

ارائه یک الگوریتم ترکیبی برای حل مسئله برنامه ریزی تولید پالایشگاه نفت انعطاف پذیر

مسعود رضائی^۱، غلامرضا اسماعیلیان^{۲*} و رامین صادقیان^۳

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۹/۰۶	
پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۱۲	
واژگان کلیدی:	
برنامه ریزی تولید،	هدف از برنامه ریزی تولید در یک پالایشگاه، تولید هرچه بیشتر محصولات با ارزش
پالایشگاه نفت،	مانند بنزین، سوخت جت، گازوئیل و غیره و درعین حال تأمین تقاضای بازار با رعایت
انعطاف پذیری،	سایر محدودیت‌ها است. پالایش نفت خام یکی از پیچیده‌ترین صنایع شیمیایی
الگوریتم ژنتیک،	است؛ بنابراین بهینه‌سازی برنامه ریزی تولید یک پالایشگاه نفت به‌عنوان یکی از
الگوریتم ثابت سازی	دشواری‌ترین و چالش‌برانگیزترین مسائل در این حوزه به شمار می‌رود. با توجه به
بهینه‌سازی،	تغییرات سریع در فن‌آوری‌های مرتبط با این صنعت همچون ساخت کاتالیست‌های
روش ترکیبی.	جدید و طراحی واحدهای فرآیندی انعطاف‌پذیرتر، انعطاف‌پذیری پالایشگاه‌ها
	به‌سرعت در حال افزایش است. با افزایش انعطاف‌پذیری پالایشگاه‌ها، برنامه ریزی
	تولید آنها نیازمند داشتن یک مدل ریاضی است که به کمک آن بتوان در زمان
	مناسب بهترین تصمیم را برای برآورده کردن تقاضاهای موجود در بازار با کمترین
	هزینه تولید، اتخاذ نمود. در این مقاله، برنامه ریزی تولید یک پالایشگاه انعطاف‌پذیر
	به کمک روابط ریاضی بین پارامترهای کلانی همچون تقاضای محصولات،
	وضعیت‌های تولید، هزینه‌های ثابت و متغیر تولید و هزینه‌های نگهداشت
	فرآورده‌های نفتی، مدل‌سازی و برای حل آن یک روش ترکیبی حاصل از تلفیق
	الگوریتم ژنتیک و روش ثابت‌سازی-بهینه‌سازی ارائه شده است. نتایج تحقیق به
	کمک ۶۳ مسئله شبیه‌سازی شده در ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ نشان می‌دهد
	که جواب نزدیک بهینه حاصل از روش ترکیبی به‌صورت میانگین در ابعاد کوچک
	و متوسط به ترتیب ۰/۲۳ و ۰/۱۲ درصد از جواب دقیق مسئله انحراف دارد.
	همچنین در ابعاد بزرگ که امکان محاسبه جواب دقیق توسط کامپیوتر وجود
	نداشت، این روش ترکیبی به‌طور میانگین در ۸۷ ثانیه به جواب می‌رسد.

۱-مقدمه^۱

اگر در برنامه ریزی تولید، مسئله تولید مطرح باشد مسائل عمده تصمیم‌گیری عبارت‌اند از: اینکه چه محصولاتی ساخته شوند و این محصولات به چه تعداد و چه موقع ساخته شوند تا بیشترین رضایتمندی در پایان افق

برنامه ریزی تولید از جمله فعالیت‌هایی است که همواره در پی یافتن ترکیب بهینه استفاده مؤثر از منابع تولیدی با توجه به نیازهای تولیدی برای برآورده سازی رضایتمندی مشتریان و سوددهی در طول افق برنامه ریزی است.

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: gre@pnu.ac.ir

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

۲. استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

۳. دانشیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

برنامه‌ریزی ایجاد شود [۱].

مسائل برنامه‌ریزی را می‌توان به‌طور عمده به سه دسته استراتژیک، تاکتیکی و عملیاتی، بر اساس تصمیمات مربوطه و افق زمانی در نظر گرفته شده، تفکیک کرد [۲]. برنامه‌ریزی سطح استراتژیک مدت‌زمان بیش از یک سال را در نظر گرفته و کل محدوده یک سازمان را در برمی‌گیرد. در این سطح، مدل‌های تقریبی و یا کلی مناسب هستند و عمدتاً تصمیمات مربوط به سرمایه‌گذاری آینده را در نظر می‌گیرند. برنامه‌ریزی سطح تاکتیکی معمولاً شامل افق میان‌مدت چند ماه تا یک سال است، جایی که تصمیمات معمولاً شامل تولید، موجودی و توزیع می‌شود. سطح عملیاتی مدت‌زمان کوتاه‌تری را شامل می‌شود و از یک هفته به سه ماه می‌رسد، جایی که تصمیمات مربوط به تولید واقعی و تخصیص منابع است [۳].

با توجه به اینکه در سالیان اخیر تقاضا برای محصولات نفت خام با ارزش بالا (مثل بنزین و نفت‌گاز) روند افزایشی داشته و فرآورده‌های با ارزش پایین مثل نفت‌کوره مشتریان خود را از دست می‌دهند؛ در آینده نزدیک فرآوری هیدروژنی ته‌مانده برج تقطیر در خلأ به‌جای پالایشگاه‌های خاص، به کلیه پالایشگاه‌ها تعمیم خواهد یافت. در همان زمان، ته‌مانده برج تقطیر در خلأ در فرآیند تصفیه هیدروژنی، به‌عنوان مواد خام ورودی واحدهای شکست کاتالیستی بسترسیال عمومیت خواهند یافت و ظرفیت پالایش بیشتری برای فرآوری نفت خام‌های سنگین‌تر برای سازگاری با کاهش تقاضای ته‌مانده برج تقطیر در خلأ موردنیاز خواهد بود و واحدهای فرآیندی و مدل‌های رایانه‌ای اقتصادی / عملیاتی پالایشگاه‌ها با ادغام در سیستم‌های کنترل رایانه‌ای واحدهای فرآیندی، بهینه خواهند شد [۴].

پالایش نفت و صنعت پتروشیمی سهم عمده‌ای را در بازار انرژی و صنعتی جهان به خود اختصاص داده‌اند. در بسیاری از موقعیت‌ها، آنها نمایانگر پشتوانه اقتصادی کشورهای صنعتی هستند. امروزه، فضای بی‌ثبات بازار و تغییر مداوم نیاز مشتری منجر به فشار مداوم در جستجوی فرصت‌هایی می‌شود که به‌درستی اجزای مختلف صنعت را هماهنگ و هماهنگ می‌کند. به‌طور خاص، هماهنگی و ادغام پالایش نفت و صنایع پتروشیمی موردتوجه بسیاری قرار گرفته است. از طریق برنامه‌ریزی مناسب و استفاده از مدل‌های ریاضی مناسب برای واحدهای مختلف فرآیندی، بسیاری از

فرصت‌های افزایش سود را می‌توان تحقق بخشید. توسعه و انتخاب تکنیک‌های مناسب مدل‌سازی ریاضی هنری است که نیاز به تمرین، درک خوب از فعل‌وانفعالات فرآیند و تجربه دارد [۳].

طی سه دهه گذشته، صنعت پالایش نفت با تغییر مشخصات نفت خام و ترکیب فرآورده‌های موردتقاضا، به چالش کشیده شده است. در قرن بیست و یکم، این صنعت نیاز به انعطاف‌پذیری روزافزون با فن‌آوری‌های پیشرفته و کاتالیزورهای بهبودیافته دارد تا با ویژگی‌های مختلف طیف گسترده‌ای از خوراک پالایشگاه مطابقت داشته و آماده مقابله با بسیاری از چالش‌های مهم باشد. از علل عمده‌ای که منجر به این چالش‌ها می‌شوند می‌توان به تغییر در ویژگی و خصوصیات نفت خام موردقبول پالایشگاه، ملاحظات محیط زیستی، مقررات و سیاست‌های دولتی، انتظارات بیشتر مصرف‌کنندگان برای سوخت و سیستم‌های تحویل سوخت، جنبه‌های مختلف پتروپلیتیک، برنامه‌های توسعه اقتصادی و اجتماعی کشورها و تأمین انرژی پایدار اشاره نمود [۵، ۶]. برای پاسخگویی به این چالش پالایشگاه‌های آینده باید انعطاف‌پذیری فرآیندهای داشته و محصولاتی با مشخصات متناسب با الزامات تعیین‌شده توسط مشتریان محصولات، تولید کند.

در مسائل مربوط به حوزه‌های مختلف برنامه‌ریزی در صنعت پالایش نفت از برنامه‌ریزی ریاضی به‌طور گسترده‌ای استفاده می‌شود. مدل‌های برنامه‌ریزی خطی و غیرخطی، ظرفیت‌ها و بازدهی واحدهای عملیاتی، عملیات ترکیب فرآورده‌های نفتی، مصرف انرژی، قیمت‌گذاری نفت خام و ارزش محصول را شبیه‌سازی می‌کنند. این راه‌حل‌های بهینه برای طیف وسیعی از تصمیمات در مورد انتخاب نفت خام، برنامه‌ریزی عملیات کوتاه‌مدت و بلندمدت، به‌کارگیری فناوری‌های جدید فرآیندی، سرمایه‌گذاری‌های جدید، نگهداری و کنترل موجودی ارائه می‌دهد [۷]. با توجه به تغییرات سریع در حوزه‌های مختلف فناوری‌های مرتبط با صنعت پالایش نفت، مقررات سخت‌گیرانه محیط زیستی، تغییرات سریع تقاضاهای فرآورده‌های نفتی در بازار و نوسانات قیمت نفت خام و فرآورده‌های نفتی به‌ویژه در دو دهه اخیر استفاده از مدل‌های ریاضی در حوزه‌های مختلف این صنعت مورد توجه ویژه صاحبان این صنایع و پژوهشگران قرار گرفته است [۸].

