

بهینه‌سازی ساختار شبکه پالایشگاه با استفاده از مدل‌سازی ریاضی

محدثه پودینه، فرهاد شهرکی، محمد رضا سردشتی بیرجندی* و میرمحمد خلیلی‌پور

گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۲۳

چکیده

محصولات حاصل از نفت خام به‌طور گسترده در صنعت و زندگی روزمره استفاده می‌شوند. پالایش نفت یکی از پیچیده‌ترین صنایع شیمیایی به‌شمار می‌رود و شامل فرایندهای متعددی است. هدف نهایی پالایشگاه‌های نفت، کاهش هزینه‌ها و افزایش سود است. در بهینه‌سازی این هزینه‌ها و یا دستیابی به سود بیشتر، می‌توان اقدامات بهینه را به‌صورت تابعی از متغیرهای تصمیم مشخص کرد. در این مقاله، به بررسی و مقایسه ساختار بهینه شبکه پالایشگاهی با در نظر گرفتن تمامی محدودیت‌های مربوط به فشار، منابع، مصرف‌کننده‌ها، هزینه‌های عملیاتی و سرمایه‌گذاری، با استفاده از دو رویکرد برنامه‌ریزی ریاضی خطی (LP) و غیرخطی (NLP) پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهد که بهینه‌سازی غیرخطی ساختار شبکه پالایشگاه در مقایسه با وضعیت موجود، حدود ۲٪ افزایش در سودآوری نسبت به مدل خطی را به‌همراه دارد.

کلمات کلیدی: پالایشگاه، مدل‌سازی، بهینه‌سازی، برنامه‌ریزی خطی، برنامه‌ریزی غیر خطی

مقدمه

را بر عهده دارد، تعریف می‌گردد. اولین پالایشگاه واقعی تأسیس شد [۱]. از آن زمان تاکنون، صنعت پالایش نفت دست‌خوش تغییرات و پیشرفت‌های زیادی با استفاده از تکنولوژی‌های نوین شده است. این تغییرات باعث شده‌اند صنعت پالایش از یک جداسازی ساده به فرآیندی پیچیده و بازدهی بالاتر تبدیل شود. از جمله تکنولوژی‌های جدید می‌توان به تقطیر اتمسفری، تقطیر در خلاء، شکست حرارتی، شکست هیدروژنی، تبدیل کاتالیستی، کاهش گرانیروی، گوگردزدایی و کک‌سازی اشاره کرد [۱]. در دهه‌های اخیر، به‌دلیل پیشرفت‌های فن‌آوری و تغییرات جدید، پالایشگاه‌های جدیدی احداث نشده است. در عوض، مهندسان پالایش بر بهبود کارایی اقتصادی واحدها و کنترل و بهینه‌سازی فرآیندها تمرکز کرده‌اند [۲].

نفت خام یکی از پرکاربردترین منابع سوختی جهان محسوب می‌شود که به‌طور گسترده در صنایع مختلف و زندگی روزمره مورد استفاده قرار می‌گیرد. از جمله محصولات متنوعی که مستقیماً از نفت خام تولید می‌شود می‌توان به بنزین، گاز مایع، نفت سفید، نفت کوره، روغن موتور و غیره اشاره کرد. با توجه به قوانین زیست محیطی و نیازهای مصرف‌کنندگان، از جمله صنایع پتروشیمی و شیمیایی، نفت خام به محصولات متنوع با مشخصات مختلف پالایش می‌شود. پالایشگاه به‌عنوان واحدی که فرآیند تبدیل نفت خام به محصولات گوناگون

*مسئول مکاتبات

آدرس الکترونیکی: m.r_sardashti@eng.usb.ac.ir

شناسه دیجیتال: (DOI: 10.22078/pr.2025.5560.3469)

MINLP^۲ حل شد، که به‌طور هم‌زمان مسائل پیچیده گسسته و پیوسته را مدیریت می‌کرد. نقدی که به این پژوهش وارد است، پیچیدگی محاسباتی زیاد آن است که در عمل می‌تواند مانع پیاده‌سازی وسیع آن در پالایشگاه‌ها شود. ژانگ و ژو [۹] استراتژی تجزیه مدل‌سازی ساختارهای بزرگ پالایشگاهی به دو سطح اصلی و فرعی را مورد بررسی قرار دادند. این روش از طریق حل سطح فرعی و استفاده از نتایج آن در سطح اصلی بهینه‌سازی انجام می‌شود. با این حال، روش مذکور در مواجهه با تعاملات پیچیده بین سطوح مختلف پالایشگاه محدودیت‌هایی دارد. ژانگ و همکاران [۱۰] نیز استراتژی بهینه‌سازی هم‌زمان برای برنامه‌ریزی کل پالایشگاه را پیشنهاد دادند که شبکه هیدروژن، یوتیلیتی‌ها، و کل شبکه پالایشگاه را به‌طور هم‌زمان بهینه‌سازی می‌کرد. استفاده از برنامه‌ریزی خطی (LP) در این تحقیق توانست ساختار بهینه پالایشگاه را با تمرکز بر حداکثرسازی سود پالایشگاه شناسایی کند، اما روش‌های خطی در مدل‌های پیچیده ممکن است محدودیت‌هایی داشته باشند. لی و همکاران [۱۱] با استفاده از مدل‌های ریاضی برای واحدهای تقطیر و FCC^۴ در مدل‌سازی شبکه پالایشگاهی، موفق به ارائه راه‌حل‌های مؤثری برای این واحدها شدند. این مدل‌ها از داده‌های تجربی و فرآیندهای غیرخطی به‌دست آمدند که اعتبار آن‌ها را افزایش می‌دهد، اما همچنان در برخی جنبه‌ها نیاز به بررسی‌های بیشتر برای تطبیق با واقعیت‌های عملی وجود دارد. اورمو و همکاران [۱۲] نیز از یک مدل ریاضی MINLP برای مدل‌سازی کل پالایشگاه نفت استفاده کردند. مدل آن‌ها شامل متغیرهای گسسته (مانند انتخاب حالت‌های عملیاتی واحدهای فرآیند) و متغیرهای پیوسته (مانند جریان‌های میانی و فعالیت واحدهای فرآیند) بود.

تقریباً استفاده از برنامه‌ریزی ریاضی و بهینه‌سازی در پالایشگاه‌ها، با معرفی برنامه‌ریزی خطی (LP)^۱، آغاز شد و تا به امروز با توجه به رقابت‌های بازار جهانی، این روند ادامه داشته است [۳]. سیموندز [۴] از یک مدل LP برای حل مسئله ترکیب و پالایش بنزین استفاده کرده است. در بررسی این مطالعه، مزیت اصلی برنامه‌ریزی خطی (LP) را می‌توان در همگرایی سریع و سهولت اجرای آن مشاهده کرد. با این حال، نقطه ضعف این روش در برخورد با مسائل پیچیده و غیرخطی آشکار می‌شود. در مقاله آلن [۵]، یک مدل LP برای پالایشگاهی ساده شامل سه بخش واحد تقطیر، کرکینگ و ترکیب ارائه شده است. اگرچه این مدل برای سیستم‌های ساده و خطی مناسب است، اما از جنبه‌های پیچیدگی‌های غیرخطی در پالایشگاه‌های بزرگ و پیچیده انتقاداتی وارد است. اولین تلاش برای استفاده از مدل برنامه‌ریزی غیرخطی (NLP)^۲ توسط مور و همکاران [۶] صورت گرفت. این مطالعه با هدف استفاده از NLP در تولید بنزین پالایشگاه انجام شد. با وجود موفقیت در شبیه‌سازی نتایج با داده‌های واقعی، این مدل فاقد الگوریتم‌های پیچیده حل مسئله بود که منجر به محدودیت‌هایی در کارایی آن شد. پینتو و مورو [۷] نیز در این راستا، مدل غیرخطی دیگری برای برنامه‌ریزی تولید پالایشگاهی ارائه کردند. این مدل با استفاده از چند فرض کلیدی، توانست جریان‌های میانی با خواص مختلف را ترکیب کند تا محصولات نهایی مورد نظر تولید شود. این روش به‌ویژه در ترکیب جریان‌ها و تولید محصولات چندگانه موفق بود، اما همچنان در مواجهه با رفتارهای پیچیده فرآیندها محدودیت‌هایی داشت. پینتو و همکاران [۸] علاوه‌بر بررسی مدل برنامه‌ریزی غیرخطی، برنامه‌ریزی زمانی پالایشگاه‌ها را نیز مورد بحث قرار دادند. این مدل شامل دو بخش بود: توسعه مدل ارائه‌شده توسط مور و همکاران [۶] و ارائه برنامه‌ریزی زمانی براساس زمان گسسته و پیوسته. این مدل با استفاده از روش بهینه‌سازی

