

ارائه یک مدل جدید عدد صحیح آمیخته و یک روش تکراری برای مسئله زمان‌بندی و برنامه‌ریزی خطوط لوله چند فرآورده‌ای نفت

سید علی میرحسینی، ندا بهشتی اصل^۱

دانشکده ریاضی و علوم کامپیوتر، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۹/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۴/۶

چکیده: مسئله برنامه‌ریزی خطوط لوله یکی از پیچیده‌ترین مسائل در حیطه مسائل کاربردی و صنعتی است. مدل‌سازی این مسائل بسیار پیچیده بوده و محققین متعددی در جهت ارائه مدل‌های کارآمد و توسعه روش‌های حل مناسب برای این دست از مدل‌ها تلاش کرده‌اند. در این مقاله مدل بهینه‌سازی عدد صحیح آمیخته^۲ (MILP) جدیدی برای زمان‌بندی و برنامه‌ریزی خطوط لوله چند فرآورده‌ای که یک پالایشگاه را به یک مرکز توزیع وصل می‌کند، ارائه می‌شود. مزیت این مدل در شیوه فرمول‌بندی آن است به‌گونه‌ای که سعی شده است تعداد متغیرهای باینری استفاده شده در مدل را کاهش داده و از پیچیدگی مدل ریاضی بکاهد. برای این منظور ابتدا مسئله بدون در نظر گرفتن برخی از محدودیت‌های عملیاتی فرمول‌بندی شده است و در طی حل مدل از طریق به‌کارگیری یک الگوریتم تکراری گام‌به‌گام این محدودیت‌ها به مدل اضافه می‌گردد. نتایج این مدل برای یک مورد واقعی بر اساس اطلاعات گرفته شده از شرکت مخابرات و خطوط لوله نفت ایران گزارش شده است.

واژه‌های کلیدی: زمان‌بندی و برنامه‌ریزی، خطوط لوله چند فرآورده‌ای، مدل ریاضی MILP

رده‌بندی موضوعی (۲۰۱۰): ۹۳A۳۰، ۳۴H۰۵.

۱- مقدمه

مهم‌ترین وسایل حمل‌ونقل فرآورده‌های نفتی شامل خطوط لوله نفت، وسایل حمل‌ونقل جاده‌ای، ریلی و دریایی می‌باشند. خطوط لوله به دلیل قابلیت اطمینان بالا، هزینه‌های پایین، عدم محدودیت در مسیر انتقال و از همه مهم‌تر ظرفیت بالای انتقال، از کاربردی‌ترین ابزار انتقال فرآورده‌های نفتی است. به همین دلیل، مسئله برنامه‌ریزی خطوط لوله فرآورده‌های نفتی به‌عنوان یک مسئله کلیدی در صنعت نفت مورد بررسی قرار می‌گیرد. در سال‌های اخیر با افزایش تقاضای فرآورده‌های نفتی، ضرورت برنامه‌ریزی سیستم انتقال و توزیع فرآورده‌ها بیش از پیش احساس می‌شود. به کمک برنامه‌ریزی می‌توان به اصلی‌ترین نیاز مدیران در امر تصمیم‌گیری از قبیل اینکه چه زمانی از چه نوع فرآورده‌ای و به چه میزان به خط لوله تزریق شود، برای یک افق زمانی معین پاسخ داد به‌گونه‌ای که موجب کاهش هزینه‌های انتقال و هزینه‌های مربوط به ذخیره‌سازی فرآورده‌ها و همچنین افزایش رضایت‌مندی بازار مصرف (تأمین تقاضای مشتریان با کمترین تأخیر ممکن) شود. مسائل برنامه‌ریزی خطوط لوله عمدتاً شامل سه بخش اصلی زیر می‌باشند:

- تخصیص (تخصیص فرآورده‌ها به محموله‌هایی که به‌صورت متوالی به خط تزریق می‌شوند)
 - زمان‌بندی (زمان‌بندی عملیات خطوط لوله از جمله زمان‌بندی تزریق محموله‌ها)
 - مدیریت موجودی (مدیریت موجودی در انبارها، مراکز توزیع و پالایشگاه‌ها)
- پیچیدگی مدل از ادغام این سه بخش ناشی می‌شود که هرکدام به‌نوبه‌ی خود حل مسئله را مشکل می‌سازند.

مسئله زمان‌بندی خطوط لوله چند فرآورده‌ای، به‌طور عمده در دهه هفتاد میلادی مورد بررسی قرار گرفت. در سال ۱۹۷۴ [۱] اولین سیستم خطوط لوله با هدف کاهش تداخل میان فرآورده‌ها توسط تکو^۱ و هلبورک^۲ مورد مطالعه قرار گرفت. بعدها هانه^۳ و راتلیف^۴ [۲] در سال ۱۹۹۵ یک مدل MILP با هدف کاهش هزینه‌های ناشی از تداخل فرآورده‌ها زمان‌بندی مسئله را برای یک دوره یک‌ماهه مورد بررسی قرار داده و برای حل مدل از روش تجزیه استفاده کردند. در این مدل متغیر زمان از نوع گسسته در نظر گرفته شده است. ضعف این مدل افزایش تعداد متغیرهای دودویی و به‌تبع آن افزایش زمان محاسباتی حل مدل گزارش شده است. کافرو^۵ و همکاران وی [۳] یک مدل MILP جدید برای زمان‌بندی مسئله خطوط لوله چند فرآورده‌ای ارائه کردند. در این مدل متغیر زمان از نوع پیوسته در نظر گرفته شده است. پایین بودن تعداد متغیرهای دودویی

