برنامه‌ریزی ارسال فرآورده‌های نفتی چندگانه در شبکه خطوط انتقال براساس راه‌کار کنترل پیش‌بین: مدل‌سازی دینامیکی شبکه و برنامه‌ریزی بلندمدت

سید حسین قناعتی و شهرام آقایی*

دانشکده مهندسی برق، دانشگاه یزد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۱۳

چکیده

به منظور تأمین نیازهای اساسی سوختی مناطق مختلف، فرآورده‌های نفتی تولید شده توسط پالایشگاه‌ها به‌سمت مراکز مصرف انتقال می‌یابند. شبکه خطوط لوله انتقال یکی از مهم‌ترین راه‌های حمل فرآورده‌های نفتی و مشتقات پتروشیمی در دنیا و از جمله در ایران است. از مهم‌ترین مسائل در انتقال فرآورده‌های نفتی درون شبکه انتقال، برنامه‌ریزی ارسال مواد نفتی درون خطوط لوله‌های انتقال است. مسأله مورد نظر شامل انواع مختلف محدودیت‌ها در حوزه‌های تولید، انتقال و ذخیره‌سازی است. در این مقاله ابتدا برای یک شبکه خطوط انتقال نمونه، یک مدل دینامیکی فضای حالت با خاصیت پیش‌بینی پیشنهاد شده و سپس با استفاده از استراتژی کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل دینامیکی، روشی جدید برای برنامه‌ریزی بلندمدت ماهانه در قالب یک مسأله بهینه‌سازی مقید افق محدود ارائه شده است. برای جلوگیری از افزایش زمان حل، مسأله مورد نظر به سه مسأله متوالی ده روزه تقسیم شده و با ایده افق لغزان کنترل پیش‌بین، بهینه‌سازی فرآیند زمان‌بندی به‌طور متوالی برای مدت ده روز اجرا گردید و با حل بهینه‌سازی برون‌خط بازه‌های ده روزه، نتایج برنامه‌ریزی بلندمدت برای طول مدت یک ماه به‌دست آمد. نتایج بهینه‌سازی نشان می‌دهد مقادیر برنامه‌ریزی شده در انتهای ماه با مقادیر مطلوب برابر بوده و راه‌کار کنترلی ارائه شده می‌تواند ابزار مناسب برای برنامه‌ریزی بلندمدت شبکه‌های خطوط انتقال فرآورده‌های نفتی باشد.

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

*مسؤول مکاتبات
آدرس الکترونیکی aghaei@yazd.ac.ir
شناسه دیجیتال: (DOI: 10.22078/pr.2020.3802.2735)

مقدمه

با توجه به محدود بودن و عدم توزیع یکنواخت منابع ذخایر نفت و گاز روی سطح کره زمین، توزیع متقارن پالایشگاه‌ها و سایر تأسیسات در سطح یک منطقه مقدور نیست. لذا برای ارسال نفت خام اولیه به پالایشگاه‌ها و همچنین برای استفاده از فرآورده‌های نفتی همچون انواع سوخت‌ها در نقاط مختلف جغرافیایی، بایستی این فرآورده‌ها را از مناطق تولید به مناطق مصرف یا ذخیره‌سازی منتقل کرد. در این شرایط استفاده از خطوط لوله انتقال علی‌رغم هزینه‌های اولیه بالاتر، می‌تواند سرعت، دقت و امنیت بیشتری را به‌همراه داشته باشد [۱]. با توجه به تولید انواع فرآورده‌های نفتی در ایران، ضرورت مدل‌سازی و برنامه‌ریزی[1] شبکه خطوط انتقال برای کاهش هزینه‌های عملیاتی انتقال مشهود است [۲].

یکی از چالش‌های مهم این حوزه، انتخاب روشی مناسب برای زمان‌بندی انتقال فرآورده‌های نفتی از نقاط تولید به نقاط مصرف است [۳]. زمان‌بندی فرآیند انتقال فرآورده‌های نفتی در شبکه خطوط انتقال، برنامه‌ریزی زمانی حرکت مواد از منابع پالایشگاهی تا مراکز مصرف است. در این راستا، برنامه‌ریزی بلندمدت به تعیین توالی انتقال محموله‌های حاوی فرآورده‌های نفتی، از پالایشگاه‌ها به‌سمت مراکز ذخیره‌سازی، در بازه‌های زمانی طولانی مدت می‌پردازد [۴]. برای برنامه‌ریزی شبکه خطوط انتقال فرآورده‌های نفتی، روش‌های مبتنی بر برنامه‌ریزی عدد صحیح خطی[2] و برنامه‌ریزی عدد صحیح غیرخطی[3] استفاده زیادی داشته‌اند. در تحقیقاتی با طرح مسأله زمان‌بندی انتقال گسسته زمان برروی یک شبکه انتقال کوچک با یک پالایشگاه و یک خط انتقال منتهی به چند مرکز ذخیره‌سازی، به کمینه‌سازی میزان تداخل مواد انتقالی به روش برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح پرداخته شده است [۱ و ۳]. هران و همکارانش یک راه‌کار زمان گسسته براساس برنامه‌ریزی خطی برای زمان‌بندی کوتاه‌مدت پنج روزه در شبکه خطوط انتقال پیچیده‌تر حاوی خطوط انتقال دوجهته معرفی کردند [۴]. زاغیان و مصطفایی از روش برنامه‌ریزی عدد صحیح خطی در برنامه‌ریزی انتقال مواد در یک شبکه واقعی شامل یک پالایشگاه و چند مرکز ذخیره‌سازی با هدف کمینه‌سازی هزینه‌های انتقال استفاده کردند [۵]. ضمن اینکه کافارو و همکارانش به بهینه‌سازی هزینه‌های انتقال براساس روابط غیرخطی موجود بین نرخ جریان[4] مواد و هزینه‌های انتقال با استفاده از روش برنامه‌ریزی غیرخطی پرداخته‌اند [۶]. کرشتاین با درنظر گرفتن یک مسأله برنامه‌ریزی اقتصادی مقید، به معرفی یک راه‌کار ابتکاری[5] برای تعیین حجم و زمان انتقال بسته‌های مواد در خطوط لوله انتقال در صنایع شیمیایی پرداخته است [۷]. کافارو و همکارانش در تحقیقی با استفاده از روش برنامه‌ریزی خطی به زمان‌بندی 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 پرداخته‌اند [۸]. همچنین محققان با طرح مسأله پیوسته زمان برنامه‌ریزی انتقال، از سه روش ابتکاری به‌همراه روش برنامه‌ریزی خطی برای تعیین مرکز ذخیره‌سازی دریافت کننده مواد استفاده کردند [۹]. ضمن اینکه محققان در تحقیقی دیگر به بررسی همین مسأله با در نظرگرفتن مراکز ذخیره‌سازی با قابلیت دریافت چند محصول به‌طور هم‌زمان پرداخته‌اند [۱۰]. به‌طور کلی مسأله برنامه‌ریزی شبکه انتقال در زمره مسائل غیر چندجمله‌ای سخت[6] است و تعمیم روش‌های مورد بررسی برای مدل‌سازی و برنامه‌ریزی با پیچیده‌تر شدن سیستم انتقال و همچنین افزایش بازه زمانی، موجب پیچیدگی محاسباتی حل مسأله می‌شود [۱۱].

1. Planning
2. Mixed Integer Linear Programming (MILP)
3. Mixed Integer Non-Linear Programming (MINLP)
4. Flow rate
5. Heuristic
6. NP-Hard

همچنین، بهینه‌سازی به‌صورت برون‌خط[1] از ویژگی اصلی تحقیقات یاد شده است و با توجه به ماهیت غیرخطی مسأله، افزایش افق برنامه‌ریزی پیچیدگی محاسباتی بیشتری را به‌همراه دارد. در نتیجه، مسأله برنامه‌ریزی بهینه به ناچار برای یک بازه زمانی محدود محاسبه و اجرا می‌شوند.

کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل[2]، یک استراتژی براساس کنترل افق لغزان[3]، است. این استراتژی با پیش‌بینی آینده رفتار دینامیکی سیستم در یک افق مناسب و با در نظر گرفتن صریح محدودیت‌های سیستم در قالب یک مسأله بهینه‌سازی، توالی ورودی کنترل سیستم را با تضمین ارضای محدودیت‌ها و دست‌یابی به بهترین عملکرد ممکن در خروجی سیستم تعیین می‌کند. در ادامه نمونه‌های اول این توالی به سیستم اعمال شده و با لغزش افق به جلو، مجدداً این عمل تکرار می‌شود. این استراتژی راه‌کار ممکنی را برای حل مسائل مبتنی بر بهینه‌سازی دارای محدودیت ارائه می‌دهد اما نیاز به یک مدل دینامیکی با خاصیت پیش‌گویی دارد [۱۲و ۱۳]. همچنین کاهش افق پیش‌رو می‌تواند منجر به کاهش پیچیدگی محاسباتی در هر گام حل مسأله شود. استفاده از استراتژی کنترل پیش‌بین در برنامه‌ریزی سیستم‌های دارای محدودیت، در برخی از تحقیقات پیشنهاد شده است. سوبرامانیان و همکارانش یک مدل فضای حالت براساس راه‌کار کنترل پیش‌بین برای برنامه‌ریزی روزانه در تولید دو نمونه محصول با وجود محدودیت و اثر اختلال قطع واحدهای تولید پیشنهاد کردند [۱۴]. در تحقیقی دیگر، محققان با استفاده از راه‌کار کنترل پیش‌بین به زمان‌بندی انتقال با بازه‌های زمانی روزانه درون یک واحد پالایشگاهی با در نظر گرفتن اختلال تغییر در میزان تقاضا پرداختند [۱۵]. در این مقاله برای یک شبکه نمونه انتقال فرآورده‌های نفتی، ابتدا یک مدل دینامیکی با خاصیت پیش‌بینی پیشنهاد شده و سپس با الهام از روش کنترل پیش‌بین، یک راه‌کار زمان‌بندی مبتنی بر مدل دینامیکی پیش‌بین با افق لغزان برای مسأله برنامه‌ریزی انتقال در شبکه انتقال فرآورده‌های نفتی ارائه می‌گردد. راه‌کار پیشنهاد شده با درنظر گرفتن پنجره‌های زمانی لغزان، عملکرد سیستم انتقال را توسط مدل دینامیکی پیشنهادی براساس شرایط فعلی شبکه انتقال، پیش‌بینی نموده و در قالب یک برنامه بهینه‌سازی، توالی مطلوب انتقال را در یک افق مشخص تعیین می‌نماید. روش پیشنهاد شده در این مقاله درخور مسأله برنامه‌ریزی به‌صورت برون‌خط و بدون در نظر گرفتن اختلال در فرآیند انتقال پیاده‌سازی و ارزیابی شده است. این راه‌کار با تبدیل مسأله برنامه‌ریزی بلندمدت به چندین مسأله با افق زمانی کوتاه‌تر و حل مجموعه مسائل کوچک‌تر در طول زمان (و نه هم‌زمان) قابلیت به‌کارگیری به‌صورت برخط[4] را نیز می‌تواند ایجاد نماید. لازم به ذکر است که در صورت بروز اختلالاتی همچون از کار افتادن قسمت‌هایی از شبکه، توالی بهینه برنامه‌ریزی شده به‌دلیل عدم شناخت اختلالات موجود در آینده سیستم غیرعملی خواهد بود و برای حل این مشکل کنترل پیش‌بین با ارتقاء فرمولاسیون و در قالب برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت خودکار با قابلیت به روزرسانی برخط، در مطالعات آینده مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

بیان مسأله و توپولوژی شبکه انتقال

موقعیت مکانی اجزای شبکه و الگوی هندسی استفاده شده جهت اتصال خطوط لوله در شبکه خطوط انتقال، نحوه عملکرد سیستم انتقال را مشخص می‌کند و همچنین تأثیر به‌سزایی در تعیین پیچیدگی شبکه و در نتیجه دینامیک‌های موجود در مدل سیستم شبکه انتقال دارد. توپولوژی خطوط لوله با توجه به نیاز و شرایط جغرافیایی منطقه، زیرساخت‌های موجود به شکل‌های مختلف است.

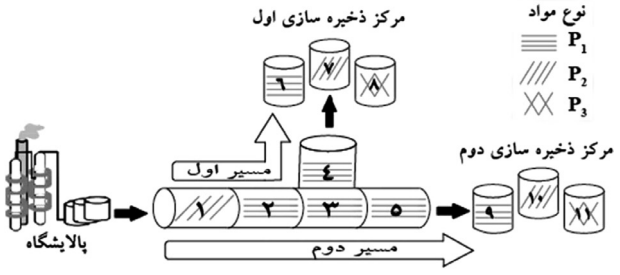
1. Offline
2. Model Predictive Control (MPC)
3. Receding Horizon Control (RHC)
4. Online

شبکه انتقال فرآورده‌های نفتی نمونه

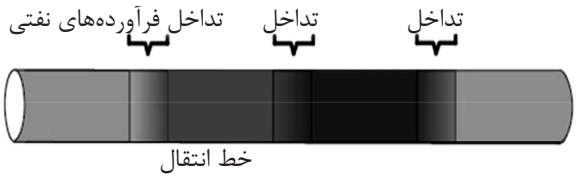
شبکه مورد بررسی در این مقاله، یک شبکه انتقال اتصال‌دهنده یک مرکز پالایشگاهی به دو مرکز ذخیره‌سازی است. برای توصیف دینامیکی حرکت مواد در شبکه انتقال، خطوط لوله به بخش‌هایی با حجم ثابت بخش‌بندی می‌شوند. مجموعه بخش‌هایی که بین دو مرکز مدیریت انتقال محلی قرار دارند، یک شاخه را تشکیل می‌دهند. محل اتصال هر دو شاخه که مبین یک مرکز مدیریت انتقال محلی است، گره نامیده می‌شود. مجموعه شاخه‌ها و گره‌هایی که ارتباط یک پالایشگاه به یک مرکز ذخیره‌سازی را ممکن می‌سازد، مسیر نام دارد. به منظور توزیع مواد نفتی مختلف به این مراکز، پمپ‌های مستقر در گره ابتدایی هر شاخه انتقال، فرآورده‌های نفتی تولیدی را از پالایشگاه به‌سمت مراکز ذخیره‌سازی ارسال می‌کنند. شکل ۱، شبکه انتقال مورد بررسی به‌همراه شرایط اولیه مربوط به مواد درون بخش‌های خطوط لوله انتقال در این تحقیق را نشان می‌دهد. به‌عنوان یکی از اساسی‌ترین محدودیت‌های ساختاری سیستم انتقال، برای انتقال فرآورده‌ها از تنها پالایشگاه سیستم به‌سمت یکی از مراکز ذخیره‌سازی، در هر لحظه فقط شاخه‌های مربوط به مسیر انتخابی فعال است و فرآورده‌های موجود در سایر بخش‌ها ساکن و بی‌حرکت هستند. در این ساختار مسیر اول از پالایشگاه به مرکز ذخیره‌سازی اول شامل بخش‌های ۱ و ۲ و ۳ و۴ و مسیر دوم انتقال از پالایشگاه به مرکز ذخیره‌سازی دوم شامل بخش‌های ۱ و ۲ و ۳ و ۵ می‌شود. با توجه به پر بودن کلیه بخش‌ها و مسیرهای خطوط لوله، در هر بازه نمونه‌برداری میزان ثابتی از حجم مواد از طریق پالایشگاه وارد شبکه انتقال می‌شود و متناظر با آن به همان میزان حجم، فرآورده از انتهای مسیر فعال به مرکز ذخیره‌سازی فعال در همان بازه‌زمانی تحویل می‌گردد.

تلفات مربوط به ترکیب مواد

برای رسیدن به اهداف مطلوب نظیر ذخیره‌سازی حجم معینی از هر فرآورده نفتی در هر محل ذخیره‌سازی در زمان مناسب با در نظر گرفتن محدودیت‌های سیستم، انتقال فرآورده‌های نفتی به‌صورت ارسال محموله‌های متوالی حاوی حجم ثابتی از یک نوع ماده نفتی صورت می‌گیرد. با توجه به انتقال مواد مختلف درون خطوط انتقال، مخلوط شدن فرآورده‌های نفتی درون خطوط انتقال در محل تماس آن‌ها اجتناب‌ناپذیر است. یکی دیگر از اهداف برنامه‌ریزی انتقال فرآورده‌های نفتی در شبکه‌های انتقال، کاهش تلفاتی از قبیل ترکیب ناخواسته مواد نفتی در هنگام حرکت درون خطوط لوله است. شکل ۲ نحوه ایجاد تلفات مربوط به ترکیب مواد در ارسال متوالی محموله‌های مواد نفتی را نشان می‌دهد. تصمیمات اتخاذ شده برای استفاده، دورریزی و یا بازپالایش قسمت‌های ترکیب شده به‌صورت تداخل در خطوط لوله، بستگی به نوع و مقدار تداخل دارد. بدیهی است انتقال هر زوج ممکن از دو محموله متوالی هزینه‌های متفاوتی دارد که برنامه‌ریزی بهینه انتقال سعی در کاهش این هزینه‌ها دارد.



شکل ۱ شبکه خطوط لوله انتقال فرآورده‌های نفتی نمونه



شکل ۲ تداخل مواد در شبکه خطوط لوله انتقال فرآورده‌های نفتی

اهداف و روش حل مسأله

هدف این پژوهش ارائه روشی برای برنامه‌ریزی بهینه انتقال فرآورده‌های مختلف نفتی در شبکه‌های خطوط لوله انتقال است تا با در نظر گرفتن محدودیت‌های سیستم انتقال، از طرفی پاسخ‌گویی به نیازهای منطقه‌ای را در همه زمان‌ها برآورده نموده و از طرف دیگر، هزینه‌ها و تلفات انتقال را تا حد ممکن کاهش دهد.

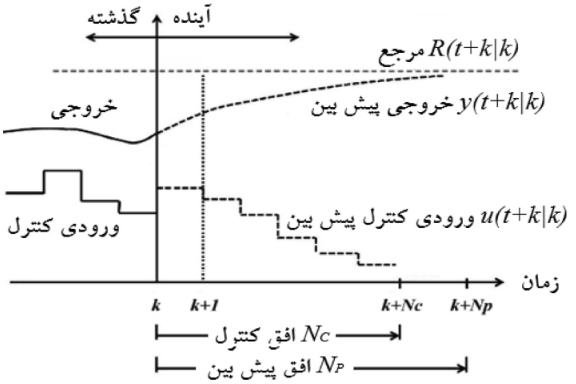
در فرآیند برنامه‌ریزی با یک مسأله بهینه‌سازی پیچیده و دارای محدودیت روبرو هستیم. یک حل مطمئن برای این مسأله بهینه‌سازی باید براساس افق نامحدود حاصل شود. از طرفی، حل یک مسأله بهینه‌سازی دارای محدودیت برروی افق بی‌نهایت غیرممکن است زیرا باید دنباله‌ای بی‌نهایت از متغیرهای تصمیم‌گیری با تضمین ارضای محدودیت‌ها تعیین شود. یک راه‌کار برای گذشتن از این مانع، محدود کردن افق حل مسأله بهینه‌سازی است. در برنامه‌ریزی مرسوم نیز در واقع با محدود کردن افق حل، دنباله‌ای از متغیرهای تصمیم‌گیری برای دوره معین تعیین شده و برای اجرا به سطوح پایین‌تر مدیریت برنامه‌ریزی شبکه ابلاغ می‌شود. پیچیدگی محاسباتی حل مسأله در سیستم‌های غیرخطی با افزایش ابعاد مسأله به‌طور فزاینده‌ای بیشتر می‌شود. یک راه‌کار برای مقابله با پیچیدگی محاسباتی تقسیم مسأله به مجموعه مسائل کوچک‌تر است. استراتژی کنترل پیش‌بین با مسائل به‌صورت مجموعه پنجره‌های زمانی دارای همپوشانی برخورد می‌کنند و در نتیجه قادرند با تبدیل مسأله اولیه به مجموعه مسائل کوچک‌تر، از پیچیدگی محاسباتی مسأله اولیه بکاهند.