1. Linear Programming

2. Non-Linear Programming

3. Mixed Integer Non-Linear Programming

4. Fluid Catalytic Cracking

اگرچه این مدل جامع و دقیق به نظر می‌رسد، اما پیچیدگی آن در عمل ممکن است چالش‌هایی ایجاد کند. گودار و همکاران تکنیک‌های کاهش مدل ریاضی ابتکاری را با هدف افزایش فرآیندهای بهینه‌سازی انرژی در سراسر پالایشگاه معرفی کردند. آنها با پرداختن به محدودیت‌های مدل‌های برنامه‌ریزی خطی (LP)، با استفاده از مدل‌های دقیق به‌دست آمده برای فرآیندهای پالایشگاه با استفاده از داده‌های فرآیندی پالایشگاه و نیز شبکه عصبی مصنوعی ساختار بهینه پالایشگاه را پیشنهاد دادند. این تحقیق نه تنها بهینه‌سازی انرژی را در پالایشگاه‌ها پیش می‌برد، بلکه راه‌حل‌های عملی را برای بهبود دقت و در عین حال حفظ راندمان محاسباتی ارائه می‌دهد، بنابراین کمک قابل‌توجهی به روش‌شناسی و شیوه‌های پایداری این حوزه می‌کند [۱۳].

و همکاران توانستند با استفاده از روش لاگرانژ دو مرحله، ساختار شبکه کلی پالایشگاه را بهینه نمایند. این رویکرد تجزیه لاگرانژی معرفی شده در فرآیند بهینه‌سازی هم برنامه‌ریزی پالایشگاه و هم مسائل زمان‌بندی نفت خام را با هم مورد بررسی قرار می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم تجزیه لاگرانژ در به‌دست آوردن راه‌حل‌های بهینه یا نزدیک به بهینه برای مسائل زمان‌بندی در مقیاس بزرگ در عملیات پالایشگاه مؤثر است [۱۴].

دو آن و همکاران برای جلوگیری از حل مدل‌های پیچیده MINLP موجود در شبکه پالایشگاه، با خطی‌سازی روابط غیر خطی، توانستند ساختار بهینه شبکه پالایشگاه را به‌دست آورند. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که حل مستقیم برنامه‌ریزی ریاضی MINLP بسیار ناکارآمد در کیفیت راه حل و زمان می‌باشد. علت آن وجود محدودیت‌های دوخطی غیرمحدب^۱ و وجود تعداد زیادی از متغیرهای عدد صحیح^۲ می‌باشد [۱۵].

یوتومو و همکاران مطالعه‌ای برای بهبود تولید پالایشگاهی با ایجاد مدلی ریاضی که شامل ترکیبی از سیستم‌های تولید و تأسیسات

بود و نیز با استفاده از ترکیبی از نفت خام‌های مختلف به‌جای تنها یک نوع، انجام دادند. نتایج حاصل از این رویکرد منجر به سود بیشتر در مقایسه با روش‌های سنتی گردید. نتایج همچنین نشان می‌دهد که عوامل کلیدی مؤثر بر سودآوری پالایشگاه عبارتند از هزینه مواد و قیمت تولید که اهمیت آنها را در تصمیم‌گیری برای برنامه‌ریزی تولید برجسته می‌باشد [۱۶].

نتیجه‌گیری کلی از این مطالعات این است که در برنامه‌ریزی ساختار شبکه پالایشگاه، روابط موازنه مواد و جریان‌ها معمولاً در نظر گرفته می‌شود [۱۲]. در اکثر تحقیقات تابع هدف حداکثر کردن سود پالایشگاه در نظر گرفته شده است [۱۲]. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که اگر تابع هدف و قیود همگی خطی باشند، یک روش قوی تحت عنوان برنامه‌ریزی خطی برای حل مسئله بهینه‌سازی وجود دارد که برای این نوع خاص، اگر جوابی وجود داشته باشد، یک جواب یکتاست. اما در اکثر اوقات مسائل یا فرمولاسیون اصلی، خود خطی نخواهند بود. یکی از مشکلات بهینه‌سازی برای سیستم‌های فیزیکی وجود تابع هدف یا قیود پیچیده در مسئله می‌باشد. تابع هدف یا قیود ممکن است توابع غیرخطی از متغیرها باشند. وقتی یک فرآیند واقعی مدنظر است، وجود رفتار خطی بسیار نادر است. علی‌رغم تحقیقات گسترده در مورد تکنیک‌های بهینه‌سازی در برنامه‌ریزی پالایشگاه، یک تحلیل مقایسه‌ای مستقیم از روش‌های LP و NLP که بر روی یک ساختار پالایشگاهی، مورد بررسی قرار نگرفته است. این تحلیل مقایسه‌ای در این مقاله بر روی پالایشگاه شازند اراک مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در روش NLP، مدل غیرخطی متغیرهای عملیاتی مهم مانند عدد اکتان و فشار بخار رید^۳ (RVP) که مدل آنها براساس شرایط واقعی پالایشگاه به‌دست می‌آید، در نظر گرفته شده است.

1. Non-Convex Bilinear Constraints

2. Auxiliary Integer Variables

3. Reid Vapor Pressure

مدل‌های ریاضی و بهینه‌یابی

مدل‌های ریاضی در بسیاری از زمینه‌های علوم و مهندسی کاربرد گسترده‌ای دارند. یک مدل ریاضی، مجموعه‌ای از روابط (روابط، ناروابط و شروط منطقی) است که به صورت انتزاعی، نمایانگر رفتار و عملکرد سیستم واقعی مورد نظر است. این مدل‌ها می‌توانند با استفاده از سه رویکرد کلی توسعه یابند: (۱) رویکرد بنیادی، (۲) روش‌های تجربی و (۳) روش‌های مبتنی بر مشابَهت‌ها و مقیاس‌بندی‌ها. در رویکرد (۱)، از تئوری‌های علمی تأییدشده، مانند قوانین نیوتن، برای استنتاج روابط استفاده می‌شود که به طور مستقیم بر پایه اصول علمی بنا شده‌اند. در روش (۲)، داده‌های تجربی ورودی و خروجی سیستم مورد تحلیل قرار می‌گیرند و به منظور تولید یک مدل تجربی یا به اصطلاح «جعبه سیاه» به کار می‌روند. روش (۳) نیز به استفاده از مشابَهت‌ها برای شناسایی ویژگی‌های سیستم واقعی می‌پردازد، به نحوی که با مطالعه یک سیستم مشابه و قابل فهم، مدل‌سازی انجام می‌شود [۱۷].

