

مدلسازی و بهینه‌سازی راکتور بستر ثابت کاتالیستی فرایند دی‌هیدروژناسیون سیکلوهگزان

روزبه غنی^۱، علی حبیبی^۲ و امیرحسین یزدان بخش^{۳*}

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۱۶	در این مقاله به مدلسازی فرایند صنعتی واکنش دی‌هیدروژناسیون سیکلوهگزان پرداخته شده است. طرح پیشنهادی متشکل از یک راکتور بستر ثابت کاتالیستی است که با استفاده از ذرات کاتالیست پلاتین و اکسید آلومینیوم، فرایند دی‌هیدروژناسیون سیکلوهگزان و تبدیل آن به محصولات مهمی مانند بنزن و هیدروژن را تحقق می‌بخشد. در واقع بهینه‌سازی صورت گرفته، امکان تولید مقادیر زیادی هیدروژن را به عنوان یک سوخت دوست‌دار محیط زیست، به همراه بنزن و بدون تولید هیچگونه آلودگی را میسر می‌سازد. معادلات حاکم بر مسئله که شامل موازنه‌های جرم، انرژی، و معادله افت فشار هستند، همگی از نوع معادلات دیفرانسیل معمولی (ODE) می‌باشند که با فرض شرایط پایدار، حرکت جریان محوری بر روی بستر کاتالیستی همگن، و خصوصیات فیزیکی متغیر بدست آمده‌اند. در نتیجه، یک مدل ریاضی یک بعدی همگن برای مسئله در نظر گرفته شده که برای حل آن از روش رانگ کوتای مرتبه چهار استفاده شده است. در نهایت، منحنی‌های تغییرات دما، میزان تبدیل، و جزء مولی اجزا در طول راکتور ترسیم و تفسیر شدند و پس از آن، عملکرد راکتور توسط الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی شد که در نتیجه آن میزان تولید محصول ۰.۸۸٪ افزایش یافت. همچنین، برای اطمینان از دقت و اعتبارسنجی مدل ارائه شده، نتایج شبیه‌سازی با اطلاعات آزمایشگاهی مقایسه شده‌اند که دقت قابل قبولی حاصل گشته است.
پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۲/۲۱	
واژگان کلیدی: دی‌هیدروژناسیون، سیکلو هگزان، راکتور بستر ثابت، مدلسازی، بهینه‌سازی.	

۱- مقدمه

بنزن به عنوان یک ترکیب اروماتیک تک حلقه‌ای به طور عمده توسط روش‌هایی مانند هیدرودی‌الکیلاسیون تولوئن، کراکینگ با بخار، و دی‌هیدروژناسیون سیکلوهگزان تولید می‌شود که روش دی‌هیدروژناسیون در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است. بنزن نقش مهمی را در تولید طیف وسیعی از مواد مانند اتیل بنزن، سیکلوهگزان، پلاستیک‌ها و رزین‌ها ایفا می‌کند. به علاوه، بنزن به عنوان یک حلال مهم شناخته می‌شود، اما به دلیل خاصیت سمی بالای آن اغلب سایر حلال‌ها به آن ترجیح داده می‌شوند. علاوه بر کاربردهای مذکور، بنزن در تولید نایلون‌ها و پلی استایرن نیز به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. اخیراً از

بنزن در افزایش عدد اکتان سوخت‌ها نیز استفاده گردیده است [۱، ۲]. از سوی دیگر، سیکلوهگزان به عنوان یک سیکلوالکان نسبتاً پایدار شناخته می‌شود که در مقادیر ناچیز در نفت خام یافت می‌گردد. این سیکلوالکان یک ترکیب بی رنگ و قابل اشتعال است که به طور گسترده‌ای به عنوان ماده واسطه در تولید نایلون بکار می‌رود. می‌توان ادعان داشت که بخش بزرگی از سیکلوهگزانی که تولید می‌شود در تولید ادیپیک اسید و کاپرولاکتام که مواد واسطه در تولید نایلون هستند استفاده می‌گردد. بخش اندکی از سیکلوهگزان نیز در تولید حلال‌ها و در واکنش‌های پلیمری مورد استفاده قرار می‌گیرد. عمده‌ترین روش تولید سیکلوهگزان از طریق واکنش هیدروژناسیون بنزن است [۳، ۴].

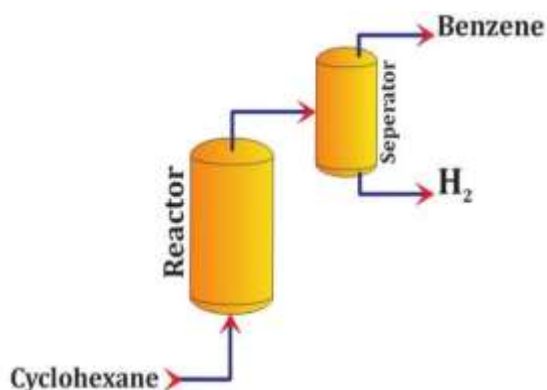
* پست الکترونیک نویسنده مسئول: a.yazdanbakhsh@ut.ac.ir

۱. دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران
 ۲. مجتمع دانشگاهی شیمی و مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر تهران
 ۳. دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تهران

داشتند. طبق ارزیابی‌های آزمایشگاهی، غشای پیشنهادی آنها پتانسیل فوق‌العاده‌ای جهت بکارگیری در راکتور غشایی دی‌هیدروژناسیون سیکلوهگزان از خود نشان داد [۱۱]. در سال ۲۰۱۶ وانگ و فرمنت یک راکتور حبابی که در بر دارنده‌ی ذرات کریستالی پلاتین بود برای واکنش دی‌هیدروژناسیون سیکلوهگزان پیشنهاد دادند. در مطالعه آن‌ها تاثیر تغییرات حجم مخلوط واکنش دهنده نیز در نظر گرفته شده بود. در نهایت، نتایج شبیه‌سازی نزدیکی قابل قبولی با داده‌های آزمایشگاهی داشتند [۱۱]. اخیراً در سال ۲۰۲۱ وانگ و همکارانش یک راکتور غشایی خورشیدی را برای واکنش دی‌هیدروژناسیون سیکلوهگزان پیشنهاد دادند. مطالعه آنها پل ارتباطی بود بین تکنولوژی انرژی خورشیدی، فرایند دی‌هیدروژناسیون سیکلوهگزان و راکتورهای غشایی [۱۲]. در این پژوهش، فرایند دی‌هیدروژناسیون سیکلوهگزان به گونه‌ای بهینه‌سازی شده است که مقادیر قابل توجهی بنزن و هیدروژن را بدون تولید گازهای گلخانه‌ای توسط واکنشی کاتالیستی و گرماگیر که در ادامه شرح داده شده است، تولید می‌کند. محدوده دمایی این واکنش مابین ۴۲۳ و ۵۲۳ کلوین و فشار عملیاتی آن ۱۰/۱۳ کیلوپاسکال است. همچنین باید به این نکته اشاره شود که فرایند دی‌هیدروژناسیون سیکلوهگزان روشی ایده‌آل برای ذخیره‌سازی و انتقال هیدروژن است [۱۱، ۱۳].

۲- شرح فرایند

طبق شکل (۱)، سیکلوهگزان به عنوان خوراک وارد راکتور شده و از درون بستر کاتالیستی که شامل ذرات پلاتین و اکسید الومینیوم است عبور می‌کند. پس از آن، گاز خروجی از راکتور وارد یک جداکننده می‌شود که در آنجا هیدروژن و بنزن از یکدیگر جدا می‌گردند. شرایط عملیاتی و مشخصات راکتور در جدول ۱ آورده شده اند [۱۴].



شکل ۱- نمای شماتیک فرایند دی‌هیدروژناسیون سیکلوهگزان

معادله (۱) نشان دهنده واکنش کاتالیستی دی‌هیدروژناسیون سیکلوهگزان است که یک واکنش برگشت پذیر گرماگیر با بکارگیری کاتالیست پلاتین و اکسید الومینیوم می‌باشد [۵، ۶].



در مقایسه با سایر روش‌های تولید هیدروژن، دی‌هیدروژناسیون سیکلوهگزان به دلیل عدم تولید آلاینده‌هایی مانند کربن منواکسید و کربن دی‌اکسید و همچنین عدم تولید محصولات جانبی روش پاک‌تری محسوب می‌گردد. هیدروژن یک سوخت بدون آلاینده و یک جایگزین مناسب برای منابع انرژی آلوده کننده محیط زیست مانند سوخت‌های فسیلی است. هیدروژن می‌تواند به روش‌های مختلفی مانند رفرمینگ گاز طبیعی، اکسیداسیون جزئی سوخت‌های فسیلی، و الکترولیز آب تولید شود. از آنجایی که روش‌های مذکور فرایندهای پر هزینه‌ای هستند و انتقال و نگهداری هیدروژن باید در دما و فشار خاصی انجام شود، هیدروژن هنوز نتوانسته است به عنوان یک جایگزین ایده‌آل برای سوخت‌های آلاینده در مقیاس صنعتی مطرح شود [۷-۹].

در این پژوهش، فرایند دی‌هیدروژناسیون سیکلوهگزان مقادیر قابل توجهی بنزن و هیدروژن را بدون تولید گازهای گلخانه‌ای توسط واکنشی کاتالیستی و گرماگیر که در ادامه می‌آید تولید می‌کند. محدوده دمایی این واکنش مابین ۴۲۳ و ۵۲۳ کلوین و فشار عملیاتی آن ۱۰/۱۳ کیلوپاسکال است. همچنین باید به این نکته اشاره شود که فرایند دی‌هیدروژناسیون سیکلوهگزان روشی ایده‌آل برای ذخیره‌سازی و انتقال هیدروژن است.

تحقیقات زیادی بر روی فرایند دی‌هیدروژناسیون سیکلوهگزان و مدلسازی راکتور آن انجام گرفته است. در سال ۲۰۰۹ اکاماتسو و همکارانش نوع جدیدی از راکتور غشایی را برای واکنش دی‌هیدروژناسیون سیکلوهگزان پیشنهاد دادند. در راکتور پیشنهادی آنها هیچ گونه گاز جارو کننده و حمل کننده‌ای استفاده نشده بود. در نتیجه این کار، هیدروژن با خلوص بالا با قابلیت استفاده مستقیم در سلول‌های سوختی بدست آمد [۱۰]. در سال ۲۰۱۲ کاستونیکولاس و همکارانش غشاهایی از جنس سیلیکا با تخلخل در ابعاد میکرو ساختند که کیفیت قابل توجهی برای بکارگیری در فرایند دی‌هیدروژناسیون سیکلوهگزان

کننده در واکنش به صورت متغیر در نظر گرفته شده است و از اتلاف های حرارتی و جرمی صرف نظر شده. در نهایت معادلات بدست آمده توسط روش رانگ کوتای مرتبه ۴ حل شده اند. معادلات مربوط به موازنه های جرم و انرژی به همراه سایر معادلات در جدول ۲ آورده شده اند.

جدول ۲- موازنه های جرم و انرژی و سایر معادلات کمکی

موازنه جرم
$\frac{dx_C}{dz} = \frac{\eta r_C A}{F_C^0}$
موازنه انرژی
$\dot{m} C_{P_{mix}} \frac{dT}{dz} = -\Delta H_{rxn} \eta r_C A$
گرمای ویژه اجزاء خالص
$C_P^0 = C_1 + C_2 \left[\frac{C_3/T}{\sinh(C_3/T)} \right]^2 + C_4 \left[\frac{C_5/T}{\cosh(C_5/T)} \right]^2$
افت فشار
$\frac{dP}{dz} = \frac{150\mu(1-\varepsilon)^2}{\varphi_s^2 d_p^3 \varepsilon^3} u + \frac{1.75\rho(1-\varepsilon)}{\varphi_s d_p \varepsilon^3} u^2$

۵- اعتبارسنجی مدل

در این مطالعه جهت بررسی دقت و اعتبارسنجی مدل ارائه شده، میزان تبدیل بدست آمده برای سیکلوهگزان در دماهای مختلف با مقادیر آزمایشگاهی میزان تبدیل سیکلوهگزان مربوط به یک راکