

ارائه مدل ریاضی برای بهینه‌سازی زمان‌بندی تولید محصولات روانکار

میلاد مشرفی نبی‌کندی^۱، علی حسین‌زاده کاشان^{۲*}، بختیار استادی^۳

۱. کارشناس ارشد مهندسی صنایع، گروه سیستم‌های اقتصادی و اجتماعی، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲. دانشیار گروه سیستم‌های اقتصادی و اجتماعی، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۳. دانشیار گروه مدیریت سیستم بهره‌وری، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

خلاصه

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۴۰۳/۰۴/۱۲

بازنگری ۱۴۰۳/۰۸/۰۴

پذیرش ۱۴۰۳/۰۸/۱۸

(مقاله پژوهشی)

کلمات کلیدی:

محصولات روانکار

زمان‌بندی تولید

مدل‌سازی ریاضی

جریان کارگاهی ترکیبی
(HFS)

امروزه برنامه‌ریزی و زمان‌بندی تولید به هسته اصلی مدیریت تولید در سیستم‌های تولیدی تبدیل شده است؛ چراکه منجر به کسب سود بیشتر و تثبیت تولید روزانه می‌شود. فرآیند تولید در برخی از صنایع تولیدی به‌صورت پیوسته و با ظرفیت بالا است؛ بنابراین تصمیم بهینه برای تولید پایدار و حداکثرسازی سود شرکت ضروری است. مسأله‌ی برنامه‌ریزی و زمان‌بندی تولید در سیستم‌های تولید پیوسته که فرآورده‌های متفاوتی را تولید می‌کنند، با در نظر گرفتن محدودیت‌های مختلف عملیاتی برای تولید فرآورده‌های مختلف و به‌منظور تأمین تقاضای مشتریان، یکی از مسائل پیچیده، اما بااهمیت در صنایع تولید، علی‌الخصوص تولید محصولات روانکار می‌باشد. در این پژوهش با در نظر گرفتن ساختار تولید محصولات روانکار، به مدل‌سازی و بهینه‌سازی زمان‌بندی تولید پرداخته می‌شود. هدف از مدل‌سازی، بهینه‌سازی زمان‌بندی و ارائه توالی اجرای برنامه تولید با در نظر گرفتن سطح و ظرفیت موجودی مخازن می‌باشد. در نهایت اعتبارسنجی مدل پیشنهاد شده، با استفاده از داده‌های مرتبط با صنعت صورت گرفته است. برای مسأله مورد مطالعه، مدل ریاضی فرموله شده در نرم‌افزار بهینه‌سازی Gams پیاده شده و راه‌حل بهینه در یک زمان قابل قبول به دست آمده است. نتایج به دست آمده نشان از بهبود برنامه زمان‌بندی داشته و دلالت بر قابلیت استفاده از مدل پیشنهادی در دنیای واقعی دارند.

۱. مقدمه

بهینه، مانند حداکثر زمان تکمیل، کمینه کردن تأخیر در کارها، دیرکرد و غیره، تخصیص و توالی می‌شوند. مسأله زمان‌بندی ازطیف گسترده‌ای از سیستم‌های تولید از جمله فولادسازی، فرآیند شیمیایی و غیره ناشی می‌شود. این نوع مسائل از دانشگاه تا صنعت به‌طور کامل مورد مطالعه قرار گرفته است و بررسی‌ها و پیشرفت‌های اخیر آن را می‌توان به‌وضوح در مطالعات صورت گرفته مشاهده کرد. فرآیندهای پالایشگاه معمولاً یک شبکه تولید پیوسته با مخازن ذخیره‌سازی نفت خام، محصولات میانی و محصولات نهایی هستند. زمان‌بندی پالایشگاه شامل تعیین برنامه مواد پردازش شده، میزان موجودی هر محصول میانی، نسبت‌های ترکیب و خروجی

در تکنولوژی به‌سرعت در حال توسعه امروزی، تولید نقش مهمی در توسعه اقتصاد ملی ایفا می‌کند. نحوه کاهش هزینه‌های تولید اغلب اولین موضوعی است که شرکت‌های تولیدی باید به آن توجه کنند و چگونگی تقویت قابلیت‌های مدیریت تولید، بهبود کارایی تولید و کاهش هزینه‌های تولید و عملیاتی توجه روزافزونی را به خود جلب می‌کند. این مشکلات را می‌توان با بهینه‌سازی توالی‌های انجام کار در زمان‌بندی تولید حل کرد. زمان‌بندی تولید یک فرآیند تصمیم‌گیری معمولی برای شرکت‌های تولیدی است که در آن کارها به‌طور مناسب در ماشین‌آلات یا واحدهای تولیدی برای دستیابی به یک یا چند هدف

* نویسنده مسئول: علی حسین‌زاده کاشان

تلفن: ۰۲۱-۸۲۸۸۴۳۹۸؛ پست الکترونیکی: a.kashan@modares.ac.ir

۲. مرور ادبیات

زمان‌بندی بهینه در جامعه مهندسی سیستم‌های فرآیند^۱ به‌طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته است. بیشتر مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی موجود برای زمان‌بندی می‌توانند از نظر نمایش زمان به دو دسته‌ی زمان‌پیوسته^۲ و زمان‌گسسته^۳ تقسیم شوند. رویکردهای زمان‌پیوسته و زمان‌گسسته هرکدام مزایا و معایب خود را دارند و برای انواع مختلف مسائل زمان‌بندی مناسب هستند. به‌منظور انطباق بیشتر بر مسائل تولید و حل مسأله پیچیدگی محاسباتی، نمایش زمان ترکیبی^۴ نیز در ادبیات مورد مطالعه قرار گرفته است که نمایش‌های زمان‌گسسته و زمان‌پیوسته را یکپارچه می‌کند [۴].

تعریف توالی در میان محققان رایج است. توالی به‌عنوان ترتیبی که در آن کارها (وظایف) از طریق ماشین‌ها (منابع) پردازش می‌شوند، تعریف می‌شود. زمان‌بندی توسط بیکر نیز به‌صورت زیر تعریف شد:

زمان‌بندی عبارت است از تخصیص منابع در طول زمان برای انجام مجموعه‌ای از وظایف. زمان‌بندی یک عملکرد تصمیم‌گیری است: فرآیند تعیین یک برنامه، زمان‌بندی است. زمان‌بندی مجموعه‌ای از نظریه‌ها است: مجموعه‌ای از اصول، مدل‌ها، تکنیک‌ها و نتیجه‌گیری‌های منطقی که بینشی در مورد عملکرد زمان‌بندی ارائه می‌کنند [۵].

برنامه‌ریزی و زمان‌بندی تولید یک موضوع مهم برای یک شرکت به‌منظور تبدیل کارآمد منابع (از جمله مواد خام) به محصول است. برنامه‌ریزی تولید به تصمیم‌گیری در مورد میزان تولید محصولات در سطح انبوه اشاره دارد، درحالی‌که زمان‌بندی به ارائه یک برنامه زمانی تولید محصولات مختلف و تخصیص منابع اشاره دارد. در صنعت تولید گسسته، زمان‌بندی اغلب مستلزم برنامه‌ریزی زمانی است که کارهای مختلف (و وظایف آن‌ها) باید بر روی پردازنده‌های موجود (ماشین‌ها) انجام شود [۶]. توالی و زمان‌بندی تولید یکی از مهم‌ترین فعالیت‌ها در برنامه‌ریزی و کنترل تولید است.

مورتون و پنتیکو در مورد اهمیت نقش توالی و زمان‌بندی بحث کردند و بیان کردند که: «در تمام فعالیت‌های اقتصادی نفوذ می‌کند». پیندو بیشتر اهمیت مسأله توالی و زمان‌بندی را مورد بحث قرار داد [۵].

برنامه‌ریزی یک جزء اصلی برای عملکرد کارآمد صنایع فرآیندی است. به‌خصوص در بازار رقابتی جهانی شده کنونی، برنامه‌ریزی برای اکثر صنایع از اهمیت حیاتی برخوردار است، زیرا حاشیه سود بسیار ناچیز است. پروفیسور سارجنت^۵ یکی از اولین کسانی بود که این را تصدیق کرد. کمک‌های موفقیت‌آمیز او راه را برای محققان دیگر برای توسعه روش‌های مبتنی بر بهینه‌سازی که می‌تواند به‌تعداد زیادی از مسائل زمان‌بندی فرآیند رسیدگی کند، هموار کرد. در بیشتر صنایع، بهینه‌سازی زمان‌بندی تولید به‌عنوان یک کار بسیار پیچیده دیده می‌شود و اکثر برنامه‌ریزان استفاده از یک نرم‌افزار مبتنی بر شبیه‌سازی

محصولات نهایی نفت در طول زمان‌بندی مشخص است. زمان‌بندی پالایشگاه نیازمند رعایت قوانین عملیاتی، ظرفیت‌های واحدها، تعادل مواد و خصوصیات، ظرفیت موجودی، تأمین نفت خام، تقاضای محصول نفتی و محدودیت‌های مصرف انرژی است [۱].

به‌نقل از علائقی و همکاران در پژوهش لی و همکاران [۲]، رقابت در بازار جهانی و مسائل مربوط به پایداری، شناسایی راه‌های بهبود سود، به‌حداقل رساندن انتشار دی‌اکسید کربن و کاهش هزینه‌ها را برای یک شرکت ضروری می‌سازد. باتوجه به تحقیقات صورت گرفته، نشان داده شده است که برنامه‌ریزی و زمان‌بندی تولید کارآمد می‌تواند مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی را برای صنایعی که به‌عنوان مصرف انرژی بالا شناخته می‌شوند، به‌همراه داشته باشد. صنایع فرآیندی مانند فولادسازی و پالایش نفت، دارای مصرف انرژی بالا و هزینه بالایی هستند. بنابراین، پیشنهاد روش‌های مؤثر برای مدیریت کارآمد عملیات یک کارخانه مهم است.

مسأله جریان کارگاهی در واقع زمان‌بندی مجموعه‌ای از کارها روی مجموعه‌ای از ماشین‌ها باهدف کاهش یک معیار معین است. این مسأله برای اولین بار توسط جانسون در سال ۱۹۵۴ معرفی و فرمول‌بندی شد. همچنین جانسون الگوریتمی برای یافتن پاسخ بهینه مسأله مذکور در شرایط وجود ۲ ماشین و شرایط وجود سه ماشین در موارد محدود ارائه داد. بعدها یک الگوریتم ابتکاری به نام NEH (Nawaz- Ensore- Ham) برای حل مسأله زمان‌بندی جریان کارگاهی در شرایط وجود m ماشین و n کار توسط برخی محققین معرفی شدند. از آنجا که مسأله FSP یک مسأله Hard-NP می‌باشد، تلاش‌های فراوانی برای توسعه الگوریتم‌های ابتکاری و فراابتکاری برای حل این مسأله انجام شده است. به‌عنوان مثال می‌توان به الگوریتم‌های بهینه‌سازی ازدحام ذرات جدید، کرم شب‌تاب گسسته، خفاش گسسته و نهنگ ترکیبی اشاره نمود [۳].

سطح تصمیمات زمان‌بندی اغلب تعیین‌کننده توانایی کسب‌وکار برای دستیابی به کاهش هزینه و پاسخ سریع به تقاضاهای بازار است. بنابراین، بهینه‌سازی زمان‌بندی تولید، یک نگرانی کلیدی برای شرکت‌های تولیدی مدرن است. پالایشگاه‌ها به‌دلیل پیچیدگی فرآیندها و وجود تجهیزات پیشرفته نیازمند یک زمان‌بندی دقیق برای کمک به تصمیم‌گیری‌های مناسب و بهینه در زمینه تولید هستند. زمان‌بندی تولید می‌تواند در کاهش هدررفت منابع و افزایش بهره‌وری انرژی نقش اساسی ایفا کند. در نتیجه، موضوع زمان‌بندی تولید در پالایشگاه‌ها به یک مسأله کلیدی تبدیل شده است که نیازمند تحقیقات بیشتر و ارتقاء روش‌های مدیریتی است. هدف غایی در این مقاله ارائه یک مدل ریاضی زمان‌بندی تولید جهت بهبود فرآیندهای تولید در پالایشگاه‌ها باتوجه به محدودیت‌های تعریف شده در حوزه مورد مطالعه می‌باشد.

4. Mixed-Time (MT)
5. Prof Sargent

1. Process Systems Engineering (PSE)
2. Continuous-Time (CT)
3. Discrete-Time (DT)

یا تصمیم‌گیری دستی را ترجیح می‌دهند که منجر به راه‌حل‌های غیربهبوده می‌شود. درنهایت، دلایل عمده‌ای که مانع استفاده از زمان‌بندی مبتنی بر بهینه‌سازی می‌شوند، به‌طور انتقادی تحلیل شده و راه‌حل‌های ممکن مورد بحث قرار می‌گیرند [۷].

مسئله زمان‌بندی جریان کارگاهی بدون انتظار با محدودیت دسترسی به ماشین‌ها در تحقیقات کمی بررسی شده است. درحالی‌که مدل‌سازی این مسئله برای محیط‌های تولیدی و خدماتی امری ضروری می‌باشد. مقالات موجود در زمینه زمان‌بندی جریان کارگاهی بدون انتظار با زمان آزادسازی برای کارها بدون در نظر گرفتن فرضیات واقعی از قبیل فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات پیش‌گیرانه انجام شده‌اند. در مطالعه [۸] نخستین بار مسئله زمان‌بندی جریان کارگاهی بدون انتظار با در نظر گرفتن زمان آزادسازی کارها و فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات پیش‌گیرانه در نظر گرفته شده است. در این تحقیق با در نظر گرفتن یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح غیرخطی مختلط سعی در دستیابی به جواب بهینه بوده است. همچنین، با توجه به پیچیدگی ذاتی موجود در مسئله مورد نظر، یک الگوریتم جستجوی هارمونی ترکیبی برای حل این مسئله به‌صورت مؤثر و کارآمد ارائه شده است.

تاو و همکاران [۹]، با مطالعه مسئله ماشین‌های موازی غیر مرتبط چند مرحله‌ای بدون بافر میانی وابسته به هم و مسدودی‌ها^۱، این هدف را که یک مسیر پردازش برای هر کار و یافتن جایگشتی از کارها که حداکثر زمان تکمیل را به حداقل برساند، دنبال کردند. نتایج زمان‌بندی براساس الگوریتم ژنتیک^۲ و الگوریتم شبیه‌سازی تبریدی^۳ (GASA) بررسی و نشان داده شد که روش پیشنهادی در این مقاله مؤثر و قابل اجرا است. پسوا و همکاران در سال [۱۰]، به یک نوع جدید از مسئله هیبریدی فلو شاپ با در نظر گرفتن مسدود کردن ماشین، زمان‌های راه‌اندازی مستقل و وابسته به ترتیب و همچنین ماشین‌های موازی نامرتب در هر مرحله اشاره کردند. آن‌ها دو مدل برنامه‌نویسی عدد صحیح مختلط^۴ برای انواع مورد مطالعه پیشنهاد و درنهایت، یک GRASP^۵ واکنشی برای یافتن حل‌های نزدیک به بهینه با تلاش محاسباتی قابل قبول ارائه دادند. تابع هدف اتخاذ شده در مطالعه صورت گرفته به حداقل رساندن فاصله زمانی یا طول عمر با انحراف نسبی به‌عنوان یک معیار عملکرد است. در مطالعه‌ای دیگر توسط وانگ و همکاران [۱۱]، مسئله زمان‌بندی کارگاه جریان هیبریدی با محدودیت‌های مسدود کردن (BHFSP) مورد مطالعه قرار گرفت. برای درک بهتر BHFSP، مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط آن ساخته شده و از حل‌کننده Gurobi برای نشان دادن درستی آن استفاده شد.

احمری و همکاران [۲] در مقاله خود با ارائه یک روش نوآورانه، با بهینه کردن این مسئله که چگونه زمان‌بندی تخلیه نفت خام به مخازن شارژ و برنامه‌ریزی شارژ برای انواع مختلف نفت خام به واحدهای تقطیر

صورت گیرد، می‌پردازد. برای حل این مسئله، یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط (MINLP) توسعه داده شده است. نتایج محاسباتی برای مطالعه موردی در نظر گرفته شده، نشان می‌دهد که رویکرد پیشنهادی به‌طور مؤثر پاسخ قابل‌قبولی را ارائه می‌دهد. در مطالعه دای و همکاران [۱۲]، یک روش بهینه‌سازی قوی مبتنی بر داده^۶ برای زمان‌بندی نفت خام پیشنهاد شده تا با عدم قطعیت‌های موجود در مسئله برخورد کند. داده‌های تاریخی بازده محصولات نفت خام به کمک یک الگوریتم خوشه‌بندی بردار پشتیبان به‌طور کامل استفاده می‌شوند تا مجموعه‌های عدم قطعیت ایجاد شوند. سپس یک مدل جدید DDRO براساس مجموعه‌های عدم قطعیت به‌دست آمده توسعه داده می‌شود و از طریق تبدیل دوگان به یک مسئله حل‌پذیر برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط بازسازی می‌شود. مطالعات موردی از یک پالایشگاه انجام شده و با حل بهینه‌ی زمان‌بندی نفت خام تعادل قابل‌قبولی بین هزینه تولید کل و استحکام زمان‌بندی نفت خام به‌دست آمده است.

به گفته محققین [۱۳] تولید پالایشگاهی و توزیع محصولات نفتی پایین‌دستی باید به‌طور یکپارچه در سیستم زنجیره‌تأمین پالایشگاهی یکپارچه باشند. در مقاله [۱۳]، یک مدل زمان‌بندی عمومی برای بهینه‌سازی همزمان تولید پالایشگاهی و توزیع چندلوله‌ای محصولات نفتی (RM&MOPD) توسعه داده شده که شامل سه زیرمدل: تولید پالایشگاهی (RM)، توزیع چندلوله‌ای محصولات نفتی (MOPD) و زیرمدل مشترکی که ارتباط بین تولید پالایشگاهی بالادستی و توزیع چندلوله‌ای محصولات نفتی پایین‌دستی را مدیریت می‌کند. RM&MOPD یک مدل MINLP مقیاس بزرگ زمان و حجم پیوسته است که هدف آن کمینه کردن هزینه عملیات کل است. این مدل قادر است به‌طور همزمان راه‌حل‌های بهینه برای عملیات واحدهای پالایشگاهی، مدیریت موجودی محصولات نفتی در پالایشگاه و انبارها، پروفایل حرکت زیان‌دهی نفت داخل لوله و استراتژی‌های تغذیه و تخلیه محصولات نفتی از لوله به مخازن متعدد در انبارها ارائه دهد.

در مقاله [۱۴] به زمان‌بندی و مدیریت موجودی یک سیستم خط لوله مستقیم می‌پردازد که یک پالایشگاه واحد را به چندین مرکز توزیع متصل می‌کند. با افزایش تعداد دسته‌ها و دوره‌های زمانی، حفظ وضوح مدل با استفاده از روش‌های مبتنی بر برنامه‌ریزی خطی و حل‌کننده‌های دقیق بسیار زمان‌بر خواهد بود. در این مقاله، تلاشی برای استفاده از ساختار مسئله و توسعه یک الگوریتم مبتنی بر تجزیه شده که قادر به یافتن راه‌حل‌های نزدیک به بهینه برای نمونه‌های بزرگ در زمان معقول است. آزمایش‌های محاسباتی روی یک مورد داده‌های دنیای واقعی و برخی از نمونه‌های تولید شده به‌طور تصادفی، کارایی الگوریتم پیشنهادی را از نظر کیفیت راه‌حل و زمان تأیید می‌کنند.