در این پژوهش با بهره‌گیری از اصول و ویژگی‌های کنترل پیش‌بین، روشی برای تعیین برنامه‌ریزی بلندمدت مبتنی بر مدل دینامیکی و افق بهینه‌سازی متحرک برای شبکه خطوط انتقال فرآورده‌های نفتی ارائه می‌گردد که با درنظر گرفتن محدودیت‌های انتقال، برنامه زمان‌بندی را به‌گونه‌ای تنظیم می‌کند که مواد مورد نیاز در مراکز ذخیره‌سازی برای بازه‌های زمانی معین ذخیره‌سازی گردند. در همین راستا، با استفاده از راه‌کار افق لغزان مبتنی بر کنترل پیش‌بین و تقسیم مسأله ماهیانه به سه مسأله ده روزه و در نظر گرفتن افق پیش‌بین بیست روزه برای هر دهه به برنامه‌ریزی بلندمدت ماهیانه پرداخته شده است. در ساختار برون‌خط برنامه‌ریزی، در هر مرحله ورودی کنترل بهینه مربوط به دهه اول، به مدل انتقال اعمال می‌شود و فرآیند بهینه‌سازی برای دهه بعدی و با افق بیست روزه، با شرایط اولیه بروز شده، تا رسیدن به انتهای ماه مجدداً تکرار می‌شود.

استراتژی کنترل پیش‌بین

کنترل پیش‌بین یک راه‌کار مبتنی بر یک مدل دینامیکی از سیستم است که براساس اطلاعات جاری سیستم و با حل یک برنامه بهینه‌سازی دارای محدودیت و با افق متناهی در هر بازه نمونه‌برداری، دنباله‌ای از ورودی را تعیین می‌کند. این راه‌کار که بعضاً با عنوان کنترل افق لغزان نیز مطرح می‌گردد، قادر است در قالب یک مسأله بهینه‌سازی برخط، خروجی‌های آینده سیستم را توسط مدل دینامیکی آن پیش‌بینی نموده و در کنار آن محدودیت‌های سیستم در طول افق را به‌صورت صریح در نظر بگیرد.

سپس یک یا چند نمونه اول دنباله تصمیم‌گیری بهینه را به سیستم اعمال می‌کند و از سایر نمونه‌های دنباله صرف‌نظر می‌گردد. با اندازه‌گیری خروجی‌ها و حصول اطلاعات جدید سیستم، راه‌کار فوق برای همه پنجره‌های نمونه‌برداری تکرار می‌شود [۱۲]. عملکرد راه‌کار کنترل پیش‌بین به‌صورت نمونه در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳ راه‌کار کنترل پیش‌بین

برای اجرای بهینه‌سازی در راه‌کار کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل در هر بازه زمانی k با استفاده از مدل فرآیند، خروجی‌های آینده برای یک افق مشخص N_p موسوم به افق پیش‌بینی، پیش‌بینی می‌شود. این خروجی‌های پیش‌بینی شده $y(t+k|k)$ برای $t=1,2,...,N_P$ وابسته به شرایط جاری سیستم در زمان نمونه‌برداری k و متغیرهای تصمیم‌گیری آتی $u(t+k|k)$ برای افق کنترل (تصمیم) $t=1,2,...,N_C$ خواهد بود. مقادیر پیش‌بینی خروجی در طول افق پیش‌بینی از طریق یک مدل دینامیکی که ارتباط ورودی، حالت‌ها و خروجی سیستم را تعیین می‌کند، به متغیرهای ورودی مربوط می‌گردند. دنباله متغیرهای تصمیم‌گیری آتی به واسطه بهینه‌سازی یک معیار مشخص عملکرد، به منظور نزدیک کردن هرچه بیشتر خروجی فرآیند به مقادیر مطلوب خروجی $R(t+k|k)$ در طول و انتهای افق پیش‌بینی، محاسبه می‌شود. براساس مفهوم افق لغزان، چند نمونه اول دنباله ورودی کنترلی $u(t+N_C|k)$ به فرآیند ارسال می‌شود در حالی‌که متغیرهای تصمیم‌گیری بعدی دور ریخته می‌شود. این روند در زمان‌های نمونه‌برداری بعد با مقادیر جدید تکرار و نتایج بر پایه آن‌ها به‌روز می‌شوند [۱۲]. محدودیت‌های سیستم نیز در افزایش پیچیدگی فرآیند بهینه‌سازی تأثیرگذار هستند به‌طوری‌که این محدودیت‌ها علاوه‌بر پاسخ سیستم ناشی از اعمال چند نمونه اول دنباله تصمیم‌گیری، در کل افق پیش‌بین باید صدق کنند. در سیستم انتقال فرآورده‌های نفتی، ثابت بودن حجم محموله‌های انتقالی، میزان تولید انواع فرآورده‌ها در زمان‌های مختلف در پالایشگاه‌ها، میزان تقاضا و محدوده مجاز ذخیره‌سازی فرآورده‌ها در مراکز ذخیره‌سازی، برابری مقدار ورودی و خروجی مواد از خطوط لوله در هر بازه نمونه‌برداری، از جمله محدودیت‌های سیستم است که لزوم استفاده از راه‌کار پیش‌بین در فرآیند برنامه‌ریزی را توجیه می‌کند.

زمان‌بندی شبکه خطوط انتقال فرآورده‌های نفتی مبتنی بر مدل دینامیکی

اصولاً برنامه‌ریزی خطوط انتقال به‌صورت تعیین توالی و مدت زمان ارسال انواع محموله‌های فرآورده‌های نفتی با هدف به حداکثر رساندن کارایی عملیات و کاهش هزینه‌ها و تلفات سیستم با تضمین محدودیت‌های سیستم، انجام می‌پذیرد. این مهم در وهله اول نیازمند شناخت نحوه عملکرد و محدودیت‌های موجود سیستم انتقال است که در قالب یک مدل توصیف‌کننده بیان می‌شود. میزان درستی برنامه‌ریزی بهینه و در نتیجه، عملکرد سیستم انتقال بستگی زیادی به نوع و دقت مدل توصیف‌کننده سیستم دارد. لذا، در ادامه ابتدا به مدل‌سازی دینامیکی شبکه نمونه در فضای حالت پرداخته و سپس روش زمان‌بندی افق محدود مبتنی بر مدل پیش‌بین ارائه خواهد شد.

مدل‌سازی دینامیکی شبکه انتقال فرآورده‌های نفتی در فضای حالت

از آنجایی‌که روش پیشنهادی برای برنامه‌ریزی بلندمدت انتقال براساس کنترل پیش‌بین ارائه می‌شود، نیاز به یک مدل با خاصیت پیش‌بینی رفتار دینامیکی آینده سیستم یعنی شبکه خطوط انتقال نمونه معرفی شده در زیربخش ۲-۲ است. بنابراین، در این زیربخش به این مهم پرداخته و سعی می‌شود عملکرد دینامیکی سیستم مورد بررسی در قالب یک مدل دینامیکی فضای حالت بیان گردد. مدل فضای حالت مدلی است که در آن مقدار هر متغیر دینامیکی در هر لحظه براساس مقادیر متغیرهای دینامیکی لحظه قبل و همچنین ورودی‌های تصمیم اعمال شده به سیستم، توصیف می‌شود.

برای بیان مدل سیستم به شکل معادلات حالت، نوع فرآورده نفتی موجود در هر بخش از خطوط انتقال با استفاده از یک متغیر حالت تعریف می‌شود. در این صورت، مدل به‌دست آمده می‌تواند نوع مواد بخش‌های مختلف سیستم انتقال را در کل بازه‌های زمانی نشان دهد. شبکه انتقال نمونه مفروض، علاوه‌بر پالایشگاه اصلی در مجموع شامل پنج بخش و شش مخزن ذخیره‌سازی برای انتقال سه نوع فرآورده نفتی است. در نتیجه، تعداد n=۱۱ متغیر عدد صحیح حالت به بیان مواد ذخیره شده در مراکز ذخیره‌سازی و همچنین، نوع مواد موجود در داخل بخش‌های خطوط انتقال در طول هر بازه نمونه‌برداری می‌پردازند. برای انتقال مواد در شبکه انتقال، دو متغیر تصمیم‌گیری یکی برای انتخاب نوع ماده و دیگری برای انتخاب مسیرحرکت مواد مورد نیاز است. در هر لحظه تنها یک ماده در یک مسیر قابلیت ارسال دارد. در نتیجه تنها یک متغیر دودویی به‌عنوان متغیر تصمیم‌گیری دوم برای بیان مرکز ذخیره‌سازی انتخابی کفایت می‌کند. از مزایای مدل فضای حالت مورد بررسی، قابلیت تعمیم به شبکه‌های بزرگ‌تر و آرایش‌های پیچیده‌تر است.

