

# برنامه‌ریزی ارسال فرآورده‌های نفتی چندگانه در شبکه خطوط انتقال براساس راه کار کنترل پیش‌بین: برنامه‌ریزی خودکار کوتاه‌مدت در حضور اختلال

سید حسین قناعتی و شهرام آقایی\*  
دانشکده مهندسی برق، پردیس فنی و مهندسی، دانشگاه یزد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۶/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۲۵

## چکیده

یکی از راه‌های مطمئن و مقرون به‌صرفه برای پاسخ‌گویی به نیازهای محلی به انواع سوخت‌های فسیلی، انتقال فرآورده‌های نفتی بر بستر شبکه خطوط انتقال است. در راستای تحقق این هدف فرآورده‌های نفتی در قالب بسته‌های با حجم معین به‌طور متوالی درون خطوط انتقال ارسال می‌شوند. مسأله برنامه‌ریزی انتقال بسته‌های مواد نفتی درون خطوط لوله‌های انتقال برای تأمین نیازهای دوره‌ای سیستم توزیع فرآورده‌های نفتی با تضمین محدودیت‌ها در حوزه‌های تولید، انتقال و ذخیره‌سازی فرآورده‌های نفتی، حائز اهمیت است. در این مقاله با استفاده از راه کار کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل فضای حالت و در قالب یک مسأله بهینه‌سازی مقید به برنامه‌ریزی در بازه‌های زمانی کوتاه‌مدت روزانه در طول یک ماه در حضور اثر اختلال قطع مسیرهای شبکه پرداخته شده است. براساس راه کار کنترل افق لغزان در انتهای هر روز، فرآیند برنامه‌ریزی به‌صورت برخط با افق پیش‌بین هفتگی اجرا شده است و مقادیر کنترل بهینه مربوط به روز اول به‌عنوان ورودی تصمیم به سیستم انتقال اعمال می‌شود. نتایج فرآیند برنامه‌ریزی نشان می‌دهد که مقادیر برنامه‌ریزی شده اهداف ذخیره‌سازی سیستم انتقال را با در نظر گرفتن محدودیت‌ها و اختلالات موجود برآورده می‌کند.

**کلمات کلیدی:** شبکه انتقال فرآورده‌های نفتی چندگانه؛ برنامه‌ریزی خودکار؛ کنترل افق لغزان؛ کنترل پیش‌بین؛ بهینه‌سازی مقید

## مقدمه

دقت و امنیت بیشتری را به‌همراه دارد و از طریق این خطوط مواد مختلف مورد نیاز از جمله گازوئیل، بنزین، سوخت حرارتی، سوخت دیزل، سوخت جت و ... برای مناطق مختلف ارسال می‌شود [۱]. در شبکه‌های خطوط انتقال فرآورده‌های نفتی چندگانه، انواع مواد نفتی براساس یک برنامه زمان‌بندی معلوم به‌صورت بسته‌هایی با حجم

برای ارسال مقادیر حجمی زیاد از فرآورده‌های نفتی در فواصل طولانی، از منابع تولید و پالایشگاه‌ها به‌سمت مراکز مصرف و ذخیره‌سازی، شبکه خطوط لوله انتقال با وجود هزینه‌های اولیه بالا، سرعت،

\*مسئول مکاتبات  
آدرس الکترونیکی  
شناسه دیجیتال: (DOI: 10.22078/pr.2021.4294.2946) aghaei@yazd.ac.ir

در یک شبکه خطوط انتقال با آرایش خطی شامل یک واحد پالایشگاهی و چند مرکز چندمنظوره ذخیره‌سازی استفاده کردند [۹]. بوئو و همکاران براساس یک راه‌کار سلسله مراتبی به برنامه‌ریزی انتقال در یک نمونه شبکه واقعی خطوط انتقال دوطرفه پرداختند به طوری که هر یک از گره‌های چندمنظوره شبکه قابلیت ذخیره‌سازی و ارسال مود را دارند [۱۰]. همچنین رجوسکی و پینتو با استفاده از روش برنامه‌ریزی عدد صحیح غیرخطی با طول بازه‌های زمانی متغیر به برنامه‌ریزی خطوط انتقال پرداختند به طوری که نرخ جریان انتقال سیالات، با در نظر گرفتن محدودیت‌های هیدرولیکی شبکه انتقال به‌عنوان متغیر بهینه‌سازی در نظر گرفته شد [۱۱]. روش‌های برنامه‌ریزی ارائه شده برای شبکه خطوط انتقال فرآورده‌های نفتی در مراجع یاد شده، مبتنی بر روش‌های برنامه‌ریزی عدد صحیح بوده که نیاز به مدل دینامیکی نداشته و خصوصیات عملکردی شبکه در قالب محدودیت‌های حاکم بر برنامه بهینه‌سازی، بیان می‌شود. بنابراین، قابلیت بررسی رفتارهای سیستم مانند اثرات تأخیر در سیستم انتقال، تحت یک مدل دینامیکی موجود نیست. عمده این روش‌ها به صورت برون‌خط<sup>۴</sup> به اجرای بهینه‌سازی می‌پردازند که در نتیجه آن اجرای فرآیند بهینه‌سازی برای یک بازه زمانی معین در یک مرحله انجام می‌پذیرد [۱۲]. همچنین در صورت بروز اختلال پیش‌بینی نشده در فرآیند انتقال، برنامه‌ریزی صورت پذیرفته از اعتبار ساقط می‌گردد. بنابراین در این موارد نیاز به برنامه‌ریزی مجدد<sup>۵</sup> است. گوپتا و همکارانش در تحقیقی، با بررسی روش‌های زمان‌بندی مجدد، روشی برای زمان‌بندی برخط به منظور رفع اثر اختلال و عدم قطعیت برای رسیدن به اهداف بلندمدت و کوتاه‌مدت در صنایع شیمیایی ارائه کردند [۱۳].

معین درون شبکه انتقال به صورت متوالی ارسال می‌شوند. فرآیند برنامه‌ریزی شامل تصمیم‌گیری در انتخاب نوع، ترتیب توالی و مدت زمان انتقال هر بسته<sup>۱</sup> فرآورده نفتی می‌شود. چالش اصلی پیش روی تعیین توالی بهینه، زمان شروع و مدت زمان پمپاژ بهینه برای انتقال این مواد به مخازن در محل‌های مصرف است [۲ و ۳]. برای دسترسی به بهترین شکل ممکن در مسائل برنامه‌ریزی، تکنیک‌های بهینه‌سازی متعددی مورد توجه قرار گرفته است [۴]. روش‌های برنامه‌ریزی مرسوم برای شبکه خطوط انتقال نفت، محدود به روش‌های بهینه‌سازی عدد صحیح خطی و غیرخطی است و به‌عنوان یکی از پژوهش‌های پایه‌ای در زمینه شروع تحقیق، هان و راتلیف با تبدیل مسأله اصلی زمان‌بندی انتقال فرآورده‌های نفتی در شبکه خطوط انتقال به چندین مسأله کوچک‌تر و حل آن‌ها با روش شاخه و کران<sup>۲</sup>، اولین فرمولاسیون برنامه‌ریزی عدد صحیح خطی را برای مسأله انتقال پی‌ریزی کردند [۵]. مصطفایی و همکاران با مدیریت بازه‌های زمانی گسسته برای اجرای فرآیندهای پیوسته زمان به برنامه‌ریزی انتقال مواد درون شبکه خطوط انتقال با یک پالایشگاه و چند مرکز ذخیره‌سازی پرداختند [۶]. کافارو و سردا با استفاده از روش برنامه‌ریزی خطی به برنامه‌ریزی انتقال برای یک سیستم انتقال متشکل از دو پالایشگاه و سه مرکز خروجی قرار گرفته روی یک خط انتقال سراسری در بازه زمانی ده روزه پرداختند [۷]. میرا و همکارانش در مقاله [۸]، برای برنامه‌ریزی انتقال مواد تولیدی یک پالایشگاه به چند مرکز ذخیره‌سازی از روش مبتنی بر برنامه‌ریزی عدد صحیح ادغام شده با روش‌های ابتکاری<sup>۳</sup> استفاده کردند. در تحقیقی دیگر، میرا و همکاران از ترکیب یک روش ابتکاری مبتنی بر کنترل افق لغزان با برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح برای (۱) تعیین تعداد و مقدار بسته‌های فرآورده‌های نفتی ارسالی به شبکه و (۲) برنامه‌ریزی انتقال بخش‌های میانی

