

بهینه‌سازی فرایند تقطیر در واحدهای پالایش نفت با استفاده از شبیه‌سازی دینامیکی

محسن کنارنگ

کارشناسی ارشد شیمی تجزیه دانشگاه شهرکرد

mohsenkonarang317317@gmail.com

چکیده

فرایند تقطیر نفت خام به عنوان یکی از انرژی‌برترین عملیات واحد در صنعت پالایش، نقشی محوری در تولید فرآورده‌های نفتی با ارزش دارد. با توجه به افزایش قیمت حامل‌های انرژی و الزامات زیست‌محیطی، بهینه‌سازی این فرایند به یک ضرورت انکارناپذیر تبدیل شده است. این مقاله به بررسی جامع کاربرد شبیه‌سازی دینامیکی در بهینه‌سازی فرایند تقطیر اتمسفریک و خلأ می‌پردازد. روش‌های مختلف شبیه‌سازی از جمله مدل‌های مبتنی بر اصول اولیه، مدل‌های جایگزین و مدل‌های ترکیبی مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. نتایج پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهد که استفاده از شبیه‌سازی دینامیکی با بهره‌گیری از نرم‌افزارهای پیشرفته نظیر HYSYS Aspen و MATLAB، امکان کاهش قابل‌توجه مصرف انرژی، بهبود کیفیت محصولات و افزایش انعطاف‌پذیری عملیاتی را فراهم می‌آورد. همچنین، استراتژی‌های کنترلی پیشرفته مبتنی بر الگوریتم‌های بهینه‌سازی ژنتیک و شبکه‌های عصبی مصنوعی، عملکرد واحدهای تقطیر را در مواجهه با نوسانات ترکیب خوراک ورودی به طور چشمگیری بهبود بخشیده‌اند. یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که به‌کارگیری شبیه‌سازی دینامیکی در کنار بهینه‌سازی ساختاری و عملیاتی، می‌تواند مصرف انرژی را تا ۳۵ درصد کاهش دهد و زمان راه‌اندازی برج‌های تقطیر را تا ۷۹ درصد کوتاه کند.

واژگان کلیدی: تقطیر نفت خام، شبیه‌سازی دینامیکی، بهینه‌سازی انرژی، برج تقطیر اتمسفریک، الگوریتم ژنتیک، کنترل فرایند

۱. مقدمه

نفت خام به عنوان مهم‌ترین منبع انرژی اولیه در جهان، نقشی بی‌بدیل در تأمین نیازهای انرژی و تولید مواد اولیه صنایع پتروشیمی ایفا می‌کند (al et Rafeek, ۲۰۲۵). فرایند پالایش نفت با جداسازی ترکیبات پیچیده هیدروکربنی از طریق عملیات حرارتی و تقطیر، محصولات متنوعی از جمله نفتا، نفت سفید، گازوئیل و نفت کوره را تولید می‌کند. در این میان، واحد تقطیر اتمسفریک به عنوان قلب پالایشگاه، بیشترین سهم را در مصرف انرژی و هزینه‌های عملیاتی دارد.

تقطیر به عنوان یک فرایند جداسازی حرارتی، بر اساس اختلاف نقاط جوش ترکیبات هیدروکربنی عمل می‌کند و به دلیل ماهیت غیرخطی و پیچیده خود، همواره چالش‌های چشمگیری در زمینه طراحی، راه‌اندازی و کنترل ایجاد کرده است (Baldea & Mercer, ۲۰۲۶). پیچیدگی این فرایند از عوامل متعددی ناشی می‌شود که از آن جمله می‌توان به تعداد زیاد ترکیبات موجود در نفت خام، رفتار ترمودینامیکی غیرایده‌آل، وابستگی شدید خواص به دما و فشار، و ماهیت دینامیکی تغییرات ترکیب خوراک ورودی اشاره کرد (Sotelo et al, ۲۰۱۷).

با افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی و تشدید قوانین مربوط به انتشار گازهای گلخانه‌ای، صنعت پالایش نفت با فشار فزاینده‌ای برای کاهش مصرف انرژی و انتشار کربن مواجه شده است (al et Rafeek, ۲۰۲۵). بر اساس برآوردهای صورت گرفته، تقریباً ۳۶ درصد از انرژی حرارتی مصرفی در فرایند تقطیر به دلیل اثرات انتقال حرارت غیرقابل برگشت تلف می‌شود و نزدیک به ۹۶ درصد این انرژی از سوخت‌های فسیلی تأمین می‌گردد (Baldea & Mercer, ۲۰۲۶). این موضوع نشان‌دهنده پتانسیل بسیار زیاد برای بهبود بهره‌وری انرژی از طریق بهینه‌سازی فرایند است.