در فرآیند مدل‌سازی با در نظر گرفتن حرکت مواد به‌سمت جلو از یک بخش به بخش بعدی، بیان نوع محتویات داخل هر یک از قسمت‌های شبکه خطوط انتقال در انتهای بازه زمانی حاضر t، با استفاده از متغیرهای حالت $X(t)=[X_1(t)\ \ X_2(t)\ \ \dots\ \ X_{n-1}(t)\ \ X_n(t)]^T \in \mathbb{Z}^n$ و به‌صورت اعداد صحیح مبین نوع فرآورده نفتی موجود، صورت می‌گیرد. همچنین نوع ماده ورودی توسط پالایشگاه به شبکه انتقال، توسط متغیر تصمیم‌گیری $U(t) \in \{1,2,...,P\} \in \mathbb{Z}$ و انتخاب مسیر حرکت توسط ورودی کنترل دودویی $S(t) \in \{0,1\}$ معین می‌گردد. به‌نحوی‌که یک بودن این متغیر بیانگر حرکت مواد در مسیر مرکز ذخیره‌سازی اول و صفر بودن آن مبین انتخاب مسیر پالایشگاه تا مرکز ذخیره‌سازی دوم است. رابطه ۱ مدل حرکت مواد درون هر بخش شبکه خطوط انتقال مورد بررسی در این مقاله را در هر بازه زمانی بیان می‌کنند به نحوی‌که تعداد انواع مواد ارسالی در شبکه انتقال P= ۳ است.

$$
\begin{aligned}
X_1(t+1) &= U(t) \\
X_2(t+1) &= X_1(t) \\
X_3(t+1) &= X_2(t) \\
X_4(t+1) &= S(t)X_3(t) + (\neg S(t))X_4(t) \\
X_5(t+1) &= (\neg S(t))X_3(t) + S(t)X_5(t)
\end{aligned}
\qquad (۱)
$$

که در آن مکمل یک متغیر دودویی مسیر حرکت انتخابی به‌صورت $(\neg S(t))=(1-S(t))$ تعریف می‌شود. همچنین فرآورده انتقالی به مراکز ذخیره‌سازی براساس نوع در تانکر مخصوص ذخیره می‌شوند. بنابراین برای ذخیره مواد مختلف در هر مرکز ذخیره‌سازی، متغیرهای حالت مناسب به‌صورت رابطه غیرخطی ۲ تعریف می‌شوند.

$$
\begin{aligned}
X_6(t+1) &= X_6(t) + S(t)\left(\left\lfloor \frac{1}{X_4(t)} \right\rfloor \left\lfloor \frac{X_4(t)}{1} \right\rfloor\right) \\
X_7(t+1) &= X_7(t) + S(t)\left(\left\lfloor \frac{2}{X_4(t)} \right\rfloor \left\lfloor \frac{X_4(t)}{2} \right\rfloor\right) \\
X_8(t+1) &= X_8(t) + S(t)\left(\left\lfloor \frac{3}{X_4(t)} \right\rfloor \left\lfloor \frac{X_4(t)}{3} \right\rfloor\right) \\
X_9(t+1) &= X_9(t) + (\neg S(t))\left(\left\lfloor \frac{1}{X_5(t)} \right\rfloor \left\lfloor \frac{X_5(t)}{1} \right\rfloor\right) \\
X_{10}(t+1) &= X_{10}(t) + (\neg S(t))\left(\left\lfloor \frac{2}{X_5(t)} \right\rfloor \left\lfloor \frac{X_5(t)}{2} \right\rfloor\right) \\
X_{11}(t+1) &= X_{11}(t) + (\neg S(t))\left(\left\lfloor \frac{3}{X_5(t)} \right\rfloor \left\lfloor \frac{X_5(t)}{3} \right\rfloor\right)
\end{aligned}
\qquad (۲)
$$

کـه در آن، $X_6(t)$ و $X_9(t)$ شـمارنده ذخیره‌سـازی محصـول نـوع اول (P1)، $X_7(t)$ و $X_{10}(t)$ شـمارنده ذخیره‌سـازی محصـول نـوع دوم (P2) و $X_{11}(t)$ و $X_8(t)$ شـمارنده ذخیره‌سـازی محصـول نـوع سـوم (P3) به‌ترتیـب در مراکـز ذخیره‌سـازی اول و دوم هسـتند. توصیـف ماتریـس حالـت و معـادلات خروجـی مـدل پیشـنهادی به‌صـورت رابطـه ۳ قابـل بیـان اسـت.

$$\begin{bmatrix} X_1(t+1) \\ X_2(t+1) \\ X_3(t+1) \\ X_4(t+1) \\ X_5(t+1) \\ X_6(t+1) \\ X_7(t+1) \\ X_8(t+1) \\ X_9(t+1) \\ X_{10}(t+1) \\ X_{11}(t+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0\,0\,0 & 0 & 0 & 0\,0\,0\,0\,0\,0 \\ 1\,0\,0 & 0 & 0 & 0\,0\,0\,0\,0\,0 \\ 0\,1\,0 & 0 & 0 & 0\,0\,0\,0\,0\,0 \\ 0\,0\,S(t) & \neg S(t) & 0 & 0\,0\,0\,0\,0\,0 \\ 0\,0\,\neg S(t) & 0 & S(t) & 0\,0\,0\,0\,0\,0 \\ 0\,0\,0 & 0 & 0 & 1\,0\,0\,0\,0\,0 \\ 0\,0\,0 & 0 & 0 & 0\,1\,0\,0\,0\,0 \\ 0\,0\,0 & 0 & 0 & 0\,0\,1\,0\,0\,0 \\ 0\,0\,0 & 0 & 0 & 0\,0\,0\,1\,0\,0 \\ 0\,0\,0 & 0 & 0 & 0\,0\,0\,0\,1\,0 \\ 0\,0\,0 & 0 & 0 & 0\,0\,0\,0\,0\,1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1(t) \\ X_2(t) \\ X_3(t) \\ X_4(t) \\ X_5(t) \\ X_6(t) \\ X_7(t) \\ X_8(t) \\ X_9(t) \\ X_{10}(t) \\ X_{11}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \end{bmatrix} U(t)$$

$$\begin{bmatrix} Y_1(t+1) \\ Y_2(t+1) \\ Y_3(t+1) \\ Y_4(t+1) \\ Y_5(t+1) \\ Y_6(t+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0\,0\,0\,0\,0\,1\,0\,0\,0\,0\,0 \\ 0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,1\,0\,0\,0\,0 \\ 0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,1\,0\,0\,0 \\ 0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,1\,0\,0 \\ 0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,1\,0 \\ 0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,0\,1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1(t) \\ X_2(t) \\ X_3(t) \\ X_4(t) \\ X_5(t) \\ X_6(t) \\ X_7(t) \\ X_8(t) \\ X_9(t) \\ X_{10}(t) \\ X_{11}(t) \end{bmatrix} \qquad (۳)$$

به‌نحوی‌کـه رابطـه ۴ مقادیـر α و β توصیف‌کننـده قسـمت‌های ضـرب شـونده غیرخطـی در رابطـه ۲ را بیـان می‌کنـد.

$$\alpha_i = \frac{S(t)}{U(t)}\left(\left\lfloor \frac{i}{X_4(t)} \right\rfloor \left\| \frac{X_4(t)}{i} \right\rfloor\right) \qquad i = 1,2,...,P$$

$$\beta_i = \frac{\neg S(t)}{U(t)}\left(\left\lfloor \frac{i}{X_5(t)} \right\rfloor \left\| \frac{X_5(t)}{i} \right\rfloor\right) \qquad i = 1,2,...,P \qquad (۴)$$

بـرای مدل‌سـازی انتقـال فرآورده‌هـا از آخریـن بخش‌هـای شـبکه خطـوط بـه درون مخزن‌هـای ذخیـره کاربـرد دارنـد. مـدل فضـای حالـت حاصـل (کـه یـک مـدل خطـی بـا پارامتـر متغیـر[1] و از زمـره مدل‌هـای مربـوط بـه سیسـتم‌های غیرخطـی اسـت) را می‌تـوان بـه فـرم بسـته مطابـق رابطـه ۵ نوشـت.

$$X(t+1) = A(S(t))X(t) + B(S(t),U(t),X(t))U(t)$$
$$Y(t) = C\,X(t) \qquad (۵)$$

به‌طوری‌کـه بـردار $Y(t) = \left[Y_1(t)\ \ Y_2(t)\ \ \dots\ \ Y_{q-1}(t)\ \ Y_q(t)\right]^T \in \mathbb{Z}^q$ و q = ۶ بـردار خروجـی شـامل سـه نـوع مـاده تحویلـی بـه دو مرکـز ذخیره‌سـازی مفـروض را نشـان می‌دهـد. ماتریس‌هـای $A \in \{0,1\}^{n\times n}$ ، $B \in \{0,1\}^n$ و $C \in \{0,1\}^{q\times n}$ به‌ترتیـب ماتریـس حالـت و ماتریـس ورودی و ماتریـس خروجـی هسـتند. همان‌طـور کـه در مـدل فضـای حالـت طبـق رابطـه ۵ مشـخص اسـت؛ ماتریـس حالـت و ماتریـس ورودی سیسـتم وابسـته بـه ورودی کنترلـی بـوده و لـذا، مـدل حاصـل یـک مـدل غیرخطـی اسـت. قابلیـت دسـت‌یابی بـه روابـط بازه‌هـای زمانـی آینـده سیسـتم براسـاس شـرایط اولیـه از مهم‌تریـن فوایـد مـدل ماتریسـی فضـای حالـت غیرخطـی به‌دسـت آمـده اسـت. در نتیجـه بـه راحتـی می‌تـوان افق‌هـای آینـده سیسـتم را براسـاس شـرایط اولیـه مدل‌سـازی نمـود. معـادلات حالـت و خروجـی پیش‌بیـن مبتنـی بـر مـدل فضـای حالـت را می‌تـوان به‌صـورت رابطـه ۶ نوشـت.

$$\begin{aligned} &X(t+1) = A(S(t))X(t) + B(S(t),U(t),X(t))U(t) \\ &X(t+2) = A(S(t+1))X(t+1) + B(S(t+1),U(t+1),X(t+1))U(t+1) \\ &\vdots \\ &X(t+N_P) = A(S(t+N_P-1))X(t+N_P-1) + \\ &\quad B(S(t+N_P-1),U(t+N_P-1),X(t+N_P-1))U(t+N_P-1) \\ &Y(t) = C\,X(t) \\ &Y(t+1) = C\,X(t+1) \\ &\vdots \\ &Y(t+N_P) = C\,X(t+N_P) \end{aligned} \qquad (۶)$$

کـه در آن افـق پیش‌بیـن بـرای برنامه‌ریـزی بلندمـدت اسـت. توصیـف معـادلات شـبکه بـه شـکل معـادلات ماتریسـی، امـکان تعریـف مـدل پیش‌بیـن سیسـتم‌های غیرخطـی را نیـز میسـر می‌سـازد. لـذا، از مهم‌تریـن مزایـای ایـن مـدل قابلیـت تعریـف سیسـتم‌های غیرخطـی مشـابه اسـت.