هر مدل ریاضی برای یک سیستم شامل چهار عنصر اصلی است: متغیرها، پارامترها، قیود و روابط ریاضی [۱۷]. متغیرها می‌توانند مقادیر مختلفی داشته باشند که تعیین این مقادیر حالت‌های متفاوت سیستم را تعریف می‌کند. متغیرها ممکن است پیوسته، عدد صحیح، یا ترکیبی از هر دو باشند. پارامترها، در یک یا چند مقدار خاص ثابت می‌مانند و تغییر آن‌ها به ایجاد مدل‌های متفاوت برای سیستم منجر می‌شود. قیود نیز محدودیت‌هایی را بر متغیرها اعمال می‌کنند که ممکن است به شکل روابط یا ناروابط تعریف شوند. روابط ریاضی در مدل‌ها به سه دسته تقسیم می‌شوند: روابط، ناروابط و شروط منطقی. روابط مدل اغلب شامل موازنه جرم، موازنه انرژی، روابط تعادلی، محاسبات خصوصیات فیزیکی و روابط طراحی مهندسی هستند که فیزیک سیستم را توصیف می‌کنند. ناروابط مدل نیز به محدودیت‌های عملیاتی مانند محدوده‌های مجاز عملیات، کارآیی

مورد نیاز، و محدودیت‌های مربوط به انتقال جرم و حرارت می‌پردازند. شروط منطقی، روابطی هستند که بین متغیرهای پیوسته و گسسته ارتباط برقرار می‌کنند و پیچیدگی مسئله را افزایش می‌دهند. مسئله بهینه‌سازی در واقع یک مدل ریاضی است که علاوه بر متغیرها، پارامترها، قیود و روابط ریاضی، یک یا چند معیار کارآیی دارد. معیار کارآیی در قالب تابع هدف تعریف می‌شود و ممکن است کمینه کردن هزینه، بیشینه کردن سود یا بهبود بازدهی محصول خاص باشد. در صورتی که بیش از یک معیار کارآیی وجود داشته باشد، با مسئله بهینه‌سازی چند هدفه مواجه خواهیم بود. در چنین مسائل بهینه‌سازی، معمولاً تعداد متغیرها بیشتر از تعداد قیود برابر است که نشان‌دهنده وجود درجه آزادی برای بهینه‌سازی است. در صورتی که تعداد متغیرها و قیود برابر باشند، مسئله به حل یک سیستم غیرخطی از روابط، به همراه ناروابط اضافی، کاهش می‌یابد.

توسعه بهینه‌سازی^۱

روش جامع و یگانه‌ای برای حل تمامی مسائل بهینه‌سازی وجود ندارد. با این حال، طیف وسیعی از روش‌های بهینه‌سازی برای حل انواع مختلف مسائل توسعه یافته‌اند. تاریخچه روش‌های بهینه‌سازی به زمان نیوتن، لاگرانژ و کوشی بازمی‌گردد. با توسعه حساب دیفرانسیل و انتگرال، روش‌های بهینه‌سازی نیز پیشرفت کردند. همکاری نیوتن و لیبنیتز در توسعه حساب دیفرانسیل، پایه‌های حساب تغییرات را ایجاد کرد، که بعدها توسط ریاضیدانانی همچون برنولی، اولر، لاگرانژ و ویراشتراس توسعه یافت. از جمله دست‌آوردهای مهم در این زمینه، معرفی روش لاگرانژ برای حل مسائل بهینه‌سازی با قیود بود. همچنین کوشی نخستین استفاده از روش Steepest Descent را برای حل مسائل بهینه‌سازی بدون قیود به نمایش گذاشت.

از مسائل برنامه‌ریزی اقتصادی، غیرخطی بودن توابع نه تنها یک استثنا بلکه یک قاعده کلی است [۱۸].

به همین دلیل، توجه به برنامه‌ریزی غیرخطی نیز از اهمیت بالایی برخوردار است. هدف برنامه‌ریزی غیرخطی یافتن مقادیر $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ است که تابع هدف و قیود را برآورده کنند، به‌طوری‌که:

$$\begin{aligned} \text{Max } f(x) \\ \text{st. } g_i(x) \leq b_i \\ x \geq 0 \end{aligned} \quad (2)$$

که $f(x)$ و $g_i(x)$ توابعی معلوم از n متغیر تصمیم هستند. در نهایت، هر مسئله بهینه‌سازی شامل سه بخش اصلی است [۱۳ و ۱۴].

۱. حداقل یک تابع هدف برای بهینه‌سازی (مانند سود، هزینه، و غیره).

۲. قیود تساوی^۱ (روابط).

۳. قیود نامساوی^۲ (ناروابط).

بخش دوم و سوم شامل مدل فرآیند یا سیستم مورد نظر هستند و بخش اول معمولاً به‌عنوان مدل اقتصادی شناخته می‌شود. منظور از یک حل عملی برای مسئله بهینه‌سازی، مجموعه‌ای از مقادیر متغیرهاست که قیود را با دقت مطلوبی ارضا کند. یک حل بهینه نه تنها قیود را ارضا می‌کند، بلکه مقدار بهینه تابع هدف را نیز به‌دست می‌آورد. در بسیاری از موارد، این حل یکتا است؛ اما در برخی موارد نیز ممکن است چندین حل بهینه وجود داشته باشد. اگر حل یکتا وجود داشته باشد، مسئله تنها به حل یک سری روابط تبدیل می‌شود و نیازی به روش‌های بهینه‌سازی پیچیده نیست. اما در غیر این صورت، مسئله بهینه‌سازی مطرح می‌شود. روش یا الگوریتم بهینه‌سازی که برای هر مسئله انتخاب می‌شود، بستگی به عوامل مختلفی دارد: الف. نوع تابع هدف و صراحت آن. ب. ماهیت قیود. ج. تعداد متغیرهای مستقل و وابسته. در ادامه، شش گام اصلی برای تحلیل و حل مسائل بهینه‌سازی ارائه شده است.

در ادامه، روش سیمپلکس توسط دانتزینگ برای مسائل برنامه‌ریزی خطی معرفی شد که مبنای برنامه‌ریزی خطی در سال‌های بعد شد. برنامه‌ریزی پویا نیز از جمله دست‌آوردهای کلیدی دانتزینگ در این زمینه است. در ریاضیات، مسائل برنامه‌ریزی خطی به بهینه‌سازی یک تابع هدف خطی می‌پردازد، که باید یک‌سری قیود خطی در قالب تساوی‌ها و نامساوی‌ها را رعایت کند. به‌طور غیررسمی، برنامه‌ریزی خطی عبارت است از استفاده از یک مدل ریاضی خطی برای به‌دست آوردن بهترین خروجی با توجه به شرایط مشخص‌شده. به‌طور رسمی‌تر، هدف در مسائل برنامه‌ریزی خطی یافتن نقطه‌ای در یک چندوجهی است که تابع هدف در آن نقطه بیشترین یا کمترین مقدار را داشته باشد. در صورت وجود چنین نقاطی، جستجو در میان رئوس چندضلعی‌ها معمولاً به یافتن حداقل یکی از این نقاط منجر می‌شود، چرا که مقدار بیشینه یا کمینه در مرزهای چندضلعی رخ می‌دهد. فرمول‌بندی استاندارد برنامه‌ریزی خطی به‌صورت زیر نمایش داده می‌شود [۱۸].

$$\begin{aligned} \text{Max } f(x) = cx \\ \text{st. } a_i x \leq b_i \\ x \geq 0 \end{aligned} \quad (1)$$

در اینجا $x \geq 0$ ، قیود نامنفی بودن متغیرها بخشی از محدودیت‌های اصلی مسئله محسوب می‌شوند و مقادیر سمت راست قیود b_i می‌تواند مثبت، منفی یا صفر باشد. اگر قیود به‌صورت نامساوی باشند ($a_i x \leq b_i$)، با ضرب طرفین در عدد منفی، می‌توان آن‌ها را به‌صورت معکوس ($-a_i x \leq -b_i$) تبدیل کرد. همچنین، اگر قیود تساوی داشته باشیم، می‌توان با جای‌گذاری یک متغیر در روابط دیگر، محدودیت تساوی را حذف کرد و مسئله را ساده‌تر نمود. یکی از فرضیات اصلی در برنامه‌ریزی خطی این است که تمامی توابع، اعم از توابع هدف و قیود، خطی هستند. اگرچه این فرض در بسیاری از مسائل واقعی برقرار است، اما در مواردی نیز صادق نیست. در واقع، اقتصاددانان اغلب دریافته‌اند که در بسیاری