- 1- Techo
- 2- Holbork
- 3- Hane
- 4- Ratliff
- 5- Cafaro

و در نتیجه کاهش زمان حل مسئله از ویژگی‌های اصلی این مدل است. ریلواس^۱ و همکاران [۴] در سال ۲۰۰۶ یک مدل MILP برای زمان‌بندی خطوط لوله چند فرآورده‌ای بر اساس کار کافرو [۳] ارائه کردند. در این مدل متغیر زمان از نوع پیوسته در نظر گرفته شده است. خط لوله مورد مطالعه شامل یک پالایشگاه و تنها یک انبار است که توجه نویسندگان بیشتر به مدیریت موجودی در پالایشگاه و انبارها معطوف بوده است. در سال ۲۰۰۸ کافرو و کردا^۲ [۵] با در نظر گرفتن یک نرخ جریان پمپاژ ثابت برای هر یک از فرآورده‌ها، فرمول‌بندی جدیدی از مدل ریلواس ارائه دادند که به‌طور چشم‌گیری زمان حل مسئله را کاهش می‌داد. آن‌ها [۶] در سال ۲۰۰۹ مدل MILP پیوسته برای زمان‌بندی یک سیستم خط لوله مستقیم ارائه کردند که علاوه بر پالایشگاهی که در ابتدای خط وجود دارد یک یا چند پالایشگاه دیگر در مسیر وجود داشت و وظیفه تأمین تقاضای مراکز توزیعی که در مسیر خط لوله وجود دارند را به عهده داشتند. در این مدل در هر زمان فقط یکی از پالایشگاه‌ها امکان تزریق به خط را دارد و به همان میزان که تزریق می‌شود در یک یا چند مرکز توزیع فرآورده تخلیه می‌شود. آن‌ها در سال ۲۰۱۰ این مدل را بهبود داده [۷] و علاوه بر تزریق امکان برداشت از مراکز میانی خط لوله لحاظ شده است. در سال ۲۰۱۲ آن‌ها [۸] فرض برداشت هم‌زمان چند مرکز توزیع در زمان تزریق هر محموله را به مدل اضافه کردند و در سال ۲۰۱۵ [۹] برای همان صورت مسئله مدل غیرخطی عدد صحیح آمیخته^۳ MINLP ارائه کرد که هزینه پمپاژ مربوط به نرخ جریان فرآورده‌ها را بهینه می‌کند. میرحسینی و همکاران [۱۰] روشی ابتکاری برای تعیین دنباله فرآورده‌ها ارائه دادند که هم از نظر زمان حل و هم از نظر بهینگی بسیار امیدوارکننده است. در این مقاله خط لوله مستقیمی که یک پالایشگاه را به چندین مرکز توزیع وصل می‌کند در نظر گرفته شده است. آن‌ها در [۱۱] و [۱۲] در سال ۲۰۱۳ با در نظر گرفتن همه محدودیت‌های عملیاتی حاکم بر مسئله، یک روش ابتکاری برای زمان‌بندی یک خط لوله مستقیم با یک مبدأ و یک مقصد ارائه دادند. در همان سال ریلواس و همکاران [۱۳] مدل MILP جدیدی را برای خط لوله مستقیم چند فرآورده‌ای ارائه کردند که زمان حل مسئله را کاهش می‌داد. این مدل خطوط لوله چند فرآورده‌ای که یک پالایشگاه را به یک مرکز توزیع متصل می‌کرد، فرمول‌بندی کردند. در این مدل، مشابه مدل کافرو، با محدود کردن دامنه انتخاب در تزریق فرآورده اولیه، باعث کاهش زمان حل مسئله می‌شد. به‌عبارت‌دیگر آن‌ها با این کار تعداد متغیر دودویی را کاهش می‌دادند. اخیراً کریچتین^۴ در سال ۲۰۱۸ مسئله خط لوله مستقیم با یک پالایشگاه و یک مرکز توزیع را در قالب یک مسئله زمان‌بندی اقتصادی فرمول‌بندی کرده و از طریق روش‌های حل موجود برای مسئله زمان‌بندی اقتصادی، مدل جدید

1- Relvas

2- Cerdá

3- Mixed integer non-linear problem

4- Kirschstein

خط لوله را حل کرده است [۱۴]. ریلواس و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۱۸ با ارائه یک روش ابتکاری دنباله و حجم محموله‌ها را به دست آورده‌اند. مدل جدید پیشنهادی آن‌ها با فرض برداشت هم‌زمان چندین مرکز توزیع فرمول‌بندی شده است و برای حل مدل از یک روش تجزیه ابتکاری بهره برده‌اند.

برنامه‌ریزی انتقال فرآورده‌های نفتی از طریق خطوط لوله اغلب منجر به ایجاد مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح آمیخته می‌شود. در این مقاله مدل جدیدی به‌منظور کاهش زمان حل مسئله از طریق کاهش تعداد متغیرهای دودویی مسئله ارائه می‌شود. همچنین به‌منظور کاهش پیچیدگی مسئله، برخی مفروضات از قبیل رعایت دنباله ممنوعه به‌طور تدریجی اعمال و برای این منظور یک الگوریتم تکراری پیشنهاد می‌شود.

در ادامه مقاله، در بخش ۲ صورت مسئله برنامه‌ریزی خط لوله و مفروضات حاکم بر مسئله بیان می‌شود. در بخش ۳ مدل جدید عدد صحیح آمیخته برای برنامه‌ریزی خطوط لوله یک ورودی و یک خروجی ارائه و در بخش ۴ الگوریتمی تکراری برای حل مدل ارائه می‌شود. در بخش ۵ با ارائه موردهای مطالعاتی متعددی روش حل پیشنهادی اعتبار سنجی و یک مثال واقعی از طریق همین روش حل شده است. در بخش آخر ۶ کارهای آتی برای مطالعات پیشرو پیشنهاد می‌شود.

۲- صورت مسئله

خط لوله مستقیم چند فرآورده‌ای، خط لوله‌ای است که یک پالایشگاه را به مرکز توزیع با انبارهای ذخیره متعدد متصل می‌کند. مرکز توزیع وظیفه تأمین تقاضای روزانه بازارهای محلی را بر عهده دارد. فرآورده‌های نفتی در قالب محموله‌هایی با حجم‌های مختلف بدون هیچ جداکننده‌ی فیزیکی به‌طور پیوسته پشت سر هم به خط لوله تزریق می‌شوند. در هنگام تزریق محموله‌ها به خط لوله، محموله‌هایی که از قبل در خط وجود دارند به سمت جلو حرکت داده می‌شوند. به همان میزان که از مبدأ فرآورده پمپاژ می‌شود، فرآورده از انتهای خط لوله تخلیه می‌شود. به‌عبارت‌دیگر حجم ورودی و خروجی از خط یکسان است. در مرکز توزیع مجموعه‌ای از مخازن وجود دارد که هر فرآورده در مخزن مخصوص به خود ذخیره می‌شود. خط لوله مستقیم مانند شکل ۱ را در نظر بگیرید. تصمیمات اصلی در برنامه‌ریزی خط لوله عبارت است از:

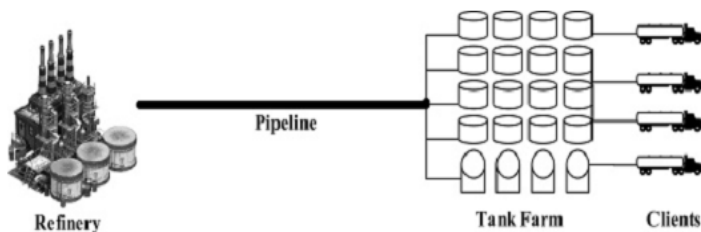
۱- انتخاب نوع فرآورده و حجم محموله‌ها.

۲- زمان دقیق انتقال محموله‌ها (زمان شروع و پایان دوره).

۳- مدیریت موجودی.

این تصمیمات در قالب تعیین دنباله‌ای از فرآورده‌ها که به هر یک از آن‌ها یک محموله گفته می‌شود، بیان می‌شود. برای هر محموله از این دنباله باید مشخصاتی از قبیل نوع فرآورده، حجم

محموله، زمان شروع و پایان تزریق و تخلیه تعیین شود. از نظر برنامه‌ریزان دنباله‌ای مطلوب است که با تزریق آن بتوان تقاضاها را به‌موقع تأمین کرد و علاوه بر آن هزینه‌هایی از قبیل انبارداری، هزینه ناشی از آلودگی فرآورده‌ها در خط لوله و هزینه انرژی مصرفی کمینه شود.



شکل (۱): خط لوله مستقیم با یک پالایشگاه و یک مرکز توزیع.

با توجه به طولانی بودن مسیرها و محدود بودن نرخ پمپاژ، فاصله زمانی بین تزریق و تخلیه هر محموله به چندین ساعت و حتی چندین روز می‌رسد؛ بنابراین اگر برای تأمین تقاضا در مراکز توزیع به حجمی از یک فرآورده نیاز باشد، این حجم باید از مدتی قبل به خط تزریق شود تا به‌موقع به مرکز توزیع برسد. هر چه مدت‌زمان بیشتری در اختیار باشد، برای تزریق فرآورده‌ها می‌توان از نرخ پمپاژ کمتری استفاده کرد و هزینه انرژی مصرفی را کاهش داد؛ اما اگر محدودیت زمانی وجود داشته باشد، باید از نرخ پمپاژ بالاتری استفاده کرد و اگر تأخیری در این کار صورت بگیرد علاوه بر ایجاد هزینه مالی، ممکن است تبعات اجتماعی و سیاسی نیز در پی داشته باشد. از طرفی چون ظرفیت انبارها محدود است، میزان تزریق فرآورده‌ها باید به‌گونه‌ای باشد که با کمبود ظرفیت در انبارها چه در مراکز توزیع و چه در پالایشگاه‌ها مواجه نشویم و چون محموله تزریق شده قابل برگشت نیست اگر حجمی بدون در نظر گرفتن ظرفیت مخازن به خط تزریق شود باعث ایجاد هزینه می‌شود. لذا باید بین مبدأ و مقصد هماهنگی لازم وجود داشته باشد. برنامه‌ریز به دنبال اتخاذ تصمیمات بهینه فوق است به‌نحوی که بیشترین سود عاید شرکت خطوط لوله گردد. این سود می‌تواند جنبه مالی (کاهش هزینه‌های عملیاتی) و غیرمالی (افزایش رضایت‌مندی مشتریان) داشته باشد. محدودیت‌های اصلی مسئله نیز به شرح زیر است:

(۱) در پالایشگاه و در انبارها، مقدار فرآورده‌ای که در هر مخزن ذخیره می‌شود باید متناسب با حداکثر ظرفیت آن مخزن باشد.

۲) امکان ارسال متوالی بعضی از فرآورده‌ها مانند بنزین و گازوئیل وجود ندارد. وقتی به این دو فرآورده نیاز است بعد از پمپاژ بنزین، نفت سفید را به خط لوله می‌فرستند و بعدازآن گازوئیل را وارد خط لوله می‌کنند.

۳) در هر لحظه حداکثر یک مخزن در پالایشگاه و یک مخزن دریکی از انبارها در ارتباط با خط لوله است.

مهم‌ترین فرضیات حاکم بر مسئله عبارت‌اند از:

۱. خط لوله همیشه پر است و تنها راه تخلیه فرآورده از خط لوله، تزریق حجمی برابر با آن به خط لوله است.

۲. در هر مرکز توزیع تمام مخازن مخصوص هر فرآورده را به‌صورت یک مخزن به‌هم‌پیوسته، با حجمی برابر با مجموع حجم این مخازن در نظر گرفته می‌شود.

۳. در زمان تزریق یک محموله، حجمی برابر با حجم تزریق‌شده، از یک یا چند محموله در مراکز توزیع تخلیه می‌شود. این تخلیه ممکن است به‌صورت هم‌زمان باشد یا متوالی که به تصمیم مدیران و امکانات موجود بستگی دارد.

۴. تزریق فقط از ابتدای خط صورت می‌گیرد.

۵. محدودیت‌های مربوط به پالایشگاه در نظر گرفته نمی‌شود، فرض بر این است که پالایشگاه قادر به تأمین تمام فرآورده‌های موردنیاز است.

۶. ممکن است برای حجم هر محموله محدودیتی در نظر گرفته شود، مثلاً حداقل و حداکثر حجمی که از هر فرآورده در قالب یک محموله می‌توان به خط تزریق کرد برای هر فرآورده مشخص است و حجم هر محموله بسته به این که شامل چه فرآورده‌ای است باید در بازه معینی صدق کند.

۷. اگر تقاضاها موعد تحویل داشته باشند، باید قبل از پایان موعد، تأمین شوند و عدم تأمین به‌موقع جریمه خواهد داشت.

۸. ممکن است به خاطر کنترل کیفیت فرآورده‌های تخلیه شده در مراکز توزیع، برای هر محموله دوره‌ته‌نشینی در نظر گرفته می‌شود؛ یعنی هر محموله پس از تخلیه کامل در مرکز توزیع باید

مدت مشخصی به صورت ساکن، خارج از فرآیند توزیع نگه‌داری شود تا ناخالصی آن ته‌نشین گردد و پس از آن قابل استفاده خواهد بود. طول دوره ته‌نشینی برای هر یک از فرآورده‌ها مشخص است.

۹. نرخ پمپاژ در یک بازه حداقل و حداکثر متغیر است.

با توجه به فرضیات اشاره شده، داده‌های مسئله عبارت‌اند از:

۱. تعداد فرآورده‌ها.

۲. برآوردی از تعداد کل محموله‌ها.

۳. حجم محموله‌هایی که از قبل در خط لوله وجود دارند و نوع فرآورده و موقعیت هر کدام در خط لوله.

۴. تعداد روزهای افق زمانی در برنامه‌ریزی، کل ساعات افق زمانی و ساعت اتمام هر یک از روزها و میزان تقاضای در هر روز.

۵. ظرفیت خط لوله از پالایشگاه تا مرکز توزیع.

۶. ماتریس مجاز کنار هم قرار گرفتن هر زوج از فرآورده‌های.

۷. حجم تداخل متناظر با هر جفت از فرآورده‌ها.

۸. موجودی اولیه هر یک از فرآورده‌ها در هر یک از مراکز توزیع.

۹. حداقل و حداکثر سطح مجاز موجودی برای هر فرآورده.

۱۰. حداقل و حداکثر حجم ممکن یک محموله.

۱۱. محدوده مجاز نرخ پمپاژ.

۱۲. طول دوره ته‌نشینی هر یک از فرآورده‌ها.

۱۳. هزینه ناشی از هر واحد تداخل بین هر جفت از فرآورده‌ها.

۱۴. جریمه تأخیر روزانه هر واحد از فرآورده‌ها در هر یک از مراکز توزیع.

مطلوب مسئله عبارت است از:

■ زمان‌بندی بهینه خط لوله شامل دنباله فرآورده‌هایی که به خط لوله تزریق می‌شوند، حجم و نوع محموله‌ها و زمان اتمام تخلیه محموله‌ها، هم‌چنین زمان در دسترس بودن محموله‌ها پس از گذراندن دوره ته‌نشینی.

- مدیریت موجودی، به این معنا که سطح مجاز هر فرآورده در مخازن همیشه رعایت شود و تقاضای مشتریان با کم‌ترین تأخیر ممکن تأمین گردد.
- تابع هدف می‌تواند ترکیبی از اهداف ذیل باشد:
- مینیمم‌سازی جریمه مربوط به تأخیر تأمین تقاضاها در موعد مقرر.
- مینیمم‌سازی هزینه انبارداری هر فرآورده در مرکز توزیع.