1. Linear Parameter Varying (LPV)

در نتیجه به‌دلیل تعمیم‌پذیری این معادلات، راه‌کار پیشنهادی برای برنامه‌ریزی شبکه‌های پیچیده‌تر و بزرگ‌تر نیز قابل استفاده است. رابطه ۶ در واقع مدل پیش‌بین برای شبکه خطوط انتقال نمونه نامیده می‌شود که در قالب استراتژی کنترل پیش‌بین برای برنامه‌ریزی بلندمدت شبکه به‌کار گرفته خواهد شد. که در آن افق پیش‌بین برای برنامه‌ریزی بلندمدت است. توصیف معادلات شبکه به شکل معادلات ماتریسی، امکان تعریف مدل پیش‌بین سیستم‌های غیرخطی را نیز میسر می‌سازد. لذا، از مهم‌ترین مزایای این مدل قابلیت تعریف سیستم‌های غیرخطی مشابه است. در نتیجه به‌دلیل تعمیم‌پذیری این معادلات، راه‌کار پیشنهادی برای برنامه‌ریزی شبکه‌های پیچیده‌تر و بزرگ‌تر نیز قابل استفاده است. رابطه ۶ در واقع مدل پیش‌بین برای شبکه خطوط انتقال نمونه نامیده می‌شود که در قالب استراتژی کنترل پیش‌بین برای برنامه‌ریزی بلندمدت شبکه به‌کار گرفته خواهد شد.

برنامه‌ریزی بلندمدت شبکه انتقال فرآورده‌های نفتی براساس استراتژی کنترل پیش‌بین

در این پژوهش برای حل مسأله برنامه‌ریزی انتقال، بهینه‌سازی به‌صورت زمان‌بندی انتقال با استفاده از راه‌کار کنترل پیش‌بین براساس مدل ارائه شده، اجرا شده است. کنترل پیش‌بین یک استراتژی مبتنی بر بهینه‌سازی افق محدود و لغزان است به‌طوری‌که با پیش‌بینی آینده سیستم با مدل مناسب و با هدف کمینه کردن یک تابع هزینه، مقادیر سیگنال ورودی در طول افق پیش‌بینی مشخص می‌شود. مقادیر اولیه دنباله ورودی به سیستم اعمال شده و از مابقی آن صرف‌نظر می‌گردد. در زمان نمونه‌برداری جدید به‌عنوان مبدأ زمانی پیش‌بینی جدید، این رویه تکرار می‌گردد. کنترل پیش‌بین قیود سیستم را به‌صورت واضح در فرمولاسیون خود در نظر گرفته و آنها را برآورده می‌کند. آنچه که کنترل پیش‌بین بر آن استوار است عبارتند از: مدل دینامیکی سیستم، تابع هدف و قیود و همچنین روش بهینه‌سازی.

تابع هدف

در بخش قبل مدل دینامیکی با خاصیت پیش‌بینی برای یک شبکه انتقال فرآورده‌های نفتی نمونه، استخراج و پیشنهاد گردید. در این بخش، ساختار تابع هزینه مناسب و همچنین محدودیت برنامه‌ریزی ماهیانه معرفی می‌گردد تا براساس آنها استراتژی کنترل پیش‌بین قابلیت پیاده‌سازی داشته باشد. برای تابع هزینه مورد استفاده در این پژوهش، موارد زیر پیشنهاد می‌گردد:

الف) دنبال کردن مقادیر مطلوب: اختلاف بین میزان تقاضای مراکز ذخیره‌سازی و مقادیر برنامه‌ریزی شده در طول افق پیش‌بین یعنی $R(t+i\,|t)-Y(t+i\,|t)$ یکی از هزینه‌هایی است که باید تا حد ممکن کاهش یابد. در این تحقیق، میزان تقاضای مطلوب فرآورده‌های نفتی برای مراکز ذخیره‌سازی در انتهای هر هفته مطابق جدول ۱ افزایش می‌یابند.

ب) کاهش تداخل مواد: درصورتی‌که مواد موجود بین دو بخش متوالی شبکه انتقال از یک جنس نباشند، ادغام مقداری از مواد موجود در دو بسته متوالی هنگام حرکت مواد در شبکه انتقال، موجب تولید فرآورده ناخالص ترکیبی می‌شود. تلفات تداخل فرآورده‌های نفتی که بر اثر ارسال انواع مختلف بسته‌ها به‌صورت متوالی درون خطوط شبکه انتقال ایجاد می‌شود به‌صورت $U(t+i\,|t)-U(t-1+i\,|t)$ قابل بیان است. بدیهی است ترکیب متنوع هر دو نوع فرآورده نفتی، هزینه‌های مختلفی را به‌همراه دارد. لذا با تخصیص هزینه‌های مناسب برای زوج مواد مختلف، کمینه‌سازی این قسمت موجب کاهش تلفات تداخل در سیستم انتقال می‌گردد.

ج) هزینه‌های پمپاژ: درنهایت، هزینه دیگری که کاهش آن در برنامه ریزی مد نظر است، هزینه‌های پمپاژ مواد درون شبکه است که به فرم $S(t+i|t)+\theta$ قابل بیان است. پارامتر $\theta=10$ برای تنظیم وزن مسیرها استفاده شده است.

جدول ۱ مقدار مطلوب انواع مختلف فرآورده‌های نفتی برحسب تعداد بسته‌های مواد در برنامه‌ریزی بلندمدت

مرکز ذخیره‌سازی	نوع فرآورده	روزهای ماه				
		۷	۱۴	۲۱	۲۸	(آخرین روز) ۳۰
اول	P1	۵	۸	۱۱	۱۴	۱۵
	P2	۳	۹	۱۲	۱۵	۱۵
	P3	۴	۷	۱۰	۱۳	۱۵
دوم	P1	۳	۶	۱۲	۱۵	۱۵
	P2	۴	۷	۱۰	۱۶	۱۶
	P3	۲	۵	۸	۱۱	۱۴

بنابراین، فرآیند بهینه‌سازی سعی در یافتن پاسخی دارد که علاوه‌بر ردیابی مقادیر مطلوب، شاخص‌های عملکردی دیگر که به آن اشاره شد را تا حد ممکن کمینه کند. لذا برای فرآیند بهینه‌سازی، تابع هزینه به‌صورت رابطه ۷ در نظر پیشنهاد می‌شود.

$$J_P = \sum_{i=1}^{N_p} \left\| \delta_i \left(R(t+i\,|\,t) - Y(t+i\,|\,t) \right) \right\|_2 + \sum_{i=0}^{N_p-1} \left\| \lambda_i \left(U(t+i\,|\,t) - U(t-1+i\,|\,t) \right) \right\|_2 + \sum_{i=0}^{N_p-1} \left\| \gamma_i \left(S(t+i\,|\,t) + \theta \right) \right\|_2 \quad (۷)$$

مقادیر ضرایب وزنی δ_i، λ_i و γ_i اهمیت کمینه‌سازی هرکدام از ترم‌های هزینه را در هر گام افق پیش‌بین مشخص می‌کند و همچنین نرم اقلیدسی یک بردار به‌صورت $\|\mathbf{M}\|_2 = \left(\sum_{i=1}^{n} |M_i|^2 \right)^{\frac{1}{2}}$ در نظر گرفته می‌شود.

د) قید برنامه‌ریزی ماهیانه: به‌عنوان یکی از مهم‌ترین قیود، مطابق رابطه ۸، اختلاف نهایی بین مقدار فرآورده‌های انتقال یافته به مراکز ذخیره‌سازی و مقادیر مطلوب در انتهای ماه -که برحسب تعداد بسته است- نباید از مقدار آستانه ۳ = Δ_p تجاوز کند.

$$\left\| \left(R(t+j\,|\,t) - Y(t+j\,|\,t) \right) \right\|_1 < \Delta_p, \quad t+j = 90 \quad (۸)$$

برنامه‌ریزی بلندمدت براساس استراتژی کنترل پیش‌بین

مسأله برنامه‌ریزی خطوط انتقال براساس مدل پیش‌بین با لحاظ موارد مورد نظر در آن، براساس استراتژی کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل به فرم مسأله بهینه‌سازی پیش‌بین افق محدود رابطه ۹ قابل بیان است:

$$\begin{aligned}
&\min_{\mathbf{S}(t),\mathbf{U}(t)} J_P\left(\mathbf{R}(t),\mathbf{X}(t),\mathbf{S}(t),\mathbf{U}(t)\right)\\
&s.t.:\\
&\begin{cases} X(t+i) = A\left(S(t+i-1)\right)X(t+i-1) + \\ \qquad B\left(S(t+i-1),U(t+i-1),X(t+i-1)\right)U(t+i-1) & \forall i = 1,2,..N_P, \\ Y(t+i) = C\,X(t+i) \end{cases}\\
&g\left(\mathbf{R}(t),\mathbf{X}(t)\right) < 0,\\
&\mathbf{X}(t) = [X(t+1),X(t+2),...,X(t+N_p)],\\
&\mathbf{R}(t) = [R(t+1),R(t+2),...,R(t+N_p)],\\
&\mathbf{S}(t) = [S(t),S(t+1),...,S(t+N_p-1)] \in \{0,1\}^{N_P},\\
&\mathbf{U}(t) = [U(t),U(t+1),...,U(t+N_p-1)] \in \{1,2,...,P\}^{N_P} \in \mathbb{Z}^{N_P}.
\end{aligned} \quad (۹)$$