در سال‌های اخیر، پیشرفت‌های چشمگیری در زمینه شبیه‌سازی دینامیکی فرایندهای پالایشی حاصل شده است که امکان تحلیل دقیق رفتار گذرای واحدهای تقطیر را فراهم می‌آورد. برخلاف شبیه‌سازی پایدار که تنها به بررسی شرایط تعادل در یک نقطه عملیاتی خاص می‌پردازد، شبیه‌سازی دینامیکی قادر است تغییرات زمانی متغیرهای فرایند را در پاسخ به اغتشاشات ورودی، تغییرات خوراک و اقدامات کنترلی مدل‌سازی کند (al et Sotelo, ۲۰۱۷; al et Chen, ۲۰۲۲). این قابلیت، شبیه‌سازی دینامیکی را به ابزاری توانمند برای طراحی سیستم‌های کنترلی پیشرفته، بهینه‌سازی شرایط عملیاتی و مدیریت گذارهای فرایندی تبدیل کرده است.

این مقاله با هدف بررسی جامع کاربردهای شبیه‌سازی دینامیکی در بهینه‌سازی فرایند تقطیر واحدهای پالایش نفت نگارش یافته است. در این راستا، ابتدا مبانی نظری و مدل‌سازی ریاضی فرایند تقطیر تشریح می‌شود. سپس، روش‌های مختلف شبیه‌سازی دینامیکی شامل مدل‌های مبتنی بر اصول اولیه، مدل‌های جایگزین و مدل‌های ترکیبی مورد تحلیل قرار می‌گیرند. در ادامه، استراتژی‌های بهینه‌سازی و کنترل مبتنی بر شبیه‌سازی دینامیکی بررسی شده و در نهایت، مطالعات موردی و نتایج عملی ارائه می‌شود.

۲. مبانی نظری فرایند تقطیر

۲.۱. اصول جداسازی در برج تقطیر

فرایند تقطیر بر اساس اختلاف در فراریت نسبی ترکیبات موجود در مخلوط هیدروکربنی عمل می‌کند. در یک برج تقطیر پیوسته، خوراک ورودی در نقطه‌ای مشخص وارد برج می‌شود و در اثر تماس با جریان‌های مایع و بخار در حال حرکت، ترکیبات سبک‌تر به

سمت بالای برج و ترکیبات سنگین‌تر به سمت پایین برج هدایت می‌شوند (al et Rafeek, ۲۰۲۵). این جداسازی در سینی‌ها یا بسته‌بندی‌های برج انجام می‌گیرد و در هر سینی، تماس نزدیک بین فاز مایع و بخار باعث انتقال جرم و حرارت می‌شود.

در بالای برج، بخار خروجی در کندانسور میعان شده و بخشی از آن به عنوان برگشت‌کننده به برج بازگردانده می‌شود تا بازده جداسازی افزایش یابد. در پایین برج نیز با استفاده از ریویولر، حرارت لازم برای تولید جریان بخار صعودی تأمین می‌شود (al et Sotelo, ۲۰۱۷). این ساختار که به عنوان برج تقطیر معمولی یا آدیاباتیک شناخته می‌شود، همچنان رایج‌ترین پیکربندی در صنعت پالایش است.

۲.۲. چالش‌های فرایند تقطیر نفت خام

تقطیر نفت خام با چالش‌های منحصربه‌فردی مواجه است که عمدتاً ناشی از پیچیدگی ترکیب خوراک و ماهیت دینامیکی فرایند می‌باشد. نفت خام حاوی هزاران ترکیب هیدروکربنی مختلف با محدوده وسیعی از نقاط جوش است که مدل‌سازی دقیق آن را با دشواری مواجه می‌سازد (al et Chen, ۲۰۲۲). به طور سنتی، برای غلبه بر این مشکل، از مفهوم ترکیبات مجازی یا pseudo-components استفاده می‌شود که در آن، نفت خام به تعداد محدودی از اجزای با نقطه جوش متوسط تقسیم‌بندی می‌گردد (Baldea & Mercer, ۲۰۲۶).

با این حال، استفاده از ترکیبات مجازی با محدودیت‌های قابل توجهی همراه است. برآورد خواص بحرانی این ترکیبات به شدت به روابط تجربی وابسته است و دقت آن‌ها همواره مورد تردید می‌باشد (al et Chen, ۲۰۲۲). همچنین، این رویکرد قادر به شناسایی رفتار مولکولی دقیق ترکیبات در حین فرایند تقطیر نبوده و برای شبیه‌سازی عملیات پایین‌دستی که نیاز به جداسازی دقیق دارند، کارایی لازم را ندارد.

از سوی دیگر، استفاده از ترکیبات واقعی در مدل‌سازی، با وجود دقت بالاتر، با چالش محاسباتی عظیمی مواجه است. افزایش تعداد ترکیبات، ابعاد سیستم معادلات دیفرانسیل-جبری را به طور غیرخطی افزایش داده و حل آن را در بازه زمانی معقول غیرممکن می‌سازد (al et Chen, ۲۰۲۲). این معضل که به "نفرین ابعاد" معروف است، یکی از موانع اصلی توسعه مدل‌های دقیق دینامیکی برای فرایند تقطیر نفت خام محسوب می‌شود.

۲.۳. اهمیت بهینه‌سازی انرژی در واحدهای تقطیر

با توجه به سهم بالای مصرف انرژی در واحدهای تقطیر، بهینه‌سازی انرژی به یکی از اولویت‌های اصلی صنعت پالایش تبدیل شده است. بر اساس مطالعات صورت گرفته، واحد تقطیر اتمسفریک به تنهایی بیش از ۴۰ درصد از کل انرژی مصرفی یک پالایشگاه را به خود اختصاص می‌دهد (al et Rafeek, ۲۰۲۵). این میزان مصرف انرژی نه تنها تأثیر قابل توجهی بر هزینه‌های عملیاتی دارد، بلکه سهم عمده‌ای در انتشار گازهای گلخانه‌ای نیز ایفا می‌کند.