1. Equality Constraints

2. Inequality Constraints

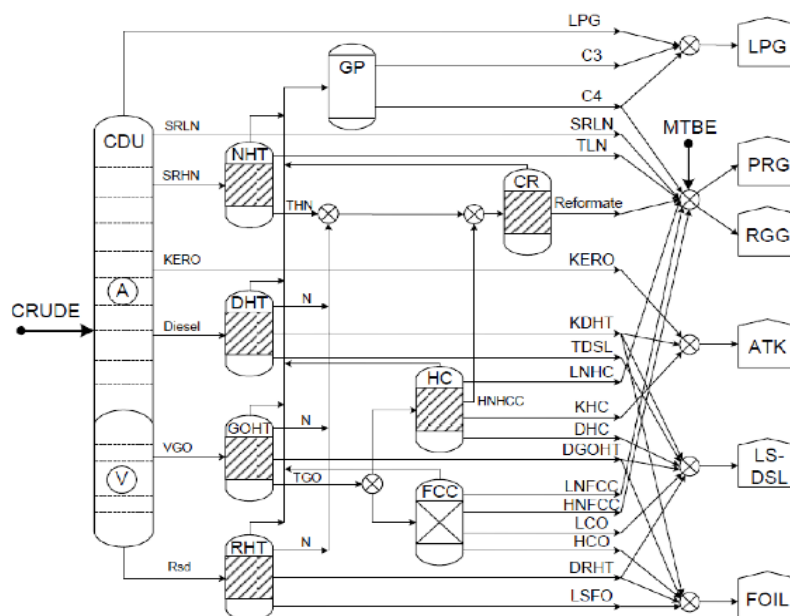
مدل‌سازی ریاضی برای برنامه‌ریزی پالایشگاه

مدل برنامه‌ریزی پالایشگاه شامل مدل فرآیند، ارتباط بین جریان‌ها و ترکیب جریان‌ها می‌باشد، که در شکل ۱ نشان داده شده است. متغیرهای مهم در مدل‌های برنامه‌ریزی عملیاتی، متغیرهای عملیاتی واحد فرآیندی، نرخ جریان خوراک، خواص خوراک، نرخ جریان محصولات و ویژگی‌های محصولات می‌باشند. در این مطالعه مدل‌سازی خطی و غیرخطی واحدهای فرآیندی از طریق رگرسیون و داده‌های واقعی مدل می‌شوند. تابع هدف بیشینه نمودن سود کل پالایشگاه تعریف شده است.

رابطه ۳ سود کلی پالایشگاه که از درآمد حاصل از فروش تمام محصولات، منهای هزینه‌های خرید مواد اولیه و هزینه‌های واحدهای فرآیند عملیاتی در پالایشگاه را نشان می‌دهد. در این رابطه اندیس B مجموعه از واحدهای ترکیبی برای محصولات نهایی و sp_i نیز قیمت فروش آن‌ها را نشان می‌دهد. ضریب ce_i هزینه خوراک خریداری شده (مواد اولیه) را نمایش می‌دهد. ضریب cx_i میزان هزینه عملیاتی برای هر واحد فرآیندی را نشان می‌دهد.

این گام‌ها لزوماً به‌ترتیب اجرا نمی‌شوند، اما در نهایت باید تمامی آن‌ها طی شوند:

۱. تحلیل فرآیند برای شناسایی متغیرهای عملیاتی و تهیه فهرستی از آن‌ها.
 ۲. تعریف معیار مناسب برای بهینه‌سازی و تعیین تابع هدف برحسب متغیرهای مرتبط.
 ۳. توسعه بیان ریاضی فرآیند یا سیستم که متغیرهای ورودی و خروجی را به‌هم مرتبط کند و قیود تساوی و نامساوی را در نظر بگیرد.
 ۴. در صورت پیچیدگی زیاد مسئله، تقسیم آن به قسمت‌های قابل مدیریت یا ساده‌سازی مدل.
 ۵. استفاده از تکنیک مناسب بهینه‌سازی برای حل مسئله.
 ۶. بررسی نتایج و ارزیابی حساسیت آن‌ها نسبت به تغییرات در ضرایب و فرضیات.
- گام‌های ۱ و ۲ با تعریف ریاضی مسئله و شناسایی متغیرها سروکار دارند. در گام ۴، پیشنهاد می‌شود که مدل ریاضی تا حد ممکن ساده‌سازی شود. در نهایت، گام ۵ به محاسبات و حل عددی برای رسیدن به نقطه بهینه می‌پردازد. گام آخر نیز شامل بررسی صحت نتایج و تحلیل حساسیت تابع هدف است.



شکل ۱ نمودار جریان پالایشگاه

تعریف می‌شود. متغیر F_i به‌عنوان مقدار خوراک و $FP_{i,p}$ به‌عنوان ویژگی خوراک تعریف شده است. همچنین $XU_{i,x}$ به‌عنوان متغیر عملیاتی در نظر گرفته شده است.

خواص محصولات واحد فرآیندی:

$$PV_{i,s,p} = f(FP_{i,p}, XU_{i,x}) \quad \forall i \in I, s \in S_i, p \in P_i \quad (7)$$

متغیر $PV_{i,s,p}$ خاصیت محصول (P) برای جریان محصول (s) از واحد (i) است که تابعی از ویژگی‌های خوراک $FP_{i,p}$ واحد $XU_{i,x}$ متغیرهای عملیاتی می‌باشد.

تقسیم محصول:

$$V_{i,s} = \sum_{m \in M} VS_{i,s,m} \quad \forall i \in I, s \in S_i \quad (8)$$

رابطه فوق نشان می‌دهد که محصول واحد i می‌تواند هم به‌عنوان محصول نهایی باشد و یا می‌تواند به‌عنوان خوراک واحد دیگر تقسیم گردد. جریان محصول s از واحد i را با $V_{i,s}$ نشان داده می‌شود، متغیر s می‌تواند به مقصدهای مختلف m ارسال گردد و توسط جریان $VS_{i,s,m}$ نمایش داده می‌شود. اندیس m به‌عنوان مجموعه‌ای از تمام واحدهای ممکن و یا ترکیب محصولات نهایی که می‌تواند جریان‌های تقسیم شده را دریافت کند، تعریف می‌شود.

ظرفیت واحد فرآیندی:

$$F_i \leq UC_i \quad \forall i \in I \quad (9)$$

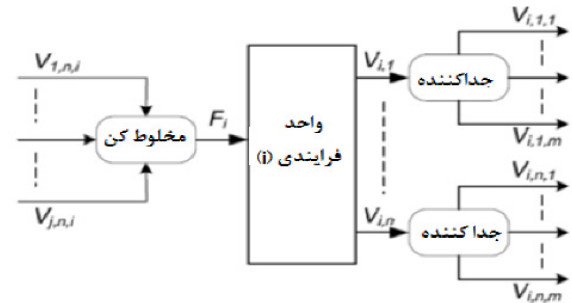
خوراک واحد فرآیندی i نمی‌تواند از حداکثر ظرفیت که با UC_i نشان می‌دهند، تجاوز کند.