۳- مدل ریاضی

همان‌طور که ذکر شد، یک بخش از مسئله خط لوله، تخصیص فرآورده به هر محموله است. قسمت تخصیص مدل به دلیل وجود تعداد زیادی از متغیرهای دودویی، بیشترین تأثیر در دشواری حل مدل مسئله خط لوله را دارد. برای رفع این مشکل رویکرد متفاوتی برای مدل‌سازی مسئله در این بخش پیشنهاد می‌شود. با معرفی کردن یک متغیر جدید نیمه‌پیوسته، بخش تخصیص مسئله خط لوله را از مدل حذف کرده و این عمل به‌طور ضمنی از طریق متغیر نیمه‌پیوسته انجام می‌شود. این کار باعث حذف تعداد چشمگیری از متغیرهای دودویی که وظیفه تخصیص نوع فرآورده به محموله‌ها را دارند، می‌شود. در سایر مدل‌های قبلی، متغیر دودویی برای تشخیص دنباله فرآورده‌ها استفاده می‌شود که این متغیرها از مدل پیشنهادی حذف شده‌اند.

فرض کنیم پالایشگاه دارای $|P|$ فرآورده متفاوت جهت برنامه‌ریزی خط لوله باشد. محموله‌ها به‌صورت بسته‌های $|P|$ تایی به ترتیب از نوع فرآورده ۱، الی فرآورده $|P|$ در نظر گرفته می‌شوند. ترتیب قرار گرفتن فرآورده‌ها باید به‌گونه‌ای باشد که هیچ دو فرآورده ممنوعه‌ای کنار هم قرار نگیرند. برای مثال اگر ۵ نوع فرآورده پالایشگاهی مدنظر باشد آنگاه بسته‌های ۵ تایی از محموله‌ها تعریف می‌شود. به ترتیب، محموله اول از نوع فرآورده P_1 ، محموله دوم از نوع P_2 و الی‌آخر محموله پنجم از نوع فرآورده P_5 است. حال اگر دو بسته از محموله‌های ۵ تایی پشت سر هم قرار بگیرند یعنی ۱۰ محموله در کنار یکدیگر، آنگاه محموله ششم دارای فرآورده نوع P_1 ، محموله هفتم دارای فرآورده از نوع P_2 و الی‌آخر، محموله دهم از نوع فرآورده P_5 است. به‌عبارت‌دیگر از طریق شماره محموله می‌توان نوع فرآورده آن محموله را مشخص کرد. اگر محموله i -ام برای $|P| > i$ را در نظر بگیریم آنگاه از طریق مقدار باقیمانده تقسیم شمارنده محموله بر تعداد کل فرآورده‌ها $\text{remined}(\frac{i}{|P|})$ می‌توان نوع فرآورده آن محموله را تعیین کرد.

مدل ریاضی پیشنهاد شده در این مقاله، برخلاف سایر مدل‌های پیشین فاقد بخش تخصیص فرآورده به هر محموله است و کافی است حجم هر محموله تعیین شود. حجم هر محموله از

طریق متغیر نیمه‌پیوسته $\{0\} \cup [\bar{b}_p^{\min}, \bar{b}_p^{\max}]$ به شرط اینکه $Q_i = \text{remined}(\frac{i}{p})$ باشد، نشان داده می‌شود. اگر برای محموله‌ای $Q_i = 0$ شود یعنی این محموله مجازی بوده و به خط لوله تزریق نشده است و در غیر این صورت اگر $Q_i \neq 0$ آنگاه با توجه به نوع فرآورده، حجم محموله باید بین حداقل و حداکثر حجم مجاز قرار گیرد.

اندیس‌ها

$p, q \in \{1, 2, \dots, P\}$ فرآورده‌ها
 $k \in \{1, \dots, h^{\max}\}$ روزهای افق زمان‌بندی
 $i, j \in \{1, \dots, I\}$ محموله‌ها

پارامترها

\bar{v}^{pipe} ظرفیت حجمی خط لوله
 \bar{h}^{\max} افق زمان‌بندی
 $p \bar{Inv}_p^{\text{pipe}}$ موجودی اولیه در خط لوله از فرآورده
 $p \bar{Inv}_p^{\circ}$ ذخیره اولیه انبار فرآورده
 $\bar{Inv}_p^{\text{pipe}}$ حداقل ظرفیت مجاز از فرآورده نوع p
 \bar{Inv}_p^{\max} حداکثر ظرفیت مجاز از فرآورده نوع p
 $\bar{Dem}_{p,k}$ حجم تقاضای از فرآورده p در روز k
 \bar{f}^{\min} حداقل نرخ جریان
 \bar{f}^{\max} حداکثر نرخ جریان

اگر تزریق دو محموله متوالی از نوع فرآورده p و q مجاز باشد مقدار آن یک و در غیر این صورت مقدار آن صفر است

$\bar{Seq}_{p,q}$
 \bar{b}_p^{\min} حداقل حجم مجاز محموله از نوع فرآورده p
 \bar{b}_p^{\max} حداکثر حجم مجاز محموله از نوع فرآورده p
 \bar{stl}_p مدت‌زمان دوره تهنشینی فرآورده نوع p
 \bar{c}_p جریمه هر واحد دیرکرد در تأمین تقاضای از فرآورده نوع p
 \bar{e}_p هزینه انبارداری

متغیرهای پیوسته نامنفی

$sh_{p,k}$ میزان کمبود در تأمین تقاضا از فرآورده نوع p در روز k ام

T_i	زمان اتمام تخلیه محموله i -ام
Q_i	میزان حجم محموله i -ام
$Inv_{p,k}$	میزان ذخیره از فرآورده p در روز k
$W_{i,k}$	حجم محموله i که در روز k تخلیه شده است
L_i	مدت زمانی که طول می کشد محموله i -ام تخلیه شود

متغیر دودویی

اگر محموله i در بین روزهای $k-1$ و k تخلیه شود، مقدار آن یک و در غیر این صورت صفر است

 $r_{i,k}$

مدل ریاضی مسئله خط لوله به صورت زیر است:

$$(MP) \quad Z^{MP} := \min \sum_{p,k} (\bar{c}_p sh_{p,k} + \bar{e}_p Inv_{p,k}) \quad (1)$$

$$s.t. \quad \bar{b}_p^{\min} \leq Q_i \leq \bar{b}_p^{\max}, \quad \forall i \quad (2)$$

$$\frac{Q_i}{\bar{f}^{\max}} \leq L_i \leq \frac{Q_i}{\bar{f}^{\min}}, \quad \forall i \quad (3)$$

$$W_{i,k} \leq Q_i, \quad \forall i, k \quad (4)$$

$$W_{i,k} \leq M r_{i,k}, \quad \forall i, k \quad (5)$$

$$W_{i,k} \geq Q_i + M(1 - r_{i,k}), \quad \forall i, k \quad (6)$$

$$Inv_{p,k} = \overline{Inv}_p - \overline{Dem}_{p,k} + sh_{p,k} + \overline{Inv}_p^{pipe} \left\lceil \frac{\overline{Inv}_p^{pipe}}{\bar{f}^{\min}} \right\rceil + \overline{stl}_p = k \quad (7)$$

