

Optimal Planning for Transportation of Petroleum Products via Pipe-line According to the Demand Time Window for Minimizing Costs

Farhad Faraje¹

Mehrdad Alimoradi²

Babak Farhang Moghaddam³

Mahdi Fadaee⁴

| m.alimoradi@imps.ac.ir

| farhang@imps.ac.ir

| m.fadaee@imps.ac.ir

Received: 10/09/2022 | Accepted: 28/11/2022

Abstract The use of pipelines is the most effective and safest method of transporting large-scale petroleum products from the refinery to the storage and distribution centers. Efficient and optimal planning in multi-product pipelines is important from economic, social, and strategic points of view. In this paper, a Mixed Integer Linear Programming (MILP) model with a continuous time framework is presented to determine not only the batches' optimal injection and volume, but also their sequence and timing. The goal is to minimize the costs of pumping, storage, mixing, and delayed demands regarding all operational constraints in the problem. This paper investigates the planning of transportation of petroleum products via a one-direction multi-product pipeline with an injection source at the origin and several distribution centers along the way. The supposition of this problem regards a multi-period planning horizon with a time window for the total demands of the distribution centers, which must be provided until the end of the program horizon. The case study is a pipeline with a length of 457 km that delivers 6 petroleum products to 4 distribution centers. Two examples of the mentioned case study are presented to demonstrate the advantages of using the Mixed Integer Linear Programming model. The evaluation and validation of the plan is confirmed by comparing it with the operational plan realized in Iran Oil Pipelines and Telecommunications Company. The results imply a significant improvement in pipeline scheduling and cost reduction by applying the mathematical model.

Keywords: Multiproduct Pipelines, Optimal Scheduling, Transportation of Petroleum Products, Mixed Integer Linear Programming (MILP), Demand Time Window.

JEL Classification: C02, C41, C44, C61, C63.

1. M.A. Student of Industrial Engineering, Macroeconomic Social Systems, Institute for Management and Planning Studies, Tehran, Iran.

2. Faculty Member (Lecturer), Department of Systems Planning and Economic Sciences, Institute for Management and Planning Studies, Tehran, Iran. (Corresponding Author).

3. Associate Professor, Department of Systems Planning and Economic Sciences, Institute for Management and Planning Studies, Tehran, Iran.

4. Assistant Professor, Department of Systems Planning and Economic Sciences, Institute for Management and Planning Studies, Tehran, Iran.

برنامه‌ریزی بهینه جابه‌جایی فرآورده‌های نفتی از خط لوله با پنجره زمانی تقاضا برای کمینه‌سازی هزینه‌ها

فرهاد فرجی

کارشناس ارشد مهندسی صنایع - سیستم‌های کلان اقتصادی، موسسه عالی آموزش و پژوهش مدیریت و برنامه‌ریزی، تهران، ایران.

m.alimoradi@imps.ac.ir |

مهرداد علیمردی

عضو هیئت علمی گروه اقتصاد و سیستم‌ها، موسسه عالی آموزش و پژوهش مدیریت و برنامه‌ریزی، تهران، ایران (نویسنده مسئول).

farhang@imps.ac.ir |

بابک فرهنگ مقدم

دانشیار گروه اقتصاد و سیستم‌ها، موسسه عالی آموزش و پژوهش مدیریت و برنامه‌ریزی، تهران، ایران.

m.fadaee@imps.ac.ir |

مهدی فدایی

استادیار گروه اقتصاد و سیستم‌ها، موسسه عالی آموزش و پژوهش مدیریت و برنامه‌ریزی، تهران، ایران.

مقاله پژوهشی

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۰۷

دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۱۹

چکیده: کاربرد خطوط لوله، اثرگذارترین و ایمن‌ترین روش جابه‌جایی کلان فرآورده‌های نفتی از پالایشگاه به مراکز ذخیره‌سازی و پخش است. برنامه‌ریزی کارا و بهینه در خطوط لوله چندفرآورده‌ای از ابعاد گوناگون اقتصادی، اجتماعی و راهبردی اهمیت دارد. در این پژوهش، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد درست مختلط با چارچوب زمان پیوسته ارائه می‌شود تا نه تنها تزریق و حجم بهینه بچه‌ها، بلکه توالی و زمان‌بندی آن‌ها نیز تعیین شود. هدف، کمینه‌سازی هزینه‌های پمپاژ، انبارش، اختلاط و تقاضاهای عقب‌افتاده با رعایت همه محدودیت‌های عملیاتی در مسئله است. پژوهش حاضر برنامه‌ریزی انتقال فرآورده‌های نفتی را از خط لوله‌ای یک‌سویه چندفرآورده‌ای با یک منبع تزریق در مبدأ و چندین مرکز پخش در طول راه مطالعه می‌کند. فرض این مسئله، افق برنامه‌ریزی چنددوره‌ای با پنجره زمانی برای کل تقاضاهای مراکز پخش است که باید تا پایان افق برنامه تامین شود. مورد مطالعاتی خط لوله‌ای است با درازای ۴۵۷ کیلومتر که شش فرآورده نفتی را به چهار مرکز پخش می‌رساند. دو مورد مطالعاتی یادشده برای آشکارسازی مزیت‌های کاربرد مدل برنامه‌ریزی خطی عدد درست مختلط ارائه می‌شود. ارزیابی و اعتبارسنجی برنامه به‌دست‌آمده از مدل از مقایسه آن با برنامه عملیاتی تحقق‌یافته در شرکت خطوط لوله و مخابرات نفت ایران انجام شده است. نتایج نشان‌دهنده بهبود قابل توجه در زمان‌بندی خط لوله و کاهش هزینه‌های آن با بکارگیری مدل ریاضی است. با بکارگیری مدل مزبور می‌توان از ظرفیت‌های عملیاتی خط لوله بهتر بهره برد.

کلیدواژه‌ها: خطوط لوله چندفرآورده‌ای، زمان‌بندی بهینه، انتقال فرآورده‌های نفتی، برنامه‌ریزی خطی عدد درست مختلط، پنجره زمانی تقاضا.

طبقه‌بندی JEL: C02, C41, C44, C61, C63.

مقدمه

در زنجیره تأمین صنعت نفت، روزانه میلیون‌ها لیتر فرآورده نفتی در سراسر جهان در پایانه‌های نفتی جابه‌جا می‌شود. برنامه‌ریزی کارا و مناسب در زنجیره تأمین یادشده از ابعاد گوناگون اقتصادی، اجتماعی و راهبردی اهمیت بالایی دارد. به سبب محل قرارگیری این مراکز و بازارهای مصرف همسایه آن‌ها در سطح جغرافیایی گسترده، در بیش‌تر مواقع مدت زمان حمل و رسید فرآورده‌های نفتی به مراکز پخش، طولانی است و به دلیل ماهیت نقاله‌ای بودن انتقال از راه خطوط لوله، احتمال نقض پنجره زمانی تحویل فرآورده‌های نفتی وجود دارد. از آن جایی که عدم تحویل به‌موقع محموله به مراکز پخش در بازه زمانی مقرر، به بروز مشکلات بزرگ در اقتصاد و صنعت کشور منجر می‌شود، بکارگیری روش‌های علمی در تعیین زمان‌بندی و برنامه‌ریزی بهینه شیوه توالی ارسال محصولات نفتی از خط لوله می‌تواند در پیشگیری از بروز مشکلات و کاهش هزینه‌های عملیاتی اطمینان‌بخش باشد. تداخل از مباحث بسیار مهم در برنامه‌ریزی انتقال است و هزینه بالایی را به سبب فرایندهای مربوط به جداسازی و بازپالایش به سیستم تحمیل می‌کند.

فرآورده‌های نفتی بدون هیچ جداکننده فیزیکی به دنبال هم درون خط لوله تزریق می‌شوند. برخی محصولات به سبب تداخل و حجم بالای آلودگی در نواحی مرزی با فرآورده مجاور خود، در اصل نباید دنبال هم تزریق شوند، که این از محدودیت‌های مهم در برنامه‌ریزی انتقال فرآورده‌های نفتی است. در این پژوهش به بررسی برنامه عملیاتی انتقال شش فرآورده نفتی گوناگون از راه یکی از خطوط لوله واقعی کشور (خط لوله چندفرآورده‌ای شاهرود به مشهد) با کاربرد داده‌های واقعی خط لوله مزبور می‌پردازیم که از مستندات شرکت خطوط لوله و مخابرات نفت ایران گردآوری شده است. به کمک داده‌های یادشده و با کاربست مدل ریاضی ارائه‌شده در پی پاسخ به این پرسش هستیم که آیا می‌توان با در نظر گرفتن همه شرایط و محدودیت‌های عملیاتی واقعی، با نیروی انسانی کم‌تر و صرف زمان خیلی کوتاه‌تر، برنامه زمان‌بندی بهتری تنظیم و تدوین کرد، به گونه‌ای که ضمن تأمین به‌موقع همه تقاضاهای انبارهای نفت، به هدف اصلی رسید که همانا کاهش کل هزینه عملیات انتقال فرآورده‌های نفتی است؟

مبانی نظری پژوهش

سرآغاز مطالعات مرتبط به برنامه‌ریزی و زمان‌بندی خطوط لوله به دهه ۱۹۷۰ برمی‌گردد، دهه‌ای که با کاربرد روش‌های بسیار ابتدایی و به کمک برنامه صفحات گسترده به برنامه‌ریزی خط لوله چندفرآورده‌ای ساده به منظور کاهش هزینه تداخلات پرداخته شد. پس از رشد فناوری و توسعه

روش‌های حل مسائل بهینه‌سازی، تعداد پژوهش‌ها در این حوزه نیز افزایش یافت. مقالات منتشرشده در زمینه برنامه‌ریزی و زمان‌بندی انتقال فرآورده‌های نفتی توسط خطوط لوله چندفرآورده‌ای در سه دسته کلی خطوط لوله با ساختار خطی، درختی، و شبکه‌ای جای می‌گیرند. در هر سه گروه، مدل‌سازی‌ها بیش‌تر با روش برنامه‌ریزی خطی عدد درست مختلط^۱ (MILP) و به‌ندرت^۲ MINLP بوده و در برخی موارد نیز مدل‌سازی هیبرید یا ترکیبی بکار رفته است. روش‌های حل نیز دربرگیرنده روش‌های ریاضی یا الگوریتم‌های ابتکاری و فرا-ابتکاری بوده است که در تلفیق با برنامه‌ریزی ریاضی گاهی برای دستیابی به پاسخ‌های بهینه و در برخی موارد، پاسخ‌شدنی بکار رفته است. ضمن این‌که در مسائل بزرگ‌تر شاهد بکارگیری تکنیک‌های تجزیه هستیم. بیش‌ترین حجم مقالات، مربوط به خطوط لوله تک‌منبعی بوده و مدل‌سازی خطوط چندمنبعی به سبب پیچیدگی زیاد آن کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است.

ریجوفسکی و پینتو^۳ (۲۰۰۳)، یک برنامه بهینه‌سازی با رویکرد گسسته برای مسائلی شامل یک پالایشگاه نفت و یک خط لوله چندفرآورده‌ای که به تعدادی پایانه پخش با بازارهای محلی مصرف متصل می‌شد ارائه دادند. حجم لوله بین دو مرکز پخش مجاور هر یک به تعدادی بسته حجمی^۴ تقسیم می‌شد. تصمیم اساسی در این مدل شامل عملیات‌های بارگیری و تخلیه مخازن بود که محدودیت‌های تداخل، تعادل بار، محدودیت‌های توزیع، تقاضای محصول و محدودیت‌های اساسی عملکردی خط لوله را نیز در نظر می‌گرفت. برای بهینه‌سازی دو مدل MILP ارائه شد. در مدل یکم، اندازه پک‌های مواد یکسان فرض می‌شد، در حالی که مدل دوم شامل چنین فرضی نبود. در هر دو مدل، پارامتر زمان به صورت گسسته در نظر گرفته شد. تابع هدف شامل کمینه کردن میزان ذخیره، پمپاژ و هزینه تداخل بود. نتایج به‌دست‌آمده سطح مواد در انبارهای مختلف، نحوه توزیع محصولات را در انبارها و بهترین توالی محصولات در خط لوله نشان می‌داد. **ریجوفسکی و پینتو (۲۰۰۴)**، مدل قبلی خود را از طریق افزودن تعدادی محدودیت خاص و نیز افزودن تعدادی برش بهبود بخشیدند. این محدودیت‌ها شامل توقف یک قسمت در صورت پُر شدن کامل آن و در نظر گرفتن تداخل اولیه و انتهایی خط بودند. مدل ریاضی مسئله همانند پژوهش قبلی MILP و به صورت زمان گسسته بود و این بار نیز از تکنیک شاخه و کران برای حل مسئله استفاده شد.

1. Mixed Integer Linear Programming
2. Mixed Integer Nonlinear Programming
3. Rejowski & Pinto
4. Volume Pack

چن و همکاران^۱ (۲۰۱۷) یک مدل MILP زمان گسسته برای بهینه‌سازی زمان‌بندی دقیق خط لوله‌ای چندفرآورده‌ای ارائه دادند. خط لوله مفروض شامل یک منبع و چندین مرکز پخش است. رویکرد ارائه‌شده مبتنی بر فرموله کردن یکپارچه سیستم بدون تقسیم‌بندی قسمت‌های خط به پک‌های فرآورده است که هدف آن کمینه کردن انحراف نرخ‌های فلو پمپ‌ها در هر بخش از خط است. مدل دارای دوسری محدودیت خاص شامل محدودیت‌های توقف و دوره زمانی عملیات تزریق مواد به خط و پایداری نرخ فلو مواد و عملیات تحویل است. فرمولاسیون MILP به‌دست‌آمده به‌طور موفقیت‌آمیز روی یک خط لوله با چهار ایستگاه و دو فرآورده و یک خط لوله دیگر با شش ایستگاه و سه فرآورده اجرا شد. با مقایسه تابع هدف (از مطالعات قبلی بدون در نظر گرفتن افت انرژی حاصل از اصطکاک سیال) و تابع هدف مدل به‌دست‌آمده نشان داده شد که زمان‌بندی دقیق حاصل از در نظر گرفتن تغییرات نرخ پمپاژ^۲ می‌تواند پایداری نرخ پمپاژ را در عملیات انتقال بهبود دهد. **کافارو و سِردا^۳ (۲۰۰۴)**، برای اولین بار مدل MILP را با رویکرد پیوسته در هر دو حوزه زمان و حجم خط لوله معرفی کردند که برنامه‌ریزی عملیاتی یک خط لوله با ساختار خطی و با یک منبع و چندین مرکز توزیع به وسیله آن عملی می‌شد. خروجی مدل آن‌ها توالی بهینه تزریق دسته‌ها به خط لوله، اندازه دسته‌های محصول، نرخ پمپاژ، زمان شروع و پایان عملکرد پمپ‌ها، حجم تداخل ایجادشده و نوع محصولات تحویلی به هر مرکز را در هر بازه زمانی اجرا تعیین می‌کرد. در این مدل تغییر نرخ جریان به دلیل تغییر قطر خط لوله قابل‌مدیریت بود. این مسئله برای یک مورد عملیاتی با چهار نوع محصول متفاوت و پنج پایانه توزیع به روش شاخه و کران و با اضافه کردن محدودیت‌هایی برای تسریع عملیات محاسباتی حل شد.

مرادی و میرحسینی (۲۰۱۵)، یک سیستم انتقال فرآورده نفتی شامل یک پالایشگاه و مرکز پخش را که دارای چندین مخزن ذخیره‌سازی است و باید نیاز روزانه مصرف‌کنندگان را تامین کند، با در نظر گرفتن مدیریت یکپارچه موجودی در پالایشگاه و مرکز توزیع، زمان‌بندی کردند که در نتیجه آن روشی برای تعیین توالی دسته‌ها معرفی شد که به برنامه‌ریزی MILP برای تعیین توالی بهینه فرآورده‌ها در خط لوله و زمان‌بندی تحویل محصولات به مرکز توزیع منجر گردید. تابع هدف در مسئله به صورت مقدار وزن‌دهی‌شده چندین هدف متفاوت بود. مطالعه یادشده رویکرد جدیدی را نمایش می‌داد که در آن تعیین توالی مواد مختلف در خط لوله به‌جای دوره زمانی کامل برنامه‌ریزی

1. Chen *et al.*
2. Pump Rate
3. Cafaro & Cerdá

به صورت روزانه بیان می‌شد و همین امر سبب کاهش تعداد متغیرهای باینری و محدودیت‌ها گردید که باعث شد مدل نیاز به پیش‌پردازش نداشته باشد و زمان پردازش را کاهش دهد.

کافارو و همکاران (۲۰۱۵)، مدل MILP را برای زمان‌بندی تفصیلی یک خط لوله با ساختار خطی چندمنبعی ارائه دادند. این خط لوله شامل یک منبع، یک پایانه پخش، یک مرکز میانی دومنظوره که رسید و ارسال فرآورده در آن انجام می‌شد و یک انبار میانی در مسیر بود. رویکرد جدید مبتنی بر مدل قبلی ارائه‌شده توسط **کافارو و همکاران (۲۰۱۴)** برای زمان‌بندی تفصیلی خطوط لوله تک‌منبعی است. فرض بر این است که تزریق موازی مواد از طرف منبع‌های مختلف به خط و نیز تحویل همزمان در چندین پایانه مجاز است. بر اساس مدل‌سازی زمان پیوسته، مدل جدید بر چالش‌های برنامه‌ریزی تفصیلی عملیات در شرایط پیچیده فائق آمده و با توجه به هماهنگی دقیق تزریق فرآورده و تحویل آن، خطوط لوله بیکار متوقف شده و از جریان سیال در این خطوط ممانعت شده است. تحویل‌های جزئی اجازه می‌دهد که بتوان مواد را از خط خارج کرد، در حالی که بسته‌ها برای رسیدن به مقاصد دورتر درون خط در حال حرکت هستند. بنابراین، نرخ جریان در هر بخش خط لوله می‌تواند با توجه به محدوده مشخص‌شده فلو تنظیم شود. یک مدل واقعی توسط این مدل مورد مطالعه قرار گرفت که شامل پنج فرآورده نفتی از دو گره منبع به سه مرکز توزیع بود. برنامه تفصیلی در زمان خیلی کوتاه به‌دست آمد. در واقع، محاسبات کلی عموماً در فاز برنامه‌ریزی یکپارچه تعیین می‌شود (Cafaro et al., 2015).

مصطفایی و همکاران^۱ (۲۰۱۶)، برای برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت یک خط لوله چندمنبعی با امکان تزریق و تحویل همزمان مواد در پایانه‌های مختلف، یک مدل ریاضی بر مبنای MILP زمان پیوسته ارائه دادند. در این مدل، بخش‌های میانی همزمان به عنوان ورودی/خروجی عمل کرده و تعداد سوئیچینگ بین قسمت‌های فعال و متوقف خط را کاهش داده و در نتیجه باعث کاهش هزینه عملیاتی شده است. برخلاف رویکردهای قبلی، تصمیمات مربوط به اندازه دسته‌ها، توالی دسته‌ها و زمان‌بندی یک گام گرفته می‌شد. فرمول‌بندی ریاضی مسئله به صورت زمان - پیوسته به‌نحوی است که هر دو هدف توالی بهینه محصولات تزریقی به خط و عملیات ارسال به صورت همزمان مدیریت می‌شود. دقت و پایداری مدل توسط چهار مورد مطالعاتی مورد بررسی قرار گرفت که دو مورد از آنها به صورت واقعی و با استفاده از داده‌های صنعتی انجام شد. نتایج محاسباتی قابلیت مدل MILP تولیدشده برای حل مسائل عملیاتی خطوط لوله را در زمان منطقی پردازش نشان می‌دهد.