که در آن R(t) بیانگر مقادیر مطلوب برای مراکز ذخیره‌سازی در طول افق پیش‌بینی است که مطابق جدول ۱ در بازه‌های زمانی هفتگی تغییر می‌کند. همچنین، قید $g\left(\mathbf{R}(t),\mathbf{X}(t)\right) < 0$ شامل محدودیت برنامه‌ریزی ماهیانه به‌صورت رابطه ۸ -یا سایر محدودیت‌های حاکم بر عملکرد شبکه انتقال- است. به‌دلیل غیرخطی بودن مدل دینامیکی شبکه انتقال و در نتیجه مسأله بهینه‌سازی پیش‌بین افق محدود حاصل رابطه ۹، در این تحقیق از روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک به‌عنوان یک روش با خواص جستجوی تصادفی برای تعیین بردار متغیرهای تصمیم نوع ماده انتقالی $\mathbf{U}(t) = [U(t),U(t+1),...,U(t+N_P-1)]$ و همچنین، بردار متغیرهای تصمیم مسیر حرکت $\mathbf{S}(t) = [S(t),S(t+1),...,S(t+N_p-1)]$ برای بازه‌های زمانی موجود در افق پیش‌بین استفاده شده است.

شبیه‌سازی و بررسی نتایج

با توجه به افزایش تعداد متغیرهای تصمیم و ابعاد مسأله برای یک دوره زمانی ماهیانه، مشکل زمانی در مرحله بهینه‌سازی اجتناب‌ناپذیر است و برای حل این مشکل بازه زمانی یک ماهه به سه دهه تقسیم شده و براساس راه‌کار کنترل پیش‌بین و با فرض عدم وجود اختلال و با استفاده از مدل فضای حالت ارائه شده، به اجرای متوالی و برون‌خط برنامه زمان‌بندی برای دهه‌های متوالی پرداخته شد. به‌طوری‌که مسأله ماهیانه به‌صورت برون‌خط با افق پیش‌بین بیست روزه شامل شصت بازه زمانی هشت ساعته و دنباله کنترلی اعمالی[1] -که در اینجا به آن دنباله تصمیم اعمالی[2] نیز می‌توان گفت- ده روزه شامل تعداد سی بازه زمانی حل می‌شود. پس از بهینه‌سازی فرآیند زمان‌بندی برای هر مرحله، مواد ذخیره شده در مراکز ذخیره‌سازی تا انتهای افق کنترل اعمالی یعنی روز دهم، شرایط اولیه مدل برای بهینه‌سازی دهه بعدی را تعیین می‌کنند. پس از بهینه‌سازی سه مسأله متوالی، مقادیر بهینه برنامه‌ریزی شده برای طول یک ماه به‌دست می‌آید. در این میان مقادیر مطلوب ذخیره‌سازی مواد، برای روزهای آخر هر هفته تغییر می‌کنند. بیشتر بودن افق پیش‌بین نسبت به مدت زمان بین تغییرات تقاضا، به الگوریتم پیش‌بین امکان را می‌دهد که تقاضای آینده در بهینه‌سازی انتقال درنظر گرفته شود. جدول ۱ علاوه‌بر محدودیت مقدار نهایی انتهای ماه، مقدار مطلوب انواع مختلف فرآورده‌های نفتی برحسب تعداد بسته‌های مواد با حجم ثابت در برنامه‌ریزی بلندمدت برای مرکز ذخیره‌سازی اول و دوم در انتهای هفته‌ها را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که مقادیر مطلوب هفتگی و محدودیت اختلاف با مقادیر مطلوب ماهانه از طریق مرکز پخش اعلام می‌شود. لذا، روش ارایه شده ضمن تعیین مقادیر بازه ۸ ساعته انتقال سعی می‌کند با کمترین مقدار ممکن خطا، مقادیر مطلوب هفتگی را طوری دنبال کند که در پایان ماه محدودیت مورد نظر برآورده گردد.

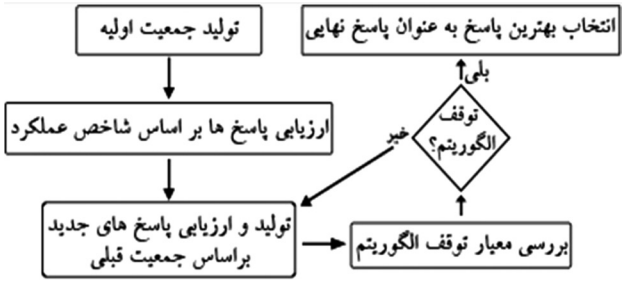
الگوریتم ژنتیک با الگو برداری از تکنیک‌های زیست شناسی تکاملی، با ارزیابی تابع هزینه شبکه انتقال به بررسی کیفیت مجموعه‌ای از پاسخ‌های تصادفی می‌پردازد و در هر مرحله با ترکیب پاسخ‌های بهتر سعی در یافتن یک پاسخ عملی[3] دارد که شاخص عملکرد سیستم را بهینه نماید [۱۶]. شکل ۴ روند نمای الگوریتم ژنتیک را نمایش می‌دهد.

پس از حل برنامه‌ریزی غیرخطی دارای محدودیت، میزان مواد ذخیره شده در مراکز، برای سه دهه متوالی به‌دست آمد. به‌گونه‌ای که علاوه‌بر ارضای محدودیت‌های ساختاری شبکه انتقال، ذخیره‌سازی مقادیر مطلوب در انتهای هر هفته نیز برنامه‌ریزی شد. شکل ۵ ورودی کنترل بهینه شده به روش کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل فضای حالت به شکل بسته‌های ارسالی به‌سمت مراکز ذخیره‌سازی اول و دوم، در دهه اول با افق پیش‌بین بیست روزه و دنباله تصمیم اعمالی (افق کنترل) ده روزه را به‌همراه تغییرات خروجی سیستم شامل تعداد محموله‌های ذخیره شده در مراکز ذخیره‌سازی نشان می‌دهد.

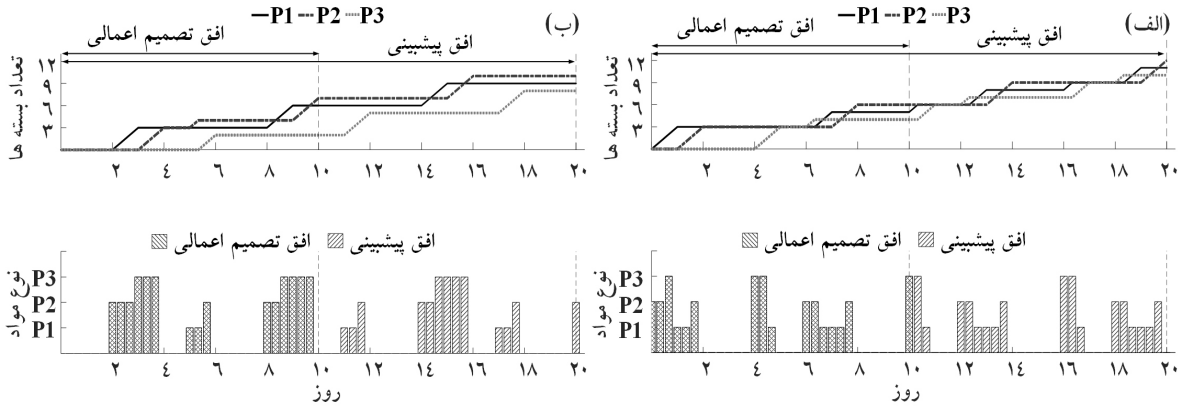
پس از بهینه‌سازی انتقال برای بیست روز اول، مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم‌گیری مربوط به دهه اول، به مدل اعمال می‌شود و حل مسأله بهینه‌سازی مبتنی بر پیش‌بینی مدل دینامیکی مجدداً برای بیست روز دوم با مبدأ زمانی انتهای دهه اول -با شرایط اولیه جدید و لحاظ محدودیت انتهای ماه- انجام گرفته و دنباله زمان‌بندی اعمالی برای دهه دوم به‌دست می‌آید.

این روند تا برنامه‌ریزی سیستم انتقال برای مدت یک ماه ادامه می‌یابد. در نهایت، مقادیر مربوط به برنامه‌ریزی ماهیانه برای مراکز ذخیره‌سازی سیستم انتقال به‌صورت شکل ۶ نشان داده شده است.