تقاضای بازار محصولات نهایی:

$$F_i \geq D_i \quad \forall i \in B \quad (10)$$

نرخ جریان محصولات واحدهای ترکیبی باید برابر و بیشتر از تقاضای D_i بازار باشد. بهینه‌سازی ساختار شبکه پالایشگاه با هدف افزایش سودآوری مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه، پالایشگاه سازند اراک به‌عنوان مورد مطالعاتی انتخاب شده و داده‌های مورد استفاده در مدل‌سازی براساس تحقیق انجام‌شده توسط رشیدی و همکاران [۱۹] است.

استراتژی مدل‌سازی واحد عملیاتی به‌صورت شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲ مدل واحدهای فرآیند

مدل ریاضی شامل مجموعه از قیود به‌صورت رابطه ۴ می‌باشد:

نرخ جریان خوراک واحدهای فرآیندی:

$$F_i = \sum_{j \in J} \sum_{s \in N} VS_{j,s,i} \quad \forall i \in I \quad (4)$$

خوراک برای هر واحد فرآیندی به‌صورت F_i نشان داده شده است. اندیس i نیز مجموعه از همه واحدهای موجود در پالایشگاه را نشان می‌دهد. خوراک F_i برابر مجموع تمام نرخ‌های جریان $VS_{j,s,i}$ که واحد i از واحدهای j دریافت کنند. تمام واحدها می‌توانند جریان s را به واحد i ارسال کنند و N به‌عنوان مجموعه‌ای از تمام جریان‌ها که می‌توانند از واحد j به واحد i ارسال شوند، تعریف می‌شود.

خواص خوراک واحدهای فرآیندی

$$FP_{i,p} = f(VS_{j,s,i}, PV_{j,s,p}) \quad \forall i \in I, p \in PF_i \quad (5)$$

خواص خوراک (p) به واحد i را با $FP_{i,p}$ نشان داده شده است. PF_i مجموعه تمام خواص خوراک واحد است. خواص تابعی از کمیت‌ها و خواص تمام جریان‌ها s از واحد j می‌باشند که به‌صورت $VS_{j,s,i}$ و $PV_{j,s,p}$ نمایش داده شده است.

نرخ جریان محصول واحدهای فرآیندی:

$$V_{i,s} = f(F_i, FP_{i,p}, XU_{i,x}) \quad \forall i \in I, s \in S_i, x \in X \quad (6)$$

شدت جریان محصول از واحد i برای جریان s با $V_{i,s}$ نشان داده شده است. متغیر S_i به‌عنوان مجموعه از تمام جریان نهایی تولید شده از واحد i

اجزاء تشکیل‌دهنده سوخت می‌باشند. با توجه به مدل‌سازی خطی ساختار شبکه مجبور به در نظر گرفتن یک عدد ثابت برای عدد اکتان اجزاء شدند. اما در تحقیق حاضر، هرکدام از این اعداد اکتان به عنوان متغیر در نظر گرفته شده‌اند و ساختار مدل‌سازی تحقیق حاضر به شکل غیر خطی تبدیل شده است. فشار بخار رید (RVP) یکی از خواص مهم بنزین و سوخت جت است که به عنوان معیاری برای ترکیب محصولات استفاده می‌شود. برای محاسبه فشار بخار رید معمولاً در ترکیبات از یک شاخص ترکیبی که اصولاً غیرخطی است، استفاده می‌شود. در مدل‌سازی خطی، یک عدد ثابت برای فشار بخار اجزاء در نظر گرفتند. در تحقیق رشیدی و همکاران نیز برای فشار بخار رید نیز یک مقدار ثابت در نظر گرفته شده است. ولی در مقاله حاضر فشار بخار رید براساس یک محدود از فشار بخار اجزاء به دست آمده است. رابطه کلی فشار بخار رید به صورت زیر است.

$$RVPBI_{blend} = \frac{\sum_s V_s \times RVPBI_s}{\sum_s V_s} \quad (13)$$

متغیر $RVPBI_s$ شاخص ترکیب فشار بخار رید اجزاء و V_s هم کسر حجمی اجزاء نشان می‌دهند.

بهینه‌سازی براساس ساختار خطی

پالایشگاه اراک

شرکت پالایش نفت شازند اراک با ظرفیت ۱۵۰ هزار بشکه در روز بهره‌برداری قرار گرفت. خوراک نفت خام این شرکت توسط خط جنوب شمال نفت خام و از میدان اهواز آسماری تامین می‌گردد. این پالایشگاه بخشی از خوراک مجتمع پتروشیمی اراک را نیز تامین می‌کند. تولیدات و فرآورده‌های اصلی این پالایشگاه عبارتند از: گازمایع، بنزین، موتور، نفت سفید و سوخت جت، نفت گاز، نفت کوره، قیر، گوگرد می‌باشد.

در تحقیق مذکور، پس از مدل‌سازی خطی (LP) شبکه پالایشگاه، نقاط بهینه و حداکثر سود با استفاده از نرم‌افزار لینگو^۱ محاسبه شده است. در بخش اول این تحقیق، مدل‌سازی خطی ساختار شبکه پالایشگاه اراک مجدداً با نرم‌افزار GAMS^۲ و روش برنامه‌ریزی خطی (LP) انجام شد. سپس نتایج به دست آمده از این روش با نتایج تحقیق رشیدی و همکاران مقایسه شد. در ادامه، با استفاده از مدل غیرخطی (NLP) و در نظر گرفتن دو خصوصیت مهم فرآورده‌های نفتی، یعنی عدد اکتان و فشار بخار رید، که از فاکتورهای کلیدی کیفیت محصولات پالایشگاهی هستند، مدل‌سازی غیرخطی انجام و به مدل‌سازی کلی پالایشگاه افزوده شد. سپس مدل غیرخطی با استفاده از نرم‌افزار GAMS حل شد و ساختار بهینه شبکه پالایشگاه اراک تعیین گردید. اعداد اکتان بیانگر ترکیب حجمی اجزای تشکیل‌دهنده سوخت‌ها هستند، اما در واقعیت، این اعداد به صورت خطی ترکیب نمی‌شوند [۸].

برای محاسبه اعداد اکتان، چندین رویکرد ریاضی ارائه شده است. در مدل‌سازی خطی، با ساده‌سازی فرض بر آن است که به هر جزء یک عدد اکتان ثابت اختصاص داده شود، که این رویکرد در تحقیق رشیدی و همکاران نیز به کار گرفته شده است. با این حال، در مدل‌سازی غیرخطی، عدد اکتان به عنوان یک متغیر تعریف می‌شود که مقدار آن بین عدد اکتان اندیس (RON) و عدد اکتان پژوهشی (MON) قرار دارد. مدل مورد استفاده برای این تحقیق به صورت رابطه زیر تعریف شده است.

(۱۱)

$$RONI_s = 651z^3 - 1552.9z^2 + 1272z - 299.5 \quad \text{where} \quad z = \frac{RON}{100}$$