$$k = 1, \forall p$$

$$Inv_{p,k} = Inv_{p,k-1} - \overline{Dem}_{p,k} + sh_{p,k} - sh_{p,k-1} + \sum_{i|p=\text{remined}(\frac{i}{|P|})} W_{i,k} + \overline{Inv}_p^{pipe} \left\lceil \frac{\overline{Inv}_p^{pipe}}{\bar{f}^{\min}} \right\rceil + \overline{stl}_p = k \quad (8)$$

$$\forall p, k > 1$$

$$\overline{Inv}_p^{\min} \leq Inv_{p,k} \leq \overline{Inv}_p^{\max}, \quad \forall p, k \quad (9)$$

$$\sum_k (k-1)r_{i,k} \leq T_i \leq \sum_k kr_{i,k} + (1+h^{\max}) \sum_k (1-r_{i,k}) \quad (10)$$

$$\forall i, k$$

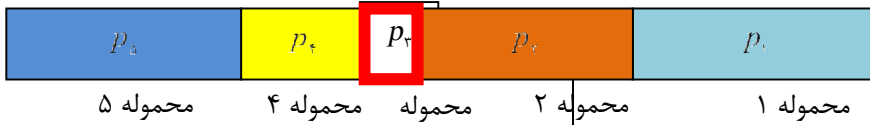
$$T_i = T_{i-1} + L_i, \quad \forall i \quad (11)$$

تابع هدف (۱) مجموع جریمه کمبودها از هر نوع فرآورده و هزینه انبارداری را کمینه می‌کند. قید (۲) بیان می‌کند که اگر محموله از نوع p باشد باید حجم آن محموله در بازه حداقل و حداکثر حجم مجاز از نوع فرآورده p قرار گیرد. قید (۳) نشان می‌دهد که مدت‌زمانی که طول می‌کشد محموله i از خط لوله به‌طور کامل تخلیه شود بین دو نسبت حجم محموله و حداقل/حداکثر نرخ جریان است. قیود (۴) الی (۶) بیانگر این مطلب هستند که اگر محموله i در روز k تخلیه شود ($r_{i,k} = 1$) آنگاه حجم تخلیه شده از محموله i در روز k برابر با حجم محموله است یعنی $W_{i,k} = Q_i$ که در آن M عددی بزرگ است. قیود (۷) و (۸) مدیریت موجودی انبارها برای روز اول و مابقی روزهای افق زمان‌بندی را نشان می‌دهد. موجودی از نوع فرآورده p در روز اول برابر است با مجموع میزان موجودی اولیه، میزان کمبود و حجمی که از قبل در خط لوله موجود بوده و بعد از گذراندن دوره ته‌نشینی در روز اول قابل‌استفاده می‌گردد، البته میزان تقاضا در آن روز از موجودی کاسته می‌شود. میزان موجودی از فرآورده p برای روز k عبارت است از مجموع میزان موجودی در روز قبل، میزان حجمی از نوع p که از طریق تخلیه محموله i در روز $k - \overline{stl}_p$ حاصل می‌شود، میزان کمبود از نوع p در روز k و میزان حجم فرآورده p که از طریق محموله‌های قبلی موجود در خط لوله که بعد از گذراندن دوره ته‌نشینی در روز k قابل‌استفاده می‌شود، منهای میزان تقاضا و میزان کمبود فرآورده p روز $k-1$ که در روز k تأمین می‌شود. قید (۹) حداقل و حداکثر ظرفیت مجاز ذخیره‌سازی از هر نوع فرآورده را نشان می‌دهد. قیود (۱۰) الی (۱۱) زمان‌بندی دریافت محموله‌ها را نشان می‌دهند. قید (۱۰) نشان می‌دهد که زمان دریافت هر محموله بین کدام دو روز متوالی قرار می‌گیرد. قید (۱۱) بیان می‌کند که زمان دریافت محموله i عبارت است از زمان دریافت محموله قبلی $i-1$ بعلاوه مدت‌زمانی که طول می‌کشد محموله i از خط لوله خارج شود.

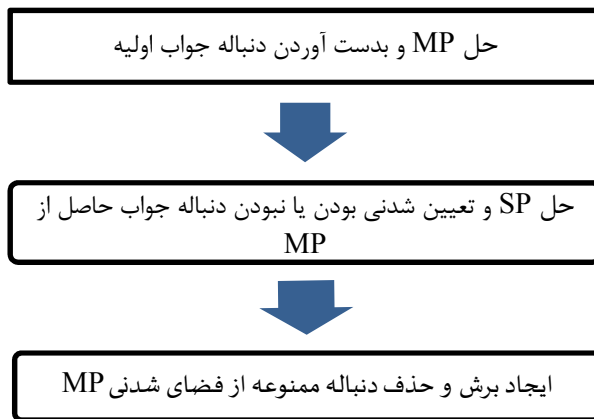
۴- الگوریتم حل مسئله

همان‌طور که گفته شد، به دلیل محدودیت عملیاتی تزریق پشت سر هم برخی فرآورده‌ها ممنوع است. این محدودیت عملیاتی به دلیل حذف متغیرهای دودویی بخش تخصیص مسئله خط لوله از مدل اصلی^۱ (MP) امکان‌پذیر نیست. برای مثال فرض کنیم فرآورده نوع دو و فرآورده نوع

چهار تشکیل دنباله ممنوعه دهند حال اگر در دنباله جواب مدل MP حجم محموله شماره سه، صفر شود یعنی دو محموله دو و محموله چهار پشت سر هم قرار می‌گیرند که یک دنباله ممنوعه را می‌سازند. برای رعایت دنباله ممنوعه الگوریتمی ارائه می‌شود که از طریق آن می‌توان این محدودیت را اعمال کرد. شکل ۲ را ببینید.



شکل (۲): عدم رعایت دنباله ممنوعه بین دو فرآورده نوع دو و چهار



شکل (۳): سه مرحله اصلی الگوریتم حل مسئله

ایده اصلی به این شرح است که ابتدا مسئله MP را حل کرده و دنباله محموله جواب به‌دست‌آمده از حل مدل بررسی می‌گردد. اگر در دنباله جواب به‌دست‌آمده هیچ دو فرآورده غیرمجازی پشت سر هم قرار نگرفته باشند، دنباله فعلی را به‌عنوان دنباله جواب بهین در نظر می‌گیریم در غیر این صورت با اضافه کردن برشی به مسئله MP جواب فعلی را حذف کرده و مسئله MP را دوباره حل می‌کنیم. این روند را تا جایی ادامه می‌دهیم که جوابی فاقد دنباله ممنوعه به دست آوریم. این الگوریتم می‌تواند جوابی با کیفیت قابل قبول نه لزوماً بهینه در زمان مناسب به دست آورد. الگوریتم شامل سه مرحله اصلی است. به شکل ۳ ببینید.