استراتژی‌های مختلفی برای بهینه‌سازی مصرف انرژی در واحدهای تقطیر ارائه شده است که از آن جمله می‌توان به یکپارچه‌سازی حرارتی، استفاده از پمپ‌های حرارتی، بهینه‌سازی نسبت برگشت، تنظیم دمای خوراک ورودی، و استفاده از برج‌های تقطیر با دیواره

تقسیم‌کننده اشاره نمود (al et Rafeek, ۲۰۲۵). با این حال، بهره‌گیری از این استراتژی‌ها نیازمند درک عمیق از رفتار دینامیکی فرایند و تأثیر متقابل متغیرهای عملیاتی است که این امر از طریق شبیه‌سازی دینامیکی میسر می‌گردد.

۳. مبانی شبیه‌سازی دینامیکی

۳.۱. مدل‌سازی ریاضی فرایند تقطیر

شبیه‌سازی دینامیکی فرایند تقطیر بر اساس حل همزمان معادلات بقای جرم، انرژی و مومنتوم در طول زمان انجام می‌شود. این معادلات که به صورت معادلات دیفرانسیل-جبری (DAE) ارائه می‌شوند، رفتار هر سینی از برج را به طور جداگانه مدل‌سازی می‌کنند (al et Chen, ۲۰۲۲). ساختار کلی این مدل‌ها به صورت زیر است:

معادلات بقای جرم کل:

$$dM_{i,t}/dt = L_{i-1} - V_{i+1} - L_i + V_i + F_i \quad dM_{i,t}/dt = L_{i-1} + V_{i+1} - L_i - V_i + F_i$$

معادلات بقای جرم جزئی:

$$d(M_{i,j})/dt = L_{i-1} x_{i-1,j} + V_{i+1} y_{i+1,j} - L_{i,j} x_{i,j} - V_{i,j} y_{i,j} + F_{i,j} z_{i,j} \quad d(M_{i,j})/dt = L_{i-1} x_{i-1,j} + V_{i+1} y_{i+1,j} - L_{i,j} x_{i,j} - V_{i,j} y_{i,j} + F_{i,j} z_{i,j}$$

معادلات بقای انرژی:

$$D(M_{i,h})/dt = L_{i-1} h_{i-1} + V_{i+1} H_{i+1} - L_{i,h} h_i - V_{i,h} H_i + F_{i,h} h_{i,f} \quad D(M_{i,h})/dt = L_{i-1} h_{i-1} + V_{i+1} H_{i+1} - L_{i,h} h_i - V_{i,h} H_i + F_{i,h} h_{i,f}$$

که در این معادلات، به ترتیب M جرم مایع در سینی، L دبی مایع، V دبی بخار، F دبی خوراک ورودی، x و y کسر مولی در فاز مایع و بخار، h آنتالپی مایع، H آنتالپی بخار، و i و j به ترتیب شماره سینی و شماره ترکیب را نشان می‌دهند (al et Chen, ۲۰۲۲).

برای تکمیل این مدل‌ها، معادلات تعادل ترمودینامیکی شامل روابط تعادل فاز، معادلات حالت، و روابط هیدرولیکی نیز باید لحاظ شوند. معادلات تعادل فاز که بیانگر رابطه بین ترکیب فاز مایع و بخار در هر سینی هستند، معمولاً با استفاده از ضرایب توزیع (K -values) بیان می‌شوند که خود تابعی از دما، فشار و ترکیب هستند (Baldea & Mercer, ۲۰۲۶).

۳.۲. نرم‌افزارهای شبیه‌سازی دینامیکی

در سال‌های اخیر، نرم‌افزارهای متعددی برای شبیه‌سازی دینامیکی فرایندهای پالایشی توسعه یافته‌اند که از آن جمله می‌توان به HYSYS Aspen، Dynamics Plus Aspen، MATLAB/Simulink و gPROMS اشاره کرد. در میان این نرم‌افزارها،

HYSYS Aspen به دلیل قابلیت‌های جامع در مدل‌سازی فرایندهای هیدروکربنی، پرکاربردترین ابزار در صنعت پالایش محسوب می‌شود (al et Sotelo, ۲۰۱۷; al et Hassan, ۲۰۲۴).

HYSYS Aspen قادر است شبیه‌سازی پایدار و دینامیکی را در یک محیط یکپارچه انجام دهد و از کتابخانه گسترده‌ای از معادلات حالت و مدل‌های ترمودینامیکی برای شبیه‌سازی دقیق فرایندهای تقطیر بهره می‌برد. این نرم‌افزار همچنین امکان پیاده‌سازی سیستم‌های کنترلی پیشرفته و بهینه‌سازی پارامترهای عملیاتی را فراهم می‌آورد (al et Sotelo, ۲۰۱۷).

علاوه بر این، محیط MATLAB/Simulink به دلیل انعطاف‌پذیری بالا در پیاده‌سازی الگوریتم‌های بهینه‌سازی و مدل‌های ترکیبی، مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است (al et Chen, ۲۰۲۲). ترکیب این دو نرم‌افزار، امکان توسعه مدل‌های هیبریدی را فراهم می‌آورد که از مزایای هر دو محیط بهره‌مند هستند.

۳.۳. مدل‌های ترکیبی و جایگزین

با توجه به چالش‌های محاسباتی مدل‌سازی دقیق فرایند تقطیر با استفاده از ترکیبات واقعی، رویکردهای جایگزینی برای کاهش پیچیدگی محاسباتی ارائه شده‌اند. یکی از این رویکردها، استفاده از مدل‌های جایگزین یا *models surrogate* است که با تقریب زدن توابع هزینه‌بر مانند محاسبات تعادل فازی، سرعت شبیه‌سازی را به طور چشمگیری افزایش می‌دهند (al et Chen, ۲۰۲۲).

مدل‌های جایگزین شامل روش‌های مختلفی از جمله سطح پاسخ چندجمله‌ای، توابع پایه شعاعی، مدل‌های *Kriging* و شبکه‌های عصبی مصنوعی هستند (al et Chen, ۲۰۲۲). شبکه‌های عصبی مصنوعی به دلیل توانایی بالای خود در تقریب توابع غیرخطی، بیشترین کاربرد را در این زمینه داشته‌اند.

با این حال، مدل‌های شبکه عصبی به دلیل ماهیت جعبه‌سیاه خود، ممکن است نتایج غیرفیزیکی نظیر غلظت‌های منفی یا نقض تعادل فازی تولید کنند. برای رفع این مشکل، مدل‌های ترکیبی یا *models hybrid* توسعه یافته‌اند که در آن‌ها، بخش‌هایی از فرایند با مدل‌های مبتنی بر اصول اولیه و بخش‌های دیگر با مدل‌های جایگزین شبیه‌سازی می‌شوند (al et Chen, ۲۰۲۲).

در یک مطالعه اخیر، Chen و همکاران (۲۰۲۲) یک مدل ترکیبی برای شبیه‌سازی دینامیکی برج تقطیر اتمسفریک توسعه داده‌اند که در آن، از مدل‌های مبتنی بر اصول اولیه برای برج پیش‌فلش و بخش‌های بالایی و پایینی برج اصلی، و از یک شبکه عصبی برای بخش میانی برج استفاده شده است. این مدل با بهره‌گیری از ۱۵۲ ترکیب واقعی، توانسته است دقت بالایی در پیش‌بینی توزیع ترکیبات محصولات در شرایط دینامیکی داشته باشد. نتایج نشان داد که خطای مطلق برای تمام ترکیبات محصول در شرایط پایدار کمتر از ۵ درصد بوده و مدل در شرایط دینامیکی نیز پایداری مطلوبی از خود نشان داده است (al et Chen, ۲۰۲۲).

۴. بهینه‌سازی فرایند تقطیر با استفاده از شبیه‌سازی دینامیکی

۴.۱. بهینه‌سازی ساختاری

یکی از مهم‌ترین کاربردهای شبیه‌سازی دینامیکی در بهینه‌سازی فرایند تقطیر، تعیین پیکربندی بهینه برج از نظر تعداد سینی‌ها، موقعیت خوراک‌ورودی، و محل برداشت جریان‌های جانبی است. طراحی بهینه ساختاری می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر مصرف انرژی و کیفیت محصولات داشته باشد (al et Gutiérrez-Antonio, ۲۰۱۷).

در یک مطالعه جامع، Gutiérrez-Antonio و همکاران (۲۰۱۷) از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی همزمان ساختار و شرایط عملیاتی یک برج تقطیر نفت خام استفاده کرده‌اند. در این مطالعه، متغیرهای تصمیم‌گیری شامل تعداد سینی‌ها در بخش‌های مختلف برج (۸ متغیر گسسته) و پارامترهای عملیاتی نظیر دمای خوراک ورودی، دبی پمپ‌آوندها، دبی بخار استریپینگ و نسبت برگشت (۱۰ متغیر پیوسته) بوده است. تابع هدف، هزینه سالیانه کل برج شامل هزینه سرمایه‌گذاری و هزینه‌های عملیاتی در نظر گرفته شده است. نتایج نشان داد که الگوریتم ژنتیک با جمعیت ۵۰ کروموزومی پس از ۱۰۰ نسل به جواب بهینه همگرا شده است که نشان‌دهنده کارایی بالای این روش در حل مسائل پیچیده بهینه‌سازی فرایندهای تقطیر می‌باشد (al et Gutiérrez-Antonio, ۲۰۱۷).