1. Batch  
2. Branch and Bound  
3. Heuristic  
4. Offline  
5. Re-Planning

کنترل ده روزه را ارائه نموده‌اند. با وجود افزایش تعداد مسائل متوالی برای دستیابی به برنامه دوره‌ای ماهانه، محدودسازی افق برنامه‌ریزی موجب افزایش سرعت حل مسأله برنامه‌ریزی ماهانه شد. در واقع نتایج مقاله [۳]، به‌عنوان مقادیر مطلوب بازه‌های زمانی مشخص در برنامه‌ریزی خودکار کوتاه مدت و برخط ارائه شده در پژوهش حاضر، کاربرد خواهد داشت. وجود اختلال در سیستم انتقال مانند از کار افتادن قسمتی از خطوط و مراکز پالایش و ذخیره‌سازی، افزایش ناگهانی عرضه و تقاضا، تغییرات ارزش فرآورده‌های نفتی و... موجب برهم خوردن تعادل در اهداف برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت و بلندمدت در فرآیند بهینه‌سازی به‌روش‌های برون‌خط می‌شوند [۱۶]. بنابراین در مواقع بروز اختلال و یا نیاز به پیاده‌سازی طرح‌های جدید، استفاده از راه‌کار افق لغزان به شکل کنترل پیش‌بین می‌تواند تصمیم‌های کنترلی را به نحو موثری به‌روزرسانی کند. بنابراین در ذیل و تکمیل پژوهش قبل [۳]، برنامه‌ریزی خودکار کوتاه‌مدت به‌صورت برخط براساس اصول کنترل پیش‌بین، به منظور جبران اثر اختلال پیشنهاد و اجرا شده است. براساس راه‌کار افق لغزان مبتنی بر کنترل پیش‌بین و با فرض این‌که اثر اختلال به‌صورت قطع بخش‌های شبکه در انتهای هر روز و همچنین مدت زمان لازم جهت رفع اختلال قابل تشخیص است، در این مقاله برنامه‌ریزی خودکار با در نظر گرفتن مجموعه دوره‌های زمانی پیش‌بینی کوتاه‌مدت هفتگی برای تعیین برنامه انتقال هر روز صورت پذیرفته است. در هر مرحله برنامه‌ریزی که به‌صورت برخط اجرا می‌گردد شرایط سیستم از لحاظ وجود اختلال در بازه‌های موجود در افق پیش‌بین که به‌صورت یک دوره یک هفته‌ای است، در مدل و محاسبات بهینه‌سازی لحاظ می‌گردد.

همچنین استفاده از روش‌های برنامه‌ریزی عدد صحیح برای زمان‌بندی توالی انتقال به‌صورت یک سیستم کنترل برخط برای برخی شبکه‌های انتقال بزرگ، به‌دلیل مشکلات مربوط به زمان محاسبات فرآیندهای کنترل چندان مناسب نیست [۱۴]. بنابراین بایستی به‌دنبال روش‌هایی باشیم که قادر به یافتن پاسخ بهینه در فضای عملی<sup>۱</sup> مسأله و در زمان معقول باشند. یک راه‌کار عملی استفاده از روش‌های بهینه‌سازی فراابتکاری<sup>۲</sup> است. این الگوریتم‌ها با وجود نداشتن هیچ‌گونه تضمین در ارائه پاسخ، با تکیه بر راه‌کارهای هوشمند و ترکیب اطلاعات به‌دنبال ایجاد یک مصالحه<sup>۳</sup> بین کیفیت پاسخ و زمان حل برای مسائل بزرگ می‌باشند. به‌طوری‌که به‌جای بررسی کل فضای جستجو به‌طور هوشمندی تنها به بررسی قسمت‌هایی از فضای جستجو می‌پردازند که احتمال وجود پاسخ‌های بهتر بیشتری دارد [۱۵]. اصولاً برنامه‌ریزی انتقال یک مسأله بهینه‌سازی دارای محدودیت می‌باشد که حل این نوع مسأله بر روی افق بی‌نهایت به‌دلیل نیاز به تعیین دنباله‌ای بی‌نهایت از متغیرهای تصمیم‌گیری با تضمین ارضای محدودیت‌ها، غیرممکن است [۱۶ و ۱۷]. یک ایده برای گذشتن از این مانع، استفاده از راه‌کار کنترل افق لغزان با محدود کردن افق مسأله است. در روش‌های کنترل افق لغزان علی‌رغم تقسیم مسأله اصلی به چندین مسأله کوچک‌تر و افزایش تعداد مسائل، کاهش افق پیش‌رو منجر به کاهش پیچیدگی محاسباتی در هر گام حل مسأله می‌شود. در سیستم انتقال فرآورده‌های نفتی، محدودیت‌های انتقال و عرضه و تقاضا در زمان‌های مختلف، استفاده از راه‌کار پیش‌بین در فرآیند برنامه‌ریزی را توجیه می‌کند.

قناعتی و آقایی در مقاله [۳] به‌عنوان بخش مقدماتی این پژوهش، برنامه‌ریزی بلندمدت انتقال ماهانه در قالب یک استراتژی برون‌خط به‌صورت حل متوالی مجموعه مسائل با افق پیش‌بین بیست روزه و افق

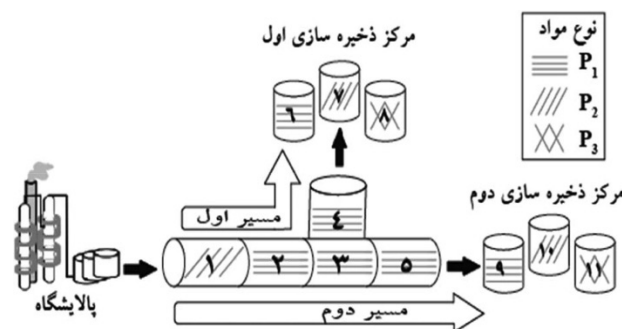
1. Feasible  
2. Metaheuristic  
3. Trade off

برنامه‌ریزی خودکار شبکه خطوط انتقال فرآورده‌های نفتی سیستم انتقال شامل مجموعه بخش‌ها و خطوط متصل کننده پالایشگاه‌ها به مراکز ذخیره‌سازی است. این اتصالات به صورت مجموعه شاخه‌های انتقال به همراه تجهیزات لازم برای کنترل فشار پمپاژ مواد نفتی درون خطوط شبکه انتقال است. با ارسال بسته‌های جدید از پالایشگاه به شبکه انتقال، بر اثر فشار موجود درون خطوط لوله شبکه انتقال، فرآورده‌های نفتی طی بازه‌های زمانی به سمت مراکز ذخیره‌سازی منتقل می‌شوند. شکل ۱ شبکه انتقال نمونه مورد استفاده به همراه شرایط اولیه خطوط لوله را نشان می‌دهد. شبکه مورد بررسی با شرایط اولیه و درخواست‌های هفتگی مشابه مقاله بخش اول همین پژوهش [۳] است.

هدف از برنامه‌ریزی انتقال شبکه خطوط انتقال فرآورده‌های نفتی، دستیابی به مجموعه توالی انتقال مناسب برای تأمین مواد مصرفی مورد نیاز مراکز مختلف در بازه‌های زمانی معین با در نظر گرفتن محدودیت‌های سیستم انتقال در جهت کاهش مجموعه هزینه‌ها است که در این پژوهش، این مهم به صورت یک مسأله کنترل بیان شده است. مسأله برنامه‌ریزی ارائه شده توسط مولفین، به دو بخش "برنامه‌ریزی برون خط بلندمدت با لحاظ محدودیت‌های کلی" و "برنامه‌ریزی خودکار کوتاه مدت با رویکرد برخط و با لحاظ اختلال قطع بخش‌های شبکه" تقسیم بندی شده است.

در این حالت با در نظر گرفتن بازه‌های زمانی ثابت هشت h برای یک هفته، مسأله برنامه‌ریزی خودکار در انتهای هر روز برای محاسبه توالی هفتگی با بازه‌های ۸ h حل شده و فقط مقادیر سه بازه زمانی بعدی یعنی روز بعد برای اعمال در نظر گرفته می‌شود. سپس ورودی کنترل بهینه مربوط به روز اول به شبکه انتقال اعمال می‌شود و تا رسیدن به پایان ماه، فرآیند بهینه‌سازی برای هر روز با شرایط اولیه به روز شده، تکرار شده و مجدداً اعمال می‌شود.

نکته متمایز کننده برنامه‌ریزی به شیوه برخط ارائه شده در این مقاله نسبت به پژوهش قبل [۳]، امکان لحاظ اختلال‌های موجود و آتی در انتهای هر روز و به روزرسانی تغییرات در مدل شبکه انتقال است که قابلیت اطمینان<sup>۱</sup> شبکه را بالا می‌برد. این مقاله در بخش‌های زیر سازمان یافته است: در بخش دوم، ساختار کلی شبکه خطوط انتقال و مسأله برنامه‌ریزی مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش سوم ادبیات کنترل پیش‌بین و دلایل استفاده از این راه کار برای مسأله برنامه‌ریزی خودکار بررسی شده است. در بخش چهارم پس از معرفی مدل فضای حالت سیستم انتقال به بیان مسأله در قالب روش کنترل پیش‌بین پرداخته شده است. در بخش پنجم به ارزیابی نتایج و شبیه‌سازی پرداخته شده است و در نهایت بخش ششم شامل نتیجه‌گیری مقاله است.



شکل ۱ شبکه خطوط انتقال فرآورده‌های نفتی نمونه [۳]

که جزئیات بیشتر آن‌ها در ادامه بیان می‌شود.

## برنامه‌ریزی بلندمدت انتقال برای شبکه خطوط انتقال فرآورده‌های نفتی

با معلوم بودن شرایط اولیه سیستم، اهداف برنامه‌ریزی و یک مدل توصیف کننده فعالیت‌ها و تاثیر آن‌ها روی سیستم، فرآیند برنامه‌ریزی به دنبال یافتن ترتیبی از فعالیت‌ها است که اعمال آن‌ها به سیستم، سیستم را از شرایط اولیه معلوم به حالت مطلوب برساند. در برنامه‌ریزی بلندمدت کلاسیک برای سیستم‌هایی که دارای مدل و شرایط معلوم باشند این فرآیند به صورت برون‌خط صورت می‌گیرد به طوری که ابتدا توالی بهینه برای مسأله مورد نظر محاسبه شده و سپس به سیستم اعمال می‌شود. مسائل حوزه برنامه‌ریزی حتی در ساده‌ترین شکل، از پدیده نفرین ابعاد<sup>۱</sup> رنج می‌برند که براساس آن با افزایش ابعاد مسأله اعم متغیرهای توصیف کننده، تعداد ورودی و خروجی‌های سیستم و حتی طول مدت برنامه‌ریزی، حجم فضای جستجو برای یافتن پاسخ بهینه یا حداقل یک پاسخ شبه بهینه عملی به شکل فزاینده‌ای معمولاً به صورت نمایی افزایش می‌یابد که این امر فرآیند بهینه‌سازی را با مشکل کمبود زمان و حافظه مواجه می‌کند [۱۸]. در مقاله بخش اول این تحقیق [۳] با توجه به افزایش تعداد متغیرهای تصمیم و ابعاد مسأله برای یک دوره زمانی ماهیانه، مشکل زمانی در مرحله بهینه‌سازی اجتناب‌ناپذیر بود که برای برای جلوگیری از افزایش زمان حل مسأله برنامه‌ریزی بلندمدت، بازه زمانی یک ماهه به سه بازه ده روزه تقسیم شد و با استفاده از مدل فضای حالت ارائه شده و براساس راه‌کار کنترل پیش‌بین و با فرض عدم وجود اختلال به اجرای متوالی و برون‌خط برنامه زمان‌بندی برای دهه‌های متوالی پرداخته شد و نتایج برنامه‌ریزی بلندمدت برای طول مدت یک ماه به دست آمد.

یکی از ویژگی‌های کلیدی راه‌کار پیشنهادی این است که در شرایط خاص و نیاز به برنامه‌ریزی

مجدد، عملیات زمان‌بندی مبتنی بر مدل دینامیکی شبکه براساس شرایط فعلی شبکه و انتظارات جدید، در قالب راه‌کار کنترل پیش‌بین و به صورت خودکار و برخط اجرا می‌شود. در واقع قابلیت به‌کارگیری برخط روش پیشنهادی در صورت تغییر استراتژی عملیات انتقال و یا بروز اختلال، از ویژگی‌های روش پیشنهادی است که در این مقاله به آن پرداخته می‌شود.

## برنامه‌ریزی خودکار انتقال برای شبکه خطوط انتقال فرآورده‌های نفتی در حضور اختلال

در برنامه‌ریزی کلاسیک داده‌های سیستم تحت کنترل اعم از دینامیک سیستم، تعداد و بازه ورودی‌ها و خروجی‌های کنترلی سیستم در قالب مدل توصیفی سیستم ارائه می‌شود. با موجود بودن شرایط اولیه و همچنین اهداف و شاخص عملکرد تعیین شده برای سیستم، فرآیند بهینه‌سازی در یک افق محدود یک مرتبه به شکل برون‌خط صورت می‌گیرد سپس توالی بهینه محاسبه شده به‌طور کامل به سیستم اعمال می‌شود. مسلماً اختلالات پیش‌بینی نشده وارد به سیستم، توالی بهینه را از درجه اعتبار ساقط می‌کنند. این درحالی است که در روش برنامه‌ریزی خودکار که به شکل برخط و مبتنی بر نتایج برنامه‌ریزی بلندمدت [۳]، اجرا می‌گردد در هر مرحله فرآیند و براساس شرایط حاضر سیستم مخصوصاً وجود یا عدم وجود اختلال، بهینه‌سازی اجرا می‌شود و قسمتی از پاسخ‌های بهینه محاسبه شده برای یک پنجره زمانی پیش رو به سیستم اعمال می‌گردد. لذا برنامه‌ریزی خودکار علاوه بر تطابق با نظریه‌های موجود در روش‌های کنترل افق لغزان و استفاده از نتایج برنامه‌ریزی برون‌خط و بلندمدت [۳]، به دلیل اجرای برخط فرآیند برنامه‌ریزی سیستم، در سطح پایین‌تر مدیریتی و نزدیک‌تر به سیستم، امکان بررسی و مدیریت اختلالات پیش‌بینی نشده را نیز به ارمغان می‌آورد.

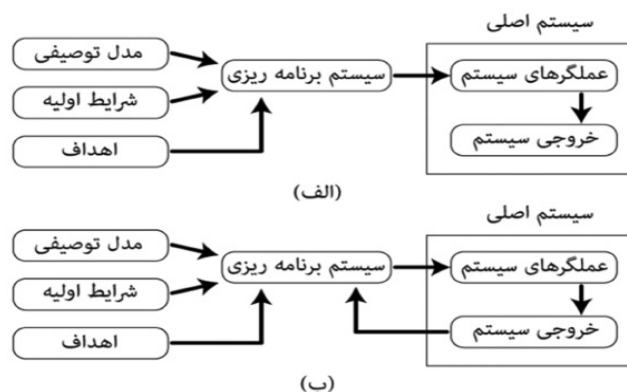
1. Curse of Dimensionality

جهت اجرای برنامه‌های اعمالی تنظیم می‌کند. برخلاف مقاله [۳] که مسأله برنامه‌ریزی بلندمدت به‌روش کلاسیک در چند مرتبه متوالی اجرا گشت، در این بخش مقاله مسأله برنامه‌ریزی خودکار با رویکرد برخط اجرا می‌گردد به‌طوری‌که در انتهای هر روز با در نظر گرفتن افق پیش‌بین هفتگی توالی انتقال برای روز آینده محاسبه می‌شود. تقسیم مسأله و حل هر مسأله در هر روز علاوه بر تقسیم زمان حل در کل ماه و کاهش پیچیدگی محاسباتی، امکان بررسی اختلال‌های وارد بر سیستم در هنگام برنامه‌ریزی روز آینده را نیز به ارمغان می‌آورد. به‌طوری‌که یکی از مزایای استفاده از راه‌کار کنترل افق لغزان به‌صورت برخط، رفع اثرات ناشی از اختلال است.

#### راه‌کار کنترل پیش‌بین برای برنامه‌ریزی خودکار

حل یک مسأله بهینه‌سازی مقید بر روی افق بی‌نهایت به دلیل عدم امکان دست‌یابی به یک دنباله‌ای بی‌نهایت از متغیرهای تصمیم‌گیری با تضمین ارضای محدودیت‌ها غیرممکن است. در چنین شرایطی محدود کردن افق حل مسأله موجب کاهش پیچیدگی مسأله مورد نظر می‌گردد. به‌طوری‌که یک روش حل، برای این نوع مسائل بهینه‌سازی به‌صورت تعریف مسأله برای افق‌های نامحدود به‌دست می‌آید.

به‌طوری‌که یکی از اهداف برنامه‌ریزی خودکار، مطالعه و طراحی سیستم‌های هوشمند خودکار است که در آن سیستم در محیطی پیچیده با عدم قطعیت یا فرآیندهای تصادفی سروکار دارد و این موارد می‌توانند به شکل‌های مختلف مانند اثر اختلال یا مدل‌های متغیر با زمان یا مدل‌های تطبیقی بیان گردند [۱۹]. برخلاف برنامه‌ریزی بلندمدت به‌روش کلاسیک که برای یک مدل شناخته شده و با شرایط اولیه معلوم به‌صورت برون‌خط اجرا می‌گردد و پاسخ به‌صورت مجموعه توالی در نهایت به سیستم اعمال می‌گردد، در سیستم‌های موجود در دنیای واقعی ممکن است پاسخ‌های مورد نیاز پیچیده باشند که این امر به دلایل مختلف اعم از تغییر محیط حل مسأله یا خروجی‌های مطلوب سیستم نسبت به‌زمان یا وجود اختلال معلوم و نامعلوم در سیستم واقعی رخ می‌دهد. در این شرایط نیاز است رویکرد حل مسأله براساس راه‌کار حل، مدل مورد استفاده و حتی مقادیر مطلوب برای برخی از بازه‌های زمانی و با در نظرگیری پایداری<sup>۱</sup> و حل‌پذیری<sup>۲</sup> سیستم کنترل مورد اصلاح قرار گیرد. شکل ۲ روندنمای برنامه‌ریزی خودکار و کلاسیک را نشان می‌دهد جایی‌که سیستم برنامه‌ریزی وظیفه تولید یک مجموعه توالی را براساس مدل توصیفی مسأله، شرایط اولیه و تابع هدف بر عهده دارد. عملگر با داشتن برنامه بهینه خروجی‌های سیستم را در



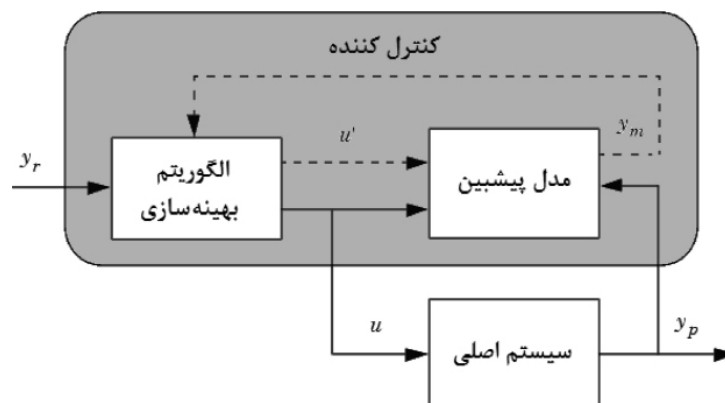
شکل ۲ روندنمای مدل توصیفی مسأله برنامه‌ریزی (الف) برنامه‌ریزی کلاسیک (ب) برنامه‌ریزی خودکار

پیش‌بینی خروجی آینده سیستم واقعی بر پایه مقادیر پیشین و کنونی و نیز براساس اعمال ورودی کنترل بهینه آینده استفاده می‌گردد. این متغیرهای تصمیم‌گیری توسط الگوریتم بهینه‌سازی و با در نظر گرفتن محدودیت‌ها و تابع هزینه‌ای که خطای تعقیب خروجی سیستم در آن در نظر گرفته شده است، محاسبه می‌شوند. امروزه، کنترل پیش‌بین کاربردهای فراوان و موفقی در صنایع مختلف دارد. به‌عنوان نمونه از کاربردهای این روش در صنایع می‌توان به طراحی مسیر برای سیستم جلوگیری از تصادف [۲۱] و سیستم کنترل سرعت حرکتی زیردریایی خودکار [۲۲] اشاره کرد. مدل پیش‌بین توصیف کننده، تابع هدف و الگوریتم استفاده شده برای بدست آوردن قانون کنترل اجزاء معمول الگوریتم‌های کنترل پیش‌بین هستند که انتخاب‌های مختلفی برای هر کدام از آن‌ها می‌تواند الگوریتم‌های مختلفی از مجموعه کنترل پیش‌بین را ایجاد کند.