گام‌های اصلی الگوریتم عبارت‌اند از:

گام اول: مدل MP را حل کرده و مقدار بهینه متغیرهای مربوط به دنباله فرآورده‌ها و حجم هر محموله (Q_j) به دست می‌آید. اگر دنباله به دست آمده از حل مدل MP شدنی باشد به این مفهوم که عدم توالی فرآورده‌های غیرمجاز رعایت شده باشد، دنباله‌ی بهینه است. در گام بعدی شدنی بودن دنباله فرآورده‌های به دست آمده از حل مدل MP بررسی می‌شود.

گام دوم: از بین دنباله جواب به دست آمده از حل مدل MP، محموله‌هایی را که حجم آن‌ها صفر است (محموله مجازی) از دنباله جواب حذف کرده و سپس به ترتیب محموله‌ها را شماره‌گذاری می‌گردد. شکل ۴ را ببینید. پارامتر دودویی $\bar{x}_{p,j}$ که در آن اندیس j شمارنده محموله‌ها است، برابر مقدار یک است اگر محموله‌ی j -ام از نوع فرآورده p باشد و در غیر این صورت مقدار آن صفر خواهد بود.



شکل (۴): ترتیب محموله‌های غیرمجازی

در این مرحله شدنی بودن دنباله جواب به معنی عدم حضور دنباله ممنوعه بررسی می‌شود. برای این منظور مدل SP^1 زیر را حل می‌گردد. اگر مقدار تابع هدف Z^{SP} صفر شود یعنی دنباله جواب شدنی است و جواب فعلی بهینه است. در غیر این صورت بعد از اضافه کردن برش (۱۵) به مسئله MP مجدداً مسئله MP به منظور به دست آوردن دنباله‌ای جدید حل می‌گردد.

$$(SP) \quad Z^{SP} := \min \sum_j y_j \tag{13}$$

$$s.t. \quad \bar{x}_{p,j} + \bar{x}_{q,j+1} - y_j \leq \overline{Seq}_{p,q} + 1, \quad \forall p, q \tag{14}$$

$$y_j \in \{0, 1\}$$

گام سوم: اگر دنباله جواب شامل دنباله ممنوعه باشد یعنی $Z^{SP} \neq 0$. فرض کنید مجموعه I^{fes} مجموعه اندیس محموله‌های تهی باشد که حذف آن‌ها باعث ایجاد دنباله ممنوعه شده است. افزودن برش (۱۵) به مدل MP باعث می‌شود حداقل یکی از محموله‌های مجازی حجمی غیر صفر داشته باشند و از طرفی چون Q_j متغیرهای نیمه‌پیوسته هستند لذا مقدار مناسب را در بازه تعریف شده برای حداقل و حداکثر مجاز محموله از هر نوع فرآورده، اتخاذ می‌کند.

$$\sum_{i \in I^{fes}} Q_i \geq 1 \quad (۱۵)$$

۵- ارزیابی الگوریتم و مقایسه نتایج

در این بخش به اعتبار سنجی الگوریتم و ارزیابی نتایج آن پرداخته می‌شود. قسمت اول با ایجاد مسائلی با داده‌های تصادفی به اعتبار سنجی الگوریتم می‌پردازد. در این قسمت برای مسائل با افق زمانی کوتاه مدت، از دو جنبه زمان حل مسئله و کیفیت جواب، نتایج با مدل ریلواس [۱۳] مقایسه شده است. در قسمت دوم مثال واقعی از طریق الگوریتم پیشنهادی حل شده و نتایج آن گزارش شده است. مدل ریاضی MILP با نرم‌افزار AIMMS 4.11 اجرا شده است. برای حل این مثال‌ها از طریق مدل، از نرم‌افزار CPLEX 12.4 به‌عنوان solver استفاده شده است. تمامی مثال‌ها با کامپیوتری با مشخصات زیر حل شده است.

Core 7 Duo CPU 4.00 GHz Processor, 6 GB of RAM

۵-۱- ارزیابی الگوریتم

داده‌هایی که در برنامه‌ریزی یک سیستم خط لوله لازم است، شامل دو دسته است. دسته اول داده‌هایی هستند که در دوره‌های زمانی مختلف ثابت می‌مانند و مستقل از زمان و برنامه‌های قبلی می‌باشند مانند ظرفیت خط لوله و مخازن، نوع فرآورده‌ها و طول دوره تهنشینی آن‌ها و حجم تداخل بین آن‌ها. برخی از این داده‌ها در ادامه نشان داده شده است. در جدول ۱ ماتریس مجاز و در جدول ۲ طول دوره تهنشینی و ظرفیت مخازن نشان داده شده است. علامت "X" در جدول ۱ نشان‌دهنده این است که دو فرآورده‌ای که در سطر و ستون متناظر آن آمده است نمی‌توانند در خط لوله کنار هم قرار بگیرند. ظرفیت خط لوله ۱۸۰۰۰ مترمکعب در نظر گرفته شده است.

جدول (۱): ماتریس مجاز تزریق فرآورده‌ها

P_6	P_5	P_4	P_3	P_2	P_1	فرآورده‌ها
	X					P_1
X	X	X	X			P_2
X				X		P_3
X				X		P_4
			X		X	P_5
		X	X	X	X	P_6

ارائه یک مدل جدید عدد صحیح آمیخته و یک روش تکراری برای مسئله زمان‌بندی... ۱۲۰

دسته دوم داده‌هایی هستند که در دوره‌های مختلف برنامه‌ریزی تغییر می‌کنند، مانند موجودی اولیه فرآورده‌ها در مرکز توزیع و خط لوله و تقاضای روزانه هر یک از فرآورده‌ها. دسته دوم از داده‌ها که به آن‌ها اشاره شد، در دوره‌های زمانی و برنامه‌ریزی‌های مختلف معمولاً در بازه مشخصی قرار می‌گیرند. این اطلاعات با استفاده از توزیع یکنواخت از بازه داده شده، تولید شده‌اند. جدول ۳ توزیع یکنواخت موجودی اولیه و تقاضای روزانه هر فرآورده را در مرکز توزیع نشان می‌دهد.

جدول (۲): میزان ذخیره اولیه فرآورده‌ها و حداقل و حداکثر حجم مجاز هر محموله

انواع فرآورده‌ها	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6
حداکثر ظرفیت مخازن (m^3)	۴۰۶۹۰	۲۲۸۲۸	۱۳۸۶۷	۱۸۲۷۶	۷۷۷۱	۶۷۳۴
کمترین حجم مجاز (m^3)	۱۷۳۰۰	۸۰۰	۸۰۰	۳۸۰۰	۸۶۰	۴۹۲۰
بیشترین حجم مجاز (m^3)	۲۱۸۰۰	۱۶۰۰۰	۱۶۰۰۰	۱۶۰۰۰	۳۴۴۰	۸۲۰۰
مدت‌زمان ته‌نشینی (h)	۲۴	۴۸	۲۴	۲۴	۶	۶

جدول (۳): توزیع یکنواخت موجودی اولیه و تقاضای روزانه هر یک از فرآورده‌ها

فرآورده‌ها	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6
توزیع یکنواخت موجودی اولیه ($\times 100$)	$U[40,50]$	$U[200,240]$	$U[120,140]$	$U[180,190]$	$U[7,85]$	$U[60,75]$
توزیع یکنواخت تقاضای روزانه ($\times 100$)	$U[20,100]$	$U[20,90]$	$U[1,10]$	$U[22,40]$	$U[20,40]$	$U[5,15]$