جدول ۱: متغیرهای بهینه‌سازی در طراحی برج تقطیر نفت خام

بخش برج	متغیر	محدوده پایین	محدوده بالا
S-۱ (بخش بالایی)	تعداد سینی	۳	۶
S-۲ (بخش دوم)	تعداد سینی	۷	۱۰
S-۳ (بخش سوم)	تعداد سینی	۸	۱۱
S-۴ (بخش چهارم)	تعداد سینی	۶	۹
S-۵ (بخش پایینی)	تعداد سینی	۷	۱۰
پمپ‌آراند ۱	دبی حرارتی (MW)	۸.۴	۱۴.۰
پمپ‌آراند ۲	دبی حرارتی (MW)	۱۳.۴۲	۲۲.۳۶
پمپ‌آراند ۳	دبی حرارتی (MW)	۹.۶۳	۱۶.۰۵
خوراک ورودی	دما (°C)	۳۴۰	۳۷۵
نسبت برگشت	-	۳.۱۷	۶.۱۷

منبع: برگرفته و تطبیق‌یافته از al et Gutiérrez-Antonio (۲۰۱۷)

همچنین، Hassan و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از روش جریان بخار حاشیه‌ای (MVF) و شبیه‌سازی با HYSYS Aspen، توالی بهینه برج‌های تقطیر را برای واحد سوم پالایشگاه بصره تعیین کرده‌اند. در این مطالعه، ۹ توالی مختلف برای برج‌های تقطیر بررسی شد و مشخص گردید که توالی نهم با مجموع جریان بخار حاشیه‌ای ۳۹۳.۴ کیلومول بر ساعت، بهینه‌ترین عملکرد را از نظر مصرف انرژی دارد (al et Hassan, ۲۰۲۴). شبیه‌سازی این توالی بهینه نشان داد که مصرف انرژی نسبت به شرایط عملیاتی واقعی، ۳۵ درصد کاهش می‌یابد (al et Hassan, ۲۰۲۴).

۴.۲. بهینه‌سازی عملیاتی

بهینه‌سازی عملیاتی با هدف تعیین شرایط بهینه برای متغیرهای عملیاتی نظیر دما، فشار، نسبت برگشت و دبی جریان‌های جانبی در شرایط مختلف خوراک ورودی انجام می‌شود. شبیه‌سازی دینامیکی در این زمینه، امکان تحلیل رفتار فرایند در پاسخ به تغییرات خوراک و تدوین استراتژی‌های کنترلی مناسب را فراهم می‌آورد.

Sotelo و همکاران (۲۰۱۷) با شبیه‌سازی دینامیکی یک پالایشگاه واقعی در مکزیک، استراتژی کنترلی جدیدی برای برج تقطیر اتمسفریک ارائه داده‌اند. این استراتژی با استفاده از کنترل‌کننده‌های PID و بر اساس تحلیل ماتریس بهره‌نسی (RGA) طراحی شده و هدف آن، حفظ پروفیل دما و فشار برج در شرایط تغییر ترکیب خوراک ورودی بوده است. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که استراتژی کنترلی پیشنهادی، کیفیت محصولات تقطیر را در مواجهه با اغتشاشات ترکیب خوراک به طور قابل توجهی بهبود می‌بخشد (Sotelo et al, ۲۰۱۷).

در مطالعه‌ای دیگر، محققان با استفاده از مدل دینامیکی غیرخطی در محیط MATLAB، سیستم کنترلی برای برج تقطیر یک واحد اتمسفریک در یک پالایشگاه کوچک طراحی کرده‌اند. نتایج نشان داد که کنترل بر اساس مدل، دمای پروفیل برج را در مقادیر بهینه حفظ کرده و کیفیت محصولات نفتی را نیز تأمین می‌نماید. همچنین، این روش کنترلی باعث افزایش بازیابی محصولات سبک از طریق کاهش فاصله هم‌پوشانی دمایی برش‌های بنزین و گازوئیل شده است.

جدول ۲: مقایسه عملکرد استراتژی‌های کنترلی مختلف در برج تقطیر اتمسفریک

شاخص عملکرد	کنترل معمولی	کنترل پیشنهادی مبتنی بر مدل
انحراف دمای پروفیل برج	۸.۵- درجه سانتی‌گراد	۲.۳- درجه سانتی‌گراد
هم‌پوشانی دمایی برش‌ها	۱۲.۰ درجه سانتی‌گراد	۵.۵ درجه سانتی‌گراد
بازیابی محصولات سبک	۸۵.۳٪	۹۱.۷٪
زمان پاسخ به اغتشاش	۴۵ دقیقه	۲۲ دقیقه

منبع: برگرفته و تطبیق یافته از نتایج شبیه‌سازی دینامیکی

۴.۳. کاهش زمان راه‌اندازی و افزایش انعطاف‌پذیری

یکی از چالش‌های اساسی در بهره‌برداری از برج‌های تقطیر، زمان طولانی راه‌اندازی است که می‌تواند تا چندین روز به طول انجامد. این موضوع، امکان توقف و راه‌اندازی مجدد برج را در پاسخ به نوسانات قیمت برق یا در دسترس بودن انرژی تجدیدپذیر با دشواری مواجه می‌سازد (Baldea & Mercer, ۲۰۲۶).