4. MILP

5. Greedy Randomized Adaptive Search Procedures

6. Data Driven Robust Optimization (DDRO)

1. Blocking Hybrid Flow-shop Scheduling Problem with Unrelated Parallel Machines (BHFSP-UPM)

2. Genetic Algorithm

3. Simulated Annealing Algorithm

عملیاتی پالایشگاه‌ها را به‌همراه داشته باشد. موضوع مسأله مورد مطالعه، زمان‌بندی تولید محصولات روانکار^۵ بر مبنای چندمحصولی با تمرکز بر مدیریت بهینه موجودی مخازن می‌باشد. یکی از مسائل مهمی که در این مجموعه از سیستم‌ها به‌وجود می‌آید، اهمیت موضوع برای چندمحصولی بودن می‌باشد که ممکن است چالش‌هایی را ایجاد کرده و برنامه‌ریزی تولید را با دردسرهایی مواجه کند. در سیستم‌های تولیدی که در آن تعداد بسیار زیادی محصول وجود دارد، شناسایی و تشخیص جریان تولیدی در سیستم موردنظر کمک به‌سزایی در درک سیستم تولیدی می‌تواند داشته باشد. بنابراین ترسیم جریان موجود در شبکه تولیدی از جمله عناصر کلیدی بمنظور درک و شناخت و یافتن چالش‌های مربوطه می‌باشد.

سیستم کلی پالایشگاه نفت به سه قسمت تجزیه می‌شود که در شکل (۱) نشان داده شده است. بخش اول شامل تخلیه، ادغام و کنترل موجودی نفت خام است. بخش دوم شامل برنامه‌ریزی واحد تولید است که شامل دو فرآیند تفکیک و موم‌گیری بوده و بخش نهایی و سوم نیز، ترکیب محصول نهایی و توزیع محصولات نهایی پالایشگاه را نشان می‌دهد.

مطابق با شکل (۱)، در مسأله حال حاضر به بخش دوم این سیستم می‌پردازیم و به‌روشی کارآمد براساس یک فرمول زمان‌پیوسته، مدل‌سازی آن فرموله خواهد شد. به‌منظور تولید محصولات نهایی در یک پالایشگاه، نیازمند یک محصول نیمه‌ساخته به‌نام روغن پایه^۶ بوده تا با اضافه کردن مواد افزودنی با فرمولاسیون‌های خاص محصولات نهایی مطرح شده به‌دست آید. فرآیند تولید محصولات روانکار بدین صورت بوده که ابتدا باید مواد اولیه مورد نیاز و مختلفی که از پالایش نفت خام در پالایشگاه به‌دست می‌آید، به‌عنوان ماده اولیه ورودی به فرآیند تهیه شود. بعد از ذخیره‌سازی مواد اولیه مختلف در مخازن ازپیش تعیین‌شده و مشخص، فرآیند تولید روغن پایه به‌صورت پیوسته آغاز می‌شود.

مدل ریاضی که در ادامه با آن بیشتر آشنا خواهید شد، برگرفته از مدل مسأله دوم پژوهش [۱۸] می‌باشد. تفاوت‌هایی که مدل مسأله موجود نسبت به پژوهش قبلی صورت گرفته دارد، بحث مربوط به وجود چندین ماشین موازی در مرحله اول از تولید و قابلیت تولید محصول بدون نیاز به پردازش آن در مرحله اول و با زمان صفر را دارد. همچنین درنظر گرفتن زمان‌های رسیدن مواد اولیه در بازه‌های زمانی متفاوت نیز از مواردی می‌باشد که در مسأله فعلی به آن توجه شده است.

در ادامه مطالعات صورت گرفته در این حوزه تحقیقاتی، یانگ و همکاران نیز در سال [۱۵] یک چارچوب مدل‌سازی MINLP برای یکپارچه‌سازی برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت نفت خام^۱ و برنامه‌ریزی میان‌مدت پالایشگاه^۲ توسعه داده و به‌طور مؤثر برای حل آن از یک الگوریتم پیشنهادی تجزیه لاگرانژ^۳ استفاده کرده است. پژوهش سو و همکاران [۱۶] نیز، به زمان‌بندی تصادفی دومرحله‌ای برای کل فرآیندهای پالایشگاهی با عدم قطعیت تقاضا و بازده محصول و استفاده از درخت سناریو برای نشان دادن عدم قطعیت‌ها، پرداخته است. یک مدل ریاضی ترکیبی از MINLP و GDP^۴ برای توصیف مسأله زمان‌بندی تصادفی براساس نمایش زمان‌پیوسته، که توسط سناریوها قابل تجزیه است، پیشنهاد شده است. با هدف حل نمونه‌های واقعی در مقیاس بزرگ، یک روش راه‌حل تقریب بیرونی براساس استراتژی Fix-and-Relax توسعه داده شده که براساس آن مدل پیشنهادی به زیر مسأله‌های با اندازه کوچکتر تجزیه می‌کند.

بهینه‌سازی در سطوح مختلف در زنجیره تأمین صنعت پالایشگاهی اعمال می‌شود که دامنه فعالیت‌های برنامه‌ریزی و زمان‌بندی و همچنین مدل‌سازی و کنترل واحد فرآیند را پوشش می‌دهد. یک زنجیره تأمین پالایشگاه معمولاً به خارج از دروازه‌های پالایشگاه گسترش می‌یابد و ملاحظات داخل محوطه و خارج از محوطه را دربر می‌گیرد. قسمت اولیه همه واحدهای داخل محوطه از مخازن ذخیره نفت خام تا مخازن محصول نهایی را پوشش می‌دهد، درحالی که قسمت دوم همه‌چیز دیگر را شامل می‌شود که شامل دک‌ها (دریاچه‌های کشتی) و نقاط حمل‌ونقل نفت می‌شود [۱۷].

به‌طور خلاصه متناسب با موارد مطرح شده، فاکتورها و ویژگی‌های اساسی در مسأله زمان‌بندی تولید؛ نوع محیط کارگاه، نوع مدل درنظر گرفته شده برای مسأله، روش حل استفاده شده، مشخصات محیط کارگاهی و فرض زمان (پیوسته/گسسته) می‌باشد. در ادامه باتوجه به فاکتورهای مهم استخراج شده، چارچوب ارائه و لحاظ کردن این ویژگی‌ها در مسأله حال حاضر به‌صورت جدول زیر تشریح می‌گردد.

بنابراین باتوجه به مشخصات مطرح شده در جدول (۱) که متناسب با مسأله موجود می‌باشد، هدف از این موضوع ارائه برنامه زمانی و توالی تولید محصولات، کنترل و مدیریت موجودی مخازن، مشخص نمودن مقادیر تولید محصولات درطول افق برنامه‌ریزی می‌باشد.

۳. تعریف مسأله

زمان‌بندی تولید روغن در پالایشگاه‌ها یکی از چالش‌های اساسی در مدیریت عملیات پالایشگاهی و پتروشیمی است. این مسأله به‌دلیل پیچیدگی فرآیندها، تأثیرات قوانین و مقررات محیطی، تقاضا و عرضه متغیر و اشکالات فنی به یک مسأله بهینه‌سازی تبدیل می‌شود. موفقیت در زمان‌بندی تولید روغن، می‌تواند بهبود عملکرد اقتصادی و

جدول (۱). مشخصات اصلی مسأله زمان‌بندی تولید

نوع مسأله	تابع هدف	مشخصات ماشین	فرض زمان	مدل حل	روش
HFSP	Makespan	Identical Parallel	Continuous Time	MILP	Exact

4. Generalized Disjunctive Programming

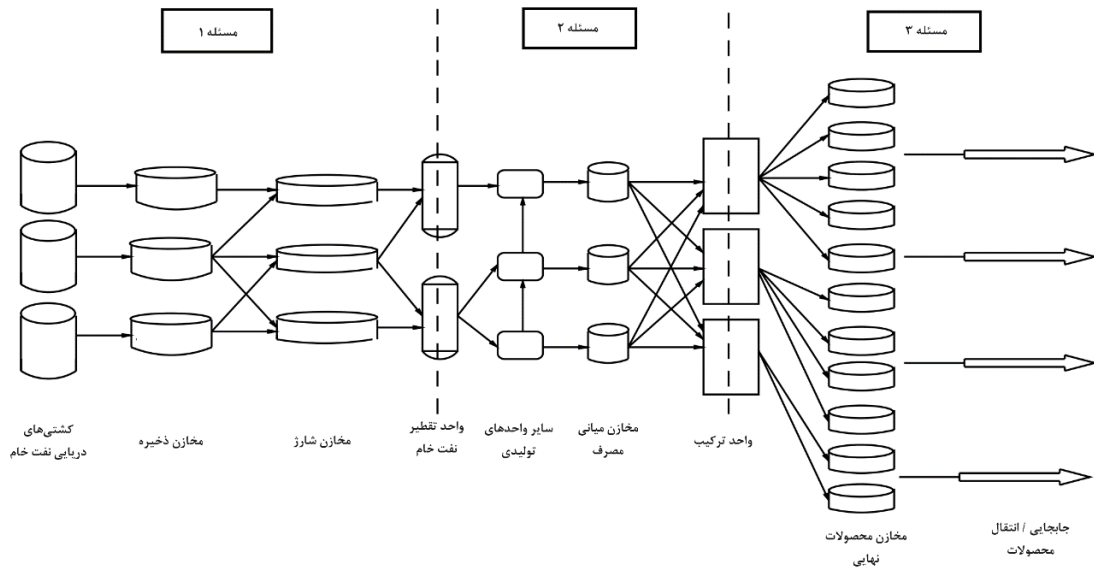
۵. روغن پایه نیز گفته می‌شود

6. Base Oil

1. Crude-oil Scheduling (CS)

2. Refinery Planning (RP)

3. Lagrangean Decomposition (LD)



شکل (۱). نمای گرافیکی سیستم پالایشگاهی [۱۸]

۱-۳. مفروضات مسأله

مفروضات اصلی مدل‌سازی ریاضی مسأله به‌صورت زیر تشریح می‌شود:

- برای هر یک از مواد اولیه، مواد میانی و محصولات نهایی ممکن است بیش از یک مخزن ذخیره‌سازی وجود داشته باشد که در این حالت ظرفیت مخازن برای آن‌ها تجمعی در نظر گرفته شده و یک مخزن واحد در نظر گرفته می‌شود.
- تقاضای موردنظر برای محصولات نهایی در طول افق برنامه‌ریزی ثابت و معلوم می‌باشد.
- افق زمانی برنامه‌ریزی ثابت لحاظ شده و این مسأله یک برنامه زمانی کوتاه مدت هفتگی را ارائه می‌دهد.
- در مرحله اول از فرآیند تولید، یک کار را می‌توان هم‌زمان روی بیش از یک ماشین پردازش کرد.
- هر ماشین موجود در فرآیند تولید می‌تواند تنها یک کار را هم‌زمان پردازش کند.
- ماشین‌ها در طول دوره برنامه‌ریزی در دسترس هستند و هرگز خراب نمی‌شوند.
- محصول تولیدی توسط کاربر مدل تعیین و تولید می‌شود.

۲-۳. معرفی مجموعه‌ها/متغیرها و پارامترها

۱-۲-۳. تعریف اندیس‌ها و مجموعه‌ها

اندیس‌ها و مجموعه‌های به‌کار برده شده در مسأله به‌صورت زیر تشریح می‌شود:

J : دسته محصول

$J \in J = \{1: \text{مواد اولیه}, 2: \text{مواد میانی}, 3: \text{نهایی محصول}\}$

p_j : محصول موجود در سیستم

t_j : مخزن موجود در سیستم

n : نقطه رویداد

k : مرحله موجود در فرآیند

m : ماشین موجود در فرآیند

L : مجموعه مراحل موجود در سیستم

I_k : مجموعه ماشین‌ها در هر مرحله $k \in L$

P_j : مجموعه محصولات در هر دسته j

T_{p_j} : مجموعه مخازن ذخیره‌سازی مواد در هر دسته محصول j

N : نقاط رویداد در افق زمانی

CPM_{p_1} : مواد اولیه‌ای که از طریق تولید ترکیبی به‌وجود آمده‌اند.

NIP_{p_1} : مواد اولیه‌ای که در تولید ترکیبی مواد میانی دخالت ندارند.

IP_{p_1} : مواد اولیه‌ای که در تولید ترکیبی مواد میانی دخالت دارند.

IMC_{p_2} : مواد میانی که از طریق ترکیب مواد اولیه به‌دست آمده‌اند.

P_{j+1,p_j} : موادی p_{j+1} که می‌توان از مواد اولیه p_j تولید کرد.

$P_{j,p_{j+1}}$: مواد p_j که می‌توانند مواد میانی p_{j+1} را تولید کنند.

۲-۲-۳. تعریف پارامترها

پارامترها و مقادیر ورودی قطعی مسأله که دارای ماهیت از قبل مشخص می‌باشند، به‌صورت زیر نمایش داده می‌شوند:

CL : تعداد مراحل موجود فرآیند تولید

Ma_k : تعداد ماشین‌های موجود در هر مرحله $k \in L$

NE : تعداد کل نقاط در نظر گرفته شده

H : افق زمانی زمان‌بندی

U : عدد بسیار بزرگ

ε : عدد بسیار کوچک

$In_j(p_j, t_j)$: مقدار مواد p_j موجود در مخزن t_j برای دسته محصولات j در ابتدای برنامه

$ELC(p_1, t_1, n)$: مقدار ورود مواد اولیه p_1 به مخزن t_1 در نقطه رویداد n

$Y(p_j, p_{j+1})$: بازده خوراک p_j و محصول p_{j+1}

$Fr_k(p_j)$: نرخ جریان مواد p_j به سمت مرحله k

$Iv(t_j)$: حداقل مقدار مجاز ذخیره مواد در مخزن t_j

$$I_j(p_j, t_j, n) = I_j(p_j, t_j, n-1) + E_k(p_j, t_j, n) - O_k(p_j, t_j, n) \quad (3)$$

$$\forall p_j \in P_j, t_j \in T_{p_j}, j = 2, k = 1, n \in N, n > 1$$

$$I_j(p_j, t_j, n) = In_j(p_j, t_j) \quad (4)$$

$$\forall p_j \in P_j, t_j \in T_{p_j}, j = |J|, n = 1$$

$$I_j(p_j, t_j, n) = I_j(p_j, t_j, n-1) + E_k(p_j, t_j, n) \quad (5)$$

$$\forall p_j \in P_j, t_j \in T_{p_j}, j = |J|, k = 2, n \in N, n > 1$$

$$\sum_{t_j \in T_{p_j}} O_{km}(p_j, t_j, n) \times Y(p_j, p_{j+1}) \leq \sum_{t_{j+1} \in T_{p_{j+1}}} E_{km}(p_{j+1}, t_{j+1}, n) + U \times (1 - SP_{km}(p_j, p_{j+1}, n)) \quad (6)$$

$$\forall p_j \in P_j, p_{j+1} \in P_{j+1}, m \in I_k, k \in L, j = k = 1, n \in N$$

$$\sum_{t_j \in T_{p_j}} O_{km}(p_j, t_j, n) \times Y(p_j, p_{j+1}) \geq \sum_{t_{j+1} \in T_{p_{j+1}}} E_{km}(p_{j+1}, t_{j+1}, n) - U \times (1 - SP_{km}(p_j, p_{j+1}, n)) \quad (7)$$

$$\forall p_j \in P_j, p_{j+1} \in P_{j+1}, m \in I_k, k \in L, j = k = 1, n \in N$$

$$\sum_{t_j \in T_{p_j}} O_k(p_j, t_j, n) \times Y(p_j, p_{j+1}) = \sum_{t_{j+1} \in T_{p_{j+1}}} E_k(p_{j+1}, t_{j+1}, n) \quad (8)$$

$$\forall p_j \in P_j, p_{j+1} \in P_{j+1}, j > 1, k = j, k \in L, n \in N$$

$$lv(t_j) \leq I_j(p_j, t_j, n) \leq hv(t_j) \quad (9)$$

$$\forall p_j \in P_j, t_j \in T_{p_j}, j \in J, n \in N$$

$$\sum_{p_{j+1} \in P_{j+1}} L(p_{j+1}) \times Sp_{km}(p_j, p_{j+1}, n) \leq \sum_{t_j \in T_{p_j}} O_{km}(p_j, t_j, n) \quad (10)$$

$$\forall p_j \in NIP_{p_1}, j = 1, k = j, m \in I_k, k \in L, n \in N$$

$$\sum_{p_{j+1} \in P_{j+1}} M(p_{j+1}) \times Sp_{km}(p_j, p_{j+1}, n) \geq \sum_{t_j \in T_{p_j}} O_{km}(p_j, t_j, n) \quad (11)$$

$$\forall p_j \in NIP_{p_1}, j = 1, k = j, m \in I_k, k \in L, n \in N$$

$$L(p_{j+1}) \times Sp_{km}(p_j, p_{j+1}, n) \leq \sum_{t_j \in T_{p_j}} O_k(p_j, t_j, n) \leq M(p_{j+1}) \times Sp_{km}(p_j, p_{j+1}, n) \quad (12)$$

$hv(t_j)$: حداکثر ظرفیت مجاز مخزن ذخیره‌سازی t_j

$L(p_j)$: حداقل مقدار مجاز مواد p_j جهت پردازش

$M(p_j)$: حداکثر مقدار مجاز مواد p_j جهت پردازش

$d(p_3)$: میزان تقاضای محصول نهایی p_3

$CAY(p_1, p_2)^1$: درصد مورد استفاده از ماده اولیه p_1 جهت تولید

ماده میانی p_2

۳-۲-۳. تعریف متغیرها

متغیرهای تصمیم به کار برده شده در مدل که شامل متغیرهای پیوسته و متغیرهای باینری می‌باشند، به صورت زیر معرفی می‌شوند:

$I_j(p_j, t_j, n)$: مقدار موجودی مواد p_j در مخزن t_j در نقطه رویداد n

$O_k(p_j, t_j, n)$: مقدار مواد p_j مصرف شده از مخزن t_j از طریق مرحله k در نقطه رویداد n

$O_{km}(p_j, t_j, n)$: مقدار مواد p_j مصرف شده از مخزن t_j به تفکیک ماشین m در مرحله k در نقطه رویداد n

$E_k(p_j, t_j, n)$: مقدار مواد p_j تولید شده به مخزن t_j از طریق مرحله k در نقطه رویداد n

$E_{km}(p_j, t_j, n)$: مقدار مواد p_j تولید شده به مخزن t_j به تفکیک ماشین m در مرحله k در نقطه رویداد n

$SP_{km}(p_j, p_{j+1}, n)$: متغیر باینری که شروع تولید محصول p_{j+1} را از ماده p_j توسط ماشین m در مرحله k در نقطه رویداد n اختصاص می‌دهند.

$S_{km}(p_j, p_{j+1}, n)$: زمان شروع تولید ماده p_j به محصول p_{j+1} توسط ماشین m در مرحله k در نقطه رویداد n

$F_{km}(p_j, p_{j+1}, n)$: زمان تولید ماده p_j به محصول p_{j+1} توسط ماشین m در مرحله k در نقطه رویداد n

۴-۲-۳. محدودیت‌ها و تابع هدف مسأله

مدل ریاضی عمدتاً شامل محدودیت‌های تعادل مواد، محدودیت‌های تخصیص، محدودیت‌های توالی و محدودیت‌های تقاضا است. به طور خلاصه محدودیت‌های تعادل مواد، مقادیر مواد را در یک واحد در یک نقطه رویداد به مقدار ماده در نقطه رویداد بعدی متصل می‌کند. محدودیت‌های تخصیص، تکالیف تحویل را بین دو مرحله متوالی تنظیم می‌کنند و زمان شروع و پایان هر عملیات توسط محدودیت‌های توالی تعیین می‌شود. محدودیت‌های تقاضا نیز تضمین می‌کنند که تمام خواسته‌ها در طول افق زمانی برآورده می‌شوند. در ادامه به طور مجزا تمام محدودیت‌های موجود در فرآیند تولید محصول نهایی یک شرکت پالایشگاهی تفکیک و به صورت کامل هریک از آن‌ها تشریح و قیود مدنظر ذکر می‌گردد.