$$RON_{blend} = \frac{\sum_s V_s \times RONI_s}{\sum_s V_s} \quad (12)$$

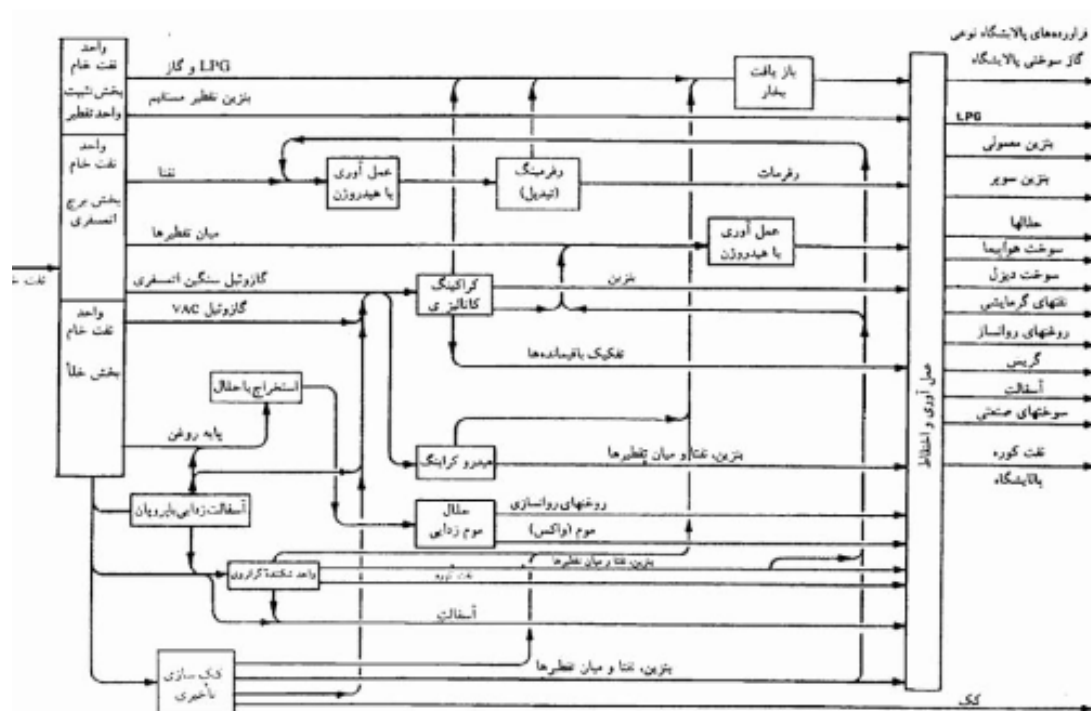
متغیر $RONI_s$ شاخص ترکیب عدد اکتان اجزاء سوخت و V_s هم کسر حجمی اجزاء نشان می‌دهند. در روابط ۱۱ و ۱۲ ضرایب متغیرها، عدد اکتان

1. Lingo

2. General Algebraic Modeling System

در جدول ۱ نشان داده شده است. براساس جدول ۱، نتایج حاصل از برنامه‌ریزی غیرخطی نشان می‌دهد که تولید برخی جریان‌ات مانند نفتای سبک، ته‌مانده برج خلاء، پلات فرمیت و نفت سفید نسبت به حالت موجود کاهش یافته است، در حالی که جریان‌اتی مانند بنزین، نفتای ممزوج و سوخت سبک مایع افزایش یافته‌اند. همچنین، نتایج مقایسه‌ای بین برنامه‌ریزی غیرخطی و مدل خطی رشیدی و همکاران نشان می‌دهد که مقادیر بنزین و نفت سفید افزایش یافته و پلات فرمیت و نفت سفید ارسالی به پتروشیمی کاهش پیدا کرده است. نکته قابل توجه در این نتایج این است که تابع هدف (درآمد) حاصل از برنامه‌ریزی غیرخطی، حدود ۲٪ بیشتر از حالت موجود شبکه پالایشگاه است. این افزایش، نه تنها نشان‌دهنده بهبود در توزیع محصولات نهایی است، بلکه بهبود قابل توجهی در سودآوری کلی پالایشگاه دارد.

شبکه کلی پالایشگاه شازند اراک در شکل ۳، نمایش داده شده است. در این شبکه، واحدهای پالایش شامل واحد تقطیر در جو و خلاء، واحد کاهش گرانی، واحد بازیافت گاز مایع، واحد تصفیه و تبدیل کاتالیستی، واحدهای هیدروکراکر، واحد هیدروژن، واحد تصفیه گاز با آمین، واحد بازیافت گوگرد و تولید ازت می‌باشند. مهم‌ترین محصولات اصلی پالایشگاه اراک که در برنامه‌ریزی ریاضی استفاده شده است گاز مایع، بنزین موتور، بنزین هواپیما، نفت سفید، نفت گاز، نفت کوره در نظر گرفته شده است. خصوصیات مهم فرآورده‌های نفتی استفاده شده در برنامه‌ریزی ریاضی شامل نقطه اشتعال، گرانی، فشار بخار رید، عدد اکتان-آرام سوزی^۱، نقطه ریزش^۲ می‌باشد. نتایج بهینه‌سازی با استفاده از حل روابط ریاضی ۳ تا ۱۳ به کمک نرم‌افزار، برای درآمد، متغیرهای عملیاتی و اعداد اکتان و فشار بخار رید در حالت غیرخطی (NLP)



شکل ۳ شبکه کلی پالایشگاه شازند اراک

1. Octane Number
2. Pour Point

جدول ۱ مقایسه نتایج مربوط به متغیرهای بهینه در محاسبات

مقدار غیر خطی	مقدار خطی	نتایج رشدی و همکاران [۱۹]	حالت موجود پالایشگاه	متغیر متناظر
$4593/1 \times 10^{-7}$	$4322/1 \times 10^{-7}$	$4387/1 \times 10^{-7}$	۱۴۳۱۷۰۴۳	Z
۵۲۰/۲۸	۵۲۰/۲۸	۵۲۰/۲۸	۵۲۰	X1
۰	۳۹۰/۰۰	۳۹۰/۰۰	۳۹۰	X2
۰	۰	۰	۰	X3
۳۹۸۶	۳۰۱۲	۲۸۰۰	۲۹۶۰	X4
۷۷	۶۶۰	۸۷۲	۶۵۰	X5
۷۴۱	۷۴۱	۷۴۱	۰	X6
۹۴۵/۲۴	۱۷۲۸/۸۸	۰	۲۳۳۲	X7
۴۱۸	۰	۱۶۹۵	۰	X8
۱۳۱۷	۱۳۱۷	۱۳۱۷	۴۱۰	X9
۷۴۰۲	۷۴۰۲	۷۴۰۲	۸۳۶۳	X10
۹۰۰۵	۷۴۴۸	۶۹۰۲	۷۲۶۶	X11
۰	۰	۵۷۹	۳۵۲	X12
۰	۱۱۹۲	۱۱۹۲	۱۱۹۲	X13
۱۰۳	۱۰۳	۱۰۳	۰	X14
۰	۰	۰	۰	X15
۷۷	۷۷	۷۷	۰	X16

بحث و جمع‌بندی

مقایسه مدل‌های بهینه‌سازی خطی و غیرخطی نشان می‌دهد که مدل غیرخطی در ارائه پاسخ‌های واقع‌گرایانه‌تر و محاسبه بهتر متغیرهای کلیدی شبکه پالایشگاهی موفق‌تر بوده است. مدل غیرخطی توانسته است با دقت بیشتری متغیرهای عملیاتی مهم مانند عدد اکتان و فشار بخار رید را در نظر بگیرد و بر مبنای این داده‌ها نتایجی نزدیک‌تر به شرایط واقعی پالایشگاه را فراهم کند. به‌طور خاص، مدل غیرخطی توانسته است نقاط بهینه بهتری را برای افزایش بهره‌وری اقتصادی پالایشگاه شازند اراک فراهم آورد. این مدل با دقت بیشتری در توزیع و ترکیب محصولات مختلف پالایشگاهی، توانسته است به تغییراتی در مقدار تولید برخی محصولات، مانند افزایش بنزین و کاهش پلات فرمیت، دست یابد که این تغییرات

منجر به بهبود سودآوری کلی پالایشگاه شده است. یکی از نکات کلیدی این تحقیق، اضافه کردن فاکتورهای غیرخطی، مانند عدد اکتان و فشار بخار رید، به مدل است که در مدل‌های خطی معمولاً نادیده گرفته می‌شوند. در واقع، این مدل غیرخطی توانسته است واقعیت‌های پیچیده‌تری را که در شبکه پالایشگاهی رخ می‌دهند، مدل‌سازی کند. مقایسه مدل‌های بهینه‌سازی خطی (LP) و غیرخطی (NLP) در پالایشگاه شازند اراک نشان داد که مدل غیرخطی با دقت بالاتری متغیرهای عملیاتی کلیدی مانند عدد اکتان (با استفاده از روابط ۱۱-۱۲) و فشار بخار رید رابطه ۱۳ را مدل می‌کند. این رویکرد منجر به نتایجی شد که ۹۶٪ نزدیک‌تر به داده‌های عملیاتی پالایشگاه است (براساس مقایسه با گزارش‌های سالانه پالایشگاه). به‌طور خاص:

- افزایش ۱۵٪ در تولید بنزین (از ۲۹۶۰ (ton/day) به

(۳۹۸۶ (ton/day)

• کاهش ۰.۸۸٪ در تولید پلات فرمیت (از (ton/day) ۶۵۰ به (ton/day) ۷۷)

• بهبود ۲٪ سود روزانه (معادل \$ ۲۷۱/۰۰۰)

این تغییرات به دلیل توانایی NLP در مدل سازی رفتار غیرخطی فرآیندهای پالایشگاهی است که در مدل های خطی با ساده سازی نادیده گرفته می شوند (مانند رابطه غیرخطی بین ترکیبات سوخت و عدد اکتان).

مزیت های تحقیق

مزیت های اصلی تحقیق حاضر شامل موارد زیر است:

۱. دقت عملیاتی:

مدل NLP با خطای کمتر از ۰.۵٪ در پیش بینی کیفیت محصولات (در مقایسه با داده های واقعی) نسبت به مدل LP (خطای ~۲۰٪) برتری دارد. مدل غیرخطی نسبت به مدل خطی توانسته است با دقت بیشتری بهینه سازی شبکه پالایشگاه را انجام دهد. این مدل شامل متغیرهای واقعی تری مانند عدد اکتان و فشار بخار رید، ترکیبات جریان است که در بهینه سازی تأثیرگذار هستند.

۲. سودآوری:

افزایش درآمد به ۱۴/۵۹ میلیون دلار در روز در مقابل ۱۴/۳۲ میلیون دلار در مدل LP).

با توجه به نتایج بهینه سازی غیرخطی، درآمد پالایشگاه حدود ۲٪ افزایش یافته است که این افزایش، نشان دهنده اهمیت و کارایی این مدل برای بهبود عملکرد اقتصادی پالایشگاه است.

۳. قابلیت تعمیم:

این چارچوب با اصلاح پارامترهای واحدهای فرآیندی، در پالایشگاه های دیگر (مانند سایر پالایشگاه ها) نیز قابل اجراست.

مدل غیرخطی توانسته است مدیریت بهتری در توزیع تولیدات مختلف پالایشگاه انجام دهد. این مدیریت باعث افزایش تولید بنزین و کاهش تولید محصولات کم ارزش تر مانند پلات فرمیت شده است.

۴. مدیریت تولید:

کاهش ۱۲٪ ضایعات فرآیندی با بهینه سازی توزیع جریان های میانی.

قابلیت استفاده در سایر پالایشگاه ها: این مدل می تواند به عنوان یک ابزار بهینه سازی در پالایشگاه های دیگر نیز به کار رود و به بهبود بهره وری و سودآوری آنها کمک کند.

نتیجه گیری

استفاده از روش های مدل های بهینه خطی و غیر خطی برای ساختار کل پالایشگاه بسیار مفید می باشد. جواب های بهینه روش خطی بسیار دقیق هستند. برای به دست آوردن مدل خطی نیاز فرضیات ساده شونده می باشد و باعث می شود که این جواب های دقیق از واقعیت دور باشد. بنابراین نتایج این تحقیق نشان می دهد که تکنیک برنامه ریزی غیرخطی عملکرد بهتری نسبت به برنامه ریزی خطی دارد و توانسته است واقعیت های پیچیده تری را در شبکه پالایشگاهی مدل سازی کند (زیرا ساده سازی در برنامه ریزی خطی وجود دارد). با افزایش ۲٪ درآمد و بهبود در توزیع محصولات پالایشگاه، این مدل به عنوان یک ابزار قدرتمند برای بهینه سازی شبکه پالایشگاه ها مورد تأیید قرار گرفته است. درآمد نهایی پالایشگاه در حالت غیرخطی به میزان ۱/۴۵×۱۰۷ دلار در روز تخمین زده شده است که این بهبود درآمد نشان دهنده اثربخشی این مدل در مقایسه با مدل های خطی رایج است.

مراجع

- [۱]. درگاهی، ر.، امید خواه، م.ر.، عمیدپور، م. (۱۳۸۸). بهینه‌سازی برنامه‌ریزی خوراک و تولیدات پالایشگاه نفت خام با هدف بیشینه‌سازی سود پالایشگاه، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی مکانیک
- [۲]. کلانتری، ا.، شهرکی، ف.، رزاقی، ک.، سردشتی بیرجندی، م.ر. (۱۳۹۲). طراحی فرآیند مناسب برای بازیابی CO_2 از شبکه هیدروژن و جلوگیری از انتشار CO_2 تولیدی پالایشگاه به اتمسفر، دانشگاه سیستان و بلوچستان، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت مهندسی شیمی - طراحی فرآیند
- [3]. Eghbal Ahmadi, M. H., Royaei, S. J., Tayyebi, S., (2018). Mamdani fuzzy modeling of flash vaporization using a new concept: fuzzy composition variable, *Petroleum Research*, 28(100), 23-26. doi: 10.22078/pr.2018.3084.2422.
- [۴]. وینستون، و. (۱۳۸۰). برنامه‌ریزی خطی، ترجمه رضا رنجیرانی فراهانی، نسرين عسکری، محمد مدرس یزدی، چاپ اول، اشارات شامران.
- [5]. Moro, L. F. L., Zanin, A. C., & Pinto, J. M. (1998). A planning model for refinery diesel production. *Computers & Chemical Engineering*, 22, S1039-S1042. doi: 10.1016/S0098-1354(98)00209-9.
- [6]. Pinto, J. M., Joly, M., & Moro, L. F. L. (2000). Planning and scheduling models for refinery operations. *Computers & Chemical Engineering*, 24(9-10), 2259-2276. doi: 10.1016/S0098-1354(00)00571-8.
- [7]. Pinto, J. M., & Moro, L. F. L. (2000). A planning model for petroleum refineries. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 17, 575-586. DOI: 10.1590/S0104-66322000000400022
- [8]. Zhang, N., & Zhu, X. X. (2000). A novel modelling and decomposition strategy for overall refinery optimisation. *Computers & Chemical Engineering*, 24(2-7), 1543-1548. doi: 10.1016/S0098-1354(00)00545-7.
- [9]. Zhang, J., Zhu, X. X., & Towler, G. P. (2001). A simultaneous optimization strategy for overall integration in refinery planning. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 40(12), 2640-2653. doi: 10.1021/ie000367c
- [10]. Li, W., Hui, C. W., & Li, A. (2005). Integrating CDU, FCC and product blending models into refinery planning. *Computers & chemical engineering*, 29(9), 2010-2028. doi: 10.1016/j.compchemeng.2005.05.010.
- [11]. Coelho, O., Bahiense, L., & Ferreira Filho, V. J. (2010). A mixed-integer nonlinear programming model for production planning in oil refineries. *Rio Oil & Gas Proc*, 1-10.
- [12]. Watkins, R.N.(1979). *Petroleum refinery distillation*. Second edition. Houston, USA: Gulf Pub. Co., Book Division.
- [13]. Taoufiq Gueddar, Vivek Dua, Novel model reduction techniques for refinery-wide energy optimisation, *Applied Energy* 89 (2012) 117–126.
- [14]. Shi, L., Jiang, Y., Wang, L., & Huang, D. (2015). A novel two-stage Lagrangian decomposition approach for refinery production scheduling with operational transitions in mode switching. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 23(11), 1793-1800. doi.org/10.1016/j.cjche.2015.08.017.
- [15]. Duan, Q., Yang, G., & Li, G. (2018). Optimisation-based algorithm for refinery short-term scheduling of crude-oil. *International Journal of Oil, Gas and Coal Technology*, 17(1), 34-59. doi.org/10.1504/IJOGCT.2018.089337.
- [16]. Utomo, F. A. P., Rosyidi, C. N., & Jauhari, W. A. (2020). An integrated optimisation model of refinery short-term planning: a case study. *Energy Systems*, 11(2), 283-299.
- [17]. Gary, J. H., Handwerk, J. H., Kaiser, M. J., & Geddes, D. (2007). *Petroleum refining: technology and economics*. CRC Press.
- [18]. Maples, R.E. (1993). *Petroleum Refinery Process Economy*. Oklahoma, USA. Penn Well Publishing.
- [۱۹]. رشیدی چقوشی، م.، مقدسی، ع.ر. (۱۳۸۹). بهینه‌سازی فرآیند اختلاط محصولات پالایشگاه اراک، پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشکده فنی. مهندسی دانشگاه اراک.