جدول (۴): نتایج حاصل از روش مستقیم و الگوریتم پیشنهادی

تعداد روزها	متغیر پیوسته		متغیر دودویی		میانگین زمان حل (ثانیه)	
	مدل ریلوآس پیشنهادی	مدل ریلوآس	مدل پیشنهادی	مدل ریلوآس	الگوریتم مستقیم	الگوریتم
۸	۱۸۶	۱۹۶	۹۶۰	۸۰	۵۳/۰۹	۱۱۸/۶۵
۱۰	۲۴۶	۲۵۸	۱۲۵۰	۱۰۰	۱۴۵/۸۷	۱۱۰/۳۳
۱۲	۳۵۷	۳۷۶	۱۷۲۸	۱۴۴	۱۶۸/۲۱	۱۰۸/۵۴
۱۴	۴۷۲	۴۹۵	۲۱۸۴	۱۸۲	۶۴۳/۷۶	۱۳۷/۲۹
۱۶	۵۶۱	۶۲۹	۲۸۸۰	۲۴۰	۷۱۹/۶۲	۱۳۲/۷۶

در مرحله اول برای اعتبارسنجی الگوریتم با تولید تصادفی چند دسته مجزا از داده‌های نوع دوم از توزیع مربوط به هر کدام، مدل را به صورت مستقیم توسط مدل ریلوآس [۱۳] برای دوره‌های

زمانی مختلف ۸، ۱۰، ۱۲، ۱۴ و ۱۶ روزه حل کرده و جواب‌های به‌دست‌آمده از نظر بهینگی و زمان حل با جواب‌های به‌دست‌آمده از الگوریتم پیشنهادی مقایسه می‌شود. نتایج در جدول ۴ نشان داده شده است. تعداد مثال‌های حل‌شده برای هر مورد ۱۰ مثال است.

می‌توان مشاهده کرد که با افزایش تعداد روزهای افق زمانی مدت‌زمان اجرای مدل به‌سرعت افزایش می‌یابد اما افزایش زمان در الگوریتم پیشنهادی با افزایش تعداد روزهای افق زمانی تغییر زیادی نمی‌کند و این نشان می‌دهد در برنامه‌ریزی‌های بلندمدت با استفاده از این روش می‌توان در زمان معقولی به یک جواب قابل‌اعتماد رسید. سرعت حل مدل پیشنهادی، به دلیل کاهش عمده متغیرهای دودویی مدل است که در مدل فوق مشهود است. علاوه بر این در تمامی موارد الگوریتم به جواب بهینه دست‌یافته است.

۵-۲- مثال دوم (یک سیستم واقعی)

مشخصات این خط لوله شامل حجم خط لوله، موقعیت مرکز توزیع، سطح مجاز موجودی هر فرآورده در مرکز توزیع، طول دوره تنشینی و حجم مجاز هر فرآورده در قالب یک محموله، تداخل بین فرآورده‌ها و همچنین داده‌های مربوط به تقاضای روزانه و موجودی اولیه فرآورده‌ها در خط لوله و مرکز توزیع برای ماه آبان سال ۱۳۹۱ از شرکت خطوط لوله و مخابرات نفت ایران گرفته شده است. پنج فرآورده نفتی شامل P_1 ، P_2 ، P_3 ، P_4 و P_5 برای تأمین تقاضای روزانه از پالایشگاه به خط لوله تزریق می‌شود. حجم هر یک از این فرآورده‌ها در قالب یک محموله که به خط تزریق می‌شوند، باید در بازه معینی برای آن فرآورده صدق کند. حداکثر و حداقل حجم هر یک از فرآورده در قالب یک محموله و همچنین موجودی اولیه و مدت‌زمان تنشینی برای هر فرآورده در جدول ۵ آمده است.

جدول (۵): میزان ذخیره اولیه فرآورده‌ها و حداقل و حداکثر حجم مجاز هر محموله

انواع فرآورده‌ها	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5
حجم اولیه مخازن (m^3)	۵۴۱۳۶	۲۸۸۲۸	۳۸۶۷	۱۹۲۷۶	۵۶۷۷۱
کمترین حجم مجاز (m^3)	۱۷۶۰۰	۶۳۰۰	۵۲۰۰	۳۴۰۰	۶۷۰۰
بیشترین حجم مجاز (m^3)	۲۶۰۰۰	۱۲۰۰۰	۱۶۰۰۰	۱۶۰۰۰	۲۰۰۰۰
مدت‌زمان تنشینی (h)	۶	۳	۷	۵	۱۲

سیستم مورد مطالعه عبارت است از یک خط لوله با ظرفیت ۵۹۰۰۰ مترمکعب که پالایشگاه اصفهان را به انبار ری متصل می‌کند. حجمی از هر یک از فرآورده‌ها که به خط تزریق می‌شوند با فرآورده‌ای که قبل از آن به خط تزریق شده است مخلوط می‌شود، این حجم با توجه به نوع هر

جفت از فرآورده‌ها متفاوت است و برای هر جفت از آن‌ها این حجم برابر با یک مقدار ثابت و مشخص است. در جدول ۶ تزریق غیرمجاز هر جفت از فرآورده‌ها آمده است.

جدول (۶): ماتریس مجاز تزریق فرآورده‌ها

فرآورده	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5
P_1	X				
P_2		X			
P_3			X	X	
P_4				X	
P_5			X	X	X

دنباله جواب مورد واقعی در مدت‌زمان ۶۴۷ ثانیه حاصل شده است و در جدول ۷ مشاهده می‌شود.

جدول (۷): دنباله جواب به‌دست‌آمده برای مثال مورد واقعی

فرآورده	محموله ۱	محموله ۲	محموله ۳	محموله ۴	محموله ۵	محموله ۶	محموله ۷
حجم (m^3)	P_4	P_3	P_4	P_1	P_2	P_1	P_2
	۹۵۵۰	۱۵۸۶۰	۹۳۶۹	۱۷۶۰۰	۱۰۹۳۱	۱۹۹۳۹	۸۰۷۰
فرآورده	محموله ۸	محموله ۹	محموله ۱۰	محموله ۱۱	محموله ۱۲	محموله ۱۳	محموله ۱۴
حجم (m^3)	P_1	P_4	P_5	P_4	P_2	P_4	P_1
	۱۸۲۰۹	۱۵۳۶۵	۱۴۵۹۷	۱۲۸۱۸	۹۱۶۰	۱۰۷۰۳	۲۱۶۶۷
فرآورده	محموله ۱۵	محموله ۱۶	محموله ۱۷	محموله ۱۸	محموله ۱۹	محموله ۲۰	محموله ۲۱
حجم (m^3)	P_2	P_1	P_4	P_1	P_2	P_1	P_2
	۱۰۷۶۴	۲۲۱۴۶	۳۶۵۷	۱۷۹۶۱	۱۰۳۲۰	۲۰۲۳۱	۱۰۶۰۵
فرآورده	محموله ۲۲	محموله ۲۳	محموله ۲۴	محموله ۲۵	محموله ۲۶	محموله ۲۷	محموله ۲۸
حجم (m^3)	P_1	P_2	P_1	P_4	P_2	P_4	P_3
	۲۵۲۲۰	۱۱۴۰۳	۱۸۱۴۷	۷۲۳۸	۱۳۳۵۹	۳۹۵۸	۷۱۲۱
فرآورده	محموله ۲۹	محموله ۳۰	محموله ۳۱	محموله ۳۲	محموله ۳۳	محموله ۳۴	محموله ۳۵
حجم (m^3)	P_4	P_3	P_4	P_1	P_2	P_1	P_2
	۶۸۲۹	۷۱۱۷	۱۲۱۸۵	۲۳۶۷۲	۱۰۹۱۳	۱۸۲۴۷	۸۷۰۳
فرآورده	محموله ۳۶						
حجم (m^3)	P_1						
	۲۱۹۶۱						