$$I_j(p_j, t_j, n) = In_j(p_j, t_j) - O_k(p_j, t_j, n) \quad (1)$$

$$\forall p_j \in P_j, t_j \in T_{p_j}, j \neq |J|, k \in L, n = 1$$

$$I_j(p_j, t_j, n) = I_j(p_j, t_j, n-1) - O_k(p_j, t_j, n) + ELC(p_1, t_1, n) \quad (2)$$

$$\forall p_j \in P_j, t_j \in T_{p_j}, j = 1, k = 1, n \in N, n > 1$$

$$\frac{\sum_{t_{j+1} \in T_{p_{j+1}}} E_{km}(p_{j+1}, t_{j+1}, n) / Y(p_j, p_{j+1})}{Fr_k(p_j)} = F_{km}(p_j, p_{j+1}, n) - S_{km}(p_j, p_{j+1}, n) \quad (24)$$

$$\forall p_j \in P_j, p_{j+1} \in P_{j+1}, k \in L, j = 1, k = j, m \in I_k, n \in N$$

$$\frac{\sum_{t_j \in T_{p_j}} O_k(p_j, t_j, n)}{Fr_k(p_j)} = F_{km}(p_j, p_{j+1}, n) - S_{km}(p_j, p_{j+1}, n) \quad (25)$$

$$\forall p_j \in P_j, p_{j+1} \in P_{j+1}, k \in L, j > 1, k = j, m \in I_k, n \in N$$

$$\min Z = \frac{\max_{p_j, p_{j+1}, j=k=|l|}^{C_{\max}} F_{km}(p_j, p_{j+1}, NE)}{SF} \quad (26)$$

$$+ \varepsilon \sum_{m \in I_k} F_{(k-1)m}(p_{j-1}, p_j, NE) \equiv \min (C_{\max} + \varepsilon \times SF) \quad (27)$$

$$F_{km}(p_j, p_{j+1}, n) \leq C_{\max} \quad \forall p_j \in P_j, p_{j+1} \in P_{j+1}, j = k = |L|, n = NE \quad (28)$$

$$\sum_{m \in I_k} F_{(k-1)m}(p_{j-1}, p_j, n) \leq SF \quad \forall p_{j-1} \in P_{j-1}, p_j \in P_{j-1}, k = j < |J|, n = NE \quad (29)$$

محدودیت‌های (۱-۳) تا (۵-۳) بیان می‌کنند که مقدار مواد در مخزن (t) در نقطه رویداد (n) برابر با مقداری است که در نقطه رویداد n-1 تولید و در نقطه n مصرف شده باشد. برای ماده اولیه، هیچ مقداری از مرحله قبلی تولید نمی‌شود، درحالی‌که برای محصول نهایی، هیچ مقداری به مرحله بعد منتقل نمی‌شود. محدودیت‌های (۶-۳) تا (۸-۳) بیان می‌کنند که برای هر واحد تولیدی، مقدار درجه محصول در نقطه رویداد (n) برابر است با مقدار درجه ورودی در همان نقطه رویداد که در بازده ضرب شده است. محدودیت (۹-۳) نیز مربوط به کنترل حداقل و حداکثر ظرفیت مخازن می‌باشد. به‌طور مشابه، محدودیت‌های (۱۰-۳) تا (۱۲-۳) مرزهای بالایی و پایینی را بر مقدار مواد در حال پردازش در واحدهای تولیدی در نقطه رویداد (n) تحمیل می‌کنند. محدودیت‌های (۱۳-۳) و (۱۴-۳) نیز به ترتیب بیانگر تخصیص حداکثر یک واکنش به یک واحد تولید و برآورده کردن تقاضای موجود می‌باشند. مجموعه محدودیت‌های (۱۵-۳) الی (۱۹-۳) بیان می‌کند که یک واکنش که در نقطه رویداد (n+1) شروع می‌شود، باید پس از پایان زمان پایان همان واکنش در همان واحد تولیدی که در نقطه رویداد (n) شروع شده است، شروع شود. همچنین هر واکنش باید در افق زمانی (H) شروع و پایان یابد. اگر دو واکنش در یک واحد تولیدی انجام شود، باید حداکثر به‌صورت متوالی انجام شود که بیانگر محدودیت (۲۰-۳) است. قیود (۲۱-۳) الی (۲۳-۳) برای دو مرحله متوالی نوشته شده و بیانگر الزاماتی است که حاصل ضرب مرحله اول خوراک مرحله دوم باشد. محدودیت‌های (۲۴-۳) و (۲۵-۳) بیانگر مدت زمان هر واکنش است که باید بین مقدار ماده پردازش شده در آن

$$\forall p_j \in P_j, p_{j+1} \in P_{j+1}, j > 1, k = j, m \in I_k, k \in L, n \in N$$

$$\sum_{p_j} \sum_{p_{j+1} \in P_{j+1}} Sp_{km}(p_j, p_{j+1}, n) \leq 1 \quad \forall k = j, m \in I_k, k \in L, n \in N \quad (30)$$

$$\sum_{t_j \in T_{p_j}} \sum_n E_k(p_j, t_j, n) + In_j(p_j, t_j) \geq d(p_j) \quad \forall p_j \in P_j, j = |J|, k = |L| \quad (31)$$

$$S_{km}(p_j, p_{j+1}, n+1) \geq F_{km}(p_j, p_{j+1}, n) - H \times (1 - Sp_{km}(p_j, p_{j+1}, n)) \quad (32)$$

$$\forall p_j \in P_j, p_{j+1} \in P_{j+1}, j \in J, k \in L, j = k, m \in I_k, n \in N, n \neq NE$$

$$S_{km}(p_j, p_{j+1}, n+1) \geq S_{km}(p_j, p_{j+1}, n) \quad \forall p_j \in P_j, p_{j+1} \in P_{j+1}, j \in J, k \in L, j = k, m \in I_k, n \in N, n \neq NE \quad (33)$$

$$F_{km}(p_j, p_{j+1}, n+1) \geq F_{km}(p_j, p_{j+1}, n) \quad \forall p_j \in P_j, p_{j+1} \in P_{j+1}, j \in J, k \in L, j = k, m \in I_k, n \in N, n \neq NE \quad (34)$$

$$S_{km}(p_j, p_{j+1}, n) \leq H \quad \forall p_j \in P_j, p_{j+1} \in P_{j+1}, j \in J, k \in L, j = k, m \in I_k, n \in N \quad (35)$$

$$F_{km}(p_j, p_{j+1}, n) \leq H \quad \forall p_j \in P_j, p_{j+1} \in P_{j+1}, j \in J, k \in L, j = k, m \in I_k, n \in N \quad (36)$$

$$S_{km}(p_j, p_{j+1}, n+1) \geq F_{km}(p_j, p_{j+1}, n) - H \times (1 - Sp_{km}(p_j, p_{j+1}, n)) \quad (37)$$

$$\forall p_j, p_{j+1} \in P_j, p_{j+1} \in P_{j+1}, p_{j+1} \in P_{j+1}, p_{j+1} \neq p_j, j \in J, k \in L, j = k, m \in I_k, n \in N, n \neq NE$$

$$S_{km}(p_j, p_{j+1}, n+1) \geq \max_{m \in I_k} \{F_{(k-1)m}(p_{j-1}, p_j, n)\} - H \times (1 - Sp_{(k-1)m}(p_{j-1}, p_j, n)) \quad (38)$$

$$\forall p_{j-1} \in P_{j-1}, p_j \in P_j, p_{j+1} \in P_{j+1}, j \in J, k \in L, j > 1, j \neq |J|, k = j, n \in N, n \neq NE$$

$$B(p_{j-1}, p_j, n) \geq F_{(k-1)m}(p_{j-1}, p_j, n) \quad \forall p_{j-1} \in P_{j-1}, p_j \in P_j, j \in J, k \in L, j > 1, j \neq |J|, j = k, m \in I_k, n \in N, n \neq NE \quad (39)$$

$$S_{km}(p_j, p_{j+1}, n+1) \geq B(p_{j-1}, p_j, n) - H \times (1 - Sp_{(k-1)m}(p_{j-1}, p_j, n)) \quad (40)$$

$$\forall p_{j-1} \in P_{j-1}, p_j \in P_j, p_{j+1} \in P_{j+1}, j \in J, k \in L, j > 1, j \neq |J|, k = j, n \in N, n \neq NE$$

معقول و منطقی گردید. برای حل این مدل از نرم‌افزار بهینه‌سازی گمز^۱ ۲۴.۱.۳ با حل‌کننده CPLEX 12.5.1.0 و با در نظر گرفتن پیش‌فرض‌های اولیه آن، استفاده شده است. واحد برنامه‌ریزی با دریافت سبد ماهیانه تولید محصولات، با توجه به تغییراتی که ممکن است در ادامه در سبد ماه به وجود آید؛ ابتدا آن را به ۴ سبد هفتگی مختلف دسته‌بندی کرده و برنامه تولید محصولات متناسب با هر هفته را به واحد فرآیند اعلام می‌نماید. واحد برنامه‌ریزی تقاضای هفتگی را با توجه به سبد ماهیانه استخراج کرده و با در نظر گرفتن جزئیات ارائه شده در قسمت داده‌های عنوان شده، سعی در ارائه یک برنامه زمان‌بندی دقیق دارد. ابتدا در جدول (۳) تقاضای در نظر گرفته شده برای هفته ۱ را نشان می‌دهیم و سپس نتایج خروجی از مدل ریاضی فرموله شده را در ادامه تشریح می‌کنیم.

با توجه به تقاضای هفتگی عنوان شده، خروجی مربوط به زمان‌بندی تولید محصولات روغن پایه برای یک دوره افق زمانی ۱۶۸ ساعته ارائه می‌گردد. جداول ارائه شده در زیر، توالی تولید در ۲ واحد فورفورال و موم‌گیری را نشان می‌دهد. جدول (۴) و (۵) برنامه تولید محصولات همراه با زمان‌های شروع و پایان تولید محصولات در افق تعیین شده و جدول (۶) برنامه و توالی تولید در واحد موم‌گیری می‌باشد. متناسب با نتایج خروجی از زمان‌بندی تولید محصولات و با بهره‌گیری از خلاصه جداول بالا، نمودار گانت چارت مربوط به برنامه زمانی تولید محصولات متناسب با داده‌های تقاضای یک هفته به صورت نمودار (۳) می‌باشد.