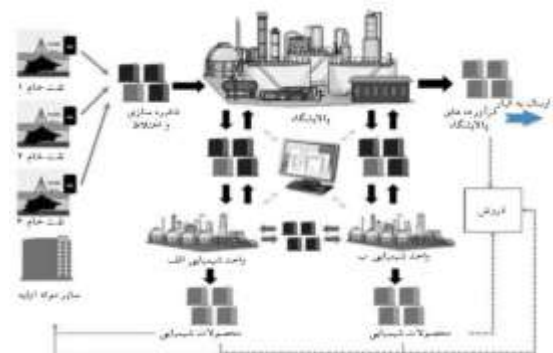
پژوهش‌های مرتبط با برنامه‌ریزی در صنعت پالایش را

تولید یک پالایشگاه می‌پردازند. یکی از تحقیقات اخیر که در این حوزه انجام شده است، ضمن لحاظ نمودن عدم قطعیت در قیمت نفت خام، قیمت فرآورده‌های نفتی و میزان تقاضاهای فرآورده به مدل‌سازی مسئله پرداخته ولی ویژگی انعطاف‌پذیری را در مدل در نظر نگرفته است [۲۳]. بررسی سایر پژوهش‌های انجام‌شده در دسته دوم، نیز نشان می‌دهد که پژوهشگران موضوع انعطاف‌پذیری در صنعت پالایش نفت خام را در مدل‌های ارائه‌شده لحاظ ننموده‌اند. مهم‌ترین علت این موضوع را می‌توان به وضعیت فعلی پالایشگاه‌های نفت موجود معطوف دانست که عموماً از سطح انعطاف‌پذیری بالایی برخوردار نیستند. با توجه به تغییرات سریع در فن‌آوری‌های مرتبط با این صنعت همچون ساخت کاتالیست‌های جدید، طراحی واحدهای فرآیندی انعطاف‌پذیرتر و پیشرفت سیستم‌های کنترل پیشرفته کامپیوتری انعطاف‌پذیری پالایشگاه‌ها به سرعت در حال افزایش است [۳۶، ۳۷، ۳۸]. با افزایش انعطاف‌پذیری پالایشگاه‌ها، برنامه‌ریزی تولید آنها نیازمند داشتن یک مدل ریاضی است که به کمک آن بتوان در زمان مناسب بهترین تصمیم را برای برآورده کردن تقاضاهای موجود در بازار با کمترین هزینه تولید را اتخاذ نمود. در این مقاله، برنامه‌ریزی تولید یک پالایشگاه انعطاف‌پذیر به کمک روابط ریاضی بین پارامترهای کلانی همچون تقاضای محصولات، وضعیت‌های تولید، هزینه‌های ثابت و متغیر تولید و هزینه‌های نگهداشت فرآورده‌های نفتی مدل‌سازی شده و ضمن ارائه یک مثال شبیه‌سازی‌شده از یک پالایشگاه انعطاف‌پذیر با ظرفیت ۱۰۰ هزار بشکه با توجه به اینکه مسئله موردنظر جزء مسائل تعیین اندازه انباشته بوده و محققین مختلف نشان داده‌اند که مسائل تعیین اندازه انباشته NP-Hard هستند [۳۹، ۴۰، ۴۱]؛ یک الگوریتم ترکیبی با تلفیق الگوریتم ژنتیک و الگوریتم ثابت‌سازی-بهینه‌سازی معرفی و با داده‌های شبیه‌سازی‌شده در ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ کیفیت و کارایی این الگوریتم در مقایسه با روش شاخه و کران موردبحث قرار خواهد گرفت.

۲- معرفی پالایشگاه نفت خام انعطاف‌پذیر

یک پالایشگاه نفت خام، یک کارخانه فرآیندی صنعتی است که نفت خام را به محصولات مفیدی همچون نفتا، بنزین، سوخت دیزل، قیر، نفت کوره و گاز مایع تبدیل می‌کند.

می‌توان به سه دسته کلی تقسیم نمود. دسته اول پژوهش‌هایی هستند که به کمک روابط شیمیایی و ترمودینامیکی بین متغیرهای عملیاتی همچون دما، فشار، سطح و جریان سیالات در واحدهای پیچیده یک پالایشگاه، عموماً مدل‌های غیرخطی ارائه می‌دهند و هدف آنها بهینه نمودن تولید با یافتن بهترین پیکربندی عملیاتی برای تولید فرآورده‌های با ارزش و کیفیت بالاتر و میزان مصرف کمتر انرژی است. یکی از اولین پژوهش‌هایی که در این دسته انجام شده است توسط مورو^۱ و همکاران [۹] انجام پذیرفت که طی آن با مدل‌سازی یک پالایشگاه واقعی برای تولید نفت‌گاز انجام شد و نتایج نشان داد که سود این پالایشگاه افزایش قابل توجهی با نتایج این تحقیق داشت. در ادامه پژوهش‌های دیگری با همین هدف انجام گردید که عموماً واحدهای مختلف یک پالایشگاه مثل واحدهای تقطیر، شکست کاتالیستی، کاهش گرانی و مخلوط‌سازی را با مدل‌هایی غیرخطی مدل‌سازی نموده و برنامه عملیاتی بهینه استخراج نموده‌اند [۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۸، ۱۹، ۲۰، ۲۱] دسته دوم تحقیقات معطوف به بهینه نمودن برنامه تولید با تمرکز بر کمینه نمودن هزینه کل تولید با لحاظ نمودن هزینه‌های راه‌اندازی، تولید و نگهداشت است [۲۲، ۲۳، ۲۴، ۲۵، ۲۶، ۲۷، ۲۸] برخی پژوهشگران مدل‌سازی پالایشگاه نفت را در قالب حلقه‌ای از زنجیره تأمین فرآورده‌های نفتی (شکل ۱) در نظر گرفته و هدف آنها بیشتر معطوف به موضوعات استراتژیکی همچون انتخاب تأمین‌کنندگان، بازارها و برنامه‌های توسعه این صنعت بوده است [۲۹، ۳۰، ۳۱، ۳۲، ۳۳، ۳۴، ۳۵].



شکل ۱- زنجیره تأمین صنعت پالایش نفت [۱۶]

با این دسته‌بندی، مسئله این تحقیق در دسته دوم این تحقیقات قرار می‌گیرد که عموماً به برنامه‌ریزی میان‌مدت

¹ Moro

سری از انعطاف‌پذیری‌ها می‌باشد. وسعت این انعطاف‌پذیری‌ها را می‌توان با مقایسه یک پالایشگاه و یک واحد تولیدی مثل کارخانه تولید خودرو نشان داد. اگرچه یک کارخانه تولید خودرو امکان تغییر تولید از یک مدل به مدل دیگر را به سرعت دارد، اما این مدل‌ها اساساً مونتاژ تعدادی اجزاء مشخص و تقریباً نزدیک به هم می‌باشند. برای ساخت هر مدل دستورالعمل یکسانی وجود دارد: ۱ موتور، ۴ درب، ۵ چرخ و ... در بین دستورالعمل ساخت مدل‌ها اختلافات جزئی مثل ۴ یا ۶ سیلندر بودن موتور، ۲ یا ۴ درب بودن مدل و ... وجود دارد. برخلاف صنعت خودرو، مصرف‌کنندگان فرآورده‌ها نفتی یک پالایشگاه نفت آزادی عمل فراوانی به پالایش‌گران می‌دهند. خریدار یک گالن بنزین نمی‌داند که محتوای آن چیست و نمی‌خواهد که بداند. فقط می‌خواهد که موتور خودرواش به درستی کار کند؛ بنابراین برای او مهم نیست که منبع نفت خام پالایشگاهی که فرآورده‌اش را خریداری می‌کند کجاست و بنزین آن پالایشگاه از ممزوج نمودن چه موادی حاصل شده است. او علاقه‌مند نیست که بداند اجزاء بنزین به چه نسبتی و در چه واحد فرآیندی تولید می‌شوند. از دیدگاه مدیران یک پالایشگاه نفت آن چیزی که اهمیت دارد تولید فرآورده‌های نفتی بر اساس ویژگی‌های استاندارد و در زمان‌بندی مشخص است. با این اوصاف یک پالایشگر از یک مدیر خط تولید خودروسازی آزادی عمل بیشتری دارد. تمام این ویژگی‌ها باعث می‌شود که یک پالایشگاه نفت خام بتواند از انعطاف‌پذیری‌های زیر برخوردار باشد:

- انعطاف در نفت خام ورودی
 - انعطاف در تولید محصولات
 - انعطاف در چگونگی تولید محصولات
- [۴۶].

انعطاف‌پذیری بیشتر پالایشگاه‌های پیچیده، آنها را قادر می‌سازد تا به سرعت با تغییرات مداوم در شرایط بازار برای ورودی‌ها و خروجی‌ها سازگار شوند. این ویژگی باعث کاهش ریسک و افزایش سود یک پالایشگاه می‌شود. با بسته شدن پالایشگاه‌های قدیمی‌تر و ساده‌تر، پالایشگاه‌های پیچیده و انعطاف‌پذیر اکنون اکثریت قریب به اتفاق از ظرفیت جهانی را پالایش نفت خام را تشکیل می‌دهند.

پالایشگاه‌های نفت عموماً واحدهای صنعتی بزرگ و پیچیده با لوله‌کشی‌های فراوان و جابجایی‌های زیاد سیالات بین واحدهای فرآیندی هستند. نفت خام مصرفی یک پالایشگاه در نزدیکی آن در مخازن بزرگی نگهداری شده و بر اساس برنامه تولید پالایشگاه به واحدهای فرآیندی منتقل می‌گردد. نفت خام در ابتدا نمک‌زدایی و سپس وارد واحدهای تقطیر (تقطیر در خلاء و اتمسفریک) شده و پس از انجام عملیات تقطیر، برش‌های مختلف آن بسته به سطح پیچیدگی واحدهای پالایشگاهی در واحدهای مختلف تبدیل و شکست کاتالیستی و حرارتی به فرآورده‌های مورد نظر تبدیل و در انتها در واحدهای سبک‌سازی شیرین سازی و اختلاط، فرآورده‌های نهایی مورد نظر مشتریان ساخته می‌شود. شکل ۲ فلوچارت فرآیندی یک پالایشگاه نفت را نشان می‌دهد [۴۲].