روابط فضای حالت یک انتخاب ممکن برای کنترل پیش‌بین است. با استفاده از مدل فضای حالت سیستم علاوه‌بر وارد کردن شرایط اولیه در محاسبات، می‌توان به تصویر کاملی از دینامیک داخلی سیستم دست یافت. به‌علاوه بهینه‌سازی عملکرد سیستم حلقه بسته با استفاده از معادلات فضای حالت به راحتی قابل انجام است [۲۳].

در نتیجه فرآیند برنامه‌ریزی به شکل یک مسأله بهینه‌سازی مقید در یک افق معین تعریف می‌شود و با محدود کردن افق حل، دنباله‌ای از متغیرهای تصمیم‌گیری برای دوره‌ای معین تعیین می‌شود.

در سال‌های اخیر راه‌کار مبتنی بر کنترل پیش‌بین با رویکرد کنترل افق لغزان در حل مسائل دارای محدودیت و از نوع غیرچندجمله‌ای سخت<sup>۱</sup> مانند برنامه‌ریزی شبکه خطوط انتقال کاربرد داشته است [۱۷ و ۲۰]. علاوه‌بر این، اجرای مسأله به‌صورت برخط تا حدودی قابلیت جبران‌سازی اثر اختلال را به ارمغان می‌آورد به طوری که در صورت ایجاد اختلال قابل تشخیص در شبکه خطوط انتقال در هر بازه نمونه‌برداری، کنترل پیش‌بین با در نظر گرفتن شرایط جدید متغیرهای تصمیم‌گیری را به گونه‌ای تنظیم می‌کند که اختلاف مواد مورد نیاز در مراکز ذخیره‌سازی در طول افق پیش‌بینی تا حد ممکن کاهش یابد. در نتیجه کنترل پیش‌بین راه‌کاری مناسب برای برنامه‌ریزی شبکه خطوط انتقال با محدودیت‌های موجود است و از طریق آن می‌توان با به‌روز نمودن خودکار دنباله متغیرهای تصمیم‌گیری در هر بازه نمونه‌برداری، به تعیین دنباله تصمیم‌گیری در یک افق محدود با ارضای محدودیت‌های موجود پرداخت. شکل ۳ ساختار پایه‌ای راه‌کار کنترل پیش‌بین برای مسائل غیرخطی را نشان می‌دهد جایی که از یک مدل به اندازه کافی دقیق از سیستم برای



شکل ۳ ساختار پایه برای کنترل پیش‌بین

خروجی آینده از طریق جریمه انحراف از حالت مطلوب  $y_s$  به‌عنوان  $e_{k+j}^y = y_{k+j} - y_s$  در طول افق پیش‌بینی  $N_p$  کنترل می‌شود. میزان عبور از محدودیت‌های کمینه خروجی  $y_j$  و بیشینه خروجی  $\bar{y}_j$  از طریق حداقل‌سازی متغیرهای محدودیت خروجی  $s_j$  تعدیل می‌شود. کاهش تغییرات سریع ورودی نیز با واژه‌های جداگانه‌ای به نام  $\Delta u_{k+j} = u_{k+j} - u_{k+j-1}$  لحاظ می‌شود. همچنین انحراف ورودی‌های آینده از مرجع حالت ماندگار مطلوب با استفاده از جریمه انحراف به‌صورت  $e_{k+j}^u = u_{k+j} - u_s$  در طول افق کنترل  $N_c$  کنترل می‌شود. انحرافات ردیابی و محدودیت‌ها براساس نرم‌های برداری  $L_1$  یا  $L_2$  ( $q=1,2$ ) اندازه‌گیری می‌شوند و اهمیت نسبی بخش‌های تابع هدف با تنظیم ماتریس‌های توزین وابسته زمانی  $Q_j$ ،  $S_j$  و  $T_j$  کنترل می‌شوند. حاصل حل دنباله‌ای از  $N_c$  ورودی به‌صورت  $u^{N_c} = \{u_k, u_{k+1}, \dots, u_{k+N_c-1}\}$  می‌باشد که براساس راه‌کار کنترل افق لغزان، به‌عنوان چند ورودی اول به فرآیند اعمال شده و محاسبات برای زمان‌های نمونه‌برداری بعدی دوباره صورت می‌گیرد [۲۴].

### روش پیشنهادی در برنامه‌ریزی خودکار کوتاه‌مدت با رویکرد برخط برای انتقال فرآورده‌های نفتی

برنامه‌ریزی انتقال بسته‌های فرآورده‌های نفتی چندگانه مورد بررسی در قالب یک مسأله بهینه‌سازی مقید، به شکل تعیین توالی ارسال انواع بسته‌های فرآورده‌های نفتی در شبکه خطوط انتقال با هدف به حداکثر رساندن کارایی عملیات و کاهش تلفات و هزینه‌های انتقال، با در نظر گرفتن محدودیت‌های سیستم انجام می‌پذیرد. در این مقاله از شبکه انتقال نمونه مفروض در مقاله [۲] در شرایط فیزیکی یکسان با مدل دینامیکی فضای حالت متناظر استفاده شده است.

در این راستا، مدل غیرخطی فضای حالت زمان گسسته برای فرآیند تحت کنترل به‌صورت رابطه ۱ در نظر گرفته می‌شود.

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= f(x_k, u_k) \\ y_k &= g(x_k) \end{aligned} \quad (1)$$

که در بازه زمان گسسته  $k$ ،  $u_k \in \mathbb{R}^{m_u}$  برداری از ورودی‌های کنترل است.  $y_k \in \mathbb{R}^{m_y}$  برداری از خروجی سیستم بوده و  $x_k \in \mathbb{R}^n$  برداری از متغیر حالت می‌باشند. مسأله کنترلی که باید حل گردد محاسبه زنجیره‌ای از توالی ورودی‌های کنترل  $\{u_{k+j}\}$  می‌باشد، به‌طوری‌که سیستم را از حالت جاری  $x_k$  به حالت مطلوب  $x_s$  ببرد. حالت مطلوب  $(y_s, x_s, u_s)$  توسط بهینه‌سازی حالت ماندگار محلی یا براساس نیازهای مسأله معین می‌شود که ممکن است براساس یک هدف اقتصادی صورت گیرد. در شرایطی که اغتشاشات وارد شده به سیستم یا تغییر خروجی مرجع محل نقطه عمل‌کننده بهینه را تغییر دهد، حالت بهینه باید در هر مرحله زمانی دوباره محاسبه شود. هدف الگوریتم کنترل پیش‌بین یافتن مقدار کمینه عملی برای یک تابع هدف غیرخطی به‌صورت رابطه ۲ است.

$$\begin{aligned} \min_{u^{N_c}} J &= \sum_{j=1}^{N_p} \|e_{k+j}^y\|_{Q_j}^q + \|s_j\|_{R_j}^q \\ &+ \sum_{j=0}^{N_c-1} \|e_{k+j}^u\|_{S_j}^q + \|\Delta u_{k+j}\|_{T_j}^q \end{aligned} \quad (2)$$

به‌طوری‌که مدل فضای حالت غیرخطی سیستم به‌صورت محدودیت رابطه ۳ است.

$$\begin{aligned} x_{k+j} &= f(x_{k+j-1}, u_{k+j-1}), \quad \forall j=1, \dots, N_p \\ y_{k+j} &= g(x_{k+j}), \quad \forall j=1, \dots, N_p \end{aligned} \quad (3)$$

و محدودیت‌های نامساوی به‌صورت رابطه ۴ بیان می‌شود.

$$\begin{aligned} y_j - s_j &\leq y_{k+j} \leq \bar{y}_j + s_j, \quad \forall j=1, \dots, N_p \\ \underline{u} &\leq u_{k+j} \leq \bar{u}, \quad \forall j=0, \dots, N_c-1 \\ \Delta \underline{u} &\leq \Delta u_{k+j} \leq \Delta \bar{u}, \quad \forall j=0, \dots, N_c-1 \\ s_j &\geq 0, \quad \forall j=1, \dots, N_p \end{aligned} \quad (4)$$

برای تابع هدف مورد ارزیابی در رابطه ۲، رفتار



$$\begin{bmatrix} B_t & 0 & 0 \\ A_{t+1}B_t & B_{t+1} & 0 \\ A_{t+N_p-2}A_{t+N_p-3} \dots A_{t+1}B_t & B_{t+N_p-2} & 0 \\ A_{t+N_p-1}A_{t+N_p-2} \dots A_{t+1}B_t & B_{t+N_p-1} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_t \\ U_{t+1} \\ U_{t+N_p-2} \\ U_{t+N_p-1} \end{bmatrix} \quad (۶)$$