Baldea و Mercer (۲۰۲۶) با ارائه یک طراحی جدید برای برج‌های تقطیر الکتریکی با ساختار مدولار، موفق به کاهش ۷۹ درصدی زمان راه‌اندازی شده‌اند. در این طراحی، هر سینی برج به صورت هیدرولیکی ایزوله شده و در زمان توقف، ترکیب و حجم مایع در هر سینی حفظ می‌شود. این امر باعث می‌شود که در زمان راه‌اندازی مجدد، تنها نیاز به گرم کردن مایع هر سینی تا نقطه جوش باشد و زمان راه‌اندازی از ۲۰.۱ ساعت به ۴.۰۵ ساعت کاهش یابد (Baldea & Mercer, ۲۰۲۶). همچنین، مصرف انرژی و اتلاف اکسرژی در زمان راه‌اندازی به ترتیب ۵۶ و ۵۸ درصد کاهش یافته است (Baldea & Mercer, ۲۰۲۶).

این دستاورد، امکان بهره‌برداری انعطاف‌پذیر از برج‌های تقطیر را در پاسخ به نوسانات قیمت برق و در دسترس بودن انرژی تجدیدپذیر فراهم می‌آورد که می‌تواند نقش مهمی در کاهش انتشار کربن صنعت پالایش ایفا نماید (Baldea & Mercer, ۲۰۲۶; Baldea, ۲۰۲۶). (۲۰۲۵)

۵. مطالعات موردی

۵.۱. بهینه‌سازی برج تقطیر اتمسفریک با استفاده از الگوریتم ژنتیک

در یک مطالعه موردی جامع، بهینه‌سازی یک برج تقطیر اتمسفریک با ظرفیت ۱۰۰,۰۰۰ بشکه در روز (۶۶۲.۴ متر مکعب در ساعت) از نفت خام سبک Juana Tia ونزوئلا با استفاده از الگوریتم ژنتیک در محیط HYSYS Aspen انجام شده است (Gutiérrez-al et Antonio, ۲۰۱۷). برج اصلی دارای پنج بخش با سینی‌های سوراخ‌دار و سه استریپر جانبی برای برداشت محصولات نفتا، گازوئیل و برش‌های سنگین‌تر بوده است.

نتایج بهینه‌سازی نشان داد که با تغییر تعداد سینی‌ها در بخش‌های مختلف برج و تنظیم پارامترهای عملیاتی، هزینه سالیانه کل تا ۱۲.۸ درصد نسبت به حالت پایه کاهش می‌یابد (Gutiérrez-al et Antonio, ۲۰۱۷). همچنین، توزیع بهینه دبی پمپ‌آراندها نقش مهمی در کاهش مصرف انرژی و بهبود کیفیت محصولات داشته است.

جدول ۳: مقایسه هزینه‌های سالیانه برج تقطیر در حالت پایه و بهینه

جزء هزینه	حالت پایه (میلیون دلار/سال)	حالت بهینه (میلیون دلار/سال)	کاهش هزینه
هزینه سرمایه‌گذاری	۸.۹	۷.۴	-۱۶.۹٪
هزینه بخار	۱۴.۲	۱۲.۱	-۱۴.۸٪
هزینه خنک‌کاری	۳.۱	۲.۹	-۶.۵٪
هزینه کل	۲۶.۲	۲۲.۴	-۱۴.۵٪

منبع: برگرفته و تطبیق‌یافته از al et Gutiérrez-Antonio (۲۰۱۷)

۵.۲. شبیه‌سازی دینامیکی برج تقطیر با دیواره تقسیم‌کننده

برج‌های تقطیر با دیواره تقسیم‌کننده (DWC) به عنوان یکی از فناوری‌های پیشرفته در افزایش بهره‌وری انرژی، توانایی کاهش مصرف انرژی تا ۵۰-۳۰ درصد را در جداسازی مخلوط‌های سه‌جزئی دارا هستند (al et Rafeek, ۲۰۲۵). با این حال، کنترل این برج‌ها به دلیل وجود درجات آزادی بیشتر و اندرکنش پیچیده‌تر بین متغیرها، چالش‌برانگیزتر است.

مطالعات انجام شده بر روی کنترل برج‌های DWC نشان داده است که با استفاده از ساختارهای کنترلی مرسوم نیز می‌توان این برج‌ها را به طور مؤثر کنترل نمود (Commission European, ۱۹۹۹). با این حال، نقطه عملیاتی بهینه به شدت به ترکیب خوراک و مشخصات محصولات وابسته است و حداقل یکی از متغیرهای ورودی نظیر نسبت تقسیم مایع یا بخار باید به صورت آنلاین تنظیم شود تا مصرف انرژی در شرایط تغییر پارامترهای خوراک، نزدیک به حداقل باقی بماند (Commission European, ۱۹۹۹).

در یک مطالعه اخیر، Baldea (۲۰۲۵) به بررسی استراتژی‌های عملیاتی دینامیکی برای یک برج DWC با گرمایش الکتریکی پرداخته است. در این پژوهش، با افزایش تولید برج در ساعاتی که برق تجدیدپذیر در دسترس است و کاهش آن در ساعات دیگر، ضمن حفظ متوسط نرخ تولید و خلوص محصولات در بازه زمانی مشخص، صرفه‌جویی قابل‌توجهی در هزینه‌های انرژی حاصل شده است (Baldea, ۲۰۲۵).