پالایشگاه‌های نفت در ابتدا برای طیف محدودی از نفت خام طراحی و بهره‌برداری می‌شدند و متناسب با آن، یک ترکیب نسبتاً ثابت از فرآورده‌های نفتی تولید می‌کردند. با این وجود از دهه ۱۹۷۰، پالایشگاه‌ها مجبور شدند انعطاف‌پذیری خود را افزایش دهند تا بتوانند خود را با یک محیط ناپایدار سازگار کنند. در حال حاضر مدیران پالایشگاه‌ها می‌توانند از طرق مختلف انعطاف‌پذیری را افزایش دهند. به‌عنوان مثال، می‌توان با تغییر دامنه ورودی‌های استفاده‌شده، شرایط عملیاتی برخی از واحدهای فرآیندی را تغییر داد و به تغییر جزئی در خروجی‌ها دست یافت. برای دستیابی به انعطاف‌پذیری بالاتر بایستی مدیران ریسک‌هایی همچون انطباق تکنولوژی جدید با واحدهای موجود را بپذیرند؛ بنابراین، پالایشگاه‌ها باید به‌طور مداوم سازگار و به‌روز شوند تا بتوانند پاسخگوی الگوهای همیشه در حال تغییر عرضه نفت خام و تقاضای فرآورده‌های نفتی در بازار باشند. با توجه به اینکه تولید فرآورده‌های نفتی در پالایشگاه‌های نفت به یکدیگر وابسته‌اند با تغییر ترکیب تقاضای فرآورده‌ها، در صورتی که پالایشگاه انعطاف‌پذیری لازم را نداشته باشد، به سرعت مقدار ذخیره محصولات غیرقابل فروش افزایش یافته که این امر موجب مشکلات حاد عملیاتی برای این واحدهای صنعتی می‌شود [۴۵، ۴۴، ۴۳، ۴۲، ۳۶].

یک پالایشگاه نفت خام با هر میزان پیچیدگی دارای یک

مزایای پالایشگاه‌های جدید عبارت‌اند از:
 ۱- تولید محصولات با ارزش‌تر: پالایشگاه‌های با بازده بالاتر تمرکز تولید را بجای محصولات کم‌ارزش‌تر مانند نفت کوره^۱، آسفالت و ته‌مانده برج تقطیر^۲ بر محصولات با ارزش‌تر مانند بنزین و فرآورده‌های میان تقطیر^۳ مثل سوخت دیزل و نفت سفید قرار داده‌اند. به‌عنوان مثال، یک پالایشگاه معمولی به‌طورمعمول ۲۰ درصد بنزین، ۳۰ درصد محصولات میان تقطیر و ۵۰ درصد ته‌مانده سنگین از نفت خام سبک تولید می‌کند. پیچیده‌ترین پالایشگاه‌ها می‌توانند از همین نفت خام تا ۶۰ درصد بنزین، ۳۵ درصد محصولات میان تقطیر و ۵ درصد ته‌مانده سنگین تولید کنند.

۲- توانایی پردازش طیف گسترده‌ای از انواع نفت خام: انعطاف‌پذیری بالاتر در انتخاب نفت خام به این معنی است که پالایشگاه‌ها می‌توانند نفت خام سنگین ارزان‌تر را برای تولید محصولات سبک‌تر که تقاضای بیشتری دارند، افزایش دهند و حاشیه سود را از طریق حجم فروش بیشتر و تنوع بیشتر فرآورده‌های تولیدی بهبود دهند.

۳- انعطاف‌پذیری برای انطباق با بازارهای در حال تغییر و مشخصات سوخت‌های محلی: این انعطاف‌پذیری به پالایشگاه‌ها اجازه می‌دهد که فرآیند تولید خود را با تغییرات تقاضای بازار و مشخصات سوخت‌های موردنیاز در بازارهای محلی انطباق دهند (مانند تقاضای رو به رشد محصولات سبک‌تر یا دیزلی به‌جای بنزین) [۳۸].

۳- مدل‌سازی مسئله

فرض کنید که یک پالایشگاه انعطاف‌پذیر نفت خام، گروهی از فرآورده‌های نفتی که با k اندیس گذاری می‌شوند، به‌عنوان محصولات همبسته تولید می‌کند. در این پالایشگاه، نفت خام ورودی با اندیس صفر در محصولات و فرآورده‌های نفتی تولیدی به‌عنوان محصولات همبسته^۴ (محصولات یکم تا K ام) به نسبت α_k^m لحاظ شده است. تولید فرآورده‌های نفتی در این پالایشگاه نفت انعطاف‌پذیر، با تغییر وضعیت تولید^۵، متغیر بوده و به ازای هر یک از وضعیت‌های تولیدی $m=1, \dots, M$ نسبت متفاوتی از فرآورده‌های نفتی تولید می‌شود. همچنین فرض کنید که بازه برنامه‌ریزی شامل T پریود بوده و تقاضای هر فرآورده در هر پریود، معین بوده و برای محصول k ام در پریود t ام با

عبارت‌اند از:

اندیس‌ها

$k=1, \dots, K$ فرآورده‌های نفتی

$t=1, \dots, T$ بازه‌های زمانی

$m=1, \dots, M$ وضعیت‌های تولید

داده‌ها

d_t^k تقاضای فرآورده k در پریود t

f_t^m هزینه راه‌اندازی در پریود t در حالت تولید m

p_t^{km} هزینه تولید هر واحد از فرآورده k در پریود t

در وضعیت تولید m

h_t^k هزینه نگهداری هر واحد از فرآورده k در پریود t

d_{it}^k تقاضای فرآورده k بین پریود i و t درحالی‌که $i \leq t$

α_k^m مقدار تولید فرآورده k به ازای هر واحد نفت

خام ورودی در حالت تولید m

B ظرفیت تصفیه نفت خام پالایشگاه

با این مفروضات، وضعیت تولید، مقدار و زمان تولید فرآورده‌های نفتی به‌گونه‌ای است که ضمن برآورده کردن تقاضاها، هزینه‌های کل تولید شامل هزینه‌های راه‌اندازی، تولید و نگهداری را مینیمم نماید، متغیرهای تصمیم مسئله هستند. متغیرهای تصمیم که در فرموله نمودن مسئله استفاده می‌شوند عبارت‌اند از:

$y_t^m = 1$ ، اگر راه‌اندازی در پریود t در وضعیت تولید m اتفاق

بیفتد و در غیر این صورت صفر

x_t^m = مقدار نفت خام ورودی پالایشگاه در پریود t در

وضعیت تولید m

x_t^{km} = مقدار تولید فرآورده k تولیدشده در پریود t در

وضعیت تولید m

⁴ By-products

⁵ Production status, Production Mode

¹ Heavy fuel oil

² Residues

³ Middle distillates

خطی عدد صحیح مختلط^۱ به صورت زیر فرموله نمود:
 $S_t^k =$ مقدار موجودی انبار فرآورده k در انتهای پریود t
 با این اوصاف، می توان مسئله را به صورت یک مسئله برنامه ریزی

$$\text{Minimize } \sum_{t=1}^T \left(\sum_{m=1}^M (f_t^m y_t^m + \sum_{k=0}^K p_t^{km} x_t^{km}) \right) + \sum_{k=1}^K h_t^k s_t^k \quad (۱)$$

$$\text{Subject to } x_t^{km} \leq B y_t^m \quad \forall t = 1, \dots, T; k = 1, \dots, K; m = 1, \dots, M \quad (۲)$$

$$\sum_{m=1}^M y_t^m \leq 1 \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (۳)$$

$$\sum_{m=1}^M x_t^{km} + s_{t-1}^k - s_t^k = d_t^k \quad \forall t = 1, \dots, T; k = 1, \dots, K \quad (۴)$$

$$s_0^k = 0 \quad \forall k = 0, \dots, K \quad (۵)$$

$$x_t^{km} = \alpha_k^m x_t^m \quad \forall t = 1, \dots, T; k = 1, \dots, K; m = 1, \dots, M \quad (۶)$$

$$s_t^k, x_t^{km} \geq 0; y_t^m \in \{0,1\} \quad \forall t = 1, \dots, T; k = 1, \dots, K, m = 1, \dots, M \quad (۷)$$

مسئله برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط تبدیل می شوند. طبق مباحث نظری، هر مسئله برنامه ریزی خطی حل شدنی است، اما تقریباً تمامی مشکلاتی که در عمل برای حل مسائل برنامه ریزی خطی رخ می دهد، ناشی از ابعاد و اندازه مسئله است تا زمانی که ابعاد مسئله به اندازه ای باشد که روش های حل دقیق برنامه ریزی خطی کارایی لازم را داشته باشند، استفاده از سایر روش های ابتکاری و فراابتکاری توجیهی ندارد؛ چراکه طراحان این روش ها به هیچ وجه رسیدن به جواب بهینه را تضمین نمی کنند و صرفاً یک جواب نزدیک بهینه و قابل قبول را ارائه می نمایند. با توجه به اینکه مسئله این تحقیق نمونه ای از مسئله تعیین اندازه انباشته در سیستم های تولیدی انعطاف پذیر با محصولات همبسته است [۴۸]، می توان با افزایش ابعاد مسئله، از الگوریتم ثابت سازی-بهینه سازی استفاده نمود. اساس روش ثابت سازی-بهینه سازی بر این نکته استوار است که در حل مسائل عدد صحیح مختلط ابتدا تعداد متغیرهای عدد صحیح است که تعیین کننده زمان حل مسئله است و تعداد متغیرهای پیوسته در درجه دوم

تابع هدف (۱) مجموع هزینه های ثابت راه اندازی هر پریود و هزینه های متغیر تولید و نگهداری موجودی را کمینه می کند. محدودیت های اجبار راه اندازی^(۲) اطمینان می دهند که یک محصول k در یک حالت تولید m در پریود t فقط زمانی که در آن پریود در آن حالت تولید راه اندازی انجام شده باشد ($y_t^m = 1$) می تواند تولید شود ($x_t^{km} > 0$). محدودیت های (۳) اطمینان می دهند که در هر پریود حداکثر فقط یک حالت تولید راه اندازی می شود. محدودیت های (۴) محدودیت های موازنه موجودی^۳ هستند که برای هر محصول در هر پریود تعریف می شوند و محدودیت های (۵) اطمینان می دهند که موجودی هر محصول در ابتدای دوره برنامه ریزی صفر فرض شده است. محدودیت های (۶) رابطه بین محصول اصلی و محصولات همبسته را نشان می دهند و محدودیت های آخر (۷) محدودیت های نامنفی بودن متغیرهای تصمیم و باینری هستند.

۴-روش حل مسئله

عموماً مسائل برنامه ریزی تولید پس از مدل سازی به یک

³ Inventory balance constraints

¹ Mixed-integer linear programming

² Setup forcing constraints

روش ثابت سازی-بهینه سازی با یک الگوریتم فراابتکاری است، استفاده شده است. با توجه به اینکه متغیرهای وضعیت تولید از نوع عدد صحیح هستند، از بین روش‌های فراابتکاری، الگوریتم ژنتیک انتخاب شد یکی از روش‌های ابتکاری مبتنی بر جمعیت است. برای تلفیق دو روش با استفاده از رویکرد ثابت سازی-بهینه‌سازی وضعیت‌های تولیدی در کروموزوم‌های جمعیت هر تکرار ثابت فرض می‌شود. در واقع هر یک از کروموزوم‌های تولیدی در هر تکرار یک بردار T بعدی است که هر عضو آن یک عدد صحیح بین ۱ تا M خواهد بود (شکل ۳).

ثابت بودن وضعیت‌های تولیدی در هر کروموزوم مسئله تحقیق که یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط است، به یک زیرمسئله برنامه‌ریزی خطی برای هر کروموزوم تبدیل می‌شود. برای هر یک از این کروموزوم‌ها می‌توان این زیرمسئله حاصل را حل نمود و به‌عنوان تابع برازش در نظر گرفت. در این پژوهش برای حل زیرمسئله‌های مذکور از روش سیمپلکس ثانویه استفاده شده است.

m_1	m_2	m_3	m_4	m_5	...	m_T
-------	-------	-------	-------	-------	-----	-------

شکل ۳- کروموزوم تولیدی در هر تکرار

اهمیت قرار دارد. لذا برای حل مسئله با این روش، در هر تکرار، متغیرهای عدد صحیح را به سه گروه ثابت، عدد صحیح و پیوسته تقسیم نموده و زیرمسئله حاصل را با استفاده از روش‌های دقیق حل نموده و در تکرارهای بعدی تعدادی از متغیرهای صحیح حاصل را ثابت فرض نموده و این تکرار تا پایان همه متغیرهای دسته سوم ادامه می‌یابد [۴۹].

با توجه به اینکه در این روش زیر مسئله‌های ایجادشده از نظر پیچیدگی مشابه مسئله اصلی بوده ولی در هر تکرار تعداد متغیرهای صحیح آن کاهش داده شده است؛ با بزرگ‌تر شدن ابعاد مسئله، روش ثابت سازی-بهینه سازی کارایی خود را از دست می‌دهد، با توجه به افزوده شدن قید ظرفیت به مسئله در این تحقیق، این امکان وجود دارد که زیرمسئله‌های ایجادشده در الگوریتم ثابت سازی-بهینه سازی جواب امکان‌پذیر نداشته و عملاً آن الگوریتم کارایی خود را از دست خواهد داد. لذا برای حل مسائل با ابعاد بزرگ این تحقیق از یک الگوریتم ترکیبی که تلفیقی از

شبه کد الگوریتم ترکیبی به‌صورت زیر است:

۰- شروع

۱- یک جمعیت اولیه به‌صورت تصادفی تولید می‌شود.

۲- زیرمسئله‌های ایجادشده به ازای هر کروموزوم که یک مسئله برنامه‌ریزی خطی است با روش الگوریتم ثانویه حل شده و مقدار تابع هدف آن به‌عنوان تابع برازش لحاظ می‌گردد.

۳- عملیات زیر روی جمعیت انجام می‌شود:

- انتخاب والدین

- اعمال عملگر ترکیب

- اعمال عملگر جهش

۴- زیرمسئله‌های ایجادشده به ازای هر کروموزوم فرزند که یک مسئله برنامه‌ریزی خطی است با روش الگوریتم ثانویه حل شده و مقدار تابع هدف آن به‌عنوان تابع برازش لحاظ می‌گردد.

۵- انتخاب نسل جدید و بهترین جواب

۶- در صورت برقرار نشدن شرط خاتمه به مرحله ۳ بروید.

۷- پایان

برای تنظیم الگوریتم پیشنهادی از روش تاگوچی استفاده شد [۵۰] که پارامترهای تنظیم‌شده این الگوریتم برای پارامترهای حداکثر تعداد تکرار، اندازه جمعیت، نرخ جهش، نرخ انتخاب و تعداد تکرار برای شرط خاتمه به ترتیب برابر با ۲۰۰، ۳۰، ۰/۳، ۰/۵ و ۲۰ تعیین شد.

۵-ارائه یک مثال از پالایشگاه انعطاف‌پذیر ۱۰۰ هزار بشکه‌ای

در حال حاضر یک پالایشگاه انعطاف‌پذیر واقعی که بتواند با نفت خام‌های مختلف و متناسب با تقاضای بازار برنامه تولید خود را به‌سرعت تغییر دهد وجود خارجی نداشته و یا حداقل داده‌های آن به‌سادگی در دسترس نیست. در این مقاله بر اساس داده‌های موسسه اطلاعات انرژی ایالات متحده^۱ [۵۱] داده‌های یک پالایشگاه یکصد هزار

¹ U.S. Energy Information Administration

با فرض انعطاف‌پذیر بودن پالایشگاه و وجود سیستم‌های کنترل کامپیوتری صفر، هزینه تولید و نگهداشت هر واحد فرآورده نیز یکسان فرض شده است.

با به‌کارگیری الگوریتم شاخه و کران و داده‌های جداول ۱ و ۲، پاسخ بهینه مدل محاسبه گردید. پاسخ بهینه مسئله در جدول ۳ نمایش داده شده است. سطر اول این جدول نشان می‌دهد که در اولین دوره زمانی ($t=1$) پالایشگاه مورد مطالعه، بایستی در وضعیت تولید شماره ۱۳ راه‌اندازی شده ($y_1^{13}=1$) و میزان خوراک ورودی ($x_1^{13}=14310$) تن باشد. در این دوره زمانی، میزان تولید فرآورده‌های گاز مایع، بنزین موتور، سوخت هوایی، نفت سفید، نفتگاز، ته‌مانده برج تقطیر، نفتا، روان‌کننده‌ها، کک، قیر، گازهای ناشی از تقطیر و محصولات جانبی (با استفاده از فرمول شماره ۶ مدل) به ترتیب ۳۲۳، ۶۴۶۱، ۱۰۵۲، ۱۳، ۴۲۸۹، ۱۴۹، ۳۱۱، ۱۶۲، ۶۷۴، ۲۷۰، ۵۳۹ و ۶۷ تن خواهد بود. مقایسه این مقادیر با ردیف اول جدول ۲ نشان می‌دهد که این برنامه تولید ضمن برآورده نمودن تقاضاهای دوره اول، حداقل میزان مازاد تولید بر تقاضا را دارد.

بشکه‌ای انعطاف‌پذیر شبیه‌سازی شده است. برای ساخت داده‌های یک پالایشگاه انعطاف‌پذیر، تابع تقاضای فرآورده‌های نفتی در این بازار برای ۱۵ دوره زمانی متوالی انتخاب گردید و با مقیاس ۱۰۰ هزار بشکه، تغییر مقیاس داده و به‌عنوان تابع تقاضای این پالایشگاه فرضی در نظر گرفته شد. با فرض وجود یک پالایشگاه انعطاف‌پذیر که بتواند به‌سرعت برنامه تولید خود را با تابع تقاضا هماهنگ نماید، با استفاده از مقادیر تصادفی در تابع تقاضا تغییرات اندکی صورت پذیرفت و با تغییر ترتیب آنها، به‌عنوان حالت‌های تولیدی این پالایشگاه در نظر گرفته شد. با این اوصاف این پالایشگاه می‌تواند در ۱۵ وضعیت تولیدی، ۱۲ فرآورده نفتی را با ترکیب‌های وزنی مختلف مطابق جدول ۱ تولید کند.

تقاضای فرآورده‌های نفتی تابعی از پارامترهای مختلفی همچون دمای هوا، قیمت، تعطیلات رسمی، محصولات جایگزین و ... است. در این مطالعه موردی تقاضای فرآورده‌های نفتی برای ۱۵ روز متوالی در جدول ۲ نمایش داده شده است. در پالایشگاه مورد مطالعه هزینه راه‌اندازی

جدول ۱- وضعیت‌های تولیدی پالایشگاه نمونه

فرآورده	گاز مایع	بنزین موتور	بنزین سوخت هوایی	نفت سفید	نفتگاز	ته‌مانده برج تقطیر	نفتا	روان‌کننده‌ها	کک	قیر	گازهای ناشی از تقطیر	محصولات جانبی
۱	۱/۸۸	۴۵/۰۶	۱۰/۰۷	۰/۰۹	۲۸/۰۳	۱/۳۲	۱/۸۸	۰/۹۴	۴/۸۹	۱/۶۰	۳/۷۶	۰/۴۷
۲	۲/۱۵	۴۴/۱۹	۱۰/۳۹	۰/۰۰	۲۸/۰۹	۱/۲۲	۱/۹۷	۰/۹۴	۵/۰۶	۱/۵۹	۳/۸۴	۰/۵۶
۳	۲/۲۷	۴۴/۱۹	۹/۹۲	۰/۰۹	۲۸/۱۴	۱/۳۲	۱/۶۱	۰/۷۶	۵/۲۹	۱/۸۹	۳/۹۷	۰/۵۷
۴	۳/۷۷	۴۲/۵۶	۸/۲۹	۰/۰۰	۲۹/۸۵	۱/۵۱	۱/۷۹	۰/۸۵	۴/۹۹	۱/۸۸	۳/۹۵	۰/۵۶
۵	۴/۹۱	۳۸/۴۷	۴/۴۴	۰/۰۰	۳۶/۰۱	۱/۲۳	۲/۲۷	۱/۰۴	۵/۲۰	۱/۸۹	۳/۹۷	۰/۵۷
۶	۴/۷۲	۴۲/۰۸	۳/۵۸	۰/۰۰	۳۳/۵۸	۱/۲۳	۱/۹۸	۰/۹۴	۵/۰۰	۲/۲۶	۴/۰۶	۰/۵۷
۷	۴/۷۱	۴۳/۹۷	۴/۹۰	۰/۰۹	۳۰/۱۳	۱/۶۹	۱/۶۹	۰/۹۴	۴/۹۰	۲/۳۵	۴/۰۵	۰/۵۶
۸	۴/۶۱	۴۳/۸۹	۵/۲۶	۰/۰۰	۳۰/۰۸	۱/۴۱	۱/۸۸	۱/۰۳	۴/۸۹	۲/۴۴	۳/۹۵	۰/۵۶
۹	۴/۵۲	۴۴/۳۰	۵/۳۷	۰/۰۹	۳۰/۲۵	۱/۲۳	۱/۷۹	۰/۹۴	۴/۷۱	۲/۳۶	۳/۹۶	۰/۴۷
۱۰	۳/۶۶	۴۵/۷۸	۵/۳۵	۰/۰۹	۲۹/۴۶	۱/۲۲	۱/۹۷	۱/۰۳	۴/۸۸	۲/۱۶	۳/۹۴	۰/۴۷
۱۱	۲/۷۲	۴۸/۲۶	۵/۵۴	۰/۰۹	۲۷/۹۸	۱/۱۳	۱/۹۷	۱/۱۳	۴/۸۸	۱/۹۷	۳/۸۵	۰/۴۷
۱۲	۲/۱۶	۴۶/۹۰	۶/۸۶	۰/۰۹	۲۸/۸۵	۱/۰۳	۱/۹۷	۱/۱۳	۴/۷۰	۱/۹۷	۳/۸۵	۰/۴۷
۱۳	۲/۲۶	۴۵/۱۵	۷/۳۵	۰/۰۹	۲۹/۹۷	۱/۰۴	۲/۱۷	۱/۱۳	۴/۷۱	۱/۸۹	۳/۷۷	۰/۴۷
۱۴	۲/۳۶	۴۵/۳۳	۷/۹۲	۰/۰۹	۲۸/۹۳	۱/۲۳	۱/۹۸	۱/۰۴	۴/۶۲	۲/۱۷	۳/۷۷	۰/۵۷
۱۵	۲/۶۴	۴۶/۲۳	۷/۱۷	۰/۱۹	۲۸/۲۱	۱/۴۲	۱/۶۰	۰/۹۴	۴/۷۲	۲/۳۶	۴/۰۶	۰/۴۷