در این پژوهش، برای حل مسأله برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت در طول یک ماه، در هر بازه نمونه‌برداری بهینه‌سازی برخط با استفاده از راه‌کار کنترل پیش‌بین براساس مدل فضای حالت ارائه شده و همچنین محدودیت‌های سیستم انتقال به منظور برآورده کردن تقاضای مراکز مصرف براساس نتایج حاصله از برنامه‌ریزی بلندمدت در پژوهش قبلی [۳] اجرا شده است. برنامه‌ریزی خودکار کوتاه‌مدت پیشنهادی در انتهای هر روز با استفاده از مدل فضای حالت پیش‌بین مطابق رابطه ۵ و براساس راه‌کار کنترل افق لغزان، شاخص عملکرد مطلوب سیستم را برای یک افق پیش‌بین هفتگی  $N_p = 21$ ، بهینه می‌کند و سپس سه نمونه اول توالی  $N_c = 3$ ، به‌عنوان توالی کنترل بهینه روز بعدی به سیستم انتقال اعمال می‌شود. برای رسیدن به این مهم تابع هدف شامل مجموعه‌ای از اهداف کمینه‌سازی به‌صورت رابطه ۷ مورد استفاده قرار گرفت.

$$J = \sum_{i=1}^{N_p} \|R(t+i|t) - Y(t+i|t)\|_{\alpha_i}^2 + \sum_{i=0}^{N_p-1} \|U(t+i|t) - U(t-1+i|t)\|_{\beta_i}^2 \quad (۷)$$

که در آن کمینه‌سازی اختلاف بین بردار تقاضا و خروجی سیستم انتقال با بردار وزن‌دهی  $\alpha = [\alpha_1 \ \alpha_2 \ \dots \ \alpha_{N_p-1} \ \alpha_{N_p}]^T$  در نظر گرفته می‌شود و مقادیر مطلوب به‌عنوان بردار تقاضا

$$R(t) = [R_1(t) \ R_2(t) \ \dots \ R_{q-1}(t) \ R_q(t)]^T \in \mathbb{R}^q$$

براساس نتایج به‌دست آمده در مقاله قبلی [۳] تحت عنوان برنامه‌ریزی بلندمدت انتقال تغییر می‌کنند. همچنین تغییر نوع مواد ارسالی متوالی موجب افزایش تلفات تداخل می‌شود.

چرا که روش ارائه شده در این مقاله به‌عنوان برنامه‌ریزی کوتاه مدت تکمیل کننده برنامه‌ریزی بلندمدت ارائه شده در تحقیق [۳] است. در این راستا، برای بیان وجود هر نوع ماده در هر بخش از سیستم انتقال از یک متغیر حالت استفاده شده است. ورودی‌های کنترل به‌صورت انتخاب نوع فرآورده انتقالی به شبکه و مسیر مشخص انتقال از پالایشگاه به سمت یکی از مراکز ذخیره‌سازی است. با در نظر گرفتن ارتباطات و توالی‌های ممکن در توپولوژی شبکه مفروض، معادلات کلی فضای حالت شبکه انتقال که در مقاله بخش اول به تفصیل بیان شد، به‌صورت رابطه ۵ قابل بیان است.

$$\begin{aligned} X(t+1) &= A(S(t))X(t) + B(S(t), U(t), X(t))U(t) \\ Y(t) &= C X(t) \end{aligned} \quad (۵)$$

برای شبکه انتقال مورد بررسی در این تحقیق، وضعیت مواد موجود در بخش‌ها به‌شکل بردار حالت  $X(t) = [X_1(t) \ X_2(t) \ \dots \ X_{n-1}(t) \ X_n(t)]^T \in \mathbb{R}^n$  به طول  $n = 11$  بیان می‌شود. همچنین ورودی کنترل به‌صورت نوع ماده ورودی به سیستم انتقال  $U(t) \in \{1, 2, \dots, P\}$  و مسیر حرکت توسط ورودی کنترل دودویی  $S(t) \in \{0, 1\}$  تعیین می‌شود. در نهایت بردار  $Y(t) = [Y_1(t) \ Y_2(t) \ \dots \ Y_{q-1}(t) \ Y_q(t)]^T \in \mathbb{R}^q$  به طول  $q = 6$  مبین بردار خروجی شامل سه نوع ماده تحویلی به دو مرکز ذخیره‌سازی است. از آنجا که با استفاده توصیف فضای حالت پیشنهادی قابلیت شبیه‌سازی رفتار سیستم انتقال برای افق‌های آینده براساس ورودی‌های کنترل مقدور است، مطابق رابطه ۶، پیش‌بینی رفتار سیستم در بازه‌های زمانی آینده براساس شرایط اولیه و ورودی‌های کنترل به شکل یک فرم بسته<sup>۱</sup> بیان می‌گردد.

$$\begin{bmatrix} X_{t+1} \\ X_{t+2} \\ \dots \\ X_{t+N_p-1} \\ X_{t+N_p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_t \\ A_{t+1}A_t \\ \dots \\ A_{t+N_p-2}A_{t+N_p-3} \dots A_{t+1}A_t \\ A_{t+N_p-1}A_{t+N_p-2} \dots A_{t+1}A_t \end{bmatrix} X_t +$$

1. Closed Form

ماده انتقالی  $U(t) = [U(t), U(t+1), \dots, U(t+N_p-1)]$  و همچنین، بردار متغیرهای تصمیم مسیر حرکت  $S(t) = [S(t), S(t+1), \dots, S(t+N_p-1)]$  برای بازه‌های زمانی موجود در افق پیش‌بین استفاده شده است.

### مطالعه موردی

#### شبیه‌سازی و ارزیابی نتایج

برای تکمیل نتایج برنامه‌ریزی بلندمدت در ساختار این پژوهش، از شبکه خطوط انتقال فرآورده‌های نفتی نمونه که در شکل ۱ نشان داده شده است با در نظر گرفتن محدودیت‌های ساختاری و عملیاتی موجود استفاده شده است. همان طور که در بخش ۲ بیان شد استراتژی پیشنهادی برای برنامه‌ریزی یک شبکه انتقال شامل دو بخش "بلندمدت" و "کوتاه‌مدت" است. با مشخص بودن درخواست‌های هفتگی توسط مراکز تصمیم‌گیری براساس توپولوژی شبکه، شرایط عرضه و تقاضا و اولویت‌ها و محدودیت‌های شبکه انتقال ابتدا فرآیند برنامه‌ریزی بلندمدت برای دستیابی یک برنامه کامل در جهت تعدیل اهداف و خواسته‌های شبکه خطوط انتقال مطابق مقاله [۳] اجرا می‌شود، سپس نتایج حاصله از برنامه‌ریزی بلندمدت به‌عنوان مسیر مرجع<sup>۱</sup> برای برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت در نظر گرفته می‌شود. لذا با داشتن نتایج بهینه‌سازی مقاله [۳]، عملکرد و نتایج روش پیشنهادی برای برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت پیشنهادی در دو سناریوی زیر مورد سنجش قرار می‌گیرد.

#### سناریوهای شبیه‌سازی

برنامه‌ریزی خودکار کوتاه‌مدت انتقال برای شبکه انتقال فرآورده‌های نفتی بدون در نظر گرفتن اختلال ذخیره‌سازی مقادیر مطلوب فرآورده‌های نفتی در بازه‌های زمانی معین از اهداف اصلی برنامه‌ریزی است. برای رسیدن به این مهم، با در نظر گرفتن

که این مهم با در نظر گرفتن ترم دوم تابع هزینه و با بردار وزندهی  $\lambda = [\lambda_0 \lambda_1 \dots \lambda_{N_p-2} \lambda_{N_p-1}]^T$  - متناسب با نوع هر دو بسته مواد انتقالی متوالی - در طول افق پیش‌بینی کمینه می‌شود. همچنین به‌عنوان یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های برنامه‌ریزی، حداکثر اختلاف مجاز بین مقدار فرآورده‌های ذخیره شده و مقادیر مطلوب در روز انتهایی ماه با عنوان محدودیت انتهایی ماه، به‌صورت رابطه ۸ در حل مسأله کنترل پیش‌بین کوتاه‌مدت در نظر گرفته شد.

(۸)

$$\|R(t+d|t) - Y(t+d|t)\|_1 < \Delta_p, t+d=90$$

که در آن عملگر  $\|M\|_1 = \sum_i |M_i|$  معادل نرم اول و مقدار  $\Delta_p = 3$  حداکثر مقدار مجاز اختلاف بین مقادیر برنامه‌ریزی شده و مورد تقاضای بسته‌ها است. در نهایت مسأله برنامه‌ریزی خطوط انتقال براساس استراتژی کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل به فرم مسأله بهینه‌سازی افق محدود و دارای محدودیت رابطه ۹ تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned} \min_{S(t), U(t)} J(R(t), X(t), S(t), U(t)) \\ s.t.: \\ \begin{cases} X(t+i) = A(S(t+i-1), X(t+i-1)) + \\ B(S(t+i-1), U(t+i-1), X(t+i-1))U(t+i-1) & \forall i=1,2,\dots,N_p, \\ Y(t+i) = C X(t+i) \end{cases} \\ g(R(t), X(t)) < 0, \\ X(t) = [X(t+1), X(t+2), \dots, X(t+N_p)], \\ R(t) = [R(t+1), R(t+2), \dots, R(t+N_p)], \\ S(t) = [S(t), S(t+1), \dots, S(t+N_p-1)] \in \{0,1\}^{N_p}, \\ U(t) = [U(t), U(t+1), \dots, U(t+N_p-1)] \in \{1,2,\dots,P\}^{N_p} \in N_p. \end{aligned} \quad (9)$$

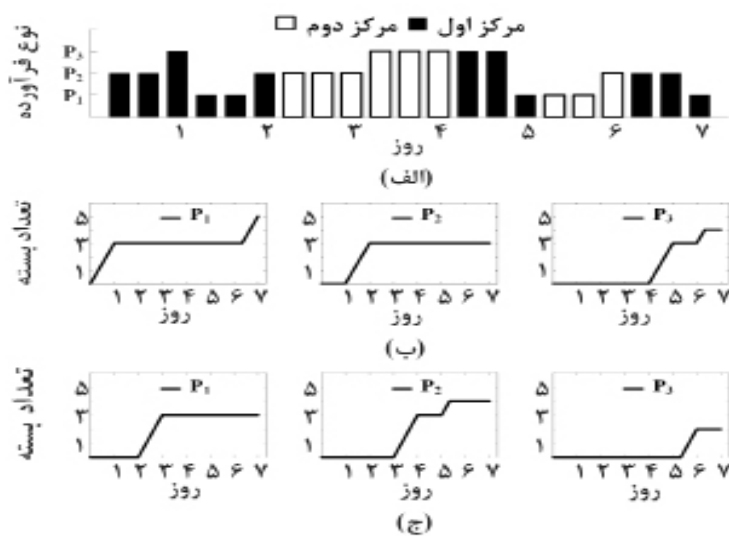
که در آن  $R(t)$  بیانگر مقادیر مطلوب برای مراکز ذخیره‌سازی در طول افق پیش‌بینی است که مطابق با نتایج برنامه‌ریزی موجود در مقاله بخش اول این تحقیق [۳] به‌دست می‌آید. همچنین، قید  $g(R(t), X(t)) < 0$  شامل محدودیت برنامه‌ریزی ماهیانه به‌صورت رابطه ۸ است. تعریف تابع هدف نیازمند بررسی روش بهینه‌سازی نیز است. با توجه به غیرخطی بودن معادلات پیش‌بین به‌دست آمده و همچنین غیرخطی بودن تابع هدف مورد نظر، در این پژوهش از نسخه گسسته الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک به‌عنوان یک روش انتخاب تصادفی، برای تعیین بردار متغیرهای تصمیم نوع

بلندمدت وجود دارد لذا در صورتی که از اختلالات ناشی از عدم قطعیت، مدل سازی و سایر عوامل صرف نظر شود، با ثابت بودن تابع هدف، نتایج روش برنامه ریزی بلندمدت با رویکرد برون خط و خودکار به صورت برخط یکسان هستند. شکل ۵ نتایج برنامه ریزی کوتاه مدت بدون حضور اختلال را به شکل تغییرات خروجی و مقادیر مطلوب هفتگی مربوط به تحویل مواد به مراکز ذخیره سازی با استفاده از راه کار کنترل پیش بین نشان می دهد. براساس برنامه بهینه به دست آمده مواد انتقالی به مراکز ذخیره سازی با مقادیر تقاضا در انتهای هر هفته برابری می کند. با توجه به فرض عدم وجود اختلال، توانایی ردیابی مسیر مرجع بلندمدت به عنوان یک پاسخ عملی بهینه مشهود است.

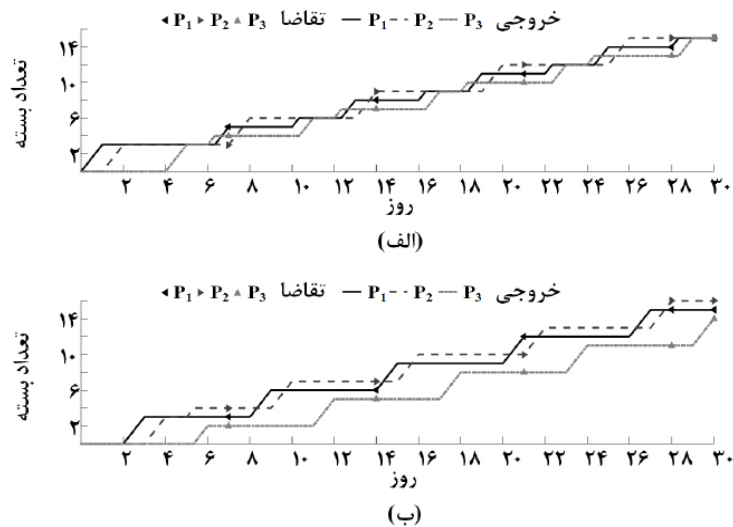
#### برنامه ریزی خودکار کوتاه مدت انتقال فرآورده های نفتی با رویکرد برخط

در انواع مسائل برنامه ریزی، به دلیل وجود محدودیت ها و همچنین غیر چندجمله ای سخت بودن مسأله، فرآیند بهینه سازی برای بازه های زمانی بزرگ با پیچیدگی های محاسباتی روبرو است.

خروجی برنامه ریزی بلندمدت [۳]، به عنوان مقادیر مسیر مرجع برای ذخیره سازی و انتقال مواد و لحاظ کردن این مقدار در تابع هدف، الگوریتم ژنتیک با متغیرهای تصمیم گسسته برای انتخاب نوع ماده انتقالی از پالایشگاه و متغیرهای دودویی برای انتخاب مسیر ماده ارسالی، در هر تکرار سعی در یافتن پاسخ هایی دارد که علاوه بر کاهش تابع هزینه انتقال، محدودیت های سیستم انتقال را نیز ارضا نماید. در این راستا، در هر بازه نمونه برداری واقع در انتهای هر روز، فرآیند برنامه ریزی به صورت بهینه سازی برای برنامه ریزی یک هفته آینده اجرا شده و سپس ورودی کنترلی مربوط به اولین روز به سیستم اعمال می شود. شکل ۴ توالی انتقال بهینه در طول افق پیش بین هفتگی را به همراه تغییرات خروجی سه نوع فرآورده نفتی ( $P_1, P_2, P_3$ ) در مراکز ذخیره سازی نشان می دهد. برای کاهش تابع هزینه مطابق رابطه ۷، در بهینه ترین حالت ممکن فرآیند برنامه ریزی خودکار سعی در رسیدن به مسیر مرجع به دست آمده از برنامه ریزی بلندمدت دارد. به طور قطعی یک پاسخ عملی بدون نقض محدودیت های سیستم به صورت برنامه ریزی



شکل ۴ ورودی کنترلی بهینه به همراه تغییرات خروجی در طول افق پیش بین الف) مواد ارسالی از پالایشگاه ب) مقادیر ذخیره سازی شده در مرکز اول ج) مقادیر ذخیره سازی شده در مرکز دوم



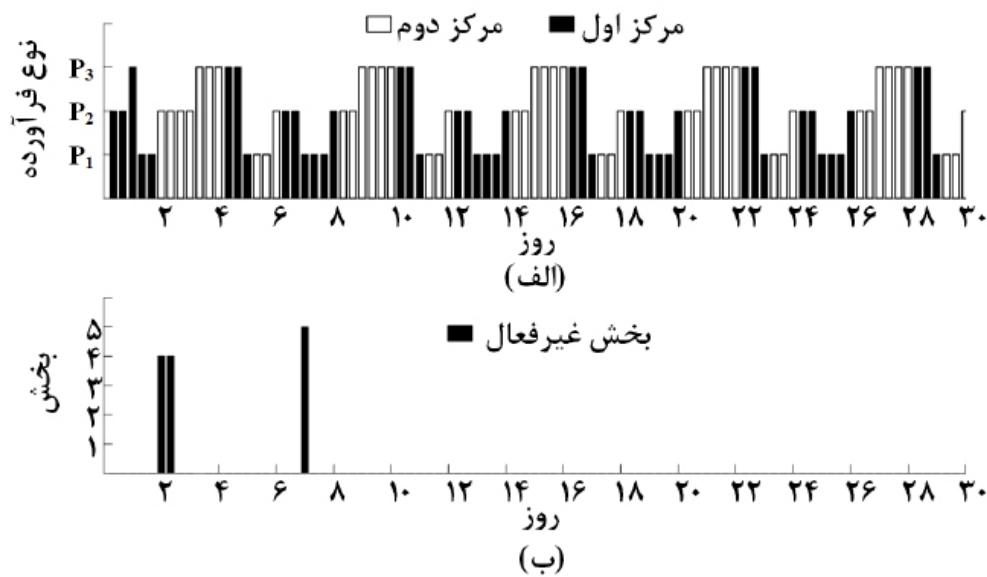
شکل ۵ برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت بدون حضور اختلال (الف) مرکز ذخیره‌سازی اول (ب) مرکز ذخیره‌سازی دوم

خواهند بود، انتقال مواد در سایر مسیرهای مجاز برنامه‌ریزی می‌شود. طوری که فرآیند بهینه‌سازی با در نظر گرفتن این محدودیت سعی در تعدیل اثر اختلال موجود در سیستم تا حد ممکن دارد. شکل ۶ نتایج حاصل از برنامه‌ریزی خودکار کوتاه‌مدت ماهیانه در حضور اختلال قطع بخش‌هایی از شبکه انتقال مفروض، را نشان می‌دهد. براساس نتایج به‌دست آمده هنگام غیرفعال بودن بخش چهارم شبکه خطوط انتقال واقع شده در مسیر اول در دو بازه‌زمانی روز دوم و همچنین غیرفعال بودن بخش پنجم در مسیر انتقال دوم در یک بازه زمانی موجود در روز هفتم، فرآیند برنامه‌ریزی به مدیریت انتقال بسته‌های مواد در مسیرهای فعال پرداخته است.