پژوهش **ساسیکومار و همکاران**^۱ (۱۹۹۷)، که یکی از قدیمی‌ترین مقالات موجود در این حوزه است، یک روش جستجوی ابتکاری را بکار می‌برد و در آن برنامه‌زمان‌بندی ماهانه‌ای برای پمپاژ محصولات در یک خط لوله یک‌جهته با یک منبع و چندین مقصد ارائه می‌شود. این فرایند مبتنی بر دانش، در دسترس بودن محصولات و نیازمندی مقصد را در نظر می‌گرفت، ضمن این‌که بسیاری از محدودیت‌های عملیاتی از جمله سطح مجاز مخازن، توالی تولید محصولات و محدودیت‌های تحویل را رعایت می‌کرد. فضای جستجو به صورت مجموعه‌ای در نظر گرفته شد که حرکت در آن بر اساس انتخاب دسته بعدی برای ارسال صورت می‌گرفت. تابع هدف در این پژوهش شامل مجموع وزن‌دهی شده چندین عامل از جمله هزینه برنامه‌ریزی، سطح پیش‌بینی شده در تمامی محل‌ها برای تمامی محصولات، مقدار نیاز تامین شده هر مقصد، جریمه برای هرگونه توقف در فعالیت خط و جریمه برای هرگونه انحراف از سطح مجاز مخازن بود. نتایج به‌دست‌آمده روی یک خط لوله واقعی مورد ارزیابی قرار گرفت و موثر واقع شد.

ماگاتائو و همکاران^۲ (۲۰۰۴)، یک رویکرد بهینه‌سازی مبتنی بر برنامه‌ریزی MILP به منظور برنامه‌ریزی تزریق دسته‌های مواد در یک خط معکوس‌شدنی ارائه داد. این سیستم شامل پالایشگاهی بود که توسط خط لوله به بندرگاه متصل می‌شد و هیچ انبار میانی در مسیر قرار نداشت. این مدل مبتنی بر تقسیم‌بندی زمان و حجم خط به بازه‌های یکنواخت بود و نرخ پمپاژ ثابتی برای دسته‌های مواد در هر دو جهت در نظر گرفت. همچنین، هزینه پیک روزانه برق مصرفی پمپ‌ها نیز در مدل لحاظ شد. به دلیل پیچیده بودن مدل و زمان بالای محاسبات مورد نیاز، نویسندگان مسئله اصلی را به سه مسئله کوچک‌تر تقسیم کردند و ساختار بهینه‌سازی به سه فاز تقسیم شد: (۱) مدل کمکی مربوط به کران مخازن، (۲) مدل کمکی روش مربوط به فرایند زمان محاسبه، و (۳) مدل اصلی MILP زمان گسسته.

در فاز اول یک انتخاب اولیه از میان مخازن بر مبنای تقاضا، در دسترس بودن فرآورده‌ها و محدودیت‌های مخازن انجام می‌شد. فاز دوم فرایند پیش‌پردازش را انجام می‌داد که فضای پاسخ را از طریق محدودیت‌های زمانی مربوط به عملکرد خط لوله در جهت مستقیم یا معکوس کوچک‌تر می‌کرد. در این بخش، محدودیت‌هایی که باید توسط مدل اصلی رعایت شوند مشخص می‌شود. مدل اصلی توالی پمپاژ محصولات و جزئیات نرخ فلو و زمان اولیه و پایان عملکرد پمپ‌ها را مشخص

1. Sasikumar *et al.*

2. Magatão *et al.*

می‌کند. در واقع، خروجی فازهای اول و دوم، ورودی فاز سوم به‌شمار می‌رود. خط لوله در هر بازه زمانی برنامه‌ریزی صرفاً در یک جهت کار می‌کند. مدل مفروض برای یک مسئله واقعی شامل انتقال چهار نوع از محصولات پیاده‌سازی است (Magatão *et al.*, 2004).

ماگاتائو و همکاران (۲۰۱۱)، کار قبلی خود را، که مدل‌سازی سیستم انتقال شامل بندرگاهی متصل به یک پالایشگاه بود، با ترکیب برنامه‌ریزی منطقی مقید و MILP توسعه دادند. این مدل راهبردهای تجزیه، نمایش زمان پیوسته، پنجره زمانی نشان‌دهنده محدودیت‌های زمان، و یکسری محدودیت‌ها و موارد عملیاتی مانند هزینه انرژی الکتریکی در ساعات پیک مصرف را در نظر می‌گیرد. خط لوله به پیک‌هایی با حجم ثابت تقسیم شد. با این حال، زمان به صورت پیوسته در نظر گرفته شده بود. جهت جریان اولیه خط باید تعیین شود و بیش از یک بار در طول بازه برنامه‌ریزی نمی‌توان تغییر جهت را به خط اعمال کرد. جریان از پالایشگاه به بندرگاه به عنوان Flow و از بندرگاه به پالایشگاه به عنوان Reflow تعریف شد. در این پژوهش، نخست مدل ترکیبی CPL-MILP فرمول‌بندی شد و سپس الگوریتم‌های مناسبی برای بهبود ارتباط بین بخش‌های CPL و MILP توسعه داده شد. هدف اصلی این پژوهش، تعیین نحوه عملکرد خط لوله در طی بازه زمانی برنامه‌ریزی با حداقل هزینه عملیات است. فرایند برنامه‌ریزی باید توالی پمپاژ، نرخ فلوی پمپ‌ها و نیازهای عملیات را در نظر بگیرد. هزینه عملیات به تداخل زمان، توقف خط و هزینه انرژی بستگی دارد. همانند مطالعه قبلی، بخش‌های مربوط به فاز یک و دو به صورت MILP مدل‌سازی شده بود و مسئله اصلی به صورت ترکیبی CPL-MILP. هر محدودیت به عنوان بخشی از مدل CPL و نیز به عنوان بخشی از MILP فرموله شد. سپس فرایند جستجوی یکپارچه با افزودن محدودیت‌های خطی صحیح و آزادسازی خطی مسئله به منظور کران‌های هر گره درخت جستجو شکل گرفت. این مدل برای برنامه‌ریزی عملیاتی خط لوله مورد استفاده قرار گرفت. نتایج محاسبات نشان می‌دهند که مدل جدید کارایی بهتری داشته و زمان محاسبه کاهش یافته است (Magatão *et al.*, 2011).

ژانگ و همکاران^۱ (۲۰۱۷)، سیستم انتقال نفتی شامل خط لوله تک‌منبعی با چندین ایستگاه پمپاژ را مدل کردند. مدل ریاضی به صورت MILP تعریف شد که پارامترهایی از جمله انتقال دسته‌های مواد، هزینه انرژی الکتریکی، پنجره زمانی تقاضا، ممانعت از قسمت‌های بیکار خط و تغییرات حداقل فلوی جریان را در نظر می‌گرفت و ملاحظات مربوط به هیدرولیک خط را وارد مدل می‌کرد. مدل ساخته‌شده به شرایط عملیاتی نزدیک بود، و بسیار پیچیده. این مدل به دو بخش

تقسیم شد و از طریق رویکرد محاسباتی ترکیبی شامل الگوریتم کلونی مورچگان^۱ (ACO) و روش سیمپلکس^۲ (SM) حل شد. نهایتاً فرمول حاصل شده به یک مورد مجازی و یک مسئله واقعی اعمال شد و پایداری، همگرایی و عملی بودن آن مورد تایید قرار گرفت. در این پژوهش، پارامترهای فیزیکی سیال از جمله چگالی و ویسکوزیته آن‌ها برای دقیق‌تر شدن هزینه مربوط به انرژی مصرفی پمپ در نظر گرفته شد. به‌طور کلی، هدف این مسئله کاهش هزینه انرژی مصرفی، انحراف بین تقاضا و برنامه تحویل و تداخل‌ها بود، در حالی که بسیاری از محدودیت‌های عملیاتی و تکنیکی نیز در نظر گرفته شدند. این روش، به یک ساختار خط لوله چندفرآورده‌ای شامل چهار پایانه پخش و نیز یک مسئله واقعی با پنج پایانه پخش اعمال شد. زمان حل مدل نسبت به مدل‌هایی با ساختار مشابه کاهش داشته است. با تنظیم درست مقادیر برای الگوریتم ACO، مدل مفروض پایداری و همگرایی مناسبی را در حل مسائل زمان‌بندی بزرگ نشان می‌دهد (Zhang et al., 2017).

میرحسینی و قربانعلی‌زاده (۲۰۰۸)، یک سیستم انتقال مواد نفتی با ساختار درختی شامل یک پالایشگاه نفت، یک خط لوله چندفرآورده‌ای با انشعابات مختلف و چندین مرکز توزیع را با در نظر گرفتن بازارهای محلی مصرف مدلسازی کردند. مدل ارائه شده به صورت برنامه‌ریزی عدد صحیح^۳ (MIP) با اندازه بزرگ به‌شمار می‌رود. این مدل برای دو مثال مختلف پیاده‌سازی شد. **میرحسینی و جهرمی (۲۰۱۱)**، مدلی را برای زمان‌بندی کوتاه‌مدت سیستم توزیع نفت متشکل از یک پالایشگاه نفت و تعدادی پایانه توزیع در یک خط لوله با ساختار درختی ارائه دادند. این مدل با مدل قبلی ارائه شده **میرحسینی و قربانعلی‌زاده (۲۰۰۸)**، که به صورت گسسته مدلسازی شده بود مقایسه شد. مدل جدید زمان حل کم‌تری داشت و کیفیت پاسخ را نیز بهبود بخشید.

کاسترو و مصطفایی (۲۰۱۹)، یک مدل MILP زمان‌پیوسته برای برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت انتقال سیالات توسط خطوط لوله با ساختار درختی ارائه دادند. این خط شامل یک گره ورودی و چندین گره خروجی است که در انتهای هر یک از انشعابات قرار گرفته است. فرض بر این است که مواد ارسالی از پالایشگاه به صورت دسته‌ای وارد خطوط لوله می‌شود و به همین ترتیب نیز به گره‌های پایانی ارسال می‌گردد. توالی غیرمجاز مواد جلو آلودگی‌های شدید محصول را در نقاط مجاورت محصولات متفاوت می‌گیرد. زمانی که خط متوقف است و جریان ندارد، تداخل‌ها گسترش پیدا می‌کنند. بنابراین،

1. Ant Colony Optimization
2. Simplex Method
3. Mixed Integer Programming
4. Castro & Mostafaei

اپراتور تمایل دارد که درون هر قسمت خط فقط یک نوع محصول قرار گیرد. به این دلیل، در مدل محدودیتی در نظر گرفته شد که این موضوع پوشش داده شود، برخلاف مدل‌های قبلی که تأکیدی بر توالی‌های غیرمجاز در اولین تزریق مواد به خط در قسمت‌های مختلف نداشتند. چندین دسته فرآورده می‌توانند در یک شکاف زمانی وارد یک قسمت شوند یا از آن خارج گردند. مدل تولیدشده به یک خط لوله واقعی اعمال شد. برنامه بهینه به‌دست‌آمده ظرفیت خط را $6/2$ درصد افزایش داد، به‌نحوی که در بازه زمانی برنامه‌ریزی یک‌هفته‌ای، محصولات مورد تقاضا ۱۴ ساعت زودتر امکان تحویل یافتند. علاوه بر این، سه مسئله دیگر که از روی مقالات مختلف با این مدل حل شد، نتایج عملکرد بهتری را در این مدل نسبت به فرمول‌سازی‌های قبلی نشان می‌دهند، که در برخی موارد قادر به یافتن پاسخ مناسب نبودند، در حالی که در این‌جا پاسخ بهینه کلی به‌دست آمده است.

هران و همکاران^۱ (۲۰۱۰)، یک مدل MILP برای برنامه‌ریزی انتقال چندین نوع فرآورده در یک شبکه چندخطه ارائه دادند. تعادل فرآورده در نقاط میانی مهم‌ترین و مشکل‌ترین مسئله در مدل است که با رویکرد گسسته‌سازی زمان و حجم خط لوله حل شده است. تحت شرایط خاص می‌توان تعداد متغیرها و محدودیت‌ها را کاهش داد و مدل را کوچک‌تر کرد. این مدل ساده صرفاً در سناریوهایی که در آن تقاضا بالاست و در زمانی که هزینه‌های پمپ نسبت به هزینه‌های Start/ Stop پایین‌تر است، می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. در غیر این صورت، مدل کامل را باید بکار بست، زیرا تامین تقاضاهای پایانه‌ها نیازمند عملکرد دائم پمپ‌ها در کل بازه زمانی برنامه‌ریزی نیست. برای نشان دادن قابلیت کاربرد مدل، یک مسئله عددی تحت چند سناریو حل شد. داده‌های مورد استفاده به‌نحوی انتخاب شدند که خط در هر دو جهت کار کند. مدل ارائه‌شده در این مسئله با توجه به تعداد متغیرها و محدودیت‌ها زمان اجرایی بالایی نیز دارد و از نوع NP-Hard به‌شمار می‌رود.

کافارو و سردا (۲۰۱۰)، یک مدل MILP پیوسته برای برنامه‌ریزی عملیاتی یک شبکه خط لوله یک‌جهته با چندین منبع معرفی کردند که امکان تزریق همزمان دسته‌های فرآورده را از چندین پایانه ورودی فراهم می‌کرد. در این شبکه، فرض بر این است که حداکثر یک مسیر در گره مجاور در شبکه وجود دارد. این کار امکان تعیین بهینه توالی بچ‌های تزریق‌شده را در هر پایانه ورودی، اندازه دسته‌های مواد، نرخ پمپاژ مجاز، زمان شروع و پایان هر بلوک اجرایی پمپاژ و تخصیص فرآورده به پایانه‌های رسید، همزمان فراهم می‌کند. همچنین در این مدل، ایستگاه‌های دمنظوره، که می‌توانند

1. Herrán *et al.*
2. Batch

همزمان عملیات رسید و ارسال را انجام دهند، و نیز تغییر جریان پمپ‌ها به دلیل تغییر قطر خط لوله، در نظر گرفته شد. مدل مفروض شامل محدودیت‌های ساده ریاضیاتی برای برنامه‌ریزی بلوک‌های غیرفعال و تزریق همزمان مواد به خط بود که برتری آن استفاده بهتر از ظرفیت خط لوله و کاهش زمان مورد نیاز برای تحویل مواد به مراکز توزیع بود. هدف مسئله تامین تقاضا با کم‌ترین هزینه کلی با در نظر گرفتن هزینه تقاضای برگشتی است. سه مورد عملیاتی برای نشان دادن کارایی مدل مورد آزمون قرار گرفتند و نشان داده شد که در مسائل با اندازه بزرگ، اجرای موازی باعث کاهش زمان محاسبات می‌شود. ضمن این‌که هزینه محاسبات نیز علی‌رغم افزایش تعداد تزریق بسته‌ها کاهش یافته و هزینه تقاضای تحویل‌نشده نیز به علت عملیات موازی کاهش داشته است.

هران و همکاران (۲۰۱۲)، مدل قبلی ارائه‌شده خود را با رویکرد جدیدی حل کردند. از آن‌جا که مسئله MILP کامل قبلی برای شبکه گسترده خط لوله چندفرآورده‌ای بسیار بزرگ بود، در این پژوهش از روش فرا-ابتکاری استفاده شد. روش‌های بکاررفته در زمره روش‌های ابتکاری ساختار هستند که پاسخی برای فرایند جستجوی فرا-ابتکاری می‌سازند. در این پژوهش، سه روش تصادفی (Cr)، آزادسازی خطی (MILP (CI)، و آزادسازی کوآدراتیک (MILP (Cq) به عنوان روش‌های ابتکاری به منظور یافتن پاسخ اولیه برای مسئله فرا-ابتکاری بکار رفت. سپس چهار روش جستجوی فرا-ابتکاری در همسایگی پاسخ تولیدشده به شرح زیر بکار گرفته شد:

- Multi-Start Search (MSS)
- Variable-Neighborhood Search (VNS)
- Taboo Search (TS)
- Simulated Annealing (SA)

مسئله بهینه‌سازی فرا-ابتکاری به شکل مناسبی برای همگرایی به پاسخی قابل قبول و در بازه زمانی منطقی طراحی شد. نمونه‌های عددی برای نمایش کارایی این روش‌ها حل و با مدل پیشین **هران و همکاران (۲۰۱۰)** مقایسه شد و نشان داد که زمان مورد نیاز برای رسیدن به پاسخ بهینه نسبت به مدل MILP دو برابر کاهش یافته است (Herrán et al., 2012).

تعریف مسئله

مهم‌ترین موضوع در عملکرد خطوط لوله چندفرآورده‌ای، برنامه‌ریزی توالی بهینه محصولات، زمان آغاز پمپاژ فرآورده از مبدأ به درون خط لوله و مدت پمپاژ آن، و زمان‌بندی بهینه تحویل فرآورده‌ها از خطوط لوله به هر یک از مقاصد توزیع است، به‌گونه‌ای که کمینه‌سازی هزینه عملیات خطوط لوله و

حفظ فعالیت خط لوله در حداکثر ظرفیت ممکن؛ تعیین توالی و حجم بهینه بچ‌های جدید تزریق شده به خط لوله در طول مدت افق زمانی برنامه‌ریزی؛ افزایش اطلاعات در خصوص وضعیت حرکت انواع محصولات درون خط لوله؛ استفاده از مزایای هزینه متغیر انرژی مورد نیاز پمپاژ در بازه‌های زمانی متفاوت؛ و تامین تقاضاهای مصرف در هر یک از مراکز پخش بدون تاخیر زمانی صورت گیرد.

روش بکاررفته در این پژوهش در حل مسئله زمان‌بندی انتقال فرآورده‌های نفتی، کاربرد یک مدل ریاضی پیوسته MILP است. این مسئله برای خط لوله‌ای چندفرآورده‌ای با ساختار خطی تعریف شده است که یک مبدأ را به عنوان منبع تامین تقاضا به چند مرکز پخش محلی پیوند می‌دهد. خط لوله می‌تواند در بخش‌های مختلف دارای اقطار متفاوت باشد و بنابراین، نرخ جریان سیال درون آن ثابت نیست. در مدلسازی مسئله مفروضات زیر مد نظر است:

خط لوله از نوع ساختار خطی یک‌جهته است که فرآورده‌های نفتی یک مبدأ را از سر مسیر به چندین مرکز پخش در پایین‌دست انتقال می‌دهد. خط لوله همیشه پر از فرآورده‌های نفتی است و هیچ‌گاه بخشی یا کل آن نمی‌تواند خالی بماند. چون سیالات تراکم‌ناپذیر فرض می‌شود، تنها راه به جلو راندن و خارج کردن مواد از خط لوله و تحویل یک حجم مشخصی از آن‌ها به مراکز پخش پایین‌دست، تزریق همان میزان حجم مواد در مبدأ است. عملیات انتقال خط لوله به صورت Fungible و به شکل تحویل کامل صورت می‌گیرد. هر بچ درون خط لوله می‌تواند به یک یا چند مرکز پخش تخصیص داده شود. هنگامی که بچ جدید در خط لوله تزریق می‌شود، به اندازه همان حجم بچ جدید، بخشی از مواد بچ موجود درون خط لوله می‌تواند به مراکز پخش مذکور تحویل شود و باقی‌مانده آن حرکت خود را به سمت پایین‌دست جریان ادامه دهد تا به مرکز پخش دورتر دیگری برسد. بخشی از محصول درون یک بچ هنگامی می‌تواند به یک مرکز پخش تحویل شود که: الف) بچ مزبور به نقطه‌ای از مسیر برسد که محل اتصال فیزیکی مخزن مرکز پخش به خط لوله باشد؛ و ب) مخزن مربوطه در مرکز پخش ظرفیت خالی برای پذیرش آن حجم فرآورده را داشته باشد، اگر مرکز پخش فضای خالی برای تحویل فرآورده نداشته باشد، کل جریان خط لوله متوقف می‌شود. میزان حجم آلودگی و تداخلات برای هر جفت فرآورده نفتی مجاور درون خط لوله از قبل مشخص و مستقل از طول مسیر حرکت آن‌هاست. هزینه واحد^۱ مربوط به عملیات پمپاژ مقدار ثابت و معلومی است که بستگی به نوع فرآورده و مقصد دارد، ولی مستقل از نرخ پمپاژ است. مقدار تقاضای کل مراکز پخش در طول مدت افق زمانی ثابت است و بر تعداد دوره‌های زمانی از قبل معین تقسیم می‌شود تا در پایان هر دوره زمانی، آن مقدار از تقاضا بدون تاخیر به مقصد خود رسانده شود.

روش‌شناسی پژوهش (مدل ریاضی)

مجموعه‌ها

I : مجموعه بچ‌های قدیم و جدید، I^{old} : مجموعه بچ‌های قدیم درون خط لوله در ابتدای افق زمانی برنامه، I^{new} : مجموعه بچ‌های جدید که در طول افق زمانی برنامه درون خط لوله تزریق خواهد شد، P : مجموعه انواع فرآورده‌های نفتی، J : مجموعه مراکز پخش متصل به خط لوله، و T : بازه‌های زمانی افق برنامه.

پارامترها

h_{max} : حداکثر طول دوره زمان برنامه‌ریزی، dd_t : کران بالای بازه زمانی T ، vb_{min} : حداقل نرخ پمپاژ فرآورده‌های نفتی درون خط لوله، vb_{max} : حداکثر نرخ پمپاژ فرآورده‌های نفتی درون خط لوله، L_{min} : حداقل مدت زمان پمپاژ فرآورده‌های نفتی درون خط لوله، L_{max} : حداکثر مدت زمان پمپاژ فرآورده‌های نفتی درون خط لوله، $Cid_{p,j}$: هزینه واحد انبارش فرآورده نفتی p در مخازن مرکز پخش j ، $Cp_{p,j}$: هزینه واحد پمپاژ برای تحویل فرآورده نفتی p از مبدأ به مرکز پخش j ، $Cf_{p,p'}$: هزینه واحد بازپالایش حجم آلوده تداخلات میان فرآورده‌های نفتی p و p' ، $Cb_{p,j}^t$: هزینه واحد جریمه دیرکرد تحویل فرآورده p به مرکز پخش j در موعد زمانی t ، IPH_k : کران پایین دوره زمانی پیک مصرف انرژی k ، FPH_k : کران بالا دوره زمانی پیک مصرف انرژی k ، ρ_k : هزینه واحد جریمه انجام عملیات انتقال در حین ساعات دوره پیک مصرف انرژی k ، $IF_{p,p'}$: حداقل مقدار آلودگی مرزی میان فرآورده‌های نفتی p و p' پشت سر هم درون خط لوله، $qdp_{j,z}$: کل تقاضای فرآورده نفتی p که باید توسط مرکز پخش j برآورده شود، W_i^0 : اندازه حجم اولیه بچ قدیمی $i \in I^{old}$ در ابتدای افق برنامه، F_i^0 : مختصات حجمی بالادستی بچ $i \in I^{old}$ در ابتدای افق برنامه، و σ_j : مختصات حجمی یا فاصله حجمی مرکز پخش j از مبدأ خط لوله.

متغیرهای پیوسته

C_i : زمان پایان تزریق بچ i ، L_i : مدت زمان تزریق بچ i ، $DD_{i,j}^{i'}$: مقدار موادی که از بچ i به مرکز پخش j در بازه زمانی $[C_{i'} - L_{i'}, C_{i'}]$ انتقال یافته است، $DP_{p,j}^{i'}$: مقدار فرآورده p که به مرکز

پخش j در بازه زمانی $[C_{i'} - L_{i'}, C_{i'}]$ منتقل شده است، $F_{i'}^{i'}$: مختصات حجمی بالادستی بچ $i \in I$ در زمان پایان پمپاژ $C_{i'}$ ، $H_{i,k}$: چه مدت از پمپاژ بچ جدید i در حین دوره پیک مصرف انرژی k انجام شده است، $ID_{p,j}^{i'}$: سطح موجودی فرآورده نفتی p در مرکز پخش j در زمان $C_{i'}$ ، Q_i : اندازه حجم اولیه بچ جدید $i \in I^{new}$: $W_{i'}^{i'}$: اندازه حجم بچ i ام در زمان پایان پمپاژ $C_{i'}$ ، $WIF_{i,p,p'}$: مقدار آلودگی مرزی میان فرآورده‌های نفتی p و p' پشت سر هم درون خط لوله، D_{max} : حداکثر مقدار موادی که قابل انتقال از بچ i به مرکز پخش j است، $DM_{p,j}^{i'}$: مقدار عرضه فرآورده p از مرکز پخش j به بازار مصرف محلی مربوطه در دوره زمانی $[C_{i'-1}, C_{i'}]$ ، و $vm_{p,j}$: حداکثر نرخ عرضه فرآورده نفتی p به بازار مصرف محلی مرکز پخش j .

متغیرهای دودویی

$u_{i,k}$: برابر یک است هنگامی که تزریق بچ $i \in I^{new}$ زودتر از دوره پیک مصرف انرژی k آغاز نشود، $v_{i,k}$: برابر یک است هنگامی که تزریق بچ $i \in I^{new}$ پیش از پایان دوره پیک مصرف انرژی k خاتمه یابد، $x_{i,j}^{i'}$: برابر یک است هنگامی که بخشی از بچ i در حین تزریق $i' \in I^{new}$ قابل انتقال به مرکز پخش j باشد، $y_{i,p}$: برابر یک است هنگامی که بچ i محتوای فرآورده نفتی p باشد، و $w_{i,t}$: برابر یک است هنگامی که تزریق بچ i در بازه زمانی t به پایان رسیده باشد.

نخستین مجموعه اصلی، مجموعه دسته مواد یا بچه‌هاست که با I نمایش داده می‌شود. بچ‌های قدیمی موجود در خط لوله و بچ‌های جدید که قرار است تزریق شوند هر دو زیر مجموعه‌ای از این مجموعه خواهند بود: $I = I^{new} \cup I^{old}$. $i \in I$ دومین مجموعه اصلی مسئله مجموعه مراکز پخش متصل به خط لوله است و با حرف J نمایش داده می‌شود ($j \in J$). سومین مجموعه اصلی مسئله مجموعه محصولات یا انواع فرآورده‌های نفتی است و با حرف P مشخص می‌شود ($p \in P$).

فرمولاسیون مسئله فرض می‌کند در ترتیب شماره‌گذاری اعضای مجموعه I بچ‌های قدیمی موجود در خط لوله I^{old} مقدم بر بچ‌های جدید I^{new} هستند. بدین ترتیب، با در نظرگیری توالی تزریق می‌توان گفت که نخستین عضو زیرمجموعه I^{old} همان دورترین بچ قدیمی از مبدأ خط لوله است و آخرین عضو آن نزدیک‌ترین بچ قدیمی به مبدأ در لحظه صفر آغاز برنامه است. از سوی دیگر، اولین عضو زیرمجموعه I^{new} همان نخستین بچی است که قرار است در افق زمانی برنامه در خط لوله تزریق شود. در واقع، وقتی قرار است یک بچ جدید $i \in I^{new}$ در خط لوله تزریق شود باید پنج ویژگی برای آن توصیف و تعیین شده باشد: فرآورده تخصیص داده‌شده به آن (متغیر دودویی

$(V_{i,p})$ ، اندازه حجم اولیه هنگام تزریق (Q_i) ، زمان آغاز تزریق $(C_i - L_i)$ ، زمان پایان تزریق (C_i) و طول مدت زمان تزریق (L_i) . این پنج ویژگی را می‌توان جزو ویژگی‌های ایستایی بچ دانست، چون در طول زمان برنامه با تزریق دیگر بچ‌های جدید و فعالیت خط لوله تغییر نخواهند کرد. بچ ویژگی‌های دیگری نیز دارد که مقادیر آن‌ها در طول افق زمانی برنامه با تزریق دیگر بچ‌های جدید به خط لوله تغییر می‌کند و جزو ویژگی‌های دینامیکی بچ شناخته می‌شود. بنابراین لحظه پایان تزریق، بچ می‌تواند نقش نقطه رخداد اصلی را برای تعیین ویژگی‌های دینامیکی بچ در مدل بازی کند.

محدودیت تخصیص فرآورده نفتی به بچ

چون هر بچ محتوای تنها یک‌گونه محصول می‌تواند باشد، برای اختصاص رابطه یک به یک بین هر بچ با یکی از انواع فرآورده‌های نفتی، لازم است از متغیر دودویی به شکل $y_{i,p}$ استفاده شود، بدین شکل که اگر بچ i ام محتوای محصول p ام باشد، مقدار این متغیر یک و در غیر این صورت صفر است.

$$\sum_{p \in P} y_{i,p} \leq 1, \forall i \in I^{new}$$

همیشه برای بچ‌های جعلی که هیچ‌گاه در خط لوله تزریق نمی‌شوند، داریم:

$$y_{i,p} = 0, \forall p \in P$$

محدودیت‌های تعیین توالی بهینه فرآورده‌های نفتی

تزریق بچ جدید $i \in I^{new}$ نباید پیش از اتمام تزریق قبلی به اضافه زمان مورد نیاز برای تعویض نوع فرآورده صورت گیرد. اگر C_i و L_i به ترتیب نشانگر زمان اتمام و طول مدت زمان تزریق بچ i ام باشد، محدودیت‌های زیر می‌توانند برای این منظور مورد استفاده قرار گیرند:

$$\begin{aligned} C_i - L_i &\geq C_{i-1} \quad \forall i \in I^{new}, p, p' \in P \\ L_i &\leq C_i \leq h_{max} \quad \forall i \in I^{new} \end{aligned}$$

پارامتر h_{max} حداکثر طول افق زمان‌بندی برنامه را نشان می‌دهد.

محدودیت های تعیین کننده حجم اولیه بچ و مدت پمپاژ آن

حجم اولیه بچ های تزریقی به خط که با Q_i نمایش داده می شود، باید در محدوده مجاز انجام شود که با توجه به حداکثر و حداقل نرخ مجاز پمپاژ در خط لوله تعیین می شود.

$$vb_{min} * L_i \leq Q_i \leq vb_{max} * L_i, \forall i \in I^{new}$$

افزون بر این، مدت تزریق بچ (L_i) نیز نباید از کمینه و بیشینه طول تعیین شده تجاوز نماید.

$$\left(\sum_{p \in P} y_{i,p} \right) * L_{min} \leq L_i \leq \left(\sum_{p \in P} y_{i,p} \right) * L_{max}, \forall i \in I^{new}$$

در اجرای برنامه ممکن است به برخی بچ ها محصول اختصاص داده نشود که مشخصه آنها $L_i = 0$ است و مقدار $y_{i,p}$ آنها برابر صفر می شود. به این بچ ها اصطلاحاً بچ های جعلی گفته می شود. به منظور دستیابی به نتایج بهتر و تسریع در جستجو به روش شاخه و کران برای دستیابی به پاسخ بهینه، بچ های جعلی که طول آنها صفر تلقی می شود باید به انتهای توالی بچ های واقعی رانده شوند:

$$\sum_{p \in P} y_{i,p} \leq \sum_{p \in P} y_{i-1,p}, \forall i \in I^{new}$$

محدودیت آلودگی محصولات مجاور و توالی غیرمجاز

فرض کنید که بچ های $i-1$ و i دو بچ پشت سر هم از دو نوع محصول متفاوت p و p' در خط لوله هستند، با این حال حجم تداخل این دو بچ همسایه هرگز کم تر از مقدار $IF_{p,p'}$ نخواهد بود. فرض هم می کنیم که این مقدار تداخل مستقل از نرخ پمپاژ است. پس:

$$WIF_{i,p,p'} \geq IF_{p,p'} (y_{i-1,p'} + y_{i,p} - 1) \forall i \in I, i > 1, p, p' \in P$$

از سویی، برخی فرآورده ها مانند بنزین و نفت گاز در صورتی که پشت سر هم به خط لوله تزریق شوند، میزان تداخل و حجم آلودگی آنها بیش از معمول خواهد بود. پس این نوع فرآورده ها نمی توانند در مجاورت هم باشند. این ممنوعیت توالی را به صورت محدودیت زیر می توان نوشت:

$$y_{i-1,p'} + y_{i,p} \leq 1 \forall i \in I^{new}$$

محدودیت پمپاژ محصولات در زمان اوج مصرف انرژی

در طول افق زمانی برنامه ریزی انتقال در خط لوله، اوقاتی وجود دارد که مصرف انرژی در آن‌ها با تعرفه بالاتری محاسبه می‌شود. به منظور کاهش هزینه پمپاژ و پرهیز از انجام عملیات در این ساعات لازم است به نحوی محدودیت تزریق در ساعات مذکور را در برنامه زمان‌بندی وارد کنیم. به این منظور، با معرفی دو متغیر دودویی که نشان‌دهنده قرارگیری زمان آغاز و پایان تزریق بچ جدید در محدوده‌های زمانی اوج مصرف انرژی هستند، موضوع را به صورت دسته محدودیت‌های زیر فرموله می‌کنیم:

$$\begin{aligned} C_i - L_i &\leq IPH_k + u_{i,k} * MT \\ C_i &\geq FPH_k(1 - v_{i,k}) \\ C_i - L_i &\geq IPH_k * u_{i,k} \\ C_i &\leq FPH_k + (1 - v_{i,k}) * MT \end{aligned}$$

$u_{i,k}$: متغیر دودویی که یک بودن آن یعنی پمپاژ بچ جدید i زودتر از کران پایین (IPH_k) دوره زمانی پیک مصرف انرژی k آغاز نشده است و $v_{i,k}$: متغیر دودویی که یک بودن آن یعنی پمپاژ بچ جدید i پیش از کران بالای (FPH_k) دوره زمانی پیک مصرف انرژی k به پایان رسیده است. برای نشان دادن این‌که چه بخشی از پمپاژ بچ جدید i در خلال دوره زمانی پیک مصرف انرژی k انجام شده است، نیاز به یک متغیر پیوسته داریم که آن را با $H_{i,k}$ معرفی می‌کنیم.

$$\begin{aligned} H_{i,k} &\geq L_i + (u_{i,k} + v_{i,k} - 2) * MT \\ H_{i,k} &\geq C_i - IPH_k - (1 - v_{i,k}) * MT - u_{i,k} * MT \\ H_{i,k} &\geq FPH_k - (C_i - L_i) - (1 - u_{i,k}) * MT - v_{i,k} * MT \\ H_{i,k} &\geq FPH_k - IPH_k - u_{i,k} * MT - v_{i,k} * MT, \forall i \in I^{new}, k \in K \end{aligned}$$

بدین ترتیب، چهار حالت مختلف برای متغیر یادشده رخ می‌دهد که عبارت‌اند از:

۱. $u=1$ و $v=1$: حالتی که زمان آغاز و پایان پمپاژ بچ جدید i در دوره زمانی پیک مصرف k قرار می‌گیرد.

۲. $u=0$ و $v=1$: حالتی که زمان پمپاژ بچ جدید i پیش از آغاز دوره زمانی پیک مصرف k آغاز می‌شود، ولی پایان آن در دوره زمانی پیک مصرف k است.

۳. $u=1$ و $v=0$: در این حالت آغاز پمپاژ بچ جدید i در دوره زمانی پیک مصرف انرژی و پایان آن پس از اتمام دوره است.

۴. $u=0$ و $v=0$: در این حالت زمان آغاز و پایان پمپاژ بچ جدید i خارج از دوره پیک مصرف انرژی است.