Optimization of Refinery Network Structure Using Mathematical Modeling

Mohadese Poudine, Farhad Shahraki, Mohammad Reza Sardashti Birjandi,* and Mir Mohammad Khalilipour

Department of Chemical Engineering, Shahid Nikbakht Faculty of Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

m.r_sardashti@eng.usb.ac.ir

DOI: 10.22078/pr.2025.5560.3469

Received: October 29, 2024

Accepted: April 12, 2025

Introduction

Efficient refinery network operation and optimal product distribution demand advanced decision-support tools that can cope with the increasing complexity and stringent economic requirements of modern oil refineries. Traditional linear programming (LP) techniques, while mathematically tractable, often oversimplify the nonlinearity inherent in major refining units, thereby limiting the accuracy and operational value of their optimization outcomes. This study addresses the need for a comprehensive mathematical modeling framework, benchmarking the capabilities of both LP and nonlinear programming (NLP) methodologies using real plant data.

Objectives

The main objective is to systematically compare conventional LP and more advanced NLP models in the context of refinery-wide planning, with particular attention to profit maximization, product quality, process flexibility, and adaptability to real industrial operations. The research focuses on the full-scale network of the Shazand Arak refinery [1], a complex plant with diverse unit operations and blending constraints.

Materials and Methods

The mathematical framework developed includes the entire process and product flow network of the refinery, integrating three main layers: feed allocation,

intermediate stream management, and final blending for product slate optimization.

Model Construction

- The LP model is built with linearized equations representing unit yields, product blending, and market constraints, based on literature standards and prior optimization studies.
- The NLP model extends this by embedding true nonlinear process relations—particularly those governing octane number estimation for reformulated gasolines and Reid vapor pressure (RVP) for volatility control.
- Both models include complete mass balances, process operating bounds, unit capacities, and market demand constraints.

The octane number is a key indicator of gasoline quality and is blended volumetrically using the blending index of each component. In addition, since true octane numbers do not blend linearly, it is necessary to employ blending indices for accurate calculation. Moreover, various blending models are available in the literature, with one of the simplest forms expressed through the following analytical relation [2]:

$$RONI_s = 651z^3 - 1552.9z^2 + 1272z - 299.5$$

$$\text{where } z = \frac{RON}{100}$$

$$RON_{blend} = \frac{\sum_s V_s \times RONI_s}{\sum_s V_s}$$

The Reid vapor pressure (RVP) is another vital property, particularly for gasoline and jet fuels, serving as a benchmark in blending operations. RVP is defined as the absolute vapor pressure exerted by a liquid fuel mixture at 100 °F. When blending components with varying RVP values, a blending index approach is typically used to estimate the RVP of the final mixture. One such method is provided in [2] and can be expressed as:

$$RVPBI_{blend} = \frac{\sum_s V_s \times RVPBI_s}{\sum_s V_s}$$

By incorporating these nonlinear relationships into the optimization model, the NLP approach enables a more accurate assessment of product quality and operational efficiency compared to traditional LP methods.

Computational Tools

- GAMS optimization software is used for both LP and NLP model solutions.

Data Sources

- Actual operational data from Shazand Arak refinery and validated research datasets (e.g., Rashidi et al. [1]).

Results

Table 1 presents the comparative results of key variables for optimized refinery configurations, with the findings summarized below:

Table 1 Comparison of results related to optimal variables in calculations.

Description	Corresponding Variable	Current State of the Refinery	Nonlinear Value (this work)	Linear Value (this work)	Results of Rashidi et al. [1]
Objective Function (\$/day)	z	14317043	1.4593E+7	1.4322E+7	1.4387E+7
LPG (tons per day)	x ₁	520	520.28	520.28	520.28
Light Naphtha Sent to Petrochemical	x ₂	390	0	390.000	390.000
Heavy Naphtha Sent to Petrochemical	x ₃	0	0	0	0
Gasoline (Regular 87)	x ₄	2960	3986	3012	2800
Platformate	x ₅	650	77	660	872
Blended Naphtha	x ₆	0	741	741	741
Kerosene	x ₇	2332	945.24	1728.88	0
Kerosene Sent to Petrochemical	x ₈	0	418	0	1695
Heavy Jet Fuel	x ₉	410	1317	1317	1317
Diesel	x ₁₀	8363	7402	7402	7402
Fuel Oil	x ₁₁	7266	9005	7448	6902
Raw Oil	x ₁₂	352	0	0	579
Vacuum Residue	x ₁₃	1192	0	1192	1192
Light Liquid Fuel	x ₁₄	0	103	103	103
Heavy Liquid Fuel	x ₁₅	0	0	0	0
Pyrolysis Received from Arak Petrochemical	x ₁₆	0	77	77	77

Quantitative assessment and solution of both models led to several key findings:

Economic Performance

The NLP model demonstrates a 2% increase in daily profit (14.59 million versus 14.32 million for LP), stemming from improved allocation of feedstock and enhanced blending flexibilities.

Product Yield and Quality

Gasoline production in the NLP scenario rises considerably, while the output of low-value byproducts is reduced, directly linked to improved management of intermediate streams.

Model Accuracy

Prediction error for product specifications (e.g., octane, RVP) drops below 5% with NLP, compared to ~20% in

the LP model; this reflects a significant advancement in representation of real refinery operations.

Waste Minimization

Optimized flow routing in NLP yields a 12% reduction in process losses, contributing to both environmental benefits and economic savings.

Scalability and Transferability

The proposed modeling approach and structure are applicable to other refineries with appropriate adjustment of unit models and parameters.

Discussion

This research highlights the inadequacy of relying solely on linear approaches for complex refinery planning. The NLP model's superior performance derives from its capacity to explicitly consider nonlinear interactions within process units, capturing phenomena such as blending rules, product property correlations, and operational synergies otherwise masked by linearization. The demonstrable uplift in profit and product quality, combined with the reduction of losses, affirms the necessity of moving towards advanced optimization methods in process industries, particularly as tightening economic and environmental constraints require adaptive and robust planning strategies.

Conclusion

Comprehensive comparison and application of LP and NLP models in a real refinery context show unequivocally that NLP delivers superior economic and operational outcomes, with error margins more consistent with actual plant data. The study provides a transferable and adaptable mathematical framework for refinery-wide optimization, marking an advancement in both the theory and practice of modern refinery operations. Future work may focus on integrating uncertainty analysis, online optimization, and further process intensification modules.

Nomenclatures

LP: Linear programming

NLP: Nonlinear programming

RVP: Reid vapor pressure

References

1. Rashidi Chaghoshi, M., Moghdisi, A.R. (2010). Optimizing the mixing process of Arak Refinery products, Master's Thesis, Faculty of Engineering, Arak University.
2. Riazi, M. R., (2005). Characterization and Properties of Petroleum Fractions, 1st ed., PA, USA.