#### بررسی و تفسیر نتایج

از دسترس خارج شدن یا قطع شدن مسیرهای شبکه یکی از سخت‌ترین مشکلاتی است که در شرایط بحرانی ممکن است در شبکه‌های انتقال رخ دهد. این امر می‌تواند به دلایل مختلف از جمله بروز مشکل در خطوط ارتباطی، مراکز ذخیره‌سازی، تولید پالایشگاه‌ها و یا حتی مربوط به عملیات پمپاژ مواد درون شبکه باشد.

یک روش برای رفع مشکل پیچیدگی محاسباتی استفاده از رویکرد بهینه‌سازی برخط است که در آن با تقسیم محاسبات بهینه‌سازی در بازه‌های نمونه‌برداری در عوض اجرای یک مرحله‌ای محاسبات به‌صورت برون‌خط، مشکل پیچیدگی محاسباتی در فرآیند بهینه‌سازی تعدیل می‌شود. همچنین یکی از مزایای راه‌کار برنامه‌ریزی برخط پیشنهادی، توانایی بررسی شرایط جدید سیستم از جمله اختلال‌های موجود در قالب یک سیستم برنامه‌ریزی خودکار در هر بازه نمونه‌برداری و جبران خودکار اثر اختلال است. در این سناریو غیرفعال شدن یا مسدود شدن بخش‌هایی از خط یا شبکه انتقال به‌عنوان اختلال در نظر گرفته می‌شود. در این حالت راه‌کار کنترل پیش‌بین ارائه شده با در نظر گرفتن شرایط جدید سیستم در هر بازه نمونه‌برداری سعی در کاهش اختلاف میزان ذخیره‌سازی مواد با مقدار مطلوب و بهینه آن دارد. در هر بازه نمونه‌برداری اختلال حاضر و همچنین پیش‌بینی وجود اختلال در بازه‌های زمانی آینده به منظور ترمیم و یا عملیات تعمیر و نگهداری لحاظ می‌گردد. بدین منظور با تثبیت متغیر کنترل مسیر انتقال  $S(t)$  در بازه‌های زمانی معلوم و با لحاظ بخش‌هایی از شبکه که از دسترس خارج

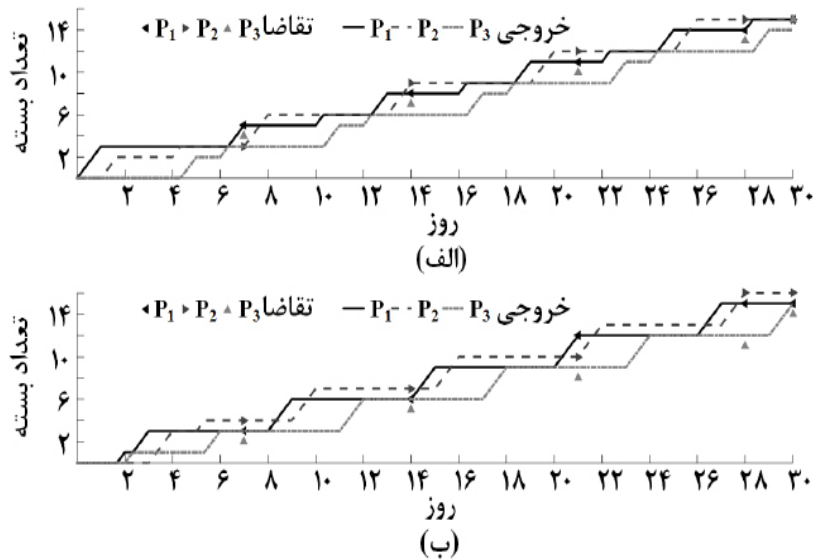


شکل ۶ برنامه‌ریزی خودکار کوتاه‌مدت در حضور اختلال (الف) برنامه‌ریزی انتقال بهینه (ب) بخش‌های غیرفعال

انواع  $P_1$  و  $P_2$  در انتهای ماه به‌طور کامل برآورده شده است. درحالی‌که مقدار ذخیره‌سازی نوع  $P_3$  در انتهای ماه با مقادیر مطلوب دارای اختلاف مجاز یک واحدی است. این امر به‌دلیل اهمیت وزنی بیشتر برای انواع فرآورده‌های  $P_1$  و  $P_2$  در تابع هدف برنامه‌ریزی سیستم انتقال است. با توجه به گستردگی شبکه‌های خطوط انتقال فرآورده‌های نفتی و قرارگیری مسأله برنامه‌ریزی این شبکه‌ها در زمره مسائل غیرچندجمله‌ای سخت، در برخی موارد برنامه‌ریزی این شبکه‌ها براساس تصمیمات تجربی مراکز مدیریتی صورت می‌گیرد. همچنین بروز انواع اختلال موجب غیرمعتبر شدن برنامه اولیه می‌گردد و در چنین شرایطی مراکز مدیریت و دیسپاچینگ دنباله‌ای از تصمیمات تجربی را برای مدیریت شبکه انتقال تعیین می‌کنند.

راهکار برون‌خط پیشنهادی در مقاله اول این پژوهش شامل یک روش برنامه‌ریزی بلندمدت حتی برای شبکه‌های انتقال بزرگ می‌باشد. حال اینکه استفاده از نتایج به دست آمده در برنامه‌ریزی بلندمدت برای تکمیل عملیات

در صورت بروز اختلال، برنامه‌ریزی برون‌خط به‌دلیل عدم لحاظ شرایط پیش‌بینی نشده اختلال، اعتبار خود را از دست می‌دهد. در حالی‌که برنامه‌ریزی خودکار انتقال در هر بازه نمونه‌برداری با به‌روزرسانی شرایط جدید به اجرای بهینه‌سازی می‌پردازد. به‌دلیل حضور اختلال، به‌دست آوردن توالی قبلی که محدودیت‌های تقاضای آخر ماه و همچنین مقادیر مطلوب هفتگی را به‌طور کامل برآورده کند، میسر نیست. اما انتظار می‌رود که محدودیت اختلاف مجاز مقدار تقاضای بازه‌های زمانی آخر ماه از مقدار مطلوب تا حد ممکن حفظ شود. شکل ۷ نتایج برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت در حضور اختلال را به شکل مقادیر تجمعی خروجی در کنار مقادیر مطلوب هفتگی مواد در مراکز ذخیره‌سازی با استفاده از راهکار کنترل پیش‌بین را نشان می‌دهد. براساس نتایج حاصله، اختلاف مقدار مطلوب و برنامه‌ریزی شده برای انتهای ماه از مقدار مجاز  $\Delta_p$  برای هر محصول تجاوز نمی‌کند. با دقت در نتایج مشاهده می‌شود که مقدار مطلوب ذخیره‌سازی



شکل ۷ برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت در حضور اختلال الف) مرکز ذخیره‌سازی اول ب) مرکز ذخیره‌سازی دوم

پیش‌بین به‌دلیلی اجرای برخط و بررسی وضعیت آینده شبکه خطوط لوله انتقال در یک افق محدود، علی‌رغم افزایش تعداد پنجره‌های زمانی، کاهش پیچیدگی حل مسأله بهینه‌سازی مقید را به‌همراه دارد. همچنین اجرای برخط بهینه‌سازی قابلیت بررسی وجود و رفع اثر اختلال در هر بازه نمونه‌برداری را تا حد ممکن میسر می‌کند. در این مقاله با در نظر گرفتن نتایج حاصله از برنامه‌ریزی بلندمدت به‌عنوان مسیر مرجع برای برنامه‌ریزی خودکار کوتاه‌مدت، به برنامه‌ریزی برخط روزانه سیستم انتقال در حضور اختلال شامل مسدود شدن بخش‌هایی از خطوط انتقال پرداخته شده است. طبق نتایج به‌دست آمده راه‌کار کنترل پیش‌بین با به‌روزرسانی تصمیمات کنترلی در هر بازه نمونه‌برداری و در نظر گرفتن شرایط آینده سیستم توانایی برطرف کردن اثرات اختلال را تا حد ممکن دارد.

برنامه‌ریزی برخط ارائه شده در این پژوهش، علاوه بر مزایای مرتفع کردن مشکل پیچیدگی محاسباتی، توانایی برنامه‌ریزی خودکار و تعیین بهترین توالی ممکن در هنگام بروز اختلال را در سطحی نزدیک‌تر به سیستم مهیا می‌کند. برای افزایش سرعت عمل روش ارائه شده در مواجهه با اختلال، می‌توان با کاهش زمان توالی پیش‌بینی به کمتر از ۸ h و همچنین محدود کردن نمونه‌های اعمالی به نمونه اول توالی، عملکرد روش پیشنهادی را به حالت بلادرنگ نزدیک‌تر کرد.