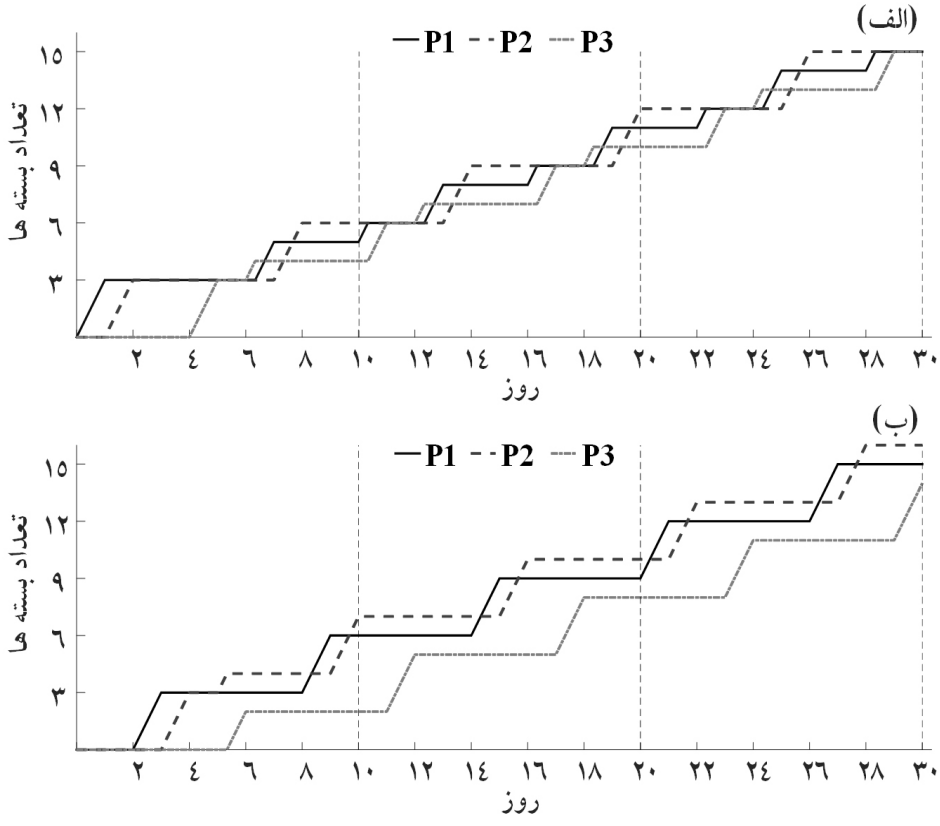
1. Manipulated Control Sequence
2. Manipulated Decision Sequence
3. Feasible



شکل ۴ روندنمای الگوریتم ژنتیک



شکل ۵ نتایج بهینه‌سازی برای زمان‌بندی انتقال بسته‌ها در دهه اول به‌سمت مرکز ذخیره‌سازی الف) اول ب) دوم (افق پیش‌بین برابر ۲۰ و افق تصمیم (کنترل) اعمالی برابر ۱۰)



شکل ۶ برنامه زمان‌بندی بلندمدت ذخیره‌سازی مواد در مرکز ذخیره‌سازی الف) اول ب) دوم

می‌آید. این روند تا برنامه‌ریزی سیستم انتقال برای مدت یک ماه ادامه می‌یابد. در نهایت، مقادیر مربوط به برنامه‌ریزی ماهیانه برای مراکز ذخیره‌سازی سیستم انتقال به‌صورت شکل ۶ نشان داده شده است. به‌طوری‌که میزان مواد ذخیره شده در انتهای هر هفته کاملاً با مقادیر مورد نیاز طبق جدول ۱ برابر است و همچنین مقدار مواد ذخیره شده در مراکز ذخیره‌سازی در انتهای ماه به‌عنوان محدودیت برنامه‌ریزی نیز با مقادیر مطلوب درخواستی برابر است. افزایش افق پیش‌بین از طرفی موجب افزایش قابلیت اطمینان سیستم در حل مسائل در بازه‌های زمانی آینده می‌شود و از طرفی موجب پیچیدگی محاسباتی بیشتر در حل مسأله می‌شود. درحالی‌که با استفاده از پنجره‌های زمانی لغزان افق محدود و تقسیم مسأله ماهیانه به مسائل کوچک‌تر، حل برون‌خط مجموعه مسائل براساس راه‌کار افق لغزان مبتنی بر کنترل پیش‌بین با نظر به وجود محدودیت‌های عملکردی، به مراتب سریع‌تر انجام خواهد پذیرفت.

نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از راه‌کار کنترل پیش‌بین و مدل دینامیکی پیشنهادی، روشی برای زمان‌بندی انتقال در شبکه خطوط انتقال فرآورده‌های نفتی، ارائه شد. ابتدا برای یک شبکه خطوط انتقال نمونه برای انتقال سه نوع فرآورده نفتی، یک مدل دینامیکی با خاصیت پیش‌بینی ارائه شد. سپس مسأله برنامه‌ریزی بلندمدت یک شبکه انتقال نمونه شامل یک مرکز پالایشگاهی متصل شده به دو مرکز ذخیره‌سازی توسط شبکه خطوط انتقال مورد بررسی قرار گرفت. برای حل مسأله برنامه‌ریزی انتقال، ابتدا مسأله ماهانه به سه مسأله کوچک‌تر ده روزه تبدیل شد و با حل متوالی آن‌ها، روش پیشنهادی مبتنی بر استراتژی کنترل پیش‌بین برای برنامه‌ریزی ماهانه به اجرا درآمد. همچنین براساس نتایج به‌دست آمده، راه‌کار کنترل پیش‌بین ضمن برآورده کردن محدودیت‌های ساختاری، تنظیم خروجی‌های سیستم به‌سمت مقادیر مطلوب در انتهای بازه زمان‌بندی را نیز عملیاتی می‌کند. ضمن اینکه در شرایط خاص و نیاز به برنامه‌ریزی مجدد، براساس شرایط فعلی شبکه و انتظارات جدید، عملیات خودکار زمان‌بندی مبتنی بر مدل دینامیکی شبکه در قالب راه‌کار کنترل پیش‌بین و به‌صورت برخط قابلیت اجرایی خواهد داشت. در واقع قابلیت به‌کارگیری برخط روش پیشنهادی در صورت تغییر استراتژی عملیات انتقال و یا بروز اختلال، از ویژگی‌های بالقوه روش پیشنهادی است. برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت در پژوهش آینده، ضمن استفاده از مدل دینامیکی ارائه شده و نتایج روش این مقاله به‌عنوان مقادیر مرجع انتقال، به‌صورت برخط اهداف انتقال و برآورده شدن محدودیت‌های انتقال را در بازه‌های زمانی کوتاه‌مدت بررسی خواهد نمود.

مراجع

[۱]. میرحسنی س. ع.، قربانعلی‌زاده م. و فانی ح.، " بهینه‌سازی برنامه‌ریزی حمل فرآورده‌های نفتی با خطوط لوله"، اولین همایش ملی راهکارهای نوین تامین، نگهداشت، انتقال و توزیع فراورده‌های نفتی، تهران. ۱۳۸۸.

[۲]. حیرانی ش.، حسین‌زاده کاشان ع. و اکبری ع.، "مدل بهینه‌سازی شبکه انتقال گاز طبیعی- مطالعه موردی شبکه سراسری انتقال گاز ایران"، پژوهش نفت، دوره ۲۷، شماره ۹۶-۴، صفحات ۵۹-۴۶، ۱۳۹۶.

[3]. MirHassani S. and Ghorbanalizadeh M., "*The multi-product pipeline scheduling system*," Computers & Mathematics with Applications, Vol. 56, No. 4, pp. 891-897, 2008.

[4]. Herrán A., de la Cruz J. M. and De Andrés B., "*A mathematical model for planning transportation of multiple*

petroleum products in a multi-pipeline system," Computers & Chemical Engineering, Vol. 34, No. 3, pp. 401-413, 2010.

[5]. Zaghian A. and Mostafaei H., "*An MILP model for scheduling the operation of a refined petroleum products distribution system*," Operational Research, Vol. 16, No. 3, pp. 513-542, 2016.

[6]. Cafaro V. G., Cafaro D. C., Méndez C. A. and Cerdá J., "*MINLP model for the detailed scheduling of refined products pipelines with flow rate dependent pumping costs*," Computers & Chemical Engineering, Vol. 72, pp. 210-221, 2015.

[7]. Kirschstein T., "*Planning of multi-product pipelines by economic lot scheduling models*," European Journal of Operational Research, Vol. 264, No. 1, pp. 327-339, 2018.

[8]. Cafaro D. C., and Cerdá J., "*Optimal scheduling of refined products pipelines with multiple sources*," Industrial & Engineering Chemistry Research, Vol. 48, No. 14, pp. 6675-6689, 2009.

[9]. Cafaro V. G., Cafaro D. C., Méndez C. A. and Cerdá J., "*Detailed scheduling of operations in single-source refined products pipelines*," Industrial & Engineering Chemistry Research, Vol. 50, No. 10, pp. 6240-6259, 2011.

[10]. Cafaro V. G., Cafaro D. C., Méndez C. A. and Cerdá J., "*Detailed scheduling of single-source pipelines with simultaneous deliveries to multiple offtake stations*," Industrial & Engineering Chemistry Research, Vol. 51, No. 17, pp. 6145-6165, 2012.

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

[12]. Mayne D. Q., "*Model predictive control: Recent developments and future promise*," Automatica, Vol. 50, No. 12, pp. 2967-2986, 2014.

[13] .Aghaee S., Zakeri Y. and Sheikholeslam F., "*Offset-free control of constrained linear systems using model-predictive control*," in IEEE International Symposium on Industrial Electronics, pp. 973-979, 2008.

[14]. Subramanian K., Maravelias C. T. and Rawlings J. B., "*A state-space model for chemical production scheduling*," Computers & Chemical Engineering, Vol. 47, pp. 97-110, 2012.

[15]. Yüzgeç U., Palazoglu A. and Romagnoli J. A., "*Refinery scheduling of crude oil unloading, storage and processing using a model predictive control strategy,*" Computers & Chemical Engineering, Vol. 34, No. 10, pp. 1671-1686, 2010.

[16]. Wu S. J. and Chow P. T., "*Genetic algorithms for solving mixed-discrete optimization problems*," Journal of the Franklin Institute, Vol. 331, No. 4, pp. 381-401, 1994.