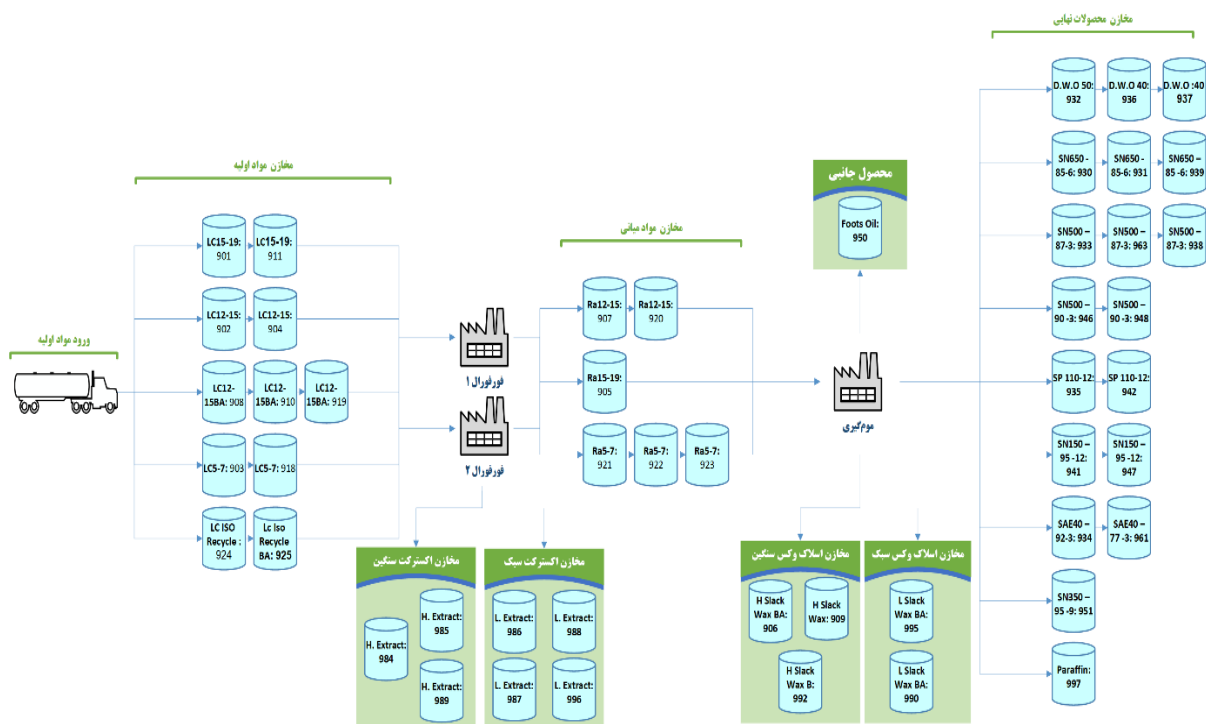
نقطه رویداد تقسیم بر نرخ جریان حداقل و حداکثر باشد. در انتها تابع هدف این مسئله کمینه کردن حداکثر زمان انجام کار در آخرین مرحله از فرآیند تولید می‌باشد که به صورت روابط (۳-۲۶) الی (۳-۲۸) فرموله شده است.

۴. حل مدل و نتایج عددی

مدل معرفی شده در بخش قبل با استفاده از داده‌های یکی از تولیدکننده‌کنندگان محصولات روانکار نظیر روغن موتورهای بنزینی و دیزلی، روغن دنده خودرو، روغن‌های صنعتی، سیالات خنک‌کننده، محصولات گریس، روغن‌های دریایی و سایر محصولات جانبی، اجرا و نتایج حاصل از عملکرد مدل در این بخش ارائه می‌شود. دو واحد فورفورال و موم‌گیری در سیستم تولیدی مورد نظر وجود دارد که در بین، قبل و بعد از آن‌ها تعدادی مخزن وجود دارند که به منظور ذخیره‌سازی مواد اولیه، مواد میانی و محصولات نهایی به کار می‌روند. همچنین به منظور دستیابی و فهم کامل از مسئله موجود شکل (۲) جزئیات کامل سیستم مورد نظر را به نمایش می‌گذارد.

به ترتیب متناسب با موارد موجود در مدل ریاضی، نظیر مجموعه‌ها، پارامترهای تعریف شده و محدودیت‌ها، ارتباط آن با مطالعه موردی مربوطه ذکر می‌گردد. مجموعه مربوط به مواد اولیه، مواد میانی و روغن‌های پایه و متناسب با آن تمامی مخازن ذخیره‌سازی دیگر برای هر ماده و سایر اطلاعات و داده‌های فنی مرتبط با این موضوع در جدول (۲) ذکر می‌گردند.

مدل MILP ارائه شده، حل و منجر به ارائه پاسخ بهینه در زمان



شکل (۲). نمایش شبکه جریان بخش روان‌کننده

به وجود دو واحد تولیدی متفاوت، هریک از این واحدها به‌ازای تولید هر ماده میانی از مواد اولیه و یا محصول نهایی از مواد میانی دارای نرخ بازدهی خاص آن محصول موردنظر می‌باشند. این راندها موجب ایجاد حجم مطلوب خروجی از واحدهای تولیدی بوده و مابقی مقادیر تحت عنوان محصولات جانبی به مخازن دیگری تخلیه می‌شوند. بازده تولید محصولات نقش مهمی در ارائه برنامه توالی تولید مناسب جهت برآورده‌سازی تقاضای موجود در سیستم و ارائه برنامه ورود مواد اولیه در شرکت دارد.

به‌منظور مشاهده تغییرات سطح موجودی مخازن در فرآیند تولید محصولات روغن پایه، نمودارهای زیر ارائه می‌شوند. نمودار (۲) مربوط به نمایش وضعیت مخازن در طول دوره افق برنامه‌ریزی برای ۳ دسته مخزن شناخته شده در سیستم می‌باشد. همانند نتایج حاصل از زمان‌بندی ماهیانه، در این نمودار نیز در ابتدا حجم بسیاری از مواد اولیه در سیستم موجود است که این موضوع موجب تسریع زمان پردازش در سیستم می‌شود که این حجم بالای موجودی مواد اولیه در انتهای دوره برنامه‌ریزی نیز به‌وضوح قابل مشخص است که باعث ایجاد یک موجودی احتیاطی قابل قبول جهت تسریع در اجرای برنامه تولید هفته بعد می‌گردد.

با تحلیل نتایج و خروجی‌های به‌دست آمده از مدل‌سازی زمان‌بندی تولید روغن پایه، به این موضوع پی‌برده می‌شود که دو محصول مهم و پر کاربرد از بین محصولات، با نام SAE40-77-3 و محصول صادراتی SN500-90-3 هستند که از کل مدت زمان ۱۶۸ ساعت در نظر گرفته شده برای افق برنامه‌ریزی، به‌ترتیب ۳۲/۴ و ۲۹/۹ ساعت، به پردازش این محصولات تخصیص یافته است.

به‌منظور تولید دو محصول SAE40-77-3 و SN500-90-3 به‌ترتیب به دو ماده اولیه Lc15-19 و Lc12-15 نیاز است که با استفاده از آن‌ها بتوان دو ماده میانی Ra15Sa40 و Ra12-15 را به‌دست آورد. همچنین باتوجه به نتایج به‌دست آمده از تحلیل نمودارهای مربوطه، میانگین موجودی مواد اولیه مخازن مرتبط با SAE40-77-3 بیشتر از مخازن وابسته به محصول SN500-90-3 می‌باشد. همچنین به‌واسطه موجودی بالای مواد میانی مربوط به محصول SAE40-77-3، مخازن میانی مرتبط با این محصول دارای حجم خروجی بیشتری نسبت به مخازن مواد میانی محصول SN500 که موجودی اولیه بالایی در مخازن نهایی خود دارند، می‌باشد.

یکی از پارامترهای مهم در این مسأله، نرخ بازده یا راندها جهت تولید ماده میانی و یا محصول نهایی می‌باشد. در مسأله موجود باتوجه

جدول (۲). اطلاعات اولیه مسأله

ردیف	نوع	محصول	شماره مخزن	ظرفیت مخزن (متر مکعب)	موجودی اولیه (مترمکعب)
۱	ماده اولیه	LC15-19	T901	۲۳۲۰	۲۳۹۰
۲	ماده اولیه	LC12-15	T902-904	۳۲۸۰	۱۸۵۵
۳	ماده اولیه	LC12-15B	T908-910-911-919	۵۹۳۵	۳۰۱۰
۴	ماده اولیه	LC5-7	T903	۲۳۲۰	۴۸۰
۵	ماده اولیه	IsoRec	T924	۵۵۰	۵۰۲
۶	ماده اولیه	IsoRecB	T925	۵۵۰	۳۹۰
۷	مواد میانی	Ra15Sn650	T921	۵۵۰	۰
۸	مواد میانی	Ra15Sa40	T905	۱۳۲۰	۱۱۵۰
۹	مواد میانی	Ra12-15	T986	۵۵۰	۰
۱۰	مواد میانی	Ra12-15B	T907	۱۳۲۰	۱۰۶۵
۱۱	مواد میانی	Ra5Sn95	T918	۱۱۸۰	۶۷۰
۱۲	مواد میانی	RaIsoSP110	T920	۵۵۰	۲۴۵
۱۳	مواد میانی	Ra7-10	T923	۵۵۰	۰
۱۵	مواد میانی	Ra5Sa92	T922	۵۵۰	۰
۱۶	روغن پایه	SN650-85-6	T939	۳۰۰	۴۰
۱۷	روغن پایه	SAE40-77-3	T961-935	۱۴۷۰	۳۴۰
۱۸	روغن پایه	SN500-90-3	T946-948	۵۵۱۵	۱۰۰۰
۱۹	روغن پایه	SN500-87-3	T963-947-936-938	۵۱۸۰	۸۳۰
۲۰	روغن پایه	SN150-95-12	T941-945	۳۱۸۰	۲۷۰
۲۱	روغن پایه	SP-110-12	T931-942	۶۵۰	۱۵۰
۲۲	روغن پایه	SN350-95-9	T951	۵۵۰	۱۵
۲۳	روغن پایه	SAE10-92-3	T930-933	۵۸۰	۱۲۰