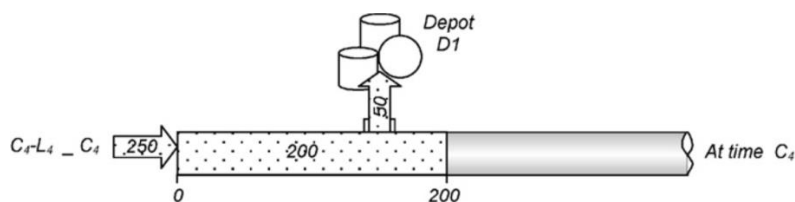
محدودیت مختصات بچ جدید

معادلات تعیین‌کننده موازنه حجم بچ تزریقی و میزان مواد موجود در خط و مواد منتقل‌شده به مراکز پخش در دو حالت تعریف می‌شوند:

۱. تحویل از بچ در حال تزریق: همان‌گونه که در **شکل (۱)** نمایش داده شد، تحویل مواد به مرکز پخش از بچ i همزمان با تزریق آن در ابتدای خط صورت می‌گیرد. در این حالت، حجم کلی تزریق‌شده بچ جدید i برابر با حجم کل تحویل‌شده به اضافه مقدار باقی‌مانده آن در خط لوله است.

$$Q_i = W_i^{i'} + \sum_{j \in J} D_{i,j}^{i'}, \forall i \in I^{new}, i' > i$$

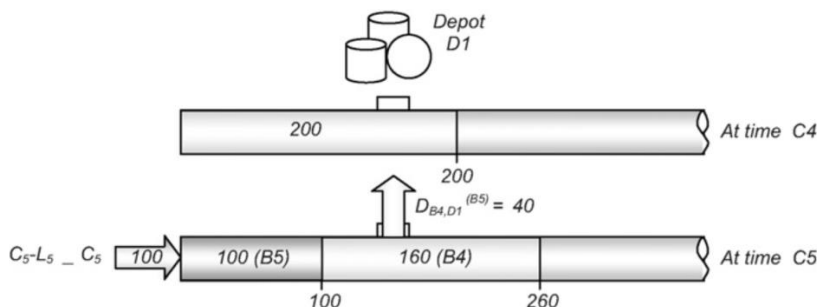
$$F_i^{i'} = W_i^{i'}$$



شکل ۱: تحویل فرآورده از بچ جدید تزریق‌شده در خط لوله

۲. تحویل از بچ قدیمی موجود در خط لوله: در این حالت، بچ جدید در ابتدای خط تزریق می‌شود و معادل آن از مواد قبلی موجود در خط لوله به مرکز/ مراکز پخش تحویل صورت می‌گیرد (**شکل ۲**). موازنه احجام در این حالت به این صورت است که حجم موجود از بچ i در انتهای تزریق بچ i' برابر تفاضل حجم این بچ در زمان اتمام تزریق بچ $(i' - 1)$ و مجموع تحویل‌های انجام‌شده از بچ i به مراکز پخش است.

$$W_i^{i'} = W_i^{i'-1} - \sum_{j \in J} D_{i,j}^{i'}, \forall i \in I, \forall i' \in I^{new}, i' > i$$



شکل ۲: تحویل فرآورده از بچ قدیمی موجود در خط لوله

محدودیت امکان تحویل مواد از بچ‌های درون خط لوله به مراکز پخش

در این بخش با تعریف یک متغیر تصمیم دودویی با نام $x_{i,j}^{i'}$ امکان انتقال مواد از بچ i به مرکز j تعیین می‌شود. زمانی مقدار این متغیر یک می‌شود که امکان انتقال مواد از بچ مذکور فراهم باشد. D_{max} کران بالای مقدار موادی است که قابل انتقال از بچ i به مرکز پخش j است.

$$D_{i,j}^{i'} \leq D_{max} * x_{i,j}^{i'}, \forall i \in I, \forall i' \in I^{new}, i' \geq i, \forall j \in J$$

$$F_i^{i'} - \sum_{p \in P} \sum_{p' \in P, p' \neq p} WIF_{i,p,p'} \geq \sigma_j * x_{i,j}^{i'}, \forall i \in I, \forall i' \in I^{new}, i' \geq i, \forall j < |J|$$

$$F_i^{i'} \geq \sigma_j * x_{i,j}^{i'}, \forall i \in I, \forall i' \in I^{new}, i' \geq i, \forall j = |J|$$

کران بالای حجم قابل انتقال به هر مرکز پخش با روابط زیر تعیین می‌شود. رابطه دوم زیر نشان می‌دهد که حجم آلوده مواد در اثر تداخل قابل انتقال به مرکز پخش نیست و همین حجم محدودیتی برای کران بالای انتقال مواد ایجاد خواهد کرد.

$$D_{i,j}^{i'} \leq \sigma_j - F_{i+1}^{i'-1} - \left(\sum_{k=1}^{j-1} D_{i,k}^{i'} \right) + (1 - x_{i,j}^{i'}) * M, \forall i \in I, \forall i' \in I^{new}, i' > i, \forall j \in J$$

$$\sum_{j \in J} D_{i,j}^{i'} \leq W_i^{i'-1} - \sum_{p \in P} \sum_{p' \in P, p' \neq p} WIF_{i,p,p'}, \forall i \in I, \forall i' \in I^{new}, i' > i$$

محدودیت موازنه حجمی کل خط لوله

چون چگالی سیال درون خط، ثابت فرض می‌شود و تراکم پذیر نیست، به‌ازای کل حجم تزریق شده

بج $i' \in I^{new}$ به خط لوله آن مقدار موادی که از بچ‌های درون خط لوله می‌تواند به مراکز پخش $j \in J$ تحویل شود برابر (Q_i) است

$$\sum_{i \in I, i \leq i'} \sum_{j \in J} D_{i,j}^{i'} = Q_{i'}, \forall i' \in I^{new}$$

دسته محدودیت‌های کنترل موجودی مخازن مراکز پخش

محدودیت‌های مقدار مواد دریافتی مرکز پخش

اگر بچ i حاوی محصول p باشد، مقدار $y_{i,p} = 1$ خواهد بود و در نتیجه می‌توان میزان مواد انتقال‌یافته از بچ مذکور به مرکز پخش j در حین مدت زمان تزریق این بچ به خط لوله را به کمک متغیر $DV_{i,p,j}^{i'}$ تعیین کرد. در غیر این صورت، هرگاه $y_{i,p} = 0$ باشد مقدار $DV_{i,p,j}^{i'}$ برابر صفر خواهد بود. بنابراین، می‌توان دو رابطه زیر را در ارتباط با بچ‌های جدید تزریقی به خط لوله مطرح کرد:

$$DV_{i,p,j}^{i'} \leq D_{max} * y_{i,p}, \forall i \in I^{new}, p \in P, j \in J, i' \in I^{new}$$

$$\sum_{p \in P} DV_{i,p,j}^{i'} = D_{i,j}^{i'}, \forall i \in I^{new}, j \in J, i' \in I^{new}$$

محدودیت‌های سطح موجودی و دامنه مجاز موجودی مخازن مراکز پخش

علاوه بر این، میزان موجودی هر یک از مخازن مراکز پخش در هر لحظه برابر با موجودی اولیه به‌علاوه مقادیر ورودی منهای مقادیر خروجی آن است. پس می‌توان گفت که برای موجودی و دامنه مجاز هر مخزن روابط زیر صادق است:

$$ID_{p,j}^{i'} = ID_{p,j}^{i'-1} + \sum_{i \in I, i \leq i'} DV_{i,p,j}^{i'} - Dm_{p,j}^{i'}, \forall p \in P, j \in J, i' \in I^{new}$$

$$IDmin_{p,j} \leq ID_{p,j}^{i'} \leq IDmax_{p,j}, \forall p \in P, j \in J, i' \in I^{new}$$

محدودیت‌های مربوط به مقدار عرضه فرآورده از سوی مراکز پخش و تامین تقاضای بازار مصرف

مقدار فرآورده $p \in P$ که از مرکز پخش $j \in J_p$ در طول دوره زمانی $(C_i - C_{i-1})$ به بازار مصرف محلی مربوطه تحویل می‌شود با متغیر $Dm_{p,j}^{i'}$ نشان داده می‌شود. این مقدار باید با نرخ عرضه v_m از طریق مرکز پخش به بازار تحویل شود. از طرفی، باید مجموع محصول تحویلی از بچ‌های مختلف به بازار در یک مرکز پخش برابر با کل تقاضای اعلام‌شده آن مرکز برای محصول مورد نظر (qd) باشد.

$$Dm_{p,j}^i \leq (C_i - C_{i-1}) * v_{m_{p,j}}, \forall p \in P, \forall j \in J_p, \forall i \in I^{new}$$

$$\sum_{i \in I^{new}} Dm_{p,j}^i = qd_{p,j}, \forall p \in P, \forall j \in J_p$$

دسته محدودیت‌های شرایط اولیه مسئله

می‌بایست در نقطه $t=0$ از افق زمانی مورد نظر شرایط موجودی درون خط مشخص باشد. بدین منظور، می‌توان محدودیت مربوط به اندازه حجم هر یک از بچ‌های قدیمی را به شکل زیر تنظیم کرد:

$$W_i^{i'-1} = W_i^0, \forall i \in I^{old}, i' = first(I^{new})$$

از سوی دیگر، مختصات و توالی بچ‌های قدیمی درون خط لوله نیز با محدودیت زیر مشخص می‌شود:

$$F_i^{i'-1} = F_i^0, \forall i \in I^{old}, i' = first(I^{new})$$

دسته محدودیت‌های پنجره زمانی تقاضا

الزام به تامین تقاضاهای کلیه مراکز پخش در پایان افق برنامه یکی از فروض اصلی و مهم مسئله است. حال علاوه بر فرض مزبور، فرض دیگری اضافه می‌کنیم بدین صورت که افق برنامه به چند بازه زمانی (با طول برابر یا نابرابر) تقسیم شود و در انتهای هر بازه زمانی مقرر می‌شود که مقدار معینی از تقاضای کل به مراکز پخش تحویل شود. به منظور تقسیم افق زمانی برنامه به چند دوره زمانی لازم است از مجموعه جدید T که معرف دوره‌های زمانی مختلف است استفاده شود $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$. از طرفی، $T = h_{max}$ و هر دوره t یک ساعت آغاز و یک ساعت پایان دارد و چون در مدل نیاز است ساعت پایان دوره‌های t از قبل مشخص باشد از پارامتر dd_t به منظور تعیین کران بالای دوره زمانی t برحسب واحد زمانی ساعت استفاده می‌شود. به منظور عملیات تحویل و محاسبه مقادیر تقاضاهای با تاخیر مواجه‌شده، ضروری به نظر می‌رسد یک متغیر دودویی مانند $w_{i,t}$ تعریف شود. این متغیر مقدار یک به خود می‌گیرد اگر و فقط اگر عملیات تزریق بچ i در دوره t به اتمام برسد. آنچه اهمیت دارد زمان پایان تزریق بچ نام است و زمان آغاز آن ممکن است در هر دوره t' پیش از t باشد.

$(t' < t)$ مقدار متغیر $w_{i,t}$ به وسیله دسته محدودیت‌های زیر مشخص می‌شود:

$$\sum_{t \in T} \omega_{i,t} = \sum_{p \in P} y_{i,p}, \forall i \in I^{new}$$

$$C_i \geq dd_{t-1} * \omega_{i,t}$$

$$C_i \leq dd_t + (1 - \omega_{i,t})(h_{max} - dd_t), \forall i \in I^{new}, t \in T$$

برای یک بچ جعلی $i \in I^{new}$ داریم: $\sum_t \omega_{i,t} = 0$ از سویی، اگر پمپاژ بچ $i \in I^{new}$ در دوره t به پایان برسد پس: $dd_{t-1} \leq C_i \leq dd_t$. توجه کنید که زمان آغاز پمپاژ بچ $i \in I^{new}$ می‌تواند در هر دوره t' به‌طوری که $t' < t$ آغاز شود، چرا که دربارهٔ زمان آغاز آن شرطی وجود ندارد، اما در دوره t پایان می‌یابد. چون ممکن است همه تقاضاها در موعد مقرر به مقصد نرسند، ضروری است این مقدار تقاضاهای عقب‌افتاده کنترل شود و در صورت اتفاق جریمه‌ای برای مدل در نظر گرفته شود. پس برای نشان دادن بخشی از تقاضاها که در پایان یک موعد زمانی t_n تامین نشده‌اند، نیاز به تعریف یک متغیر پیوسته است. به کمک این متغیر و تعریف محدودیت‌های لازم، آن مقدار از تقاضا که در پایان دوره مذکور تامین نشده باشد تحت عنوان «تقاضای عقب‌افتاده»^۱ به دوره بعدی انتقال خواهد یافت. متغیر $B_{p,j,t}$ مقدار تقاضای عقب‌افتاده محصول p در مرکز j را در انتهای موعد تحویل t ام نشان می‌دهد.

$$\sum_{l=1, l \in I^{new}}^i DM_{p,j}^l \geq \left(\sum_{k=1}^t dem_{p,j,k} \right) (\omega_{i,t} - \omega_{i+1,t}) - B_{p,j,t}, \forall p \in P, j \in J_p, t \in T, i \in I^{new}$$

پارامتر $dem_{p,j,t}$ آن بخش از تقاضای کل فرآورده p در مرکز j را که بایستی پیش از اتمام موعد زمانی dd_t تامین شود نشان می‌دهد. برای تضمین این‌که محدودیت فوق به‌درستی عمل نماید الزامی است که دست‌کم یک عملیات تزریق بچ در هر دوره زمانی t به پایان برسد. بنابراین، این التزام را با محدودیت زیر به مدل تفهیم می‌کنیم:

$$\sum_{i \in I^{new}} \omega_{i,t} \geq 1, \forall t \in T$$

با لحاظ تقاضاهای عقب‌افتاده در مدل لازم است در تابع هدف نیز متناسب با مفهوم آن عبارتی اضافه شود تا با حضور آن، مدل در پی کمینه کردن تقاضاهای عقب‌افتاده باشد. به این منظور پارامتر $Cb_{p,j,t}$ به عنوان جریمه در مدل ریاضی مسئله تعریف می‌شود. این پارامتر به شکل هزینه واحد جریمه دیرکرد در تامین تقاضا و با توجه به درجه اهمیت نوع فرآورده p و مرکز پخش j و موعد تحویل t متفاوت است و همانند داده‌های اولیه در ابتدای مسئله تعیین می‌شود.

تابع هدف مدل

هدف مسئله، کمینه‌سازی کل هزینه عملیاتی خط لوله است که شامل هزینه انتقال، هزینه بازپالایش مواد آلوده، و هزینه نگهداشت محصولات در مخازن مراکز پخش است. هزینه نگهداشت محصولات مبتنی بر مقدار میانگین هر یک از محصولات در مخازن در بازه زمانی برنامه‌ریزی انتقال است. رابطه زیر نمایانگر تابع هدف در نظر گرفته شده در این مدل‌سازی است. ترم یکم این معادله مربوط به هزینه پمپاژ، ترم دوم مربوط به جریمه اعمالی ناشی از کار در ساعات پیک مصرف انرژی، ترم سوم مربوط به هزینه تداخل و بازپالایش، ترم چهارم مربوط به هزینه نگهداشت فرآورده‌ها در مخازن مراکز پخش، و ترم آخر مربوط به هزینه تقاضاهای به‌تأخیر افتاده است.

$$\begin{aligned} \min z = & \sum_{p \in P} \sum_{j \in J} \left(cp_{p,j} \sum_{i \in I} \sum_{i' \in I^{new}} DV_{p,i,j}^{i'} \right) + \sum_{k \in K} \sum_{i \in I^{new}} \rho_k H_{i,k} + \sum_{p' \in P, p' \neq p} \sum_{i \in I, i' > 1} cf_{p,p'} \times WIF_{i,p,p'} \\ & + \frac{1}{card(I^{new})} \sum_{p \in P} \left[\sum_{j \in J_p} cid_{p,j} \left(\sum_{i' \in I^{new}} ID_{p,j}^{i'} \right) \right] + \sum_{p \in P} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} Cb_{p,j,t} \times B_{p,j,t} \end{aligned}$$

تجزیه و تحلیل یافته‌ها (آزمایش مدل با داده‌های واقعی و نتایج محاسبات)

اطلاعات واقعی خط لوله مورد بررسی

با توجه به فروض در نظر گرفته شده در فرایند مدل‌سازی ریاضی، خط لوله یک‌سویه چند فرآورده‌ای شاهرود به مشهد با قطر ۲۰ اینچ از مجموعه خطوط لوله چند فرآورده‌ای کشور برگزیده شد. این سنجش در قالب دو مسئله با شرایط متفاوت از هم و با داده‌های واقعی مرتبط با شرایط عملیاتی خط لوله یادشده انجام شد. طول خط لوله ۲۰ اینچ گفته شده ۴۵۷ کیلومتر است و از شهر شاهرود آغاز می‌شود و در مسیر خود از مراکز پخش^۱ سبزوآر (D_1)، نیشابور (D_2)، امام تقی (D_3) می‌گذرد و در آخر به مرکز پخش و تأسیسات مشهد (D_4) می‌رسد. فاصله هر یک از این چهار مرکز پخش از مبدأ خط لوله (شاهرود) برحسب واحد حجمی متر مکعب به ترتیب برابر ۴۷۱۰۰، ۶۶۶۰۰، ۷۸۹۰۰ و ۸۸۰۰۰ است. از خط لوله یادشده شش فرآورده نفتی بنزین (Ms)، بنزین یورو (Mu)، نفت سفید (Kr)، نفت گاز (Go)، نفت گاز یورو (Gu)، به همراه نفت جت (JF) حمل و به ترتیب با P_I تا P_6 نمادگذاری می‌شوند.

مرکز انتقال^۱ شاهرود فرآورده‌های نفتی را با دبی متغیر ۶۰۰ تا ۸۰۰ متر مکعب در ساعت، درون خط لوله پمپاژ می‌کند و بر اساس این نرخ تزریق و طول مسیر می‌توان نتیجه گرفت که برای رسیدن مواد به آخرین مرکز پخش (مشهد) حداقل زمان مورد نیاز ۱۱۰ ساعت (۴/۶ روز) است.

بر اساس الگوی مصرف و سیاست‌های اعمال شده در توزیع انواع فرآورده‌ها می‌توان گفت که نه تنها مقدار، بلکه نوع تقاضاهای مصرف چهار مرکز پخش در طول مسیر متفاوت از هم هستند، به طوری که مراکز پخش سبزوار و نیشابور فقط متقاضی سه فرآورده بنزین، نفت سفید، و نفت گاز یورو از شش فرآورده نفتی هستند و مرکز پخش امام تقی متقاضی چهار نوع فرآورده بنزین، نفت سفید، نفت گاز معمولی، و نفت گاز یورو است و تقاضای مرکز پخش مشهد به عنوان آخرین مرکز پخش شامل همه انواع فرآورده‌های نفتی به استثنای نفت گاز معمولی است.

یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های عملیاتی، توالی مجاز تزریق شش فرآورده نفتی است که در خط لوله شاهرود به مشهد مطابق با **جدول (۱)** تعریف می‌شود. چنان که پیش‌تر نوشته شد، بر اثر افزایش تعرفه مصرف انرژی الکتریکی در برخی ساعات، هزینه پمپاژ افزایش می‌یابد. به همین دلیل، در این ساعات نباید خط لوله فعال باشد. اگرچه گاهی به سبب اهمیت تامین به موقع تقاضاها ناگزیر به ادامه فعالیت خط لوله در ساعات مزبور خواهیم شد. در سه مثال پیش‌ارو در مدت ۲۴۰ ساعت افق زمانی برنامه‌ریزی دو دوره اوج مصرف انرژی الکتریکی هر یک به مدت پنج ساعت مشخص شده است که بین ساعات ۵۰ تا ۵۵ و ۲۳۵ تا ۲۴۰ است. در صورت انجام عملیات انتقال فرآورده‌های نفتی در این ساعات، هزینه انتقال بیش‌تری بر سیستم تحمیل خواهد شد. این موضوع به شکل جریمه در تابع هدف لحاظ شده و تعرفه آن معادل ۱۰ واحد پولی به‌ازای هر ساعت فعالیت خط لوله است.

هزینه انبارش یک متر مکعب فرآورده نفتی به مدت یک ساعت در مخزن مربوطه را هزینه واحد انبارش تعریف می‌کنیم. هزینه واحد انبارش برای همه انواع فرآورده‌ها در مخازن مراکز پخش $Cid(p, j)$ با هم برابر و مساوی ۰/۱ واحد پولی فرض می‌شود. اطلاعات مربوط به میزان کمینه و بیشینه ظرفیت مجاز عملیاتی مخازن هر یک از فرآورده‌های نفتی به تفکیک مراکز در **جدول (۲)** آمده است. هزینه واحد پمپاژ $Cp(p, j)$ برای تحویل هر نوع فرآورده نفتی به هر یک از مراکز انتقال به شرح **جدول (۳)** است. هزینه واحد پمپاژ، تابعی از نوع فرآورده و فاصله مرکز پخش تا مبدأ خط لوله است. یکی دیگر از پارامترهای مهم مدل، نرخ عرضه فرآورده‌های نفتی در بازارهای مصرف مجاور مراکز پخش $Vm(p, j)$ است که برحسب متر مکعب بر ساعت در **جدول (۴)** آمده است. میزان حجم آلودگی در مرز

بین دو بچ مجاور درون خط لوله که با پارامتر $IFF(p, p')$ نشان داده می‌شود، از دیگر داده‌های ثابت و مشترک بین دو مسئله مطرح شده است. این حجم آلودگی برای همه انواع فرآورده‌ها معادل ۳۰ متر مکعب در نظر گرفته شده است. همچنین، در مبحث جرایم تاخیرات در تحویل تقاضاها، میزان جریمه دیرکرد در تامین تقاضاهای عقب‌افتاده $Cb(j, p, t)$ برای همه انواع فرآورده‌های نفتی و برای همه مراکز پخش در همه پنجره‌های زمانی برنامه به‌ازای هر متر مکعب برابر ۱۵ واحد پولی در نظر گرفته شده است.