جدول ۲- تقاضاهای فرآورده‌های نفتی برای ۱۵ روز متوالی پالایشگاه مورد مطالعه (برحسب هزار تن)

محصولات جانبی	گازهای ناشی از تقطیر	قطر	کما	روان‌کننده‌ها	فتنا	نماینده برج تقطیر	فتگاز	نفت سفید	سولخ هوائی	بازین موتور	گاز مایع	فرآورده روز
۶۷	۵۳۹	۲۶۹	۶۷۰	۱۶۰	۳۱۰	۱۴۰	۴۲۰۰	۱۳	۱۰۰۰	۶۴۰۰	۳۲۰	۱
۶۷	۵۵۱	۲۸۲	۶۷۲	۱۶۱	۲۸۲	۱۴۷	۴۱۲۸	۱۳	۹۸۱	۶۷۱۱	۳۰۹	۲
۸۱	۵۸۰/۵	۳۲۴/۱	۷۱۵/۵	۱۳۵	۲۸۳/۵	۱۷۵/۵	۴۸۰۶	۰/۱	۵۱۳	۶۰۲۱	۶۷۵	۳
۸۱/۱	۵۶۷/۵	۲۷۰/۲	۷۵۶/۷	۱۰۸/۱	۲۲۹/۷	۱۸۹/۱	۴۰۲۷	۱۳/۵	۱۴۱۹	۶۳۲۴	۳۲۴/۳	۴
۸۰/۷	۵۷۹/۳	۳۳۶/۸	۷۰۰/۶	۱۳۴/۶	۲۴۲/۴	۲۴۲/۴	۴۳۱۲	۱۳/۴	۷۰۰/۶	۶۲۹۳	۶۳۷/۷	۵
۸۰/۶	۵۶۴/۸	۳۴۹/۶	۶۹۹/۳	۱۴۷/۸	۲۶۸/۹	۲۰۱/۶	۴۳۰۴	۰	۷۵۳/۱	۶۲۸۱	۶۵۸/۹	۶
۸۰/۹	۵۲۹/۵	۳۱۰/۲	۶۶۰/۹	۱۴۸/۴	۲۸۳/۲	۱۷۵/۳	۴۱۴۱	۱۳/۵	۱۱۳۳	۶۴۸۷	۳۳۷/۲	۷
۶۷/۵	۵۸۰/۵	۳۳۷/۵	۶۷۵	۱۳۵	۲۲۹/۵	۲۰۲/۵	۴۰۳۷	۲۷	۱۰۲۶	۶۶۱۵	۳۷۸	۸
۶۷/۳	۵۳۸/۵	۲۲۸/۹	۷۰۰	۱۳۴/۶	۲۶۹/۲	۱۸۸/۵	۴۰۱۲	۱۰	۱۴۴۰	۶۴۴۸	۲۶۹/۲	۹
۸۰/۲	۵۴۹/۲	۲۲۷/۶	۷۲۳/۳	۱۳۳/۸	۲۸۱/۲	۱۷۴	۴۰۲۰	۲/۸	۱۴۸۷	۶۳۲۴	۳۰۸	۱۰
۶۷/۳	۵۶۶/۴	۳۳۷/۱	۶۷۴/۳	۱۳۴/۸	۲۵۶/۲	۱۷۵/۲	۴۳۲۹	۱۳/۴	۷۶۸/۷	۶۳۳۹	۶۴۷/۳	۱۱
۶۷/۱	۵۶۴	۳۰۸/۸	۶۹۸	۱۴۷/۷	۲۸۱/۹	۱۷۴/۵	۴۲۱۵	۱۳/۴	۷۶۵/۲	۶۵۵۱	۵۲۳/۵	۱۲
۶۷/۲	۵۵۰/۹	۲۸۲/۲	۶۹۸/۷	۱۶۱/۲	۲۸۲/۲	۱۶۱/۲	۴۰۰۴	۱۳/۴	۷۹۲/۸	۶۹۰۶	۳۸۹/۷	۱۳
۸۰/۸	۵۶۵/۹	۲۶۹/۵	۷۱۴/۲	۱۲۱/۳	۲۵۶	۲۱۵/۶	۴۲۷۱	۰	۱۱۸۶	۶۰۹۱	۵۳۹	۱۴
۸۱/۲	۵۶۸/۱	۲۷۰/۵	۷۴۳/۹	۱۴۸/۸	۳۲۴/۶	۱۷۵/۸	۵۱۵۳	۰	۶۳۵/۷	۵۵۰۵	۷۰۳/۳	۱۵

جدول ۳- جواب بهینه برنامه‌ریزی تولید پالایشگاه مورد مطالعه

روز	وضعیت تولیدی	میزان خوراک (هزار تن)	روز	وضعیت تولیدی	میزان خوراک (هزار تن)
۱	۱۳	۱۴۳۱۰	۹	۱	۱۴۳۱۰
۲	۱۲	۱۴۳۱۰	۱۰	۲	۱۴۳۱۰
۳	۶	۱۴۳۱۰	۱۱	۹	۱۴۳۰۹
۴	۳	۱۴۳۱۰	۱۲	۱۰	۱۴۳۱۰
۵	۷	۱۴۳۱۰	۱۳	۱۱	۱۴۳۱۰
۶	۸	۱۴۲۸۲	۱۴	۴	۱۴۳۱۰
۷	۱۴	۱۴۳۱۰	۱۵	۵	۱۴۳۱۰
۸	۱۵	۱۴۳۱۰			

۶- نتایج عددی

مورد استفاده قرار گرفت و میانگین نتایج برای هر دسته استخراج و با نتایج راه‌حل دقیق مقایسه گردیده است. پس از تنظیم پارامترهای الگوریتم در ابعاد کوچک و متوسط، یک دسته مسئله با ابعاد بزرگ شامل ۲۱ نمونه داده شبیه‌سازی شده توسط الگوریتم ترکیبی پیشنهادی حل شده است. برای کد نویسی الگوریتم‌های این مقاله از نرم‌افزار ۲۰۱۶ MATLAB استفاده شده و محاسبات عددی توسط کامپیوتر شخصی با پروسسور ۳/۹GHz@۷۱۰۰- Core™i۳ با حافظه داخلی ۸ گیگابایت انجام شده است.

در این بخش، برای اعتبارسنجی الگوریتم ترکیبی پیشنهادی، از داده‌های شبیه‌سازی شده که به صورت تصادفی تولید شده‌اند، استفاده شده و مسائلی در ابعاد کوچک و متوسط طراحی و الگوریتم ترکیبی مطرح شده در بخش قبلی به آزمون گذاشته شده و عملکرد آنها با یک الگوریتم دقیق (الگوریتم شاخه و کران) مقایسه شده است. بدین منظور دو دسته مسئله با اندازه‌های متفاوت در قالب ابعاد کوچک و متوسط طراحی و برای هر اندازه مسئله، ۲۱ نمونه داده شبیه‌سازی شده

الف- نتایج حل مسائل با ابعاد کوچک:

و زمان رسیدن به جواب برحسب ثانیه، محاسبه شده به روش الگوریتم ترکیبی ستون چهارم و پنجم به ترتیب مقدار تابع هدف و زمان رسیدن به جواب برحسب ثانیه، محاسبه شده به روش شاخه و کران، و ستون پنجم درصد انحراف تابع هدف الگوریتم ترکیبی با روش شاخه و کران است.

ج- نتایج حل مسائل با ابعاد بزرگ:

برای بررسی عملکرد الگوریتم ترکیبی پیشنهادی این مقاله در ابعاد بزرگ ۲۱ مسئله با مقادیر $M=15$, $K=12$ و $T=30$ به کار گرفته شد. نتایج حاصله در جدول ۶ ارائه شده است. در این جدول ستون اول شماره نمونه داده‌های شبیه‌سازی شده، ستون دوم و سوم به ترتیب مقدار تابع هدف و زمان رسیدن به جواب برحسب ثانیه، محاسبه شده به روش الگوریتم ترکیبی ستون چهارم و پنجم به ترتیب مقدار تابع هدف و زمان رسیدن به جواب برحسب ثانیه، محاسبه شده به روش شاخه و کران، و ستون پنجم درصد انحراف تابع هدف الگوریتم ترکیبی با روش شاخه و کران است.

برای بررسی عملکرد الگوریتم ترکیبی پیشنهادی این مقاله در ابعاد کوچک ۲۱ مسئله با مقادیر $M=4$, $K=4$ و $T=8$ به کار گرفته شد. نتایج حاصله در جدول ۴ ارائه شده است. در این جدول ستون اول شماره نمونه داده‌های شبیه‌سازی شده، ستون دوم و سوم به ترتیب مقدار تابع هدف و زمان رسیدن به جواب برحسب ثانیه، محاسبه شده به روش الگوریتم ترکیبی ستون چهارم و پنجم به ترتیب مقدار تابع هدف و زمان رسیدن به جواب برحسب ثانیه، محاسبه شده به روش شاخه و کران، و ستون پنجم درصد انحراف تابع هدف الگوریتم ترکیبی با روش شاخه و کران است.