Petroleum Research
Petroleum Research 2020(April-May), Vol. 30, No. 110, 23-25
DOI: 10.22078/pr.2020.3802.2735

Planning the Transportation of Multiple Petroleum Products in Pipeline Network based on Model Predictive Control: Modeling and Long-term Planning

Seyyed Hossein Ghenaati and Shahram Aghaei
Electrical Engineering Department, Yazd University, Iran
aghaei@yazd.ac.ir
DOI: 10.22078/pr.2020.3802.2735

Received: June/03/2019 Accepted: January/03/2020

Introduction

Due to the limited and uneven distribution of oil and gas reservoirs on the earth, there is no symmetrical distribution of refineries and other facilities in the same area. Therefore, for sending raw crude oil to refineries and also for using petroleum products like all kinds of fuels in different geographical locations, these products should be transported from refineries to consumption or storage areas. In these circumstances, using transporting pipelines, despite higher initial costs can provide higher speed, accuracy, and security [1]. One of the major issues discussed is the selection of a suitable method for timing the transfer of petroleum products from production points to the depots [2]. Planning provides coordination over a long-timescale of weeks or months to the process of transport of petroleum products in the pipeline network which is related to timing and permutation of batches [3].

Model predictive control is a rolling horizon control strategy which predicts the future of the system's dynamic behavior in a suitable horizon and explicitly considers the constraints of the system in the form of an optimization problem and determines the sequence of control inputs by ensuring that the constraints are satisfied and achieving the best possible performance at the system output [4]. This strategy provides a feasible solution to the constraint-based optimization problems.

In this paper, for a typical petroleum transfer network, a dynamic state space model is first established and then based on the predictive control method, a constrained optimization for the planning problem in the multiple pipeline network is presented. By considering slider time windows, constraints and future demands located in the given prediction horizon, the applied receding horizon control strategy predicts the performance of the transportation system by the dynamic model based on the current conditions of the pipeline network. Then, in the form of an optimization program, it determines the optimal transportation sequences in a specified horizon. Finally, the proposed method permits to easily optimize planning with low computational cost.

Material And Methods

The Proposed Approach for Planning the Multiple Pipeline Network

The topology of the network components used to connect the pipelines to the transportation network determines how the transporting system operates and also has a significant impact on determining the complexity of the network; and therefore, the dynamics available in the pipeline network model. Figure 1 shows the investigated multiple pipeline network along with the initial state within the pipeline sections in this study.

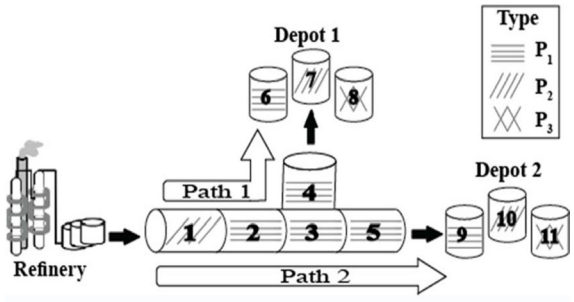


Fig. 1: Multiple pipeline network.

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 transportation system. To establish a dynamic model, Equation 1 expresses the transporting model of batches within each network segment at each time interval.

$$\begin{aligned} X_1(t+1) &= U(t) \\ X_2(t+1) &= X_1(t) \\ X_3(t+1) &= X_2(t) \\ X_4(t+1) &= S(t)X_3(t) + (\neg S(t))X_4(t) \\ X_5(t+1) &= (\neg S(t))X_3(t) + S(t)X_5(t) \end{aligned} \quad (1)$$

Then Equation 2 represents stored batches in various depots.

$$\begin{aligned} X_6(t+1) &= X_6(t) + S(t)\left(\left\lfloor \frac{1}{X_4(t)} \right\rfloor \left\lfloor \frac{X_4(t)}{1} \right\rfloor\right) \\ X_7(t+1) &= X_7(t) + S(t)\left(\left\lfloor \frac{2}{X_4(t)} \right\rfloor \left\lfloor \frac{X_4(t)}{2} \right\rfloor\right) \\ X_8(t+1) &= X_8(t) + S(t)\left(\left\lfloor \frac{3}{X_4(t)} \right\rfloor \left\lfloor \frac{X_4(t)}{3} \right\rfloor\right) \\ X_9(t+1) &= X_9(t) + (\neg S(t))\left(\left\lfloor \frac{1}{X_5(t)} \right\rfloor \left\lfloor \frac{X_5(t)}{1} \right\rfloor\right) \\ X_{10}(t+1) &= X_{10}(t) + (\neg S(t))\left(\left\lfloor \frac{2}{X_5(t)} \right\rfloor \left\lfloor \frac{X_5(t)}{2} \right\rfloor\right) \\ X_{11}(t+1) &= X_{11}(t) + (\neg S(t))\left(\left\lfloor \frac{3}{X_5(t)} \right\rfloor \left\lfloor \frac{X_5(t)}{3} \right\rfloor\right) \end{aligned} \quad (2)$$

Predictive equations of state and output based on the state space model can be written as Equation 3.

$$\begin{aligned} &X(t+1) = A(S(t))X(t) + B(S(t),U(t),X(t))U(t) \\ &X(t+2) = A(S(t+1))X(t+1) + \\ &\qquad B(S(t+1),U(t+1),X(t+1))U(t+1) \\ &\vdots \\ &Y(t+1) = C\,X(t+1) \\ &\vdots \\ &Y(t+N_P) = C\,X(t+N_P) \end{aligned} \quad (3)$$

where $X(t) = \left[X_1(t) \;\; X_2(t) \;\; \ldots \;\; X_{q-1}(t) \;\; X_q(t)\right]^T \in \mathbb{Z}^q$

and $Y(t) = \left[Y_1(t) \;\; Y_2(t) \;\; \ldots \;\; Y_{q-1}(t) \;\; Y_q(t)\right]^T \in \mathbb{Z}^q$

Based on the model (3), the proposed MPC-based method leads to the following finite horizon nonlinear constrained programming:

$$\min_{\mathbf{S}(t),\mathbf{U}(t)} \left(\begin{array}{l} \sum_{i=1}^{N_p} \left\| \delta_i \left(R(t+i\,|\,t) - Y(t+i\,|\,t) \right) \right\|_2 + \ldots \\ \sum_{i=0}^{N_p-1} \left\| \lambda_i \left(U(t+i\,|\,t) - U(t-1+i\,|\,t) \right) \right\|_2 + \ldots \\ \sum_{i=0}^{N_p-1} \left\| \gamma_i \left(S(t+i\,|\,t) + \theta \right) \right\|_2 \end{array} \right)$$

$$s.t.: \quad \text{Model (3)}, \quad g\left(R(t+i), X(t+i)\right) < 0, \quad \forall i = 1,2,\ldots,N_P, \quad (4)$$

where $U(t+i) \in \{1,2,\ldots,P\}$ and $S(t+i) \in \{0,1\}$ are the decision variable determining the type of product and control input variable determining the path of transportation respectively. Also, the function g denotes the set of constraints to be fulfilled. Then, the problem is ready to be solved based on the model predictive control strategy.

Results And Discussion

Simulation Results

Based on the predictive control strategy utilizing moving finite horizon, the monthly problem of planning transportation of multiple petroleum simulated. The planning problem was divided into three consecutive problems with 10-day horizon and then the proposed was implemented by solving them sequentially. After solving the constrained nonlinear programming (4), the number of batches stored in the depots was obtained for three consecutive 10-day periods. In addition to satisfying the structural constraints of the pipeline network, the storage of optimum values at the end of each week was also planned.

products in the given typical network was Figures 2 and 3 show optimized control inputs based on the state space model and model predictive control in the form of batches sent to two depots, with a 20-day prediction horizon and a 10-day control horizon along with system output changes including the number of batches.

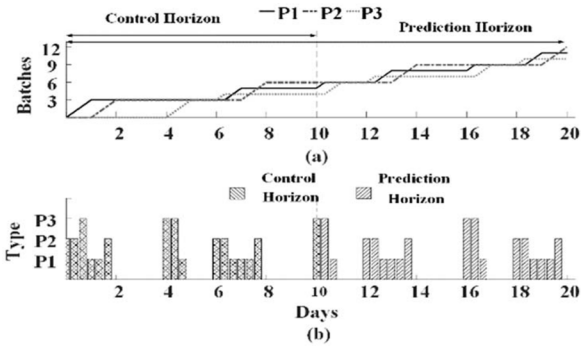


Fig. 2: Optimization results of the first 10-days of transporting to depot 1. a) Batches b) Type.

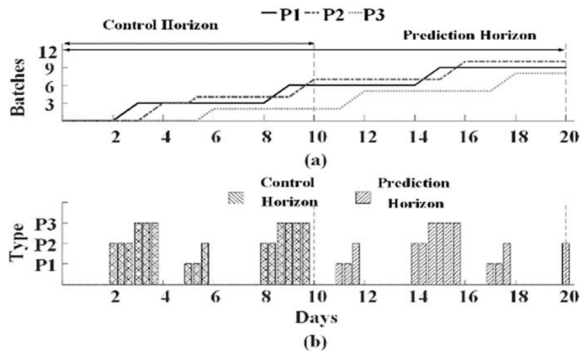


Fig. 3: Optimization results of the first 10-days of transporting to depot 2. a) Batches b) Type.

Conclusions

In this paper, a dynamic model is proposed for a multiple pipeline network to transport three types of petroleum products (P1, P2, P3). Then the long-term planning problem for a pipeline network consisting of a refinery center connected to two depots by the transporting pipelines was investigated. To solve the planning problem, the monthly problem was first divided into three smaller 10-day problems, and by solving them sequentially, a proposed method based on the predictive control strategy for monthly planning was developed. Based on the results, fulfilling the structural constraints, the proposed predictive control approach permits to adjust the system outputs to the desired demands at the weekends.

References

1. MirHassani S, Ghorbanalizadeh M (2008) The multi-product pipeline scheduling system, Computers & Mathematics with Applications, 56, 4: 891-897.
2. Kirschstein T (2018) Planning of multi-product pipelines by economic lot scheduling models, European Journal of Operational Research, vol. 264, no. 1, pp. 327-339.
3. 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.
4. Mayne D Q (2014) Model predictive control: Recent developments and future promise, Automatica, 50, 12: 2967-2986.