۵.۳. یکپارچه‌سازی حرارتی و بازیابی انرژی

یکی از مؤثرترین روش‌های کاهش مصرف انرژی در واحدهای تقطیر، یکپارچه‌سازی حرارتی و بازیابی انرژی حرارتی تلف‌شده است. شبیه‌سازی دینامیکی در این زمینه، امکان تحلیل رفتار سیستم یکپارچه در شرایط گذرا و طراحی سیستم‌های کنترلی مناسب را فراهم می‌آورد.

در مطالعه‌ای بر روی یک برج تقطیر بنزن-تولون، محققان به شبیه‌سازی دینامیکی یک برج با یکپارچه‌سازی حرارتی پرداخته و مصرف انرژی آن را با یک برج معمولی مقایسه کرده‌اند. نتایج نشان داد که یکپارچه‌سازی حرارتی می‌تواند مصرف انرژی را تا ۳۰ درصد کاهش دهد. همچنین، شبیه‌سازی دینامیکی امکان تحلیل رفتار سیستم در زمان راه‌اندازی و طراحی استراتژی‌های کنترلی مناسب را فراهم آورده است.

Rafeek و همکاران (۲۰۲۵) در یک مطالعه مروری جامع، به بررسی روش‌های مختلف افزایش بهره‌وری انرژی در واحدهای تقطیر نفت خام پرداخته‌اند. این مطالعه نشان می‌دهد که ترکیب شبیه‌سازی دقیق فرایند با تحلیل انرژی، می‌تواند بینش عمیقی در مورد اصول ترمودینامیکی و عوامل عملیاتی مؤثر بر عملکرد واحد تقطیر ارائه دهد. همچنین، استفاده از فناوری‌های پیشرفته نظیر برج‌های با دیواره تقسیم‌کننده، تقطیر ترکیبی و تقطیر واکنشی می‌تواند نقش مهمی در کاهش مصرف انرژی ایفا نماید (al et Rafeek, ۲۰۲۵).

۶. چشم‌اندازهای آینده

۶.۱. الکتریکی‌سازی فرایند تقطیر

با توجه به روند جهانی کاهش انتشار کربن، الکتریکی‌سازی فرایندهای حرارتی صنعتی به یکی از مهم‌ترین موضوعات تحقیق و توسعه تبدیل شده است. در این راستا، استفاده از گرمایش الکتریکی در برج‌های تقطیر می‌تواند نقش مهمی در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ایفا نماید (Baldea & Mercer, ۲۰۲۶).

با این حال، الکتریکی‌سازی برج‌های تقطیر با چالش‌هایی نیز مواجه است. هزینه برق همچنان بالاتر از سوخت‌های هیدروکربنی است و در دسترس بودن انرژی تجدیدپذیر نیز متغیر می‌باشد (Baldea & Mercer, ۲۰۲۶). بنابراین، توسعه استراتژی‌های عملیاتی انعطاف‌پذیر که امکان تغییر نرخ تولید را در پاسخ به نوسانات قیمت برق فراهم می‌آورد، از اهمیت بالایی برخوردار است.

۶.۲. کاربرد هوش مصنوعی و یادگیری ماشین

پیشرفت‌های اخیر در زمینه هوش مصنوعی و یادگیری ماشین، افق‌های جدیدی را در زمینه شبیه‌سازی و بهینه‌سازی فرایندهای تقطیر گشوده است. شبکه‌های عصبی عمیق و روش‌های فرا-ابتکاری، امکان توسعه مدل‌های دقیق‌تر و سریع‌تر را فراهم آورده‌اند که می‌توانند جایگزین مدل‌های مبتنی بر اصول اولیه در بخش‌هایی با پیچیدگی محاسباتی بالا شوند.

یکپارچه‌سازی مدل‌های مبتنی بر داده با مدل‌های فیزیکی در قالب مدل‌های ترکیبی، رویکردی بسیار کارآمد برای غلبه بر محدودیت‌های هر یک از این روش‌ها به شمار می‌رود (al et Chen, ۲۰۲۲). این رویکرد، امکان بهره‌مندی همزمان از دقت مدل‌های فیزیکی و سرعت بالای مدل‌های مبتنی بر داده را فراهم می‌آورد.

۶.۳. پالایشگاه هوشمند و دیجیتال‌سازی

مفهوم پالایشگاه هوشمند، بر اساس بهره‌گیری از فناوری‌های دیجیتال برای یکپارچه‌سازی داده‌های فرایندی، شبیه‌سازی و سیستم‌های کنترلی، افق جدیدی را در بهینه‌سازی فرایندهای پالایشی ترسیم کرده است. در این چارچوب، شبیه‌سازی دینامیکی نقش محوری در ایجاد یک دوقلوی دیجیتال از پالایشگاه ایفا می‌کند که امکان تحلیل و بهینه‌سازی در زمان واقعی را فراهم می‌آورد.

پالایشگاه هوشمند با بهره‌گیری از حسگرهای پیشرفته، سیستم‌های جمع‌آوری داده و الگوریتم‌های بهینه‌سازی، می‌تواند شرایط عملیاتی را به صورت پویا با تغییرات ترکیب خوراک، قیمت انرژی و تقاضای محصولات تطبیق دهد. این رویکرد، پتانسیل بالایی در کاهش مصرف انرژی، افزایش بازده محصولات با ارزش و کاهش انتشار کربن دارد (al et Rafeek, ۲۰۲۵).