### نتیجه‌گیری

با توجه به فرارگیری مسأله برنامه‌ریزی خطوط انتقال در زمره مسائل غیرچندجمله‌ای سخت دارای محدودیت، بهینه‌سازی آن با استفاده از روش‌های دقیق به‌دلیل پیچیدگی محاسباتی - با زمان و هزینه قابل قبول امکان‌پذیر نیست. راه‌کار کنترل

### مراجع

[1]. Khlebnikova E, Sundar K, Zlotnik A, Bent R, Ewers M, Tasseff B (2020) Optimal economic operation of liquid petroleum products pipeline systems, *AIChE Journal*, 67, 4: e17124.

[۲]. کبیری م، شهرخی م، عیدی ع. براهیمی ا، برنامه‌ریزی حمل و نقل فرآورده‌های نفتی چندگانه با در نظر گرفتن پنجره زمانی برای عرضه، تقاضا و مسیرهای حمل و نقل (مطالعه موردی: استان کردستان)، *مجله مهندسی*

صنایع شریف، ۳۳، ۱، ۱۳۹۶.

[۳]. قناعتی س. ح. و آقای ش.، برنامه‌ریزی ارسال فرآورده‌های نفتی چندگانه در شبکه خطوط انتقال براساس راه‌کار کنترل پیش‌بین: مدل‌سازی دینامیکی شبکه و برنامه‌ریزی بلندمدت، پژوهش نفت، دوره ۳۰، ۱-۹۹، ۱۱۲-۱۳۹۹، ۹۹.

[4]. Pellerin R, Perrier N (2019) A review of methods, techniques and tools for project planning and control, *International Journal of Production Research*, 57, 7: 2160-2178.

[5]. Hane C A, Ratliff H D (1995) Sequencing inputs to multi-commodity pipelines, *Annals of Operations Research*, 57, 1: 73-101.

[6]. Mostafaei H, Castro P M, Oliveira F, Harjunkski I (2020) Efficient formulation for transportation scheduling of single refinery multiproduct pipelines, *European Journal of Operational Research*, 293, 2: 731-747.

[7]. Cafaro D C, Cerdá J (2009) Optimal Scheduling of Refined Products Pipelines with Multiple Sources," *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 48, 14: 6675-6689.

[8]. Tsunoda Meira W H, Magatão L, Relvas S, Barbosa-Póvoa A P, Neves Jr F, Arruda L V (2018) A matheuristic decomposition approach for the scheduling of a single-source and multiple destinations pipeline system, *European Journal of Operational Research*, 268, 2, 665-687.

[9]. Tsunoda Meira W H, Magatão L, Neves Jr F, Arruda L V R, Vaqueiro J P, Relvas S, Barbosa-Póvoa A P (2021) A solution framework for the long-term scheduling and inventory management of straight pipeline systems with multiple-sources, *Computers and Operations Research*, 127: 105143.

[10]. Bueno L, Magatão L, Arruda L V R, Neves F, Monteiro A, Vaqueiro J P (2020) Assigning and sequencing batches and blends of oil derivatives in a mesh-like pipeline network, *Computers and Chemical Engineering*, 139: 106894.

[11]. Rejowski Jr R, Pinto J M (2008) A novel continuous time representation for the scheduling of pipeline systems with pumping yield rate constraints, *Computers and Chemical Engineering*, 32, 4-5: 1042-1066.

[12]. Ghallab M, Nau D, Traverso P (2004) *Automated Planning: theory and practice*, Elsevier.

[13]. Gupta D, Maravelias C T, Wassick J M (2016) From rescheduling to online scheduling, *Chemical Engineering Research and Design*, 116, 83-97.

[14]. De Roo G, and Hillier J (2016) *Complexity and planning: Systems, assemblages and simulations*, Routledge.

[15]. Russell S J, Norvig P (2016) *Artificial intelligence: a modern approach*, Malaysia; Pearson Education Limited.

[16]. Shobrys D E, White D C (2002) Planning, scheduling and control systems: why cannot they work together, *Computers and Chemical Engineering*, 26, 2: 149-160.

[17]. Subramanian K, Maravelias C T, Rawlings J B (2012) A state-space model for chemical production scheduling, *Computers and Chemical Engineering*, 47, 97-110.

[18]. Bellman R (1966) *Dynamic programming*, Science, 153: 3731, 34-37.

[19]. Nau D S (2007) Current trends in automated planning, *AI magazine*, 28, 4: 43-43.

[20]. Yüzgeç U, Palazoglu A, Romagnoli J A (2010) Refinery scheduling of crude oil unloading, storage and processing using a model predictive control strategy, *Computers and Chemical Engineering*, 34, 10: 1671-1686.

[21]. Ji J, Khajepour A, Melek W W, Huang Y (2016) Path planning and tracking for vehicle collision avoidance based on model predictive control with multiconstraints, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 66: 2, 952-964.

[22]. Ghenaati S H, Aghaei S (2016) Speed control of autonomous underwater vehicle with constraints using model predictive control, *International Journal of Coastal and Offshore Engineering*, 3: 27-33.

[23]. Kwakernaak H, Sivan R (1972) *Linear optimal control systems*, Wiley-interscience New York.

[24]. Fernandez-Camacho E, Bordons-Alba C (1995) *Model predictive control in the process industry*, Springer London.







over moving horizons until the end of the month.

## Results and Discussion

### Simulation Results

Due to the stochastic characteristics of the pipeline disturbances and also the unexplained time required to affix these disruptions in the case of pipeline breakdown occurs, offline programming fails its validity since the lack of disturbance consideration while programming, however, presented automated planning performed in this study administers optimization in each sampling interval by updating the new conditions and model to manage transportation just over permissive routes. This study considers pipeline breakdown so that it restricts some transportation paths by obligatory manipulating while a breakdown makes some branches inactive for time instance. Figure 2 illustrates optimal sequences as automated planning in the presence of breakdown over a month and Figure 3 shows optimal sequences based on the state space model and model predictive control in the form of transported batches and demands for two available depots in the network. Based on obtained results, online planning modifies pipeline breakdowns satisfying constraint on demand of the last day of the month.

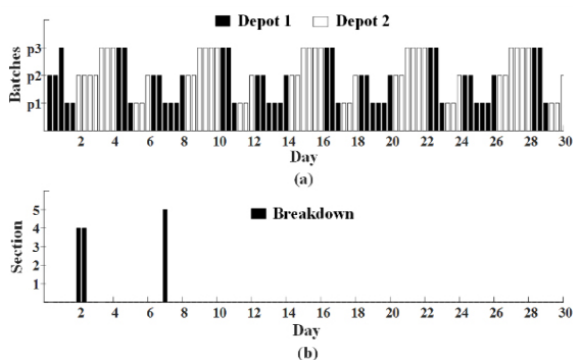


Fig. 2 Automated planning in the presence of breakdown. a) Pumping sequences b) Breakdown.

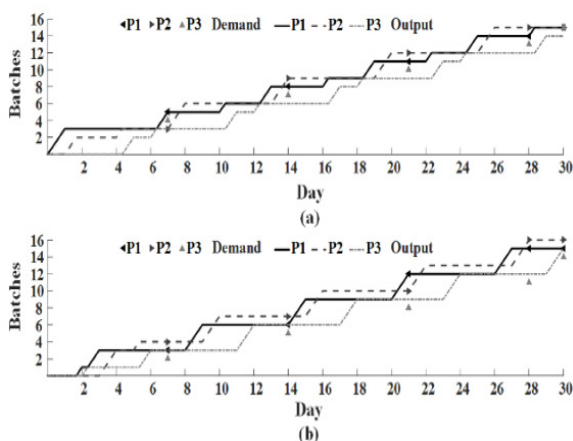


Fig. 3 Optimization results of transporting over a month. a) Depot1 b) Depot 2

According to the achieved results, transported and delivered product batches in depot 1 and depot 2 for product types P1 and P2 on the last day of the month has been processed completely. While the number of stored batches for product type P3 in both depots at the last timestep of the month endure a permissible difference of one unit with respect to the desired demand. This process has fulfilled the storing demands of the two first products accurately rather than product type P3 since greater optimization weights defined in the planning objective function.

## Conclusions

The purpose of this study is to provide a method for optimally planning the transportation of various petroleum products in multiple pipeline networks considering the constraints of the pipeline network and breakdown disturbances. Presented automated planning by considering the new conditions of the network in each sampling interval attains a suboptimal solution to track the desired demands. Based on the results, fulfilling the structural constraints, the presented online control approach permits system output tracking to the desired demands in the best way possible.

## References

1. Ghenaati S H, Aghaei S (2020) Planning the transportation of multiple petroleum products in pipeline network based on model predictive control: modeling and long-term planning, *Journal of Petroleum Research*, 30, 110: 99-112.
2. Hane C. A. and Ratliff H. D. (1995) Sequencing inputs to multi-commodity pipelines, *Annals of Operations Research*, 57,1: 73-101.
3. Bueno L, Magatão L, Arruda L V R, Neves F, Monteiro A, Vaqueiro J P (2020) Assigning and sequencing batches and blends of oil derivatives in a mesh-like pipeline network, *Computers and Chemical Engineering*, 139, 106894.
4. Pellerin R, Perrier N. (2019) A review of methods, techniques and tools for project planning and control, *International Journal of Production Research*, 57, 7: 2160-2178.
5. De Roo G. and Hillier J. (2016) Complexity and planning: Systems, assemblages and simulations, Routledge.
6. Mayne D Q (2014) Model predictive control: Recent developments and future promise, *Automatica*, 50, 12: 2967-2986.
7. Yüzgeç U, Palazoglu A, Romagnoli J A (2010) Refinery scheduling of crude oil unloading, storage and processing using a model predictive control strategy, *Computers and Chemical Engineering*, 34, 10: 1671-1686.