جدول ۱: توالی مجاز تزریق فرآورده‌های نفتی درون خط لوله

فرآورده نفتی	بنزین	نفت سفید	نفت گاز	نفت گاز یورو	بنزین یورو	نفت جت
بنزین	مجاز	مجاز	غیرمجاز	غیرمجاز	مجاز	غیرمجاز
نفت سفید						
نفت گاز	غیرمجاز		مجاز	مجاز	غیرمجاز	
نفت گاز یورو						
بنزین یورو	مجاز	غیرمجاز	غیرمجاز	غیرمجاز	مجاز	
نفت جت	غیرمجاز	مجاز			غیرمجاز	مجاز

جدول ۲: کمینه و بیشینه ظرفیت مجاز عملیاتی مخازن مراکز (برحسب متر مکعب)

فرآورده نفتی	موجودی	منبع شاهرود	مرکز پخش سبزوار	مرکز پخش نیشابور	مرکز پخش امام تقی	مرکز پخش مشهد
بنزین	بیشینه کمینه	۲۰۰۰۰ ۵۰۰۰	۳۸۰۰۰ ۳۰۰۰	۶۸۰۰ ۵۰۰	۱۹۰۰۰ ۳۰۰۰	۶۷۵۰۰ ۵۰۰۰
نفت سفید	بیشینه کمینه	۲۰۰۰۰ ۵۰۰۰	۱۹۰۰۰ ۲۰۰۰	۵۰۰۰ ۵۰۰	۲۷۰۰۰ ۱۰۰۰	۷۴۰۰۰ ۴۰۰۰
نفت گاز	بیشینه کمینه	۲۰۰۰۰ ۵۰۰۰	۰ ۰	۰ ۰	۱۹۰۰۰ ۲۰۰۰	۰ ۰
نفت گاز یورو	بیشینه کمینه	۲۰۰۰۰ ۵۰۰۰	۳۲۰۰۰ ۲۰۰۰	۱۵۰۰۰ ۱۰۰۰	۸۵۰۰ ۵۰۰	۷۴۰۰۰ ۴۰۰۰
بنزین یورو	بیشینه کمینه	۲۰۰۰۰ ۵۰۰۰	۰ ۰	۰ ۰	۰ ۰	۳۴۰۰۰ ۳۰۰۰
نفت جت	بیشینه کمینه	۲۰۰۰۰ ۵۰۰۰	۰ ۰	۰ ۰	۰ ۰	۲۱۵۰۰ ۲۰۰۰

جدول ۳: هزینه پمپاژ فرآورده‌های نفتی درون خط لوله (واحد پول بر متر مکعب)

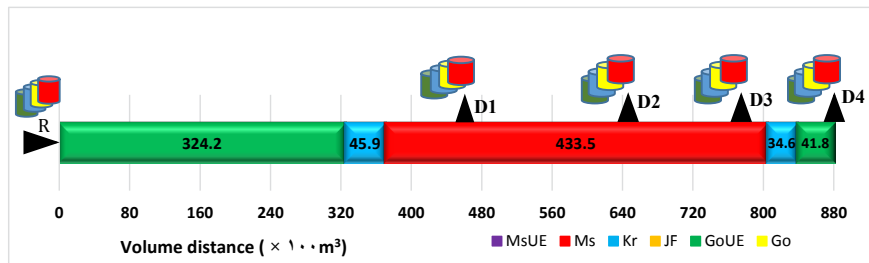
فرآورده نفتی	مرکز بخش سبزواری	مرکز بخش نیشابور	مرکز بخش امام تقی	مرکز بخش مشهد
بنزین	۳/۵	۴/۵	۵/۵	۶/۵
نفت سفید	۳/۷	۴/۷	۵/۷	۶/۷
نفت گاز	۴/۸	۵/۸	۶/۸	۷/۸
نفت گاز یورو	۴/۸	۵/۸	۶/۸	۷/۸
بنزین یورو	۳/۵	۴/۵	۵/۵	۶/۵
نفت جت	۴	۵	۶	۷

جدول ۴: بیشینه نرخ عرضه فرآورده‌های نفتی به بازار مصرف (متر مکعب بر ساعت)

فرآورده نفتی	مرکز بخش سبزواری	مرکز بخش نیشابور	مرکز بخش امام تقی	مرکز بخش مشهد
بنزین	۲۰۰	۲۰۰	۳۰۰	۴۰۰
نفت سفید	۲۰۰	۲۰۰	۴۰۰	۴۰۰
نفت گاز	-	-	۴۰۰	-
نفت گاز یورو	۳۰۰	۳۰۰	۳۰۰	۴۰۰
بنزین یورو	-	-	-	۳۰۰
نفت جت	-	-	-	۳۰۰

نمونه مسئله ۱

در این نمونه حمل‌شش فرآورده نفتی مختلف از خط لوله ۲۰ اینچ چندفرآورده‌ای شاهرود به مشهد در افق زمانی ۱۰ روزه ($H_{max} = 240$ hours) برنامه‌ریزی می‌شود. بر پایه داده‌های واقعی، شکل (۳) موقعیت بچ‌های قدیمی درون خط لوله یادشده را در شرایط اولیه نشان می‌دهد. خط لوله نام‌برده حاوی پنج بچ قدیمی فرآورده‌های نفتی شامل به‌ترتیب: نفت گاز یورو (بچ یکم) با حجم ۴۱۸۰ متر مکعب، نفت سفید (بچ دوم) با حجم ۳۴۶۰ متر مکعب، بنزین (بچ سوم) با حجم ۴۳۳۵۰ متر مکعب، نفت سفید (بچ چهارم) با حجم ۴۵۹۰ متر مکعب، و نفت گاز یورو (بچ پنجم) با حجم ۳۲۴۲۰ متر مکعب است.



شکل ۳: وضعیت اولیه بچ‌های فرآورده‌های نفتی درون خط لوله مسئله ۱

موجودی اولیه مخازن مراکز شاهرود، سبزوار، نیشابور، امام تقی، و مشهد به تفکیک نوع فرآورده به شرح **جدول (۵)** است. تقاضاهای مصرف چهار مرکز پخش سبزوار، نیشابور، امام تقی، و مشهد در قالب پنجره زمانی متشکل از سه دوره زمانی $T_1 = 48$, $T_2 = 96$, $T_3 = 240$ و به تفکیک نوع فرآورده نفتی در **جدول (۶)** درج شده‌اند و عملیات انتقال باید به‌نحوی برنامه‌ریزی شود که در زمان‌های مقرر تعیین‌شده مقدار مصرف مورد نیاز هر دوره زمانی به‌موقع تامین شود. اگر تاخیری در تامین تقاضای هر یک از سه دوره زمانی T_1 و T_2 و T_3 رخ دهد، سیستم متناسب با آن بخش از تقاضاهای عقب‌افتاده مشمول جریمه می‌شود و هزینه دیرکرد تامین تقاضا بر سیستم تحمیل می‌شود.

جدول ۵: موجودی اولیه مخازن فرآورده‌های نفتی مراکز مسئله ۱ (متر مکعب)

فرآورده نفتی	مرکز پخش سبزوار	مرکز پخش نیشابور	مرکز پخش امام تقی	مرکز پخش مشهد
بنزین	۳۰۰۰	۲۰۰۰	۴۰۰۰	۲۵۰۰۰
نفت سفید	۳۰۰۰	۳۰۰۰	۳۰۰۰	۴۵۰۰
نفت گاز	-	-	۲۵۰۰	-
نفت گاز یورو	۵۰۰۰	۸۰۰۰	۶۰۰۰	۲۰۰۰۰
بنزین یورو	-	-	-	۷۲۰۰
نفت جت	-	-	-	۶۰۰۰

برای نمونه در **جدول (۶)**، مرکز پخش مشهد متقاضی ۷۳۶۰۰ متر مکعب بنزین در ۱۰ روز آینده است و باید به‌گونه‌ای برنامه‌ریزی و زمان‌بندی عملیات انتقال فرآورده بنزین انجام شود که طبق اعداد **جدول (۷)**، ۱۰۰۰۰ متر مکعب از این تقاضا تا ۴۸ ساعت نخست برنامه به مشهد برسد و ۲۵۰۰۰ متر مکعب دیگر

آن در دوره دوم، یعنی تا ساعت ۹۶ و ۳۸۶۰۰ متر مکعب باقی‌مانده تا پایان افق زمانی تحویل مشهد شود.

جدول ۶: تقاضای مصرف فرآورده‌های نفتی مراکز پخش مسئله ۱ (متر مکعب)

فرآورده نفتی	مرکز پخش سبزوار	مرکز پخش نیشابور	مرکز پخش امام تقی	مرکز پخش مشهد
بنزین	۱۱۱۸۰	۷۲۰۰	۱۸۵۰۰	۷۳۶۰۰
نفت سفید	۲۴۰۰	۲۹۰۰	۶۴۰۰	۱۱۰۰۰
نفت گاز	.	.	۲۵۰۰	.
نفت گاز یورو	۹۷۰۰	۱۴۶۰۰	۱۳۷۰۰	۳۲۸۰۰
بنزین یورو	.	.	.	۱۳۳۹۰
نفت جت	.	.	.	۱۴۶۵۰

جدول ۷: پنجره زمانی تقاضاهای مراکز پخش مسئله ۱ (متر مکعب)

مرکز پخش	مرکز پخش سبزوار	مرکز پخش نیشابور	مرکز پخش امام تقی	مرکز پخش مشهد	دوره زمانی
	دوره سوم T3=240h دوره دوم T2=96h دوره یکم T1=48h	دوره سوم T3=240h دوره دوم T2=96h دوره یکم T1=48h	دوره سوم T3=240h دوره دوم T2=96h دوره یکم T1=48h	دوره سوم T3=240h دوره دوم T2=96h دوره یکم T1=48h	
بنزین	۱۱۸۰	۴۰۰۰	۱۵۰۰	۳۲۰۰	۲۵۰۰
نفت سفید	۰	۱۴۰۰	۵۰۰	۱۴۰۰	۷۰۰۰
نفت گاز	۰	۰	۰	۰	۲۵۰۰
نفت گاز یورو	۱۷۰۰	۳۰۰۰	۵۰۰۰	۳۶۰۰	۷۰۰۰
بنزین یورو	۰	۰	۰	۰	۳۰۰۰
نفت جت	۰	۰	۰	۰	۲۰۰۰

چنان‌که پیش‌تر بیان شد، هدف اصلی مسئله کاهش هزینه‌های عملیاتی مربوط به ذخیره‌سازی و انبارش فرآورده‌های نفتی در مخازن مبدأ و مراکز پخش، هزینه پمپاژ در طول مسیر، هزینه تداخلات و بروز آلودگی‌ها در زمان‌های تعویض نوع فرآورده در حال تزریق، هزینه اجرای عملیات انتقال در ساعات اوج مصرف انرژی الکتریکی شبکه برق که تعرفه بالاتری دارند، و هزینه دیرکرد تامین تقاضاها تعریف شده است. با بررسی روشن می‌شود که مدل به دست کم ۸ بیج جدید برای برنامه‌ریزی مسئله بالا نیاز دارد و با

تعداد کم‌تر از ۸ بچ مسئله قابل برنامه‌ریزی نخواهد بود. برنامه تصویری مدل در **شکل (۴)** نمایش داده شده است. مدل برای برنامه‌ریزی مسئله (۱) به گونه‌ای تصمیم گرفته است که نخستین بچ جدید را که همان بچ ۶ است با محتوای نفت گاز و با حجم ۲۵۰۰ متر مکعب درون خط لوله تزریق کند. عملیات تزریق این بچ با نرخ ۶۰۰ متر مکعب بر ساعت از ساعت ۴/۹۵۸ آغاز و تا ساعت ۹/۱۲۵ ادامه داشته است. بچ ۷ (دومین بچ جدید) را نیز با محتوای نفت گاز یورو به حجم ۲۷۰۰ متر مکعب با نرخ ۸۰۰ متر مکعب بر ساعت به مدت ۳/۳۷۵ ساعت درون خط لوله تزریق کرده و در ادامه بچ‌های ۸ تا ۱۳ را به ترتیب از نفت سفید، نفت جت، نفت سفید، بنزین، و بنزین یورو و دوباره بنزین یورو با احجام ۷۴۳۰ و ۱۰۶۵۰ و ۱۲۲۰ و ۴۴۶۳۰ و ۴۰۱۹۰ و ۵۷۰۰۰ متر مکعب درون خط لوله تزریق کرده است. کارشناسان واحد برنامه‌ریزی انتقال مواد نفتی در شرکت خطوط لوله و مخابرات نفت ایران، مطابق با رویه جاری، مسئله (۱) را به روش دستی و با تزریق ۱۱ بچ جدید درون خط لوله برنامه‌ریزی کرده‌اند که نتایج تصمیم‌های آن‌ها به صورت گرافیکی در **شکل (۵)** آمده است. نتایج مقایسه در **جدول (۸)** آمده است. برنامه مدل با تزریق ۸ بچ جدید خط لوله را به مدت ۲۳۰/۰۴۱ ساعت از ۲۴۰ ساعت افق زمانی فعال نگاه داشته و سرجمع ۱۶۶۳۲۰ متر مکعب از انواع فرآورده نفتی درون خط لوله تزریق کرده است.

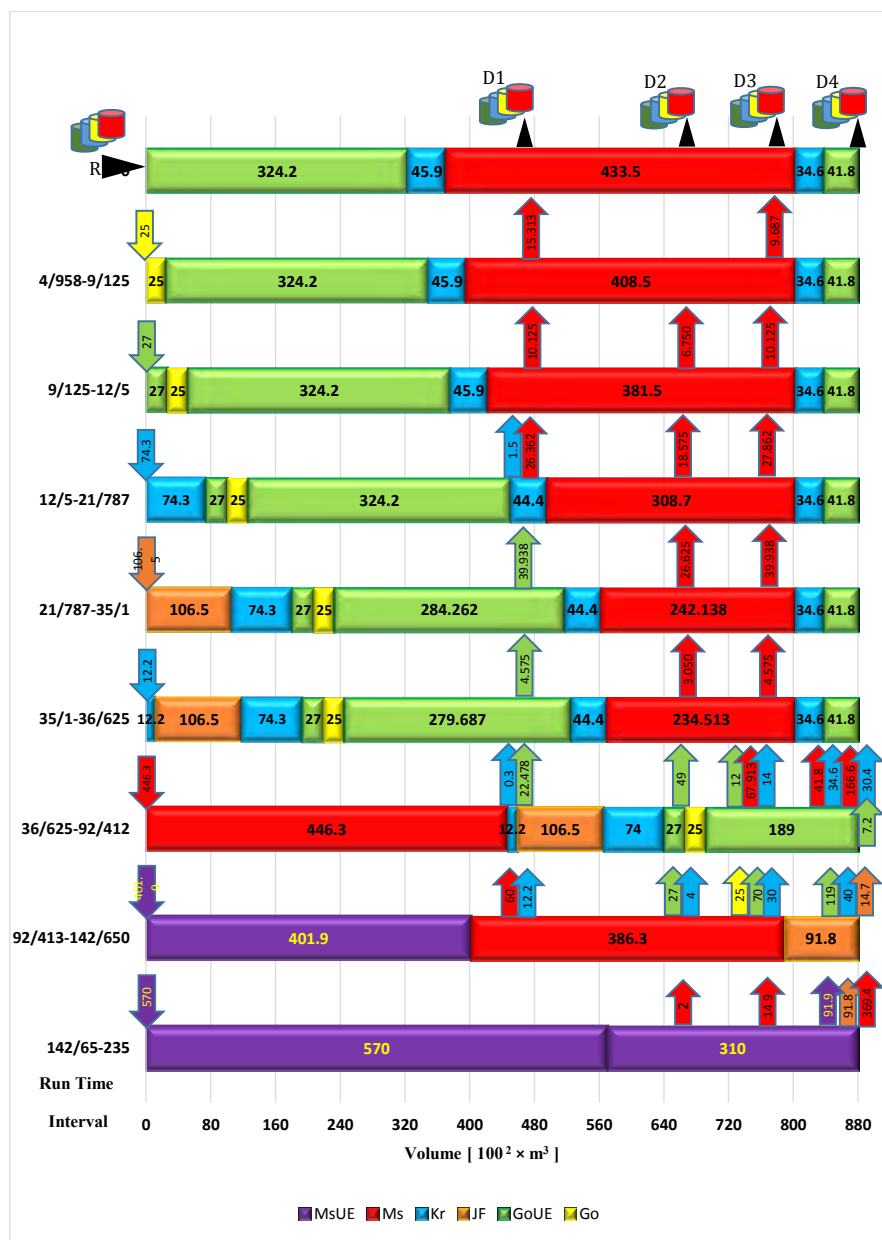
اما در برنامه‌ریزی رویه جاری برای مسئله یادشده، شاهد فعالیت خط لوله به مدت ۲۳۴/۷۳۸ ساعت هستیم که سرجمع ۱۸۷۷۵۰ متر مکعب فرآورده نفتی درون خط لوله تزریق شده است. برنامه مدل با تزریق ۸ بچ توانسته ۱۱/۴ درصد کم‌تر فرآورده در خط لوله تزریق کند و پیامد آن هزینه پمپاژ و آلودگی و انبارش مواد در مخازن مراکز پخش در مقایسه با برنامه رویه جاری به ترتیب ۷/۲، ۳۳/۳، و ۱۹/۹ درصد کاهش است. از سوی دیگر، برنامه مدل در مدیریت تامین تقاضاها بسیار بهتر عمل کرده، به طوری که میزان تقاضاهای عقب افتاده ۸۳/۷ درصد کم‌تر شده است. **جدول (۹)**، وضعیت تامین تقاضاها و میزان تاخیر پیش آمده در افق زمانی را برای هر یک از مراکز پخش نشان می‌دهد. در برنامه‌ریزی مدل تنها مرکز پخش مشهد که دورترین انبار نفت از مبدأ خط لوله است، فقط دو مورد از تقاضاهای خود را در دوره زمانی دوم با تاخیر دریافت کرده است که به ترتیب ۱۱۰۰ و ۴۸۰۰ متر مکعب از نفت گاز یورو و بنزین یورو هستند. هرچند در دوره زمانی سوم برنامه، این تاخیرها جبران شده است، اما در برنامه‌ریزی رویه جاری مسئله (۱) شاهد موارد زیادی از تاخیر در تامین تقاضاهای فرآورده‌های مختلف در هر چهار مرکز پخش هستیم. همه این آثار مثبت روی هم توانسته است هزینه کل عملیات انتقال فرآورده‌های نفتی را در برنامه مدل در مقایسه با برنامه رویه جاری به میزان ۱۲/۸ درصد بکاهد که مقدار بهبود به ازای دوره زمانی ۱۰ روزه قابل توجه است.