به‌منظور مقایسه نتایج حاصل از مدل ریاضی مسأله فعلی با مطالعه موردی در نظر گرفته شده برای مرحله زمان‌بندی واحد تولید (مسأله ۲) براساس داده‌های واقع‌بینانه ارائه‌شده توسط Honeywell Hi-Spec Solutions [۱۸] که از ۵ ماده اولیه، ۳ مرحله فرآوری و ۱۰ محصول تشکیل شده است، مشاهده می‌شود که زمان‌بندی موردنیاز در قالب ۱۶۸ ساعت بوده (هفتگی) که با توجه به این که پیوستگی در تولید و کوتاه‌کردن زمان تولید در هریک از واحدهای تولیدی در صنعت موردنظر و همچنین مطالعه موردی فعلی اهمیت چشم‌گیری دارد، تابع هدف مسأله حاضر بر مبنای همین موضوع می‌باشد. حال این که در پژوهش [۱۸] تابع هدف دیگری در نظر گرفته شده است و مبنای آن افزایش سود بوده است. همین موضوع موجب شده که قابلیت پیوستگی و عدم توقف خط تولید را به‌همراه داشته باشد تا با ذخیره‌کردن زمان هفته برای هفته‌های آتی بتوان محصولات حیاتی را به‌صورت زودتر از موعد تولید و تقاضای آن‌ها تأمین شود. متناسب با موارد مطرح‌شده، تولید محصولات در واحد هیدروفلینیشینگ مشابه نمودار (۶) با عدم پیوستگی در تولید همراه بوده (LNHF - SPHF) در حالی که در نتایج مدل حال حاضر (نمودار (۱)) این خاصیت حفظ شده است.

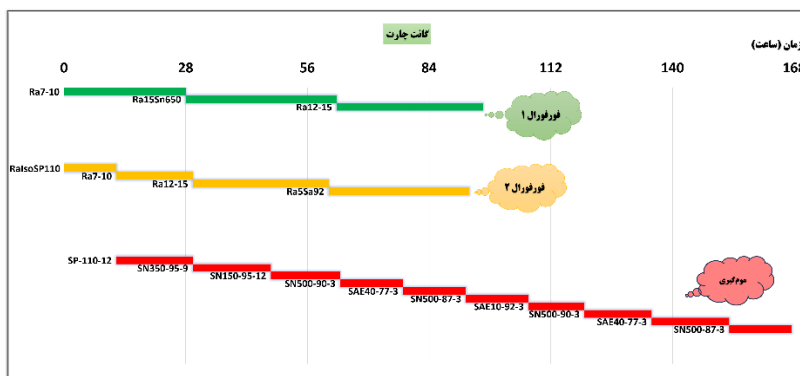
جدول (۳). تقاضای هفته

ردیف	محصول	تقاضا (متر مکعب)
۳	SN650-85-6	۱۸
۴	SAE40-77-3	۱۱۲۰
۵	SN500-90-3	۱۷۲۶
۶	SN500-87-3	۸۴۶
۷	SN150-95-12	۵۴۲
۸	SP-110-12	۱۸۶
۹	SN350-95-9	۹۷
۱۱	SAE10-92-3	۱۲۷

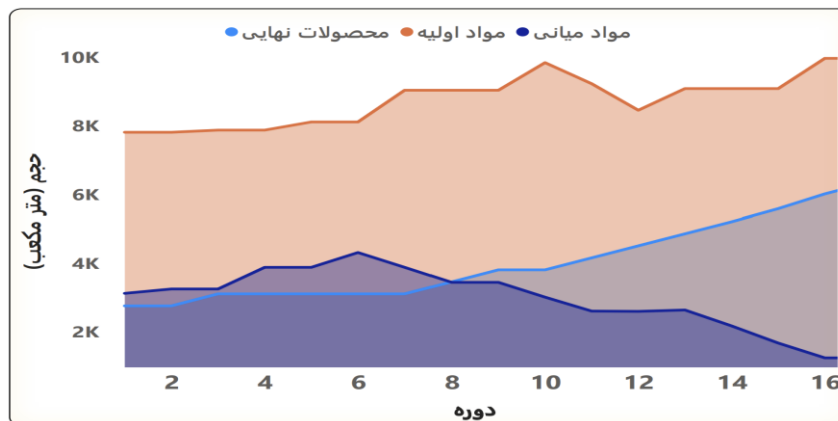
در ادامه در صورتی که بخواهیم برای نتایج حاصله از هفته اول وضعیت موجودی مخازن، حجم مصرف‌شده و واردشده از آن‌ها را به‌تفکیک هر نوع ماده در طی افق برنامه‌ریزی تشریح کنیم، نمودارهای زیر این وضعیت‌ها را در هر سه دسته مخزن موجود در سیستم به نمایش می‌گذارند. نمودار (۳) وضعیت موردنظر برای دسته مخازن مواد اولیه، نمودار (۴) وضعیت تعادل مخازن برای مواد میانی به‌صورت تجمعی به‌ازای هر ماده و نمودار (۵) نیز وضعیت سطوح موجودی و حجم وارده به‌ازای هر نوع را نمایش می‌دهد.

جدول (۴). زمان‌بندی تولید در واحد فورفورال ۱

خوراک	مخزن خوراک	حجم خروج	محصول	مخزن محصول	حجم ورود	زمان شروع	زمان پایان	مدت
LC12-15 & LC5-7	T902-904 & T903	۴۸۳/۲۳	Ra7-10	T923	۲۶۵/۷۸	۰	۲۸/۰۱	۲۸/۰۱
LC15-19	T901	۷۵۰	Ra15Sn650	T921	۴۶۵	۲۸/۰۱	۶۲/۷۴	۳۴/۷۲
LC12-15	T902-904	۷۷۳/۸۳	Ra12-15	T986	۴۶۴/۳	۶۲/۷۴	۹۶/۳۸	۳۳/۶۴



نمودار (۱). گانت چارت برنامه‌ریزی و زمان‌بندی تولید هفتگی بر مبنای تقاضای محصولات



نمودار (۲). وضعیت موجودی مخازن مواد اولیه، میانی و محصولات نهایی در هفته اول

۵. نتیجه‌گیری و تحقیقات آتی

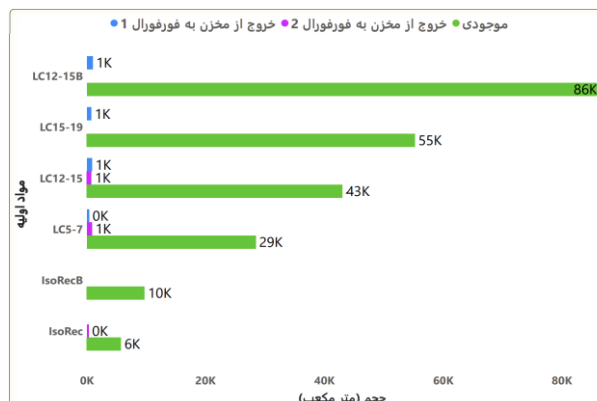
در محیط صنعتی، زمان‌بندی به تخصیص عملیات به ماشین‌آلات در دسترس و به‌علاوه تعیین این‌که چه‌چیزی، چگونه و چه‌موقع تولید شود، اطلاق می‌گردد. در این مسأله با درنظر گرفتن اهداف: (الف) زمان شروع و پایان وظایفی که در هر مرحله بایستی انجام شود (ب) مقدار و نوع ماده‌ای که در هر زمان تولید یا مصرف شود (ج) مقدار و نوع مواد ذخیره شده در هر بار در هر مخزن، سعی در دستیابی به یک جواب بهینه از تابع هدف داشت. به‌منظور محقق کردن هریک از اهداف مطرح‌شده، مدل ریاضی عنوان شده در بخش سوم به‌صورت یک مدل قطعی در نرم‌افزار بهینه‌سازی گمز کدنویسی شده و با استفاده از حل‌کننده دقیق CPLEX، در زمان منطقی جواب بهینه به‌دست آمد. مسأله مورد نظر به منظور صحت‌سنجی و آزمایش آن، با توجه به داده‌ها و محدودیت‌های موجود در محیط تولیدی بررسی قرار گرفته و اعتبار و صحت مدل مورد تأیید قرار گرفت.

با مقایسه نتایج به‌دست آمده برای هفته اول، با برنامه زمان‌بندی واقعی مشاهده می‌شود که در شرایط واقعی، همواره مقادیر تولید محصولات در واحدهای فورفورال و موم‌گیری بیشتر از خروجی حاصل از مدل ریاضی می‌باشد. به‌طور میانگین با بررسی هفته‌های متعدد به این نتایج دست یافتیم که همواره مقادیر تولیدی بین ۱۰ الی ۱۵ درصد بیشتر از حالت ایده‌آل می‌باشد که این موضوع موجب افزایش زمان تولید محصولات در واحدهای مذکور و بالا بردن حجم موجودی در مخازن میانی و محصولات نهایی می‌گردد. همچنین تولید مقادیر بیشتر از حدنیاز موجب بالا رفتن تقاضای شرکت برای ورود مواد اولیه شده که این موضوع نیز خود باعث افزایش حجم وارده‌های مواد اولیه به شرکت می‌شود.

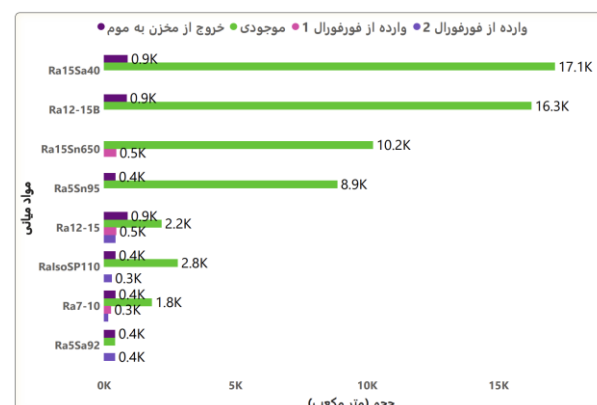
ساخت مدل ریاضی با درنظر گرفتن نقش مدیریت موجودی مخازن و یکپارچه کردن زمان‌بندی تولید در مدل‌سازی، با توجه به تنوع بسیار زیاد مخازن و همچنین اهمیت ارائه برنامه زمانی تولید مناسب برای پالایشگاه‌ها، علی‌رغم قدمت موضوع، به‌خوبی به‌کار گرفته نشده است و از نکات مثبت این تحقیق وجود یک نمونه مطالعه همراه با داده‌های واقعی می‌باشد.

در ادامه به‌منظور ارائه پیشنهادات برای فعالیت‌های آتی می‌توان به این موضوع اشاره کرد که، مطالعه بر روی زمان‌بندی پالایش با درنظر گرفتن شرایط عدم قطعیت‌های مختلف نظیر؛ زمان رسیدن مواد اولیه به پالایشگاه، نرخ جریان و بازده تولید محصولات در رده‌های مختلف می‌تواند به ارائه یک برنامه زمان‌بندی مناسب‌تر با توجه به پیش‌بینی شرایط محیطی غیرقطعی کمک کند. در بسیاری از محیط‌های صنعتی امروزه، مسائل زمان‌بندی ماهیت چندهدفه دارند، این مسأله نیز ارزش مطالعه یک مسأله چندهدفه را دارد.

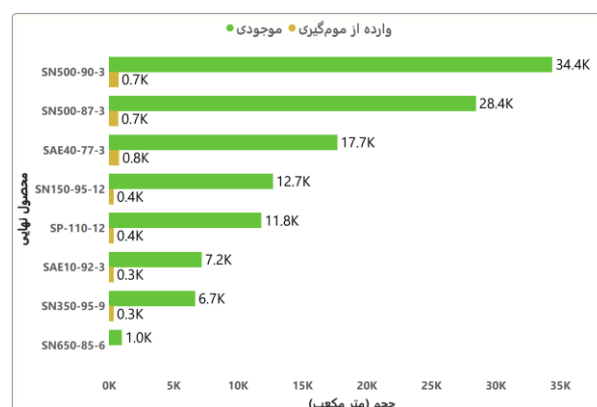
همچنین، به‌منظور بهبود و کاهش زمان حل مدل ریاضی مربوطه در کوتاه‌ترین زمان ممکن در ابعاد بالاتر درنظر گرفتن روش‌های حل فراابتکاری همچون "الگوریتم ژنتیک" و مقایسه آن‌ها با یکدیگر می‌تواند به بهینه‌سازی زمان حل مسأله کمک نماید.



نمودار (۳). وضعیت مخازن مواد اولیه

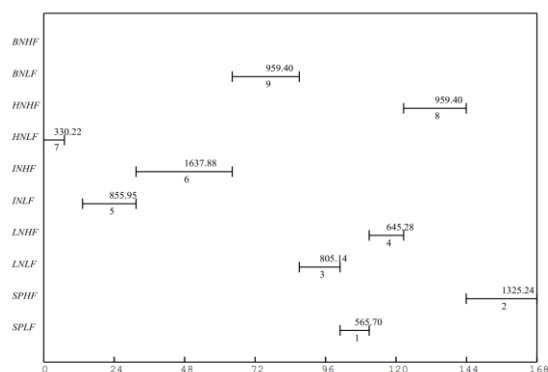


نمودار (۴). وضعیت مخازن مواد میانی



نمودار (۵). وضعیت مخازن محصولات نهایی

Z. Jia, M. Ierapetritou / Computers and Chemical Engineering 28 (2004) 1001–1019



نمودار (۶). گانت چارت زمان‌بندی تولید محصولات در پژوهش [۱۸]

مراجع

- The Open Automation and Control Systems Journal*, 6(1), 5293-600.
<http://dx.doi.org/10.2174/1874444301406010593>
- [10] Pessoa, R., Maciel, I., Moccellin, J., Pitombeira-Neto, A., & Prata, B. (2021). Hybrid flow shop scheduling problem with machine blocking, setup times and unrelated parallel machines per stage. *Investigacion Operacional*.
- [11] Wang, Y., Wang, Y., & Han, Y. (2023). A variant iterated greedy algorithm integrating multiple decoding rules for hybrid blocking flow shop scheduling problem. *Mathematics*, 11(11), 2453.
<https://doi.org/10.3390/math11112453>
- [12] Dai, X., Zhao, L., Li, Z., Du, W., Zhong, W., He, R., & Qian F. (2021). A data-driven approach for crude oil scheduling optimization under product yield uncertainty. *Chemical Engineering Science*, 246, 116971.
<https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.116971>
- [13] Yu, L., Wang, S., & Xu, Q. (2022). Optimal scheduling for simultaneous refinery manufacturing and multi oil-product pipeline distribution. *Computers & Chemical Engineering*, 157, 107613.
<https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2021.107613>
- [14] Moradi, S., MirHassani, SA., Hooshmand, F. (2019). Efficient decomposition-based algorithm to solve long-term pipeline scheduling problem. *Petroleum science*, 16, 1159-1175. <https://doi.org/10.1007/s12182-019-00359-3>
- [15] Yang, H., Bernal, DE., Franzoi, RE., Engineer, FG., Kwon, K., Lee, S., & Grossmann, IE. (2020). Integration of crude-oil scheduling and refinery planning by Lagrangean Decomposition. *Computers & Chemical Engineering*, 138, 106812.
<https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2020.106812>
- [16] Su, L., Bernal, DE., Grossmann, IE., & Tang, L. (2023). Modeling for integrated refinery planning with crude-oil scheduling. *Chemical Engineering Research and Design*, 192, 141-57. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2023.02.008>
- [17] Khor, CS., Varvarezos, D. (2017). Petroleum refinery optimization. *Optimization and Engineering*, 18(4), 943-989. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11081-016-9338-x>
- [18] Jia, Z., & Ierapetritou, M. (2004). Efficient short-term scheduling of refinery operations based on a continuous time formulation. *Computers & Chemical Engineering*, 28(6-7), 1001-1019.
<https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2003.09.007>
- [1] Su, L., Tang, L., Grossmann, I., & Huang, Y. (2022). Modeling and Optimization of Stochastic Scheduling for Refinery Processes.
https://egon.cheme.cmu.edu/Papers/Su_Modeling%20and%20Optimization%20for%20Refinery%20Scheduling.pdf
- [2] Al-Ahmari, A., Kaid, H., Li, Z., Wu, N., El-Tamimi, A-A., & Qiao, Y. (2022). A new MINLP continuous time formulation for scheduling optimization of oil refinery with unreliable CDUs. *Mathematical Problems in Engineering*, Article ID 1298495, 1-12.
<https://doi.org/10.1155/2022/1298495>
- [۳] قندی بیدگلی، سمیه، بنرودی، ریحانه، (۱۴۰۱). «مدل‌سازی ریاضی و حل مسأله زمان‌بندی جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر با جریان‌های معکوس و محدودیت دسترسی به ماشین‌ها». نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید، ۱۰(۲۱): ۱-۱۷.
<https://doi.org/10.22084/ier.2023.25010.2048>
- [4] Shao, F. (2021). The study of time representations for chemical production scheduling models. Msc Thesis, Queen's University, Canada.
<https://www.proquest.com/openview/aa2b0c98509536ba1bd9b6d1ffb6ada4>
- [5] Alharkan, IM. (2005). Algorithms for sequencing and scheduling. Industrial Engineering Department, King Saud University, Riyadh, Saudi Arabia.
- [6] Persson, J. (1999). Production planning and scheduling in refinery industry. Department of Mathematics, Linköping University, Sweden.
- [7] Georgiadis, GP., Elekidis, AP., & Georgiadis, MC. (2019). Optimization-based scheduling for the process industries: from theory to real-life industrial applications. *Processes*, 7, 438. <https://doi.org/10.3390/pr7070438>
- [۸] خاکساری، پریا، قندی بیدگلی، سمیه، (۱۴۰۲). «مدل‌سازی ریاضی و حل مسأله زمان‌بندی جریان کارگاهی بدون انتظار با در نظر گرفتن زمان آژادسازی و فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات پیش‌گیرانه». نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید، ۱۱(۲۳): ۳۹-۵۵.
<https://doi.org/10.22084/ier.2024.5564>
- [9] Tao, Z., Liu, X., & Zeng, P. (2014). Study on hybrid flow shop scheduling problem with blocking based on GASA.



DOI: <https://doi.org/10.22084/ier.2025.29548.2172>

Presentation of a Mathematical Model for Optimizing the Production Scheduling of Lubricant Products

Milad Moshrefi Nabikandi¹, Ali Husseinzadeh Kashan^{2*}, Bakhtiar Ostadi³

¹ Master of Industrial Engineering, Department of Socio-Economic Systems, Faculty of Industrial Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

² Associate Professor, Department of Socio-Economic Systems, Faculty of Industrial and Systems Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

³ Associate Professor, Department of Systems and Productivity Management, Faculty of Industrial and Systems Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 2 - 7 - 2024

Revised: 25 - 10 - 2024

Accepted: 8 - 11 - 2024

Keywords:

Lubricant Products
Production Planning
Mathematical Modeling
Hybrid Flow Shop (HFS)

ABSTRACT

Nowadays, production planning and scheduling have become the core of production management in manufacturing systems, as they lead to greater profitability and stabilization of daily output. In some manufacturing industries, the production process is continuous and operates at high capacity. Therefore, making optimal decisions for sustainable production and maximizing company profit is essential. The problem of production planning and scheduling in continuous manufacturing systems that produce various products, considering operational constraints for different products to meet customer demand, is one of the complex yet important issues in manufacturing industries—particularly in the production of lubricant products. In this study, considering the structure of lubricant production, a model is developed and optimized for production scheduling. The goal is to optimize scheduling and provide an execution sequence for the production plan, while taking into account tank inventory levels and capacity constraints. The validity of the proposed model is verified using real data. The formulated mathematical model has been implemented in the GAMS optimization software, and the optimal solution(s) has been obtained within an acceptable runtime. The results demonstrate improvements in scheduling and indicate the applicability of the proposed model in real-world scenarios.

* Corresponding author. A. Husseinzadeh Kashan
Tel.: 021-82884398; E-mail address: a.kashan@modares.ac.ir