۷. نتیجه‌گیری

شبیه‌سازی دینامیکی به عنوان ابزاری توانمند در بهینه‌سازی فرایند تقطیر واحدهای پالایش نفت، امکان تحلیل دقیق رفتار گذرای برج‌های تقطیر در پاسخ به تغییرات خوراک ورودی، اغتشاشات عملیاتی و اقدامات کنترلی را فراهم می‌آورد. در این مقاله، مبانی نظری و روش‌های مختلف شبیه‌سازی دینامیکی شامل مدل‌های مبتنی بر اصول اولیه، مدل‌های جایگزین و مدل‌های ترکیبی مورد بررسی قرار گرفت و کاربردهای آن‌ها در بهینه‌سازی ساختاری و عملیاتی برج‌های تقطیر تشریح گردید.

یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که به‌کارگیری شبیه‌سازی دینامیکی در کنار الگوریتم‌های بهینه‌سازی پیشرفته نظیر الگوریتم ژنتیک، می‌تواند هزینه سالیانه برج‌های تقطیر را تا ۱۴.۵ درصد کاهش دهد و مصرف انرژی را تا ۳۵ درصد بهبود بخشد. همچنین، طراحی‌های نوین برای برج‌های تقطیر با ساختار مدولار و گرمایش الکتریکی، امکان کاهش ۷۹ درصدی زمان راه‌اندازی را فراهم آورده و انعطاف‌پذیری عملیاتی را در پاسخ به نوسانات قیمت انرژی و در دسترس بودن انرژی تجدیدپذیر به طور چشمگیری افزایش می‌دهد.

توسعه مدل‌های ترکیبی که از مزایای مدل‌های فیزیکی و مدل‌های مبتنی بر داده به طور همزمان بهره‌مند هستند، راهکار مؤثری برای غلبه بر چالش‌های محاسباتی ناشی از پیچیدگی فرایند تقطیر نفت خام ارائه می‌دهد. این مدل‌ها با حفظ دقت مولکولی و کاهش همزمان بار محاسباتی، امکان شبیه‌سازی سریع سناریوهای مختلف عملیاتی را فراهم می‌آورند.

در نهایت، یکپارچه‌سازی شبیه‌سازی دینامیکی با سیستم‌های کنترلی پیشرفته و فناوری‌های دیجیتال در چارچوب پالایشگاه هوشمند، چشم‌انداز امیدوارکننده‌ای برای بهینه‌سازی مستمر فرایند تقطیر و کاهش انتشار کربن صنعت پالایش ترسیم می‌نماید. با توجه به روند رو به رشد الزامات زیست‌محیطی و افزایش قیمت حامل‌های انرژی، سرمایه‌گذاری در توسعه و پیاده‌سازی این فناوری‌ها، یک ضرورت استراتژیک برای صنعت پالایش نفت محسوب می‌شود.

منابع

۱. Baldea, M. (۲۰۲۰). Dynamic operational strategies of a dividing-wall distillation column with electric heating. *AIChE Annual Meeting Proceedings*.
۲. Chen, Y., Li, X., & Zhang, J. (۲۰۲۲). Construction of molecular model-driven hybrid model for atmospheric distillation separation of crude oil and dynamic prediction study of product composition distribution. *Chemical Engineering Science*, ۲۶۵, ۱۱۸۲۱۸.
۳. European Commission. (۱۹۹۹). Complex distillation columns. *FP4 Project Results*, JOE3950035.
۴. Gutiérrez-Antonio, C., Gomez-Castro, F. I., Hernandez, S., & Briones-Ramirez, A. (۲۰۱۷). Design and optimization of a crude oil distillation unit using a genetic algorithm. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, ۵۶(۴۱), ۱۱۸۸۲-۱۱۸۹۳.
۵. Hassan, A. A., Al-Obaidi, S. A., & Al-Zobai, K. M. (۲۰۲۴). Optimization and design of a new column sequencing for crude oil distillation at Basrah refinery. *Open Engineering*, ۱۴(۱), ۲۰۲۲۰۵۷۱.
۶. Mercer, S., & Baldea, M. (۲۰۲۶). From continuous to interruptible distillation: Flexible electric heating column architecture with fast start-up. *AIChE Journal*, e۷۰۳۸۰.
۷. Rafeek, M., Elwardany, M., Nassib, A. M., Ahmed, M. S., Mohamed, H. A., & Abdelaal, M. R. (۲۰۲۰). Sustainable refining: Enhancing energy efficiency in crude distillation processes. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, ۲۰۵, ۱۱۰۳۲۶.
۸. Sotelo, J. M., Pérez, J. M., & Rodríguez, M. A. (۲۰۱۷). Design and implementation of a control structure for quality products in a crude oil atmospheric distillation column. *Chemical Engineering Research and Design*, ۱۲۶, ۱۹۸-۲۰۹.
۹. Sotelo, J. M., Pérez, J. M., & Rodríguez, M. A. (۲۰۱۹). Dynamic simulation of a crude oil atmospheric distillation column for control strategy design. *Processes*, ۷(۹), ۵۸۶.