جدول ۸: ارزیابی و مقایسه برنامه مدل با برنامه رویه جاری برای مسئله ۱

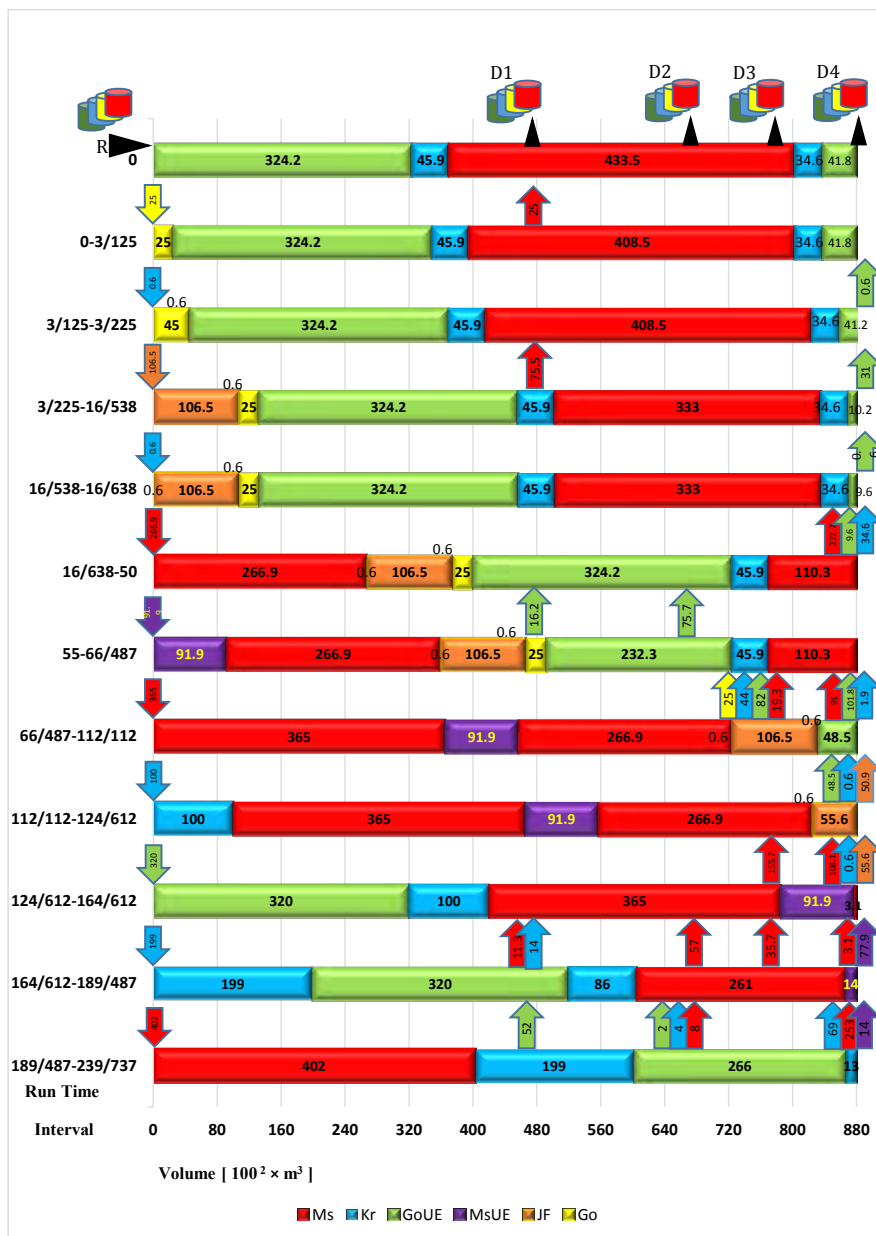
شرح آیتم	واحد	نماد	حل دستی	حل رایانه	اختلاف	درصد بهبود
تعداد بچهای تزریقی	عدد	i	۱۱	۸	۳	۲۷
کل مدت زمان فعالیت خط لوله	ساعت	$\Sigma-L$	۲۳۴/۷۳۸	۲۳۰/۰۴۱	۳/۵۵۷	۲
مجموع حجم تزریق شده در خط لوله	متر	$\Sigma-Q$	۱۸۷۷۵۰	۱۶۶۳۲۰	۲۱۴۳۰	۱۱/۴
مجموع حجم آلودگی در حین عملیات انتقال	مکعب	$\Sigma-WIF$	۴۵۰	۳۰۰	۱۵۰	۳۳/۳
هزینه پمپاژ کل عملیات انتقال		Zp	۱۱۶۳۲/۱۴	۱۰۷۹۹/۱۳۷	۸۳۳/۰۰۳	۷/۲
هزینه جراثیم مصرف انرژی در ساعات اوج مصرف		Zh	۴۷/۳۷۵	۵۰	۲/۶۲۵	-۵/۵
هزینه تداخلات و آلودگی	واحد	Zc	۱۳۵	۹۰	۴۵	۳۳/۳
هزینه نگهداشت و انبارش مواد در مخازن مراکز انتقال	پول	Zid	۵۸/۳۸۸	۴۶/۷۷۴	۱۱/۶۱۴	۱۹/۹
هزینه دیرکرد تامین تقاضاها در پنجره زمانی مصرف		Zb	۱۴۴/۵۴	۲۳/۶	۱۲۰/۹۴	۸۳/۷
کل هزینه عملیات انتقال (تابع هدف)		Z	۱۲۰۱۷/۴۴۴	۱۰۴۷۲/۸۲۴	۱۵۴۴/۶۲	۱۲/۸

جدول ۹: تقاضاهای به تاخیر افتاده در برنامه مدل برای مسئله ۱ (متر مکعب)

مرکز پخش	مرکز پخش سبزواری	مرکز پخش نیشابور	مرکز پخش امام تقی	مرکز پخش مشهد
دوره زمانی	دوره سوم T3=240h دوره دوم T2=96h دوره یکم T1=48h	دوره سوم T3=240h دوره دوم T2=96h دوره یکم T1=48h	دوره سوم T3=240h دوره دوم T2=96h دوره یکم T1=48h	دوره سوم T3=240h دوره دوم T2=96h دوره یکم T1=48h
بنزین	حل مدل	۳۲۰۰	۷۵۰۰	۸۴۰۵ ۳۳۴۵
نفت	حل مدل			
سفید	رویه جاری		۱۴۰۰	۳۰۴۰
نفت	حل مدل			
گاز	رویه جاری			
نفت گاز	حل مدل			۱۱۰۰
یورو	رویه جاری	۸۰	۱۲۰۰	۱۸۲۰ ۱۳۴۵
بنزین	حل مدل			۴۸۰۰
یورو	رویه جاری			۴۸۰۰
نفت	حل مدل			
جت	رویه جاری			

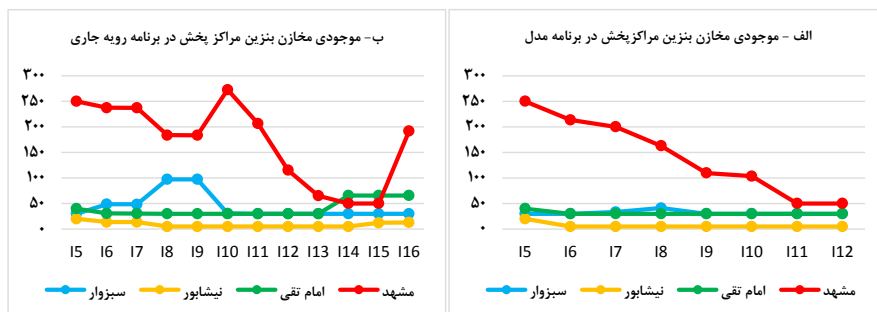


شکل ۴: برنامه‌ریزی مدل برای انتقال فرآورده‌های نفتی مسئله ۱

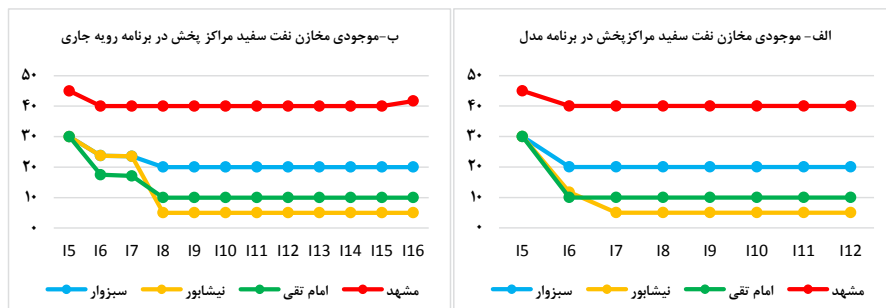


شکل ۵: برنامه‌ریزی رویه جاری برای انتقال فرآورده‌های نفتی مسئله ۱

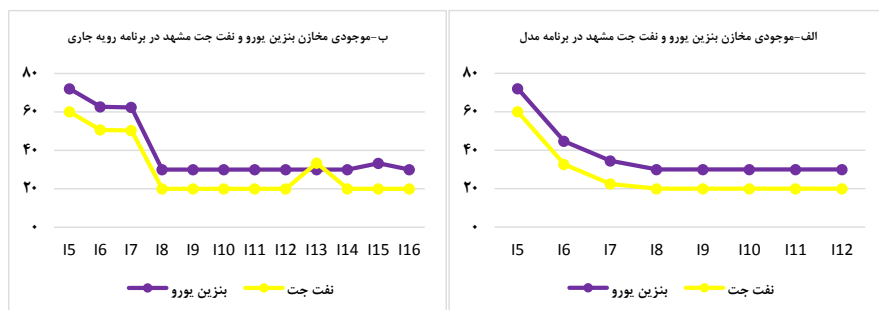
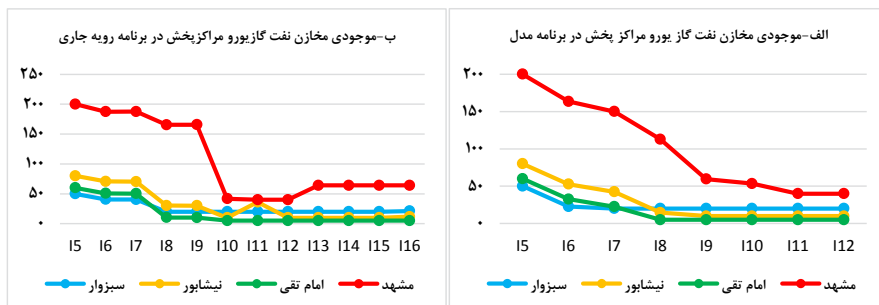
با ارزیابی داده‌های سطح موجودی مخازن فرآورده‌های نفتی در مراکز پخش و مقایسه نتایج هر دو روش برنامه‌ریزی می‌توان به عملکرد بهینه مدل ریاضی نسبت به رویه جاری پی برد. با توجه به اشکال مقایسه‌ای (۶)، (۷)، (۸)، و (۹) که تغییرات سطح موجودی مخازن فرآورده‌های نفتی را در مراکز پخش نشان می‌دهند، می‌توان نتیجه گرفت که مدل برای کاهش هزینه‌ها در برنامه‌ریزی، سطح موجودی مخازن همه فرآورده‌ها را در کمینه خود نگه داشته است و همواره در گذر زمان روند نزولی داشته‌اند. در حالی که در برنامه رویه جاری، سطح موجودی مخازن برخی فرآورده‌ها در آخر برنامه در حداقل خود نبوده، روند تغییرات نوسان داشته و روند کاهشی یکنواخت نداشته است.



شکل ۶: مقایسه روند تغییرات سطح موجودی مخازن بنزین مسئله ۱

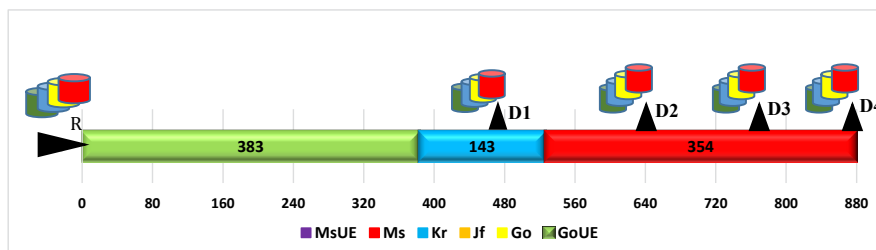


شکل ۷: مقایسه روند تغییرات سطح موجودی مخازن نفت سفید مسئله ۱



نمونه مسئله ۲

در این مسئله شرایط اولیه خط لوله شاهرود به مشهد به شرح **شکل (۱۰)** است. سه بچ قدیمی به‌ترتیب حاوی فرآورده‌های نفتی بنزین، نفت سفید، و نفت گاز با حجم‌های ۳۵۴۰۰، ۱۴۳۰۰، و ۳۸۳۰۰ متر مکعب درون خط لوله وجود دارد.



داده‌های موجودی اولیه مخازن مراکز سبزواری، نیشابور، امام تقی و مشهد به تفکیک نوع فرآورده به شرح جدول (۱۰) است. تقاضاهای مصرف هر یک از چهار مرکز پخش سبزواری، نیشابور، امام تقی و مشهد به تفکیک نوع فرآورده نفتی برای ۲۴۰ ساعت افق زمانی برنامه در قالب پنجره زمانی متشکل از چهار دوره زمانی در جدول (۱۱) درج شده‌اند. مدل برای برنامه‌ریزی مسئله بالا به حداقل ۸ بچ جدید نیاز دارد و با تعداد کم‌تر از ۸ بچ قابل برنامه‌ریزی نخواهد بود. برنامه‌ریزی مدل برای مسئله (۲) در شکل (۱۱) آمده است. کارشناسان باتجربه واحد برنامه‌ریزی انتقال مواد نفتی در شرکت خطوط لوله و مخابرات نفت ایران همین مسئله را مطابق رویه جاری و به روش دستی با تزیق ۱۱ بچ جدید درون خط لوله برنامه‌ریزی کرده‌اند. شکل (۱۲)، برنامه انتقال فرآورده‌های نفتی به‌دست آمده از رویه جاری را نمایش می‌دهد. ارزیابی و مقایسه این دو برنامه از جوانب مختلف در جدول (۱۲) آمده است.

جدول ۱۰: موجودی اولیه مخازن فرآورده‌های نفتی مراکز مسئله ۲ (متر مکعب)

فرآورده نفتی	مرکز پخش سبزواری	مرکز پخش نیشابور	مرکز پخش امام تقی	مرکز پخش مشهد
بنزین	۳۰۰۰	۲۰۰۰	۴۰۰۰	۲۵۰۰۰
نفت سفید	۳۰۰۰	۳۰۰۰	۳۰۰۰	۴۵۰۰
نفت گاز	.	.	۲۰۰۰	.
نفت گاز یورو	۵۰۰۰	۸۰۰۰	۶۰۰۰	۲۰۰۰۰
بنزین یورو	.	.	.	۷۲۰۰
نفت جت	.	.	.	۶۰۰۰

جدول ۱۱: پنجره زمانی تقاضاهای مراکز پخش مسئله ۲ (متر مکعب)

مرکز پخش	مرکز پخش سبزواری	مرکز پخش نیشابور	مرکز پخش امام تقی	مرکز پخش مشهد	دوره زمانی (ساعت)
بنزین	۱۵۰۰	۲۵۰۰	۲۵۰۰	۲۵۰۰۰	دوره چهارم T4=240 h
نفت سفید	۵۰۰	۱۰۰۰	۵۰۰	۱۰۰۰	دوره سوم T3=144 h
نفت گاز	.	.	.	.	دوره دوم T2=96 h
نفت گاز یورو	۲۵۰۰	۳۵۰۰	۲۰۰۰	۱۰۰۰	دوره یکم T1=48 h
بنزین یورو	.	.	.	.	دوره چهارم T4=240 h
نفت جت	.	.	.	.	دوره سوم T3=144 h
	.	.	.	.	دوره دوم T2=96 h
	.	.	.	.	دوره یکم T1=48 h

جدول ۱۲: ارزیابی و مقایسه برنامه مدل با برنامه رویه جاری برای مسئله ۲

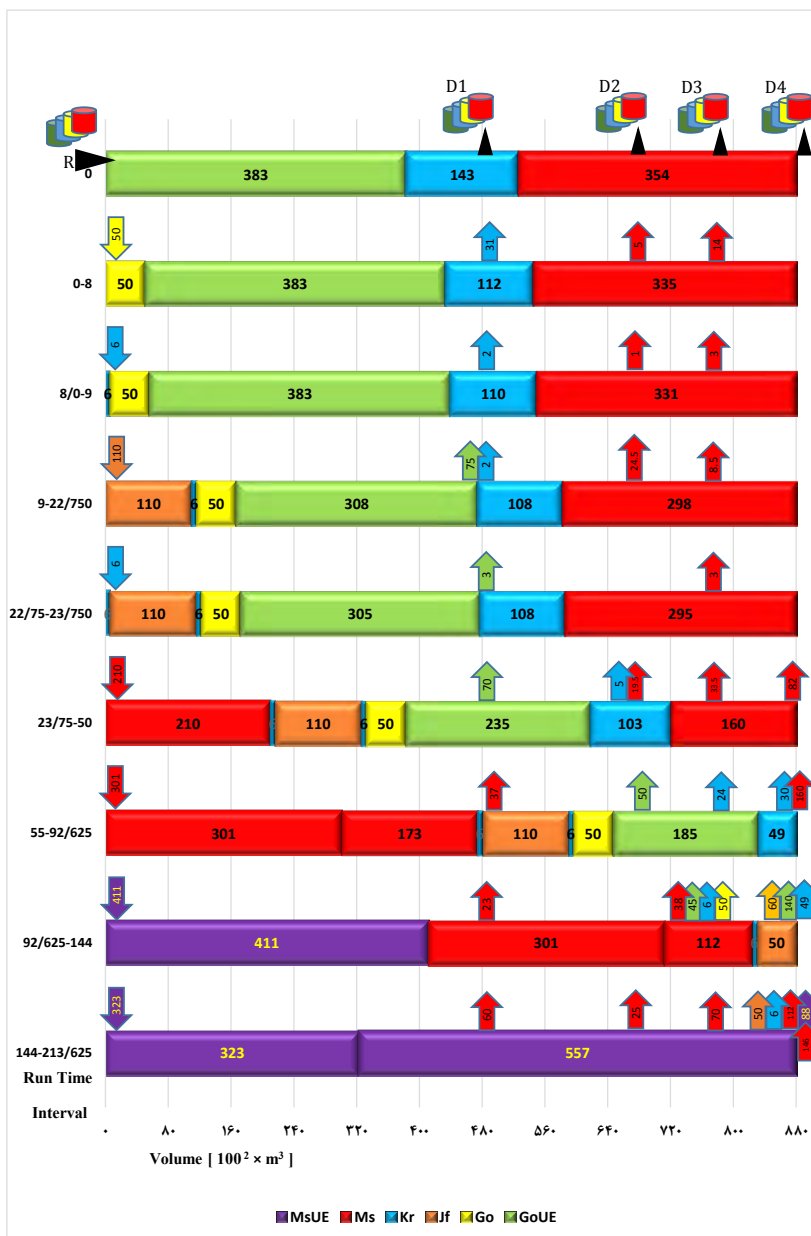
شرح آیتم	واحد	نماد	حل رویه جاری	حل مدل	اختلاف	درصد بهبود
تعداد بچ‌های تزریقی	عدد	i	۱۱	۸	۳	۲۷
کل مدت زمان فعالیت خط لوله	ساعت	ΣL	۱۹۸/۵	۲۰۸/۶۲۵	۱۰/۱۲۵	-۵/۱
مجموع حجم تزریق شده در خط لوله	متر مکعب	ΣQ	۱۶۵۷۰۰	۱۶۵۱۰۰	۶۰۰	۰/۴
مجموع حجم آلودگی در حین عملیات انتقال	متر مکعب	ΣWIF	۳۹۰	۲۴۰	۱۵۰	۳۸/۵
هزینه پمپاژ کل عملیات انتقال		ZP	۱۰۲۵۸/۶	۹۸۱۰	۴۴۸/۶	۴/۴
هزینه جرائم مصرف انرژی در ساعات اوج مصرف		ZH	.	.	.	.
هزینه تداخلات و آلودگی	واحد	ZC	۱۱۷	۷۲	۴۵	۶۲/۵
هزینه نگهداشت و انبارش مواد در مخازن مراکز انتقال	پول	Zid	۵۱/۲۷۳	۵۰/۵۴۱	۰/۷۳۲	۱/۴
هزینه دیرکرد تامین تقاضاها در پنجره زمانی مصرف		ZB	۱۱۲/۸	۵۳/۶	۵۹/۲	۵۲/۵
کل هزینه عملیات انتقال (تابع هدف)		COST	۱۰۵۳۹/۶۷۳	۹۹۸۶/۱۳	۵۵۳/۵۴۳	۵/۲

نکته مهم جدول (۱۲) این است که برنامه‌ریزی مدل نسبت به برنامه‌ریزی رویه جاری، علی‌رغم انتقال حجم کمتر، مدت زمان فعالیت بیش‌تری در نظر گرفته است. هزینه پمپاژ، هزینه تداخلات، و هزینه انبارش در مخازن مراکز پخش به ترتیب ۴/۴، ۶۲/۵، و ۱/۴ درصد بهبود یافته است و هزینه دیرکرد تقاضاها در برنامه‌ریزی مدل به مقدار قابل توجه ۵۲/۵ درصد کم‌تر است که در مجموع موجب بهتر شدن مقدار تابع هدف به میزان ۵/۲ درصد شده است. اگر بخواهیم موضوع تامین تقاضاها را در پنجره زمانی مورد بررسی قرار دهیم، با مقایسه ارقام مربوطه در جدول (۱۳)، می‌توان بیان کرد که برنامه‌ریزی مدل در مدیریت تامین تقاضاهای مصرف مراکز پخش بهتر از برنامه‌ریزی رویه جاری عمل کرده است.