نتیجه‌گیری

در این مقاله مدلی جدید برای مسئله خط لوله مستقیم با یک ورودی و یک خروجی ارائه شده است. این مدل در مقایسه با سایر مدل‌های موجود دارای تعداد متغیر دودویی کمتری است لذا حل مدل سریع صورت می‌گیرد. به منظور رعایت کردن فرض دنباله ممنوعه الگوریتمی تکراری ارائه شد که در هر تکرار شدنی بودن دنباله جواب حاصل از مدل را بررسی کرده و در صورت نشدنی بودن برشی را به مدل اضافه می‌کند. روش پیشنهادی ارزیابی شد و برای مثال واقعی پیاده‌سازی گردید. علاوه بر این نتایج الگوریتم با نتایج مدل ریاضی [۱۳] مقایسه گشت. مقایسه نشان داد که مدل ریاضی برای مسائل با افق زمانی دو هفته در مقایسه با نتایج الگوریتم پیشنهادی بسیار زمان‌بر خواهد بود. در حالی که الگوریتم در زمان خیلی کوتاه‌تر می‌تواند به جواب خوبی دست یابد. در الگوریتم ارائه شده تنها یک پالایشگاه و یک مرکز توزیع در نظر گرفته شده است، به‌عنوان کارهای آتی، می‌توان الگوریتم را برای چند پالایشگاه و چند مرکز توزیع تعمیم داد و همچنین به موضوع تزریق و برداشت توأم توسط پالایشگاه‌ها و مرکز توزیع پرداخت. همچنین می‌توان در آینده خط لوله انشعاب‌دار را به این روش برنامه‌ریزی کرد و همچنین مدیریت موجودی در پالایشگاه را نیز لحاظ کرد. هر چه مسئله مورد نظر جنبه‌های بیشتری را در برگیرد، پیچیدگی آن‌هم بیشتر می‌شود و زمان حل مدل‌های ریاضی به شدت افزایش می‌یابد. در نتیجه ارائه روش‌هایی با سرعت بالا برای حل این مسئله بسیار حائز اهمیت است که در کارهای آتی می‌توان به آن پرداخت.

منابع

- [1] Techo, R. and Holbrook, D. L. (1974), Computer scheduling the world's biggest product pipeline, *Pipeline Gas Journal*, **4**, 27.
- [2] Hane, C. A. and Ratliff, H. D. (1995), Sequencing inputs to multi-commodity pipelines, *Annals of operations research*, **57(1)**, 73-101.
- [3] Cafaro, D. C. and Cerda, J. (2004), Optimal scheduling of multiproduct pipeline systems using a nondiscrete MILP formulation, *Computers and Chemical Engineering*, **28(10)**, 2053–2068.
- [4] Relvas, S., Matos, H. A., Barbosa-Po'voa, A. F. D., Fialho, J. O. and Pinheiro, A. N. S. (2006), Pipeline Scheduling and Inventory Management of a Multiproduct Distribution Oil System, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, **45(23)**, 7841-7855.
- [5] Cafaro, D. C. and Cerda, J. (2008), Efficient Tool for the Scheduling of Multiproduct Pipelines and Terminal Operations, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, **47(24)**, 9941-9956.

- [6] Cafaro, D. C. and Cerda, J. (2009), Optimal Scheduling of Refined Products Pipelines with Multiple Source, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **48**, 6675–6689.
- [7] Cafaro, D. C. and Cerda, J. (2010), Operational scheduling of refined products pipeline networks with simultaneous batch injections, *Computers and Chemical Engineering*, **34**, 1687–1704.
- [8] Cafaro, V. G., Cafaro, D. C., Mendez, C. A. M. and Cerda, J. (2012), Detailed Scheduling of Single-Source Pipelines with Simultaneous Deliveries to Multiple Offtake Stations, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **51**, 6145-6165.
- [9] Cafaro, G. E. A. (2015), MINLP model for the detailed scheduling of refined products pipelines with flow rate dependent pumping costs, *computers and Chemical Engineering*, **72**, 210-221.
- [10] MirHassani, S. A., Moradi, S. and Taghinezhad, N. (2011), Algorithm for long-term scheduling of multi-product pipelines, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **50**, 13899-13910.
- [11] MirHassani, S. A. and BeheshtiAsl, N. (2013), A heuristic batch sequencing for multiproduct pipelines, *Computers and Chemical Engineering*, **56**, 58-67.
- [12] MirHassani, S. A., Abbasi, M. and Moradi, S. (2013), Operational scheduling of refined product pipeline with dual purpose depots, *Applied mathematical modeling*, **37**, 5723-5742.
- [13] Relvas, S., Matos, H. A., Barbosa-Po'voa, A. F. D. and Fialho, J. O. (2013), Integrated scheduling and inventory management of an oil products distribution system, *Omega*, **41**, 955-968.
- [14] Kirschstein, T. (2018), Planning of multi-product pipelines by economic lot scheduling models, *European Journal of Operational Research*, **264**, 327–339.
- [15] Hitoshi, W., Meira, T., Magatão, L. and Relvas, S. (2018), A matheuristic decomposition approach for the scheduling of a single-source and multiple destinations pipeline system, *European Journal of Applied Mathematics*, **327**, 41-63.

A New Mixed Integer Model and Iterative Solution Approach for Scheduling and Planning of Multi Product Oil Pipeline

Seyed Ali Mirhassani, Neda Beheshti Asl,

Department of Applied Mathematics, Amir Kabir University of Technology,
Tehran, Iran

Abstract

The problem of pipeline planning is one of the most complex problems in the field of applied and industrial problems. Modeling this problem is very complicated and many researchers have been working on models to provide efficient models and develop appropriate methods for solving this problem. In this paper, a new mixed integer optimization model (MILP) is proposed for scheduling and planning multiple product pipelines that connect a refinery to a distribution center. The advantage of this model is its formulation method, which attempts to reduce the number of binary variables used in the model and reduce the complexity of the mathematical model. For this purpose, the problem has first been formulated without taking into account some operational constraints and during the model's solving, by applying an iterative algorithm, these restrictions are added to the model step by step. The results of this model are reported for a real case based on information from Iran Telecom and Oil Pipelines.

Keywords: Scheduling and Planning, Multiple products Pipelines, MILP Mathematic Model.

Mathematics Subject Classification (2010): 93A30, 34H05.