ب- نتایج حل مسائل با ابعاد متوسط:

برای بررسی عملکرد الگوریتم ترکیبی پیشنهادی این مقاله در ابعاد کوچک ۲۱ مسئله با مقادیر $M=6$, $K=6$ و $T=12$ به کار گرفته شد. نتایج حاصله در جدول ۵ ارائه شده است. در این جدول ستون اول شماره نمونه داده‌های شبیه‌سازی شده، ستون دوم و سوم به ترتیب مقدار تابع هدف

جدول ۴- مقایسه بین الگوریتم ترکیبی و جواب دقیق برای مسائل با ابعاد کوچک ($K=4$, $M=4$, $T=8$)

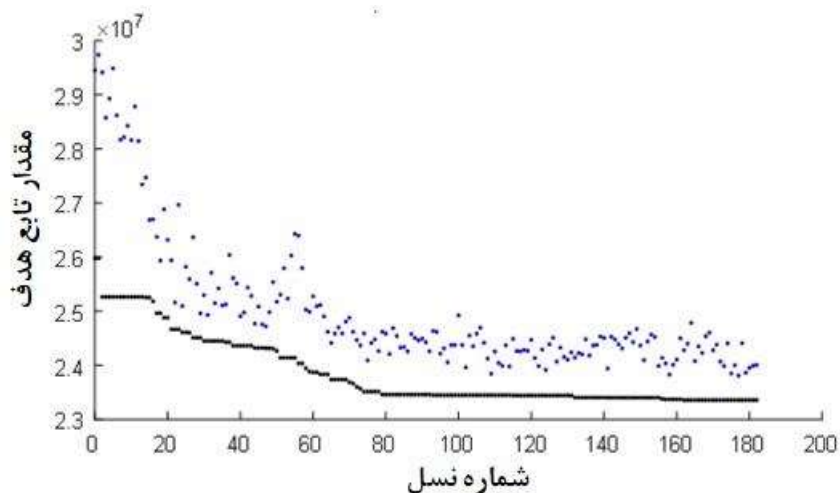
شماره نمونه	الگوریتم ترکیبی		روش شاخه و کران		درصد انحراف
	مقدار تابع هدف	زمان رسیدن به جواب	مقدار تابع هدف	زمان رسیدن به جواب	
۱	۵۰۶۸۱۰	۱۴/۶۹۹	۵۰۶۸۰۵	۰/۰۵۰	۰/۰۰
۲	۷۴۳۹۴۳	۱۱/۴۵۴	۷۴۰۳۸۲	۰/۰۲۸	۰/۴۸
۳	۵۹۲۶۳۱	۱۴/۰۳۴	۵۹۱۳۳۷	۰/۰۲۶	۰/۲۲
۴	۴۴۵۶۴۸	۱۴/۱۴۶	۴۴۳۹۶۵	۰/۰۴۵	۰/۳۸
۵	۴۵۵۰۶۱	۱۲/۷۶۳	۴۵۴۶۶۹	۰/۰۵۲	۰/۰۹
۶	۳۴۲۰۹۳	۱۰/۰۰۵	۳۴۱۷۹۱	۰/۰۳۹	۰/۰۹
۷	۱۵۹۳۰۸	۱۳/۵۱۵	۱۵۸۹۲۰	۰/۰۱۶	۰/۲۴
۸	۱۳۶۷۹۹۸	۱۵/۸۷۵	۱۳۶۲۷۴۸	۰/۰۵۶	۰/۳۹
۹	۱۱۴۱۳۷۲	۱۳/۳۸۳	۱۱۳۷۲۴۵	۰/۰۲۹	۰/۳۶
۱۰	۵۹۴۰۷۹	۱۶/۲۲۵	۵۹۳۸۱۴	۰/۰۷۴	۰/۰۴
۱۱	۵۹۵۹۲۵	۱۵/۵۴۱	۵۹۳۸۱۴	۰/۰۷۳	۰/۳۶
۱۲	۴۶۸۴۶۷	۱۰/۰۴۱	۴۶۷۱۳۷	۰/۰۵۲	۰/۲۸
۱۳	۵۳۱۷۲۹	۱۹/۶۰۹	۵۳۱۲۵۴	۰/۰۲۰	۰/۰۹
۱۴	۴۶۸۱۲۷	۱۰/۶۵۸	۴۶۶۶۹۵	۰/۰۷۸	۰/۳۱
۱۵	۴۷۴۷۴۳	۱۳/۹۵۱	۴۷۳۶۶۳	۰/۰۴۶	۰/۲۳
۱۶	۴۶۴۳۰۵	۱۰/۵۴۵	۴۶۲۴۵۰	۰/۰۷۰	۰/۴۰
۱۷	۴۶۳۳۶۰	۱۲/۷۱۶	۴۶۲۴۲۶	۰/۰۷۲	۰/۲۰
۱۸	۵۱۱۶۲۵	۱۰/۵۰۹	۵۱۱۱۲۹	۰/۰۹۵	۰/۱۰
۱۹	۴۹۸۴۸۵	۱۷/۷۴۷	۴۹۷۶۴۴	۰/۰۹۷	۰/۱۷
۲۰	۴۴۰۷۱۳	۱۳/۹۴۹	۴۳۹۷۷۴	۰/۰۹۶	۰/۲۱
۲۱	۶۰۱۸۳۴	۱۲/۶۱۱	۶۰۰۴۵۱	۰/۰۴۲	۰/۲۳
میانگین		۱۳/۵۲۳		۰/۰۵۵	۰/۲۳

جدول ۵- مقایسه بین الگوریتم ترکیبی و جواب دقیق برای مسائل با ابعاد متوسط ($K=6, M=6, T=12$)

شماره نمونه	الگوریتم ترکیبی		روش شاخه و کران		درصد انحراف
	مقدار تابع هدف	زمان رسیدن به جواب	مقدار تابع هدف	زمان رسیدن به جواب	
۱	۱۷۸۴۳۰۰	۱۹/۰۵۳	۱۷۸۱۶۴۶	۰/۲۶۵	۰/۱۵
۲	۱۸۴۹۵۳۰	۱۶/۵۶۲	۱۸۴۷۲۸۴	۰/۳۱۰	۰/۱۲
۳	۱۷۹۰۷۰۹	۱۵/۱۷۶	۱۷۸۸۶۹۵	۰/۲۱۴	۰/۱۱
۴	۱۷۶۸۱۶۸	۲۱/۴۶۸	۱۷۶۶۴۲۷	۰/۳۱۰	۰/۱۰
۵	۵۶۰۳۲۱۰	۱۶/۰۹۶	۵۵۹۸۲۶۳	۰/۰۷۱	۰/۰۹
۶	۱۸۵۸۴۹۱	۱۹/۱۹۰	۱۸۵۶۶۸۰	۰/۲۲۳	۰/۱۰
۷	۱۷۴۰۶۷۱	۱۵/۵۰۲	۱۷۳۹۰۱۰	۰/۲۲۰	۰/۱۰
۸	۱۷۸۴۷۷۰	۱۹/۱۷۷	۱۷۸۲۷۶۸	۰/۳۴۸	۰/۱۱
۹	۲۲۶۳۷۲۸	۱۹/۳۷۴	۲۲۶۰۴۹۹	۰/۱۱۳	۰/۱۴
۱۰	۱۷۰۱۳۹۷	۲۰/۷۱۱	۱۶۹۹۳۲۶	۱/۲۹۶	۰/۱۲
۱۱	۱۲۳۶۸۳۱	۱۹/۱۶۶	۱۲۳۵۷۸۷	۰/۲۵۹	۰/۰۸
۱۲	۱۷۸۰۹۷۰	۱۹/۱۱۲	۱۷۷۹۶۲۹	۰/۲۶۷	۰/۰۸
۱۳	۱۷۵۴۳۲۰	۱۸/۷۱۸	۱۷۵۱۹۸۶	۰/۴۵۵	۰/۱۳
۱۴	۱۷۸۴۲۰۱	۲۱/۰۰۷	۱۷۸۱۶۴۶	۰/۲۶۲	۰/۱۴
۱۵	۳۱۱۰۷۱۲	۱۷/۷۱۸	۳۱۰۶۳۵۷	۰/۲۵۹	۰/۱۴
۱۶	۱۷۴۶۵۰۳	۱۸/۱۹۲	۱۷۴۴۸۰۱	۰/۲۶۱	۰/۱۰
۱۷	۱۷۹۹۶۲۱	۱۶/۱۰۸	۱۷۹۶۹۸۷	۰/۳۳۷	۰/۱۵
۱۸	۱۸۵۲۹۰۷	۱۸/۴۴۴	۱۸۵۰۳۳۱	۰/۳۳۳	۰/۱۴
۱۹	۱۵۶۳۹۱۴	۱۹/۲۷۱	۱۵۶۱۷۰۲	۰/۲۳۲	۰/۱۴
۲۰	۱۹۳۱۸۰۹۲	۱۷/۱۹۶	۱۹۳۰۳۲۵۴	۰/۱۱۲	۰/۰۸
۲۱	۱۷۸۳۰۸۴	۲۱/۹۶۸	۱۷۸۱۲۹۱	۰/۲۶۴	۰/۱۰
میانگین		۱۸/۵۳۴		۰/۳۰۵	۰/۱۲

نسل الگوریتم است و محور عمودی مقدار تابع هدف را برای بهترین مقدار هر نسل (نمودار پایین) و همچنین میانگین مقادیر تابع هدف هر نسل (نقاط بالای نمودار) را نشان می‌دهد.