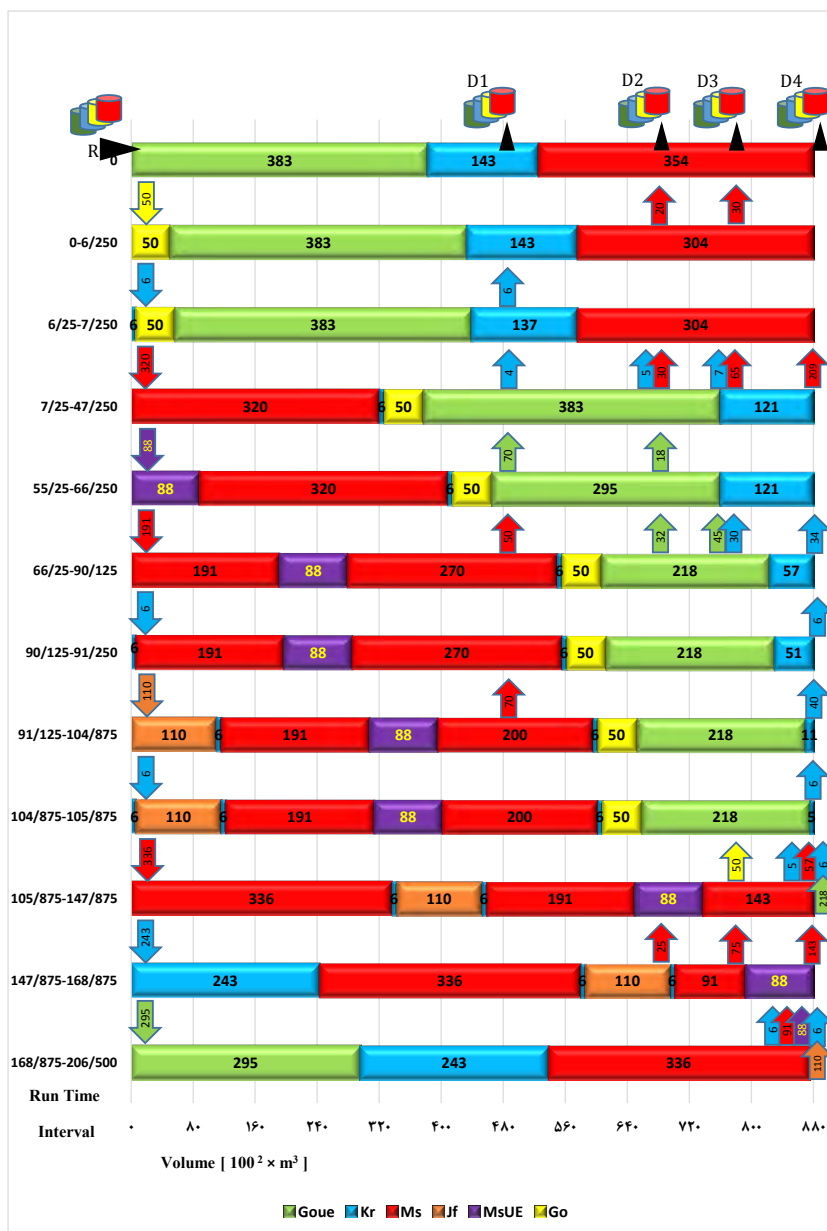
جدول ۱۳: تقاضاهای به تاخیر افتاده در برنامه مدل برای مسئله ۲ (متر مکعب)

مرکز پخش	مرکز پخش سبزوار	مرکز پخش نیشابور	مرکز پخش امام تقی	مرکز پخش مشهد	دوره زمانی (ساعت)
حل	۱۰۰۰	.	.	۵۰۰	دوره چهارم T4=240 h
مدل	.	.	.	.	دوره سوم T3=144 h
بنزین	.	.	.	.	دوره دوم T2=96 h
رویه	۱۰۰۰	.	۵۰۰	.	دوره یکم T1=48 h
جاری	.	.	.	.	دوره چهارم T4=240 h
حل	.	.	.	۵۰۰	دوره سوم T3=144 h
مدل	.	.	.	.	دوره دوم T2=96 h
نفت	.	.	.	.	دوره یکم T1=48 h
سفید	.	.	.	۵۰۰	دوره چهارم T4=240 h
رویه	.	.	.	.	دوره سوم T3=144 h
جاری	.	.	.	.	دوره دوم T2=96 h
حل	.	.	.	.	دوره یکم T1=48 h
نفت	.	.	.	.	دوره چهارم T4=240 h
مدل	.	.	.	.	دوره سوم T3=144 h
گاز	.	.	.	۱۵۰۰	دوره دوم T2=96 h
رویه	.	.	.	.	دوره یکم T1=48 h
جاری	.	.	.	.	دوره چهارم T4=240 h
حل	.	.	.	.	دوره سوم T3=144 h
مدل	.	.	.	.	دوره دوم T2=96 h
گاز	.	.	.	.	دوره یکم T1=48 h
رویه	.	.	.	.	دوره چهارم T4=240 h
یورو	.	.	.	.	دوره سوم T3=144 h
جاری	.	.	.	.	دوره دوم T2=96 h
حل	.	.	.	.	دوره یکم T1=48 h
بنزین	.	.	.	.	دوره چهارم T4=240 h
مدل	.	.	.	.	دوره سوم T3=144 h
رویه	.	.	.	.	دوره دوم T2=96 h
جاری	.	.	.	.	دوره یکم T1=48 h
حل	.	.	.	.	دوره چهارم T4=240 h
مدل	.	.	.	.	دوره سوم T3=144 h
نفت	.	.	.	.	دوره دوم T2=96 h
جت	.	.	.	.	دوره یکم T1=48 h
رویه	.	.	.	.	دوره چهارم T4=240 h
جاری	.	.	.	.	دوره سوم T3=144 h

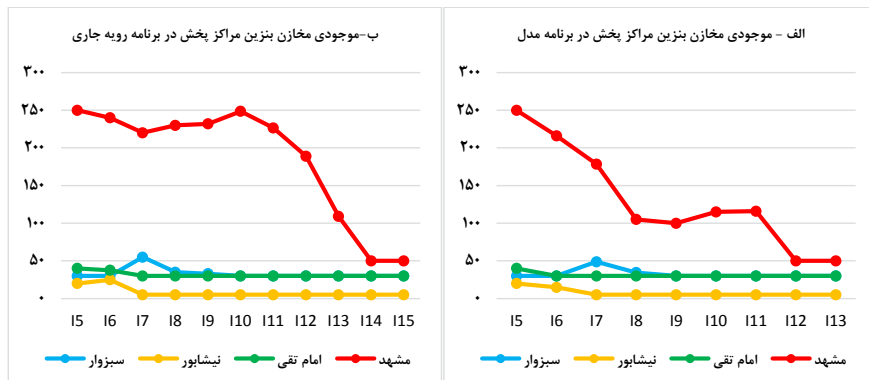
با ارزیابی داده‌های مربوط به موجودی مخازن فرآورده‌های نفتی در مراکز پخش و مقایسه نتایج برنامه‌ریزی مدل و برنامه‌ریزی رویه جاری می‌توان به عملکرد بهتر مدل ریاضی نسبت به رویه جاری پی برد. اشکال (۱۳)، (۱۴)، (۱۵)، و (۱۶) همگی گویای این مطلب هستند.



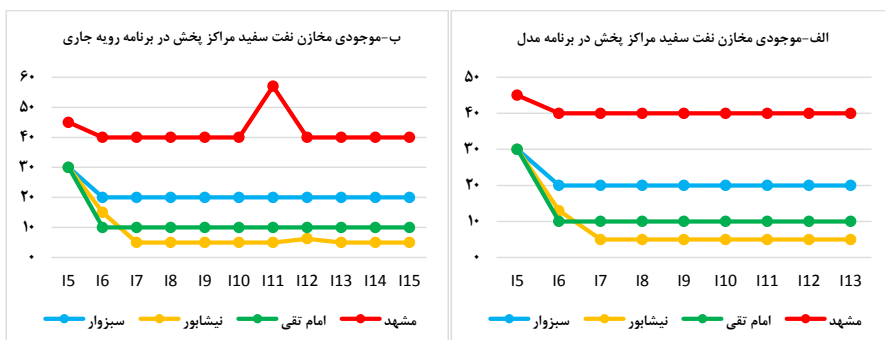
شکل ۱۱: برنامه‌ریزی مدل برای انتقال فرآورده‌های نفتی مسئله ۲



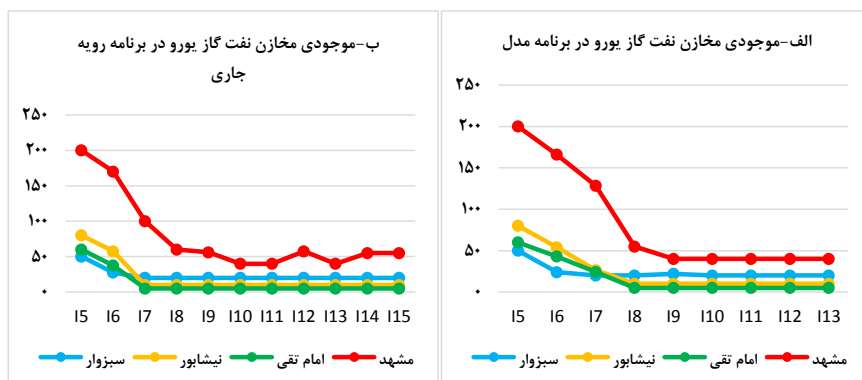
شکل ۱۲: برنامه ریزی رویه جاری برای انتقال فرآورده های نفتی مسئله ۲



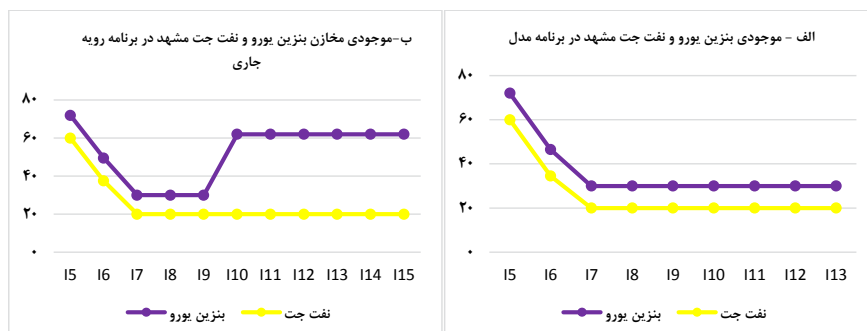
شکل ۱۳: مقایسه روند تغییرات سطح موجودی مخازن بنزین مسئله ۲



شکل ۱۴: مقایسه روند تغییرات سطح موجودی مخازن نفت سفید مسئله ۲



شکل ۱۵: مقایسه روند تغییرات سطح موجودی مخازن نفت گاز یورو مسئله ۲



شکل ۱۶: مقایسه روند تغییرات سطح موجودی مخازن بنزین یورو و نفت جت مشهد مسئله ۲

تحلیل حساسیت

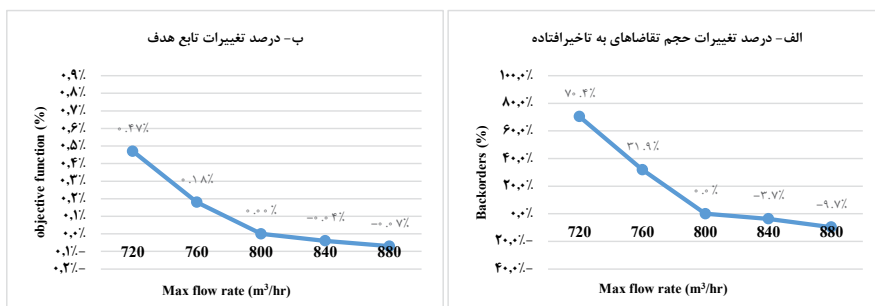
در این بخش، اثر تغییرات برخی پارامترهای سیستم بر نتایج محاسباتی مدل و تحلیل حساسیت آن بررسی می‌شود. نمونه مسئله (۲) را به همین منظور برگزیدیم.

تحلیل حساسیت نسبت به تغییرات بیشینه نرخ پمپاژ فرآورده

از پارامترهای مهم در عملکرد خط لوله، نرخ تزریق فرآورده به درون خط لوله است که نقش تعیین‌کننده‌ای در شیوه تامین تقاضا دارد. اثر تغییرات پارامتر بیشینه نرخ پمپاژ فرآورده‌های نفتی در محدوده ± 5 و ± 10 بر نتایج برنامه‌ریزی مدل بررسی شد. نتایج اعمال تغییرات یادشده در جدول (۱۴) آمده است. دیده می‌شود که تغییرات بیشینه نرخ پمپاژ با تغییرات حجم تقاضاهای به تاخیر افتاده و تغییرات مقدار هزینه کل عملیات انتقال (تابع هدف) نسبت وارونه دارد. به سخن دیگر، در هر یک از حالات بررسی شده کاهش/افزایش بیشینه نرخ پمپاژ، سبب افزایش/کاهش حجم تقاضاهای به تاخیر افتاده و افزایش/کاهش هزینه کل عملیات انتقال (تابع هدف) شده است. اعداد جدول دلالت بر تاثیر بسیار زیاد پارامتر بیشینه نرخ پمپاژ بر متغیر حجم تقاضاهای به تاخیر افتاده دارد. البته به نظر می‌رسد تاثیر کاهش بیشینه نرخ پمپاژ بر متغیر یادشده بیش‌تر از تاثیر افزایش آن است. حساسیت هزینه کل عملیات (تابع هدف) خیلی کم‌تر از حساسیت حجم تقاضاهای به تاخیر افتاده نسبت به تغییرات بیشینه نرخ پمپاژ است. برای نمونه، کاهش تنها ۵ درصد از اندازه بیشینه نرخ پمپاژ سبب می‌شود حجم تقاضاهای به تاخیر افتاده ۳۱/۹ درصد افزایش یابد و مقدار هزینه کل عملیات (تابع هدف) ۰/۱۸ درصد زیاد شود. بخش الف و ب شکل (۱۷) حساسیت حجم تقاضاهای به تاخیر افتاده و تابع هدف را به تغییرات پارامتر بیشینه نرخ پمپاژ به درون خط لوله نشان می‌دهد.

جدول ۱۴: اثر تغییرات بیشینه نرخ پمپاژ فرآورده بر برنامه‌ریزی مدل

بیشینه نرخ پمپاژ	تغییر نسبت به مقدار پایه	حجم تقاضای به تاخیرافتاده	تغییر تقاضای به تاخیرافتاده	تابع هدف	تغییرات تابع هدف (%)
۸۸۰	+۱۰	۱۲۱۰۰	-۹/۷	۱۰۲۶۷	-۰/۰۷
۸۴۰	+۵	۱۲۹۰۰	-۳/۷	۱۰۲۷۰/۳	-۰/۰۴
۸۰۰	۰	۱۳۴۰۰	۰	۱۰۲۷۴	۰
۷۶۰	-۵	۱۷۶۸۰	+۳۱/۹	۱۰۲۹۲/۸	+۰/۱۸
۷۲۰	-۱۰	۲۲۸۳۰	+۷۰/۴	۱۰۳۲۲/۸	+۰/۴۷



شکل ۱۷: حساسیت حجم تقاضاهای به تاخیرافتاده و تابع هدف نسبت به تغییرات پارامتر بیشینه نرخ پمپاژ

دلیل حساسیت زیاد تقاضاهای به تاخیرافتاده به کاهش بیشینه نرخ پمپاژ قطعاً مرتبط به این موضوع است که هرچه بازه تغییرات بیشینه نرخ پمپاژ را کوچک‌تر کنیم، در واقع شرایط را برای مدل دشوارتر کرده‌ایم، به‌طوری که مجبور خواهیم شد عملیات انتقال فرآورده‌های نفتی را با سرعت کم‌تری برنامه‌ریزی کنیم و در نتیجه کاهش سرعت جابه‌جایی سیال درون خط لوله، رساندن محصولات به مقاصد، و تامین تقاضاهای مصرف آن‌ها از بُعد زمان با تاخیراتی مواجه خواهند شد.

تحلیل حساسیت نسبت به تغییرات بیشینه حجم بچ فرآورده نفتی

یکی دیگر از پارامترهای اثرگذار بر عملکرد خط لوله، بیشینه حجم فرآورده درون یک بچ است. تغییرات بیشینه حجم بچ تزریق‌شده درون خط لوله را در محدوده ± 5 ، ± 10 و ± 15 بررسی می‌کنیم. نتایج اعمال تغییرات پارامتر یادشده در جدول (۱۵) آمده است. دیده می‌شود که کاهش بیشینه حجم

بع فراورده در هر یک از حالات مورد بررسی، سبب افزایش حجم تقاضاهای به تاخیرافتاده و افزایش هزینه کل عملیات انتقال (تابع هدف) شده، ولی افزایش اندازه پارامتر یادشده هیچ تغییری در حجم تقاضاهای به تاخیرافتاده و هزینه کل عملیات انتقال (تابع هدف) نکرده است.

جدول ۱۵: اثر تغییرات پیشینه حجم بع بر برنامه مدل

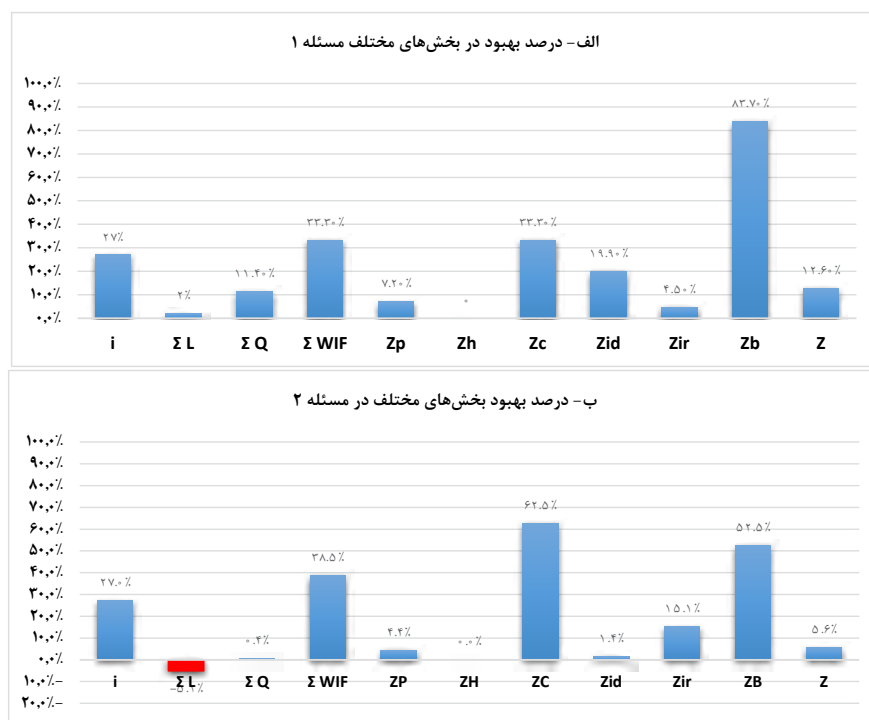
تغییر تابع هدف (%)	تابع هدف	تغییر تقاضای به تاخیرافتاده (%)	حجم تقاضای به تاخیرافتاده (m3)	تغییر نسبت به مقدار پایه (%)	پیشینه حجم بع (m3)
۰	۱۰۲۷۴/۷	۰	۱۳۴۰۰	+۱۵	۶۵۵۵۰
۰	۱۰۲۷۴/۷	۰	۱۳۴۰۰	+۱۰	۶۲۷۰۰
۰	۱۰۲۷۴/۷	۰	۱۳۴۰۰	+۵	۵۹۸۵۰
۰	۱۰۲۷۴/۷	۰	۱۳۴۰۰	۰	۵۷۰۰۰
+۰/۰۶	۱۰۲۸۰/۵	+۱/۹	۱۳۶۵۰	-۵	۵۴۱۵۰
+۰/۳۹	۱۰۳۱۵	+۱/۹	۱۳۶۵۰	-۱۰	۵۱۳۰۰
+۰/۸۳	۱۰۳۶۰	+۱۰/۸	۱۴۸۵۰	-۱۵	۴۸۴۵۰

بحث و نتیجه گیری

برنامه مدل ریاضی با برنامه کارشناسان باتجربه شرکت خطوط لوله و مخابرات نفت ایران از جوانب مختلف مقایسه گردید. جنبه‌هایی از قبیل تعداد بع‌های تزریقی، کل مدت زمان فعالیت خط لوله، مجموع حجم تزریق شده درون خط لوله، مجموع حجم آلودگی‌های ناشی از تداخلات، هزینه عملیات پمپاژ، هزینه سربار فعالیت در ساعات با تعرفه بالاتر برای مصرف انرژی، هزینه انبارش محصولات در مخازن مراکز پخش، هزینه تاخیرات در تامین تقاضاها بر پایه پنجره زمانی مقرر و کل هزینه عملیات به‌طور سرجمع در هر یک از نمونه مسائل تحلیل شد. درصد بهبود در بخش‌های مختلف یادشده بالا در مسائل (۱) و (۲) به‌ترتیب در بخش‌های الف و ب **شکل (۱۸)** نشان داده شده است. کاملاً مشخص است که بیش‌ترین تاثیر مثبت کاهش مدل در هزینه مربوط به دیرکرد تقاضاهاست. در دو مسئله فوق، کاهش چشمگیر ۸۳/۷ و ۵۲/۵ درصدی در هزینه دیرکرد تامین تقاضاها رخ داده است. در مرتبه دوم می‌توان به توانایی قابل توجه مدل در کاهش هزینه تداخلات و آلودگی‌ها به اندازه ۳۳/۳ و ۶۲/۵ درصد در دو نمونه مسئله اشاره کرد.

از حل دو نمونه مسئله واقعی مطرح‌شده برای خط لوله ۲۰ اینچ چندفرآورده‌ای شاهرود به مشهد و تحلیل نتایج آن‌ها مشخص شد که برنامه مدل ریاضی بهتر از برنامه رویه جاری کارشناسان باتجربه این حوزه بوده است. افق برنامه‌ریزی و زمان‌بندی ۱۰ روزه خط لوله در مسئله یکم به سه دوره زمانی و

در مسئله دوم به چهار دوره زمانی تقسیم شد. بهینگی به‌دست‌آمده در پاسخ نهایی دو مسئله یادشده به‌ترتیب ۱۲/۶ و ۵/۶ درصد است. اگر فرض کنیم با بکارگیری مدل ریاضی مزبور، حداقل بهینگی و حداقل مقدار کاهش در هزینه‌های عملیاتی برای یک بازه زمانی ۱۰ روزه به‌طور متوسط برابر ۹/۱ درصد باشد آنگاه می‌توان با تعمیم این فرض به سایر بازه‌های ۱۰ روزه سال (۳۶ بازه) شاهد کاهش چشمگیری در هزینه‌های عملیاتی خط لوله شاهرود به مشهد در طول سال خواهیم بود. علاوه بر کاهش هزینه‌های عملیاتی خط لوله شاهرود به مشهد، می‌توان به زمان صرف‌شده برای برنامه‌ریزی انتقال اشاره کرد. مدل ریاضی با دریافت داده‌های ضروری و اولیه مسئله، برنامه‌ریزی انتقال را در کوتاه‌ترین زمان ممکن و بدون هیچ خطا و اشتباه محاسباتی تنظیم و تولید می‌کند و ریسک‌های عملیاتی ناشی از خطای انسانی افراد برنامه‌ریز را کاهش می‌دهد. در حالی که مطابق رویه جاری نیروی انسانی به‌مراتب به زمان بیش‌تری نیاز دارد و با ریسک خطای انسانی زمان‌بندی عملیاتی برنامه انتقال را تدوین و استخراج می‌کند.



شکل ۱۸: میزان بهبود بخش‌های مختلف در دو نمونه مسئله

بیش‌ترین حجم مطالعات بررسی‌شده مربوط به خطوط لوله تک‌منبعی بود و به نظر می‌رسد خطوط لوله چندمنبعی به سبب پیچیدگی ساختاری خط لوله و در نتیجه مدل‌های پیچیده‌تر، کم‌تر مورد توجه بوده‌اند و نویسندگان به عنوان یکی از پیشنهادهای آینده، بررسی مدل‌های پیچیده‌تر را مطرح کرده‌اند. بیش‌تر مدل‌های برنامه‌ریزی و بهینه‌سازی بکاررفته با تکنیک‌های برنامه‌ریزی ریاضی، توصیف و حل شده‌اند که از عمده این روش‌ها می‌توان به MILP و MINLP اشاره کرد. این مدل‌ها با دو روش دقیق شاخه و کران (B&B) یا شاخه و برش (B&C) یا به روش‌های ابتکاری و فرا-ابتکاری حل شده‌اند. روش‌های حل دقیق بیش‌تر در پی پاسخ بهینه هستند که اگر باشد، زمان‌بر است. در حالی که روش‌های ابتکاری و فرا-ابتکاری، بهینگی پاسخ را تضمین نمی‌کنند، اما پاسخ شدنی را در زمان قابل قبول می‌دهند. در مواردی که مسئله، بزرگ و پیچیده است، تکنیک‌های تجزیه مورد اقبال بوده‌اند. در این گونه مسائل، مسئله اصلی به چند زیرمسئله تجزیه شده و از حل این زیرمسائل پاسخ نهایی به‌دست آمده است. این تکنیک‌ها گاهی از هر دو روش دقیق و تقریبی (ابتکاری و فرا-ابتکاری) برای حل مسئله بهره برده‌اند. با دقت در تکنیک‌های حل، رویکرد زمان پیوسته بیش‌تر در مطالعات دیده می‌شود. اگر نرخ جریان در خط لوله متغیر باشد، حالت زمان پیوسته به نظر مناسب‌تر است و در مقایسه با حالت زمان گسسته از تعداد متغیرهای دودویی کم‌تری در مدل استفاده می‌کند.

مطالعات سال‌های اخیر بیش‌تر بر مدل‌سازی‌های دقیق‌تر مبتنی بر شرایط عملیاتی و محدودیت‌های تکنیکی مسئله تمرکز داشته و کوشیده‌اند که مدل را به شرایط واقعی نزدیک‌تر کنند تا پاسخ بهینه‌تر باشد. اما در هیچ یک از آن‌ها برای یک مسئله جهان واقعی، میان عملکرد مدل ریاضی ارائه‌شده و عملکرد شرکت‌های مالک خطوط لوله چندفرآورده‌ای مقایسه‌ای نشده است. جالب است بدانیم که یافته‌ها و برنامه‌های به‌دست‌آمده از خروجی مدل ریاضی مسئله، که در قالب برنامه عملیاتی است، چقدر با تصمیم‌ها و برنامه‌ریزی عملیاتی کارشناسان و سرپرست‌های باتجربه شرکت‌های خطوط لوله انتقال فرآورده‌های نفتی متفاوت خواهد بود که همواره و روزانه این کار را انجام می‌دهند. با ارزیابی و بررسی دقیق بر پایه شرایط یکسان از مسئله مربوط به یک خط لوله واقعی و مقایسه نتایج هر دو روش (حل مدل ریاضی و حل دستی کارشناسان باتجربه) می‌توان به امکان‌سنجی و برآوردهایی از اندازه بهینه‌سازی بالقوه در فرایند تصمیم‌گیری‌های عملیاتی و تدوین برنامه زمان‌بندی عملیاتی خطوط لوله دست یافت، به گونه‌ای که ظرفیت‌های نوینی در بهینگی عملیات انتقال فرآورده‌های نفتی در دو حوزه زمان انتقال یا حجم انتقال پدید آید. بدین معنا که برای تامین حجمی مشخص از انواع تقاضاها، مدل ریاضی سبب بهینگی در قالب کاهش مدت زمان عملیات انتقال یا کاهش حجم کل فرآورده نفتی

جابه‌جاشده درون خط لوله می‌شود که در پایان، این بهینه‌سازی‌ها خود را به شکل کاهش هزینه‌های عملیاتی خط لوله نشان می‌دهد.

نظر به مطالب بالا یکی از خطوط لوله چندفرآورده‌ای ایران به عنوان مورد مطالعاتی برگزیده شد و مطابق با شرایط عملیاتی آن، مدلی ریاضی معرفی شد تا به کمک آن برای انتقال فرآورده‌های نفتی، که از راه آن جابه‌جا می‌شوند و به دست مصرف‌کنندگان در طول مسیر می‌رسند، یک برنامه عملیاتی اجرایی، تنظیم و شبیه‌سازی شود و خروجی آن با برنامه عملیاتی محقق در دنیای واقعی مقایسه شود. در نتیجه، تحلیل‌هایی در زمینه چگونگی کاهش هزینه‌ها در حوزه‌های گوناگون، هزینه پمپاژ، هزینه تداخلات و آلودگی‌ها، هزینه انبارش و نگهداشت فرآورده‌های نفتی در مخازن مراکز پخش و پالایشگاه، هزینه دیرکرد تامین تقاضاها در پنجره‌های زمانی و هزینه فعالیت خط لوله در ساعات اوج مصرف انرژی ارائه شد.

زمینه‌های پژوهشی بالقوه‌ای در ادامه این کار می‌تواند بررسی شود. برای نمونه، در این پژوهش فرض شده که طی افق برنامه‌ریزی، مقدار تقاضا از پیش مشخص و تغییرناپذیر است. بنابراین، یکی از گسترش‌های بالقوه این پژوهش، ساخت مدل‌های ریاضی با در نظرگیری احتمال تغییرات تقاضا در طول افق برنامه است. یکی از مفروضات اصلی این پژوهش، نوع عملیات تحویل کامل فرآورده‌های نفتی است. اگر این فرض عملیات تحویل کامل به حالت تحویل جانبی تغییر یابد، به گونه‌ای که عملیات تحویل جانبی به دو یا چند مرکز همزمان انجام شود، قابلیت جدید به مدل افزوده می‌شود که از دید عملیاتی انعطاف بیش‌تری دارد و با شرایط عملیاتی برخی دیگر از خطوط لوله نیز همخوان است.

منابع

- Cafaro, D. C., & Cerdá, J. (2004). Optimal Scheduling of Multiproduct Pipeline Systems Using a Non-Discrete MILP Formulation. *Computers & Chemical Engineering*, 28(10), 2053-2068. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2004.03.010>
- Cafaro, D. C., & Cerdá, J. (2010). Operational Scheduling of Refined Products Pipeline Networks with Simultaneous Batch Injections. *Computers & Chemical Engineering*, 34(10), 1687-1704. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2010.03.005>
- Cafaro, D. C., & Cerdá, J. (2014). Rigorous Formulation for the Scheduling of Reversible-Flow Multiproduct Pipelines. *Computers & Chemical Engineering*, 61(1), 59-76. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2013.10.006>
- Cafaro, V. G., Cafaro, D. C., Méndez, C. A., & Cerdá, J. (2015). Optimization Model for the

- Detailed Scheduling of Multi-Source Pipelines. *Computers & Industrial Engineering*, 88(1), 395-409. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2015.07.022>
- Castro, P. M., & Mostafaei, H. (2019). Batch-Centric Scheduling Formulation for Treelike Pipeline Systems with Forbidden Product Sequences. *Computers & Chemical Engineering*, 122(1), 2-18. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2018.04.027>
- Chen, H., Zuo, L., Wu, C., Wang, L., Diao, F., Chen, J., & Huang, Y. (2017). Optimizing Detailed Schedules of a Multiproduct Pipeline by a Monolithic MILP Formulation. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 159(1), 148-163. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.09.036>
- Herrán, A., de la Cruz, J. M., & De Andrés, B. (2010). A Mathematical Model for Planning Transportation of Multiple Petroleum Products in a Multi-Pipeline System. *Computers & Chemical Engineering*, 34(3), 401-413. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2009.11.014>
- Herrán, A., de la Cruz, J. M., & De Andrés, B. (2012). Global Search Metaheuristics for Planning Transportation of Multiple Petroleum Products in a Multi-Pipeline System. *Computers & Chemical Engineering*, 37(1), 248-261. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2011.10.003>
- Magatão, L., Arruda, L. V., & Neves Jr, F. (2004). A Mixed Integer Programming Approach for Scheduling Commodities in a Pipeline. *Computers & Chemical Engineering*, 28(1-2), 171-185. [https://doi.org/10.1016/S0098-1354\(03\)00165-0](https://doi.org/10.1016/S0098-1354(03)00165-0)
- Magatão, L., Arruda, L. V., & Neves-Jr, F. (2011). A Combined CLP-MILP Approach for Scheduling Commodities in a Pipeline. *Journal of Scheduling*, 14(1), 57-87. <https://doi.org/10.1007/s10951-010-0186-9>
- MirHassani, S., & Ghorbanalizadeh, M. (2008). The Multi-Product Pipeline Scheduling System. *Computers & Mathematics with Applications*, 56(4), 891-897. <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2008.01.035>
- MirHassani, S., & Jahromi, H. F. (2011). Scheduling Multi-Product Tree-Structure Pipelines. *Computers & Chemical Engineering*, 35(1), 165-176. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2010.03.018>
- Moradi, S., & MirHassani, S. (2015). Transportation Planning for Petroleum Products and Integrated Inventory Management. *Applied Mathematical Modelling*, 39(23-24), 7630-7642. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2015.04.023>
- Mostafaei, H., Castro, P. M., & Ghaffari-Hadigheh, A. (2016). Short-Term Scheduling of Multiple Source Pipelines with Simultaneous Injections and Deliveries. *Computers & Operations Research*, 73(1), 27-42. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2016.03.006>
- Rejowski Jr, R., & Pinto, J. M. (2003). Scheduling of a Multiproduct Pipeline System. *Computers & Chemical Engineering*, 27(8-9), 1229-1246. [https://doi.org/10.1016/S0098-1354\(03\)00049-8](https://doi.org/10.1016/S0098-1354(03)00049-8)
- Rejowski Jr, R., & Pinto, J. M. (2004). Efficient MILP Formulations and Valid Cuts for Multiproduct Pipeline Scheduling. *Computers & Chemical Engineering*, 28(8), 1511-1528. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2003.12.001>
- Sasikumar, M., Prakash, P. R., Patil, S. M., & Ramani, S. (1997). PIPES: A Heuristic Search Model for Pipeline Schedule Generation. *Knowledge-Based Systems*, 10(3), 169-175. [https://doi.org/10.1016/S0950-7051\(97\)00026-9](https://doi.org/10.1016/S0950-7051(97)00026-9)
- Zhang, H., Liang, Y., Liao, Q., Wu, M., & Yan, X. (2017). A Hybrid Computational Approach for Detailed Scheduling of Products in a Pipeline with Multiple Pump Stations. *Energy*, 119(1), 612-628. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.11.027>

نحوه ارجاع به مقاله:

فرجی، فرهاد؛ علیم‌رادی، مهرداد؛ و فرهنگ مقدم، بابک، و فدایی، مهدی (۱۴۰۱). برنامه‌ریزی بهینه جابه‌جایی فرآورده‌های نفتی از خط لوله با پنجره زمانی تقاضا برای کمینه‌سازی هزینه‌ها. نشریه برنامه‌ریزی و بودجه، ۲۷(۳)، ۱۷۵-۲۲۱.

Faraje, F., Alimoradi, M., Farhang Moghadam, B & Fadaee, M. (2022). Optimal Planning for Transportation of Petroleum Products via Pipe-line According to the Demand Time Window for Minimizing Costs. *Planning and Budgeting*, 27(3), 175-221. DOI: <https://doi.org/10.52547/jpbud.27.3.175>

Copyrights:

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to Planning and Budgeting. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