شکل (۱) روند همگرایی الگوریتم ترکیبی مربوط به اولین نمونه مسائل ابعاد بزرگ بر اساس منحنی پارتو (حاصل از اجرای برنامه) را نشان می‌دهد. محور افقی این نمودار شماره



شکل ۱ - نمودار همگرایی الگوریتم ترکیبی مربوط به اولین نمونه مسائل ابعاد بزرگ

جدول ۶- مقایسه بین الگوریتم ترکیبی و جواب دقیق برای مسائل با ابعاد بزرگ ($K=12, M=15, T=30$)

شماره نمونه	الگوریتم ترکیبی		روش شاخه و کران		درصد انحراف
	مقدار تابع هدف	زمان رسیدن به جواب	مقدار تابع هدف	زمان رسیدن به جواب	
۱	۲۳۳۵۸۲۰۰	۸۹/۹۰۱	-	-	-
۲	۲۴۹۷۶۶۴۸	۸۷/۳۰۳	-	-	-
۳	۲۶۲۵۳۰۱۰	۱۰۹/۷۲۷	-	-	-
۴	۲۱۲۵۷۲۹۳	۶۲/۲۴۳	-	-	-
۵	۲۴۸۵۴۲۷۱	۷۷/۷۳۹	-	-	-
۶	۲۴۹۹۶۱۵۸	۹۸/۸۲۴	-	-	-
۷	۲۲۲۱۵۰۶۰	۸۶/۹۴۶	-	-	-
۸	۲۵۷۲۶۳۸۰	۷۵/۶۸۳	-	-	-
۹	۲۴۶۹۵۳۷۵	۸۲/۶۷۴	-	-	-
۱۰	۲۳۱۸۰۵۰۸	۱۱۷/۷۸۶	-	-	-
۱۱	۲۵۳۳۹۶۴۸	۹۰/۸۰۴	-	-	-
۱۲	۲۱۹۶۳۹۹۴	۱۰۴/۶۴۱	-	-	-
۱۳	۲۱۷۵۳۵۶۶	۷۱/۹۴۳	-	-	-
۱۴	۲۱۵۰۵۶۷۶	۹۰/۱۵۸	-	-	-
۱۵	۲۴۸۵۵۶۸۰	۹۵/۲۲۵	-	-	-
۱۶	۲۵۴۲۳۸۴۴	۶۷/۰۴۸	-	-	-
۱۷	۲۱۹۱۵۸۸۴	۹۰/۹۵۳	-	-	-
۱۸	۲۴۱۰۵۵۵۱	۱۱۰/۳۱۸	-	-	-
۱۹	۲۲۴۶۳۴۰۳	۶۲/۲۲۱	-	-	-
۲۰	۲۲۹۳۱۴۷۱	۷۴/۷۰۰	-	-	-
۲۱	۲۳۸۷۴۱۹۶	۷۸/۹۰۶	-	-	-
میانگین		۸۶/۹۴۱			

۷- بحث

سایر تحقیقات مشابه همخوانی دارد. در خصوص نزدیکی مقدار تابع هدف در ابعاد متوسط، الگوریتم ترکیبی پیشنهادی تحقیق و میزان انحراف تابع هدف این جواب با الگوریتم شاخه و کران ۰/۱۲ درصد است.

مشابه سایر پژوهش‌ها با افزایش ابعاد مسئله روش‌های دقیق عملاً کارایی خود را از دست داده و امکان رسیدن به جواب بهینه با این روش‌ها وجود نداشته و یا به‌سختی امکان‌پذیر است. دسته سوم مسائلی که در این تحقیق توسط الگوریتم ترکیبی پیشنهادی مورد آزمون قرار گرفت دارای ابعاد $K=12$ ، $M=15$ و $T=30$ بود و نتایج تحقیق نشان می‌دهد که امکان محاسبه جواب به روش شاخه و کران میسر نگردید؛ اما روش الگوریتم ترکیبی پیشنهادی این مقاله با میانگین زمانی ۸۶/۹۴۱ ثانیه عملکرد مناسبی دارد (جدول ۶). همچنین نمودار ۱ نمودار همگرایی الگوریتم ترکیبی مربوط به اولین نمونه مسائل ابعاد بزرگ را نشان می‌دهد.

نتایج تحقیق در ابعاد مسائل کوچک (جدول ۴) نشان می‌دهد که میانگین زمان رسیدن به جواب الگوریتم ترکیبی پیشنهادی ۱۳/۵۲۳ ثانیه است. مطابق انتظار در ابعاد کوچک نیز راه‌حل‌های دقیق در زمان قابل قبولی به جواب بهینه می‌رسند که در مسئله این تحقیق نیز نتایج با سایر تحقیقات مشابه همخوانی دارد. در خصوص نزدیکی مقدار تابع هدف در ابعاد متوسط الگوریتم ترکیبی پیشنهادی تحقیق و میزان انحراف تابع هدف این جواب با الگوریتم شاخه و کران ۰/۲۳ درصد است.

نتایج تحقیق در ابعاد مسائل متوسط (جدول ۵) نشان می‌دهد که میانگین زمان رسیدن به جواب الگوریتم ترکیبی پیشنهادی ۱۸/۵۳۴ ثانیه است. همان‌گونه که انتظار می‌رود در ابعاد متوسط نیز راه‌حل‌های دقیق در زمان قابل قبولی به جواب بهینه می‌رسند که در مسئله این تحقیق نیز نتایج با

۸- نتیجه‌گیری

در این پژوهش مسئله برنامه‌ریزی تولید پالایشگاه نفت انعطاف‌پذیر به کمک برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط مدل‌سازی گردید. برای حل این‌گونه مسائل روش‌های مختلفی توسط محققین ارائه شده که عموماً ابعاد مسئله تعیین‌کننده کارایی این روش‌ها است و در این تحقیق یک الگوریتم ترکیبی با تلفیق الگوریتم ژنتیک و روش ابتکاری ثابت‌سازی-بهینه‌سازی معرفی و در ادامه سه دسته مسئله با ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ به کمک داده‌های تصادفی شبیه‌سازی گردید و سپس این مسائل توسط الگوریتم ترکیبی مذکور و در صورت امکان با روش شاخه و کران حل و نتایج آنها مقایسه و تحلیل شد.

نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم ترکیبی این تحقیق در ابعاد کوچک ضمن ارائه جوابی نزدیک به جواب بهینه در مقایسه با روش شاخه و کران زمان قابل‌ملاحظه‌ای را صرف می‌کند و با افزایش ابعاد مسئله، الگوریتم ترکیبی همچنان در زمان مقبولی به یک جواب نزدیک بهینه می‌رسد. با افزایش ابعاد مسئله الگوریتم شاخه و کران کارایی خود را از دست داده ولی کماکان الگوریتم پیشنهادی در زمان مناسبی به جواب می‌رسد. یکی از تحقیقاتی که اخیراً در زمینه تعیین اندازه انباشته تولیدی انجام شده است، از الگوریتم ثابت‌سازی-بهینه‌سازی استفاده نموده و یک الگوریتم دو بعدی در این زمینه ارائه نموده است [۴۸]. مقایسه نتایج این تحقیق با تحقیق مذکور نشان می‌دهد که از نظر نزدیکی مقدار جواب محاسبه شده با جواب دقیق در ابعاد کوچک و متوسط، الگوریتم ترکیبی پیشنهادی این تحقیق، جواب‌هایی به مراتب نزدیک‌تر از الگوریتم ثابت‌سازی-بهینه‌سازی به جواب بهینه ارائه می‌دهد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که با پیشرفت صنعت ساخت پالایشگاه‌های نفت و افزایش انعطاف‌پذیری همچنان به کمک برنامه‌ریزی ریاضی می‌توان به سرعت برنامه تولید را با تقاضاهای به سرعت متغیر بازار تنظیم و هزینه‌های کل تولید

مراجع

- [1] H. Chen, "Fix-and-optimize and variable neighborhood search approaches for multi-level capacitated lot sizing problems", Omega, Vol. 56, No.1, October 2015, pp. 25-36.
- [2] I. E. Grossmann, S. A. Van Den Heever, and I. Harjunkoski, "Discrete optimization methods and their role in the integration of planning and scheduling", In AIChE Symposium Series, New York; American Institute of Chemical Engineers, Vol. 1, No. 1, March 2002, pp. 150-168.
- [3] K. Y. Al-Qahtani, and A. Elkamel, Planning and integration of refinery and petrochemical operations. John Wiley & Sons, 2011.
- [4] J. G. Speight, The refinery of the future, Gulf Professional Publishing, 2020.

و یا تابع سود را بهینه نمود. مقایسه نتایج این تحقیق با تحقیقات مشابه قبلی نشان می‌دهد که عملاً بدون لحاظ انعطاف‌پذیری در مدل برنامه‌ریزی تولید پالایشگاه، امکان حل مسئله وجود ندارد. به‌عنوان مثال یکی از نزدیک‌ترین مدل‌های ارائه‌شده در پژوهش‌های قبلی مربوط به پژوهش نوح و همکاران [۲۲] است که رویکرد مشابهی برای مدل‌سازی داشته ولی ویژگی انعطاف‌پذیری را ندارد. بدیهی است که در حال حاضر با توجه به انعطاف‌پذیری پایین اکثر پالایشگاه‌های نفت، شاید بتوان بدون لحاظ این ویژگی در مدل برنامه‌ریزی تولید و صرفاً با استفاده از مدل‌های مکمل غیرخطی برای تنظیم پارامترهای عملیاتی، به یک برنامه نزدیک بهینه دست یافت ولی با افزایش انعطاف‌پذیری پالایشگاه‌ها، لحاظ نمودن انعطاف‌پذیری در مدل ریاضی برنامه‌ریزی تولید می‌تواند به یافتن بهینه سراسری کمک شایانی نماید.

در انجام این پژوهش مهم‌ترین محدودیت، عدم وجود داده‌های واقعی برای یک سیستم تولیدی انعطاف‌پذیر با محصولات همبسته بود که به همین دلیل برای اعتبارسنجی مدل و آزمودن الگوریتم ترکیبی پیشنهادی از داده‌های شبیه‌سازی شده استفاده شد. هدف از این پژوهش ارائه مدل پایه‌ای برای برنامه‌ریزی تولید پالایشگاه نفت انعطاف‌پذیر بوده است و به منظور معرفی مدل پایه‌ای، حداقل ویژگی‌های مسئله لحاظ شده است. به‌عنوان مثال برای استفاده و به‌کارگیری نتایج این تحقیق در شرایط واقعی می‌توان محدودیت‌های دیگری همچون محدودیت ذخیره‌سازی فرآورده‌ها، محدودیت تأمین انواع نفت خام در بازه‌های زمانی مختلف و سایر محدودیت‌های عملیاتی از جمله انجام تعمیرات دوره‌ای پالایشگاه را به مسئله اضافه نمود. همچنین پژوهشگران می‌توانند برای حل مدل ارائه‌شده در این مقاله از سایر روش‌های ابتکاری و فراابتکاری استفاده نموده و با مقایسه نتایج آن با نتایج این تحقیق، روش حل این مدل را بهبود بخشند.

- [5] J. G. Speight, *An introduction to petroleum technology, economics, and politics*, John Wiley & Sons, 2011.
- [6] R. Beck, *A vision for the refinery of 2030*, Hydrocarbon Process, 2019.
- [7] Canadian Fuels Association, *The Economics of Petroleum Refining-Understanding the business of processing crude oil into fuels and other value added products*, December 2013.
- [8] M. Joly, "Refinery production planning and scheduling: The refining core business", *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 29, No. 2, June 2012, pp. 371-84.
- [9] L. F. L. Moro, A. C. Zanin, and J. M. Pinto, "A planning model for refinery diesel production", *Computers & Chemical Engineering*, Vol. 22, No. 1, March 1998, pp.S1039-S1042.
- [10] W. Li, C.W. Hui, C. W., and A. Li, "Integrating CDU, FCC and product blending models into refinery planning", *Computers & chemical engineering*, Vol. 29, No. 9, August 2005, pp. 2010-2028.
- [11] I. Alhajri, A. Elkamel, T. Albahri, and P.L. Douglas, "A nonlinear programming model for refinery planning and optimisation with rigorous process models and product quality specifications" *International Journal of Oil, Gas and Coal Technology*, Vol. 1, No. 3, August 2008, pp. 283-307.
- [۱۲] رضا درگاهی و محمدرضا جعفری نصر، " کاربرد مدل برنامه ریزی خطی در فرایند مخلوط سازی بنزین تولیدی پالایشگاه تهران"، پژوهش نفت، دوره ۱۹، شماره ۶۰، زمستان ۱۳۸۸، صفحه ۶۷-۸۳.
- [13] A.M. Alattas, I.E. Grossmann, and I. Palou-Rivera, "Integration of nonlinear crude distillation unit models in refinery planning optimization", *Industrial & engineering chemistry research*, Vol. 50, No. 11, April 2011, pp. 6860-6870.
- [14] A.M. Alattas, I.E. Grossmann, I. Palou-Rivera, "Refinery production planning: multiperiod MINLP with nonlinear CDU model", *Industrial & engineering chemistry research*, Vol. 51, No. 39, August 2012, pp.12852-12861.
- [15] B.J. Zhang, K. Liu, X.L. Luo, Q.L. Chen, and W.K. Li, "A multi-period mathematical model for simultaneous optimization of materials and energy on the refining site scale", *Applied Energy*, Vol. 143, No. 1, April 2015, pp.238-250.
- [16] J. Li, X. Xiao, F. Boukouvala, C.A. Floudas, B. Zhao, G. Du, X. Su, and H. Liu, "Data-driven mathematical modeling and global optimization framework for entire petrochemical planning operations", *AIChE Journal*, Vol. 62, No. 9, March 2016, pp. 3020-3040.
- [17] M.R. Siamizade, "Global optimization of refinery-wide production planning with highly nonlinear unit models", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 58, No. 24, May 2019, pp. 10437-10454.
- [18] F. Li, M. Yang, W. Du, and X. Dai, "Development and challenges of planning and scheduling for petroleum and petrochemical production", *Frontiers of Engineering Management*, Vol. 7, No. 1, July 2020, pp. 373-383.
- [19] L. Zhang, Z. Yuan, and B. Chen, "Refinery-wide planning operations under uncertainty via robust optimization approach coupled with global optimization", *Computers & Chemical Engineering*, Vol. 146, No. 1, March 2021, p.107205.
- [۲۰] مرتضی اصغری، شیرین قربان لوینه و مجتبی راجی، "شبیه‌سازی عددی و مطالعه نظری تأثیر پارامترهای عملیاتی در تقطیر غشایی در خلأ"، مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۶، شماره ۵۵، زمستان ۱۳۹۷، صفحه ۴۱-۴۹.
- [۲۱] سید حسین ابراهیمی و احمد جعفرزاده افشاری، "ارایه یک مدل ریاضی جهت بهینه سازی عملیات شبکه انتقال گاز"، مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۴، شماره ۴۴، بهار ۱۳۹۵، صفحه ۹۳-۱۰۴.
- [22] N.M. Noh, A. Bahar, and Z.M. Zainuddin, "Scenario Based Two-Stage Stochastic Programming Approach for the Midterm Production Planning of Oil Refinery", *MATEMATIKA: Malaysian Journal of Industrial and Applied Mathematics*, Vol. 34, No. 3, December 2018, pp. 45-55.
- [23] L.D. Sales, F.M. Luna, and B.D. Prata, "An integrated optimization and simulation model for refinery planning including external loads and product evaluation", *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 35, No. 1, January 2018, pp. 199-215.
- [24] J. Shin, and J.H. Lee, "Multi-timescale, multi-period decision-making model development by combining reinforcement learning and mathematical programming", *Computers & Chemical Engineering*, Vol. 121, No. 1, February 2019, pp.556-573.

- [25] F.A. Utomo, C.N. Rosyidi, and W.A. Jauhari, "An integrated optimisation model of refinery short-term planning: a case study", *Energy Systems*, Vol. 11, No. 2, November 2020, pp. 283-299.
- [26] C.D. Demirhan, F. Boukouvala, K. Kim, H. Song, W.W. Tso, C.A. Floudas, and E.N. Pistikopoulos, "An integrated data-driven modeling & global optimization approach for multi-period nonlinear production planning problems", *Computers & Chemical Engineering*, Vol. 141, No. 1, October 2020, p.107007.
- [27] F. Li, F. Qian, C. Fan, and V. Mahalec, "Hinging Hyperplanes Crude Oil Mixing Model for Production Planning Optimization", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 59, No. 18, April 2020, pp. 8704-8714.
- [28] C. Wang, X. Peng, C. Shang, C. Fan, L. Zhao, and W. Zhong, "A deep learning-based robust optimization approach for refinery planning under uncertainty", *Computers & Chemical Engineering*, Vol. 155, No. 1, December 2021, p. 107495.
- [29] J.M. Pinto, and L.F. Moro, "A planning model for petroleum refineries", *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 17, No. 4-7, December 2000, pp.575-586.
- [30] S.M. Neiro, and J.M. Pinto, "A general modeling framework for the operational planning of petroleum supply chains", *Computers & Chemical Engineering*, Vol. 28, No. 6-7, June 2004, pp. 871-896.
- [31] B.C. Menezes, L.F. Moro, I.E. Grossmann, J.D. Kelly, R.A. Medronho, and F.P. Pessoa, "Production planning of oil-refinery units for the future fuel market in Brazil", *COBEQ*, Florianopolis, 19-22 October 2014.
- [32] P. Castillo Castillo, P.M. Castro, and V. Mahalec, "Global optimization algorithm for large-scale refinery planning models with bilinear terms", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 56, No. 2, December 2017, pp.530-548.
- [33] A. Azadeh, F. Shafiee, R. Yazdanparast, J. Heydari, and A. Keshvarparast, "Optimum integrated design of crude oil supply chain by a unique mixed integer nonlinear programming model", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 56, No. 19, April 2017, pp. 5734-5746.
- [34] P. Tominac, and V. Mahalec, "A game theoretic framework for petroleum refinery strategic production planning", *AIChE Journal*, Vol. 63, No. 7, July 2017, pp. 2751-2763.
- [۳۵] امیر رحیمی منش، حمزه امین طهماسبی و کامبیز شاهرودی، "ارائه مدل بهینه‌سازی ریاضی برای زنجیره تأمین چند محصولی با امکان وقوع اختلال در تأمین‌کننده در شرایط تحریم (مطالعه موردی صنایع تعمیراتی پالایشگاهی)"، مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۸، شماره ۶۰، بهار ۱۳۹۹، صفحه ۱۰۷-۱۲۵.
- [36] C.S. Hsu, and P.R. Robinson, *Handbook of Petroleum Technology*, Springer International Publishing AG, Cham, 2017.
- [37] T. Olsen, and E. Schodowski, "Improve refinery flexibility and responsiveness", *Hydrocarbon Processing*, Vol. 15, No. 1, January 2015, pp. 87-89.
- [38] J.G. Speight, *Handbook of industrial hydrocarbon processes*, Gulf Professional Publishing, 2019.
- [39] J.O. Cunha, H.H. Kramer, and R.A. Melo, "On the computational complexity of uncapacitated multi-plant lot-sizing problems", *Optimization Letters*, Vol. 15, No. 2, July 2021, pp. 803-812.
- [40] C. Devoto, E. Fernández, and P. Piñeyro, "The economic lot-sizing problem with remanufacturing and inspection for grading heterogeneous returns", *Journal of Remanufacturing*, Vol. 11, No. 1, April 2021, pp. 71-87.
- [41] V. Bo, M. Bortolini, E. Malaguti, M. Monaci, C. Mora, and P. Paronuzzi, "Models and algorithms for integrated production and distribution problems", *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 154, No. 1, April 2021, p. 107003.
- [42] Set Laboratories Inc., Refining Operations. Retrieved from here: <http://www.setlab.com/resources/refining/refining-operations>, Jan. 05, 2022.
- [43] S. Parkash, *Refining processes handbook*, Elsevier, 2003.
- [44] J.H. Gary, J.H. Handwerk, M.J. Kaiser, and D. Geddes, *Petroleum refining: technology and economics*, CRC press, 2007.
- [45] J.G. Speight, *The Chemistry and Technology of Petroleum*, CRC Press, 2006.
- [46] J.G. Speight, *Handbook of petroleum refining*, CRC press, 2016.

[47] L. Dong, P. Kouvelis, and X. Wu, "The value of operational flexibility in the presence of input and output price uncertainties with oil refining applications", *Management Science*, Vol. 60, No. 12, October 2014, pp. 2908-2926.

[۴۸] مسعود رضائی، غلامرضا اسماعیلیان و رامین صادقیان، "الگوریتم دوبعدی ثابت سازی - بهینه‌سازی برای حل مسأله تعیین اندازه انباشته در سیستم‌های تولیدی انعطاف‌پذیر با محصولات همبسته"، مدیریت تولید و عملیات، دوره ۱۲، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۰، صفحه ۹۳-۱۱۱.

[49] S. Helber, and F. Sahling, "A fix-and-optimize approach for the multi-level capacitated lot sizing problem", *International Journal of Production Economics*, Vol. 123, No. 2, February 2010, pp. 247-256.

[50] S. K. Karna, and R. Sahai, "An overview on Taguchi method", *International journal of engineering and mathematical sciences*, Vol. 1, No. 1, January 2012, pp. 1-7.

[51] U.S. Energy Information Administration, Available from: <https://www.eia.gov/dnav/pet> , Accessed Sep. 16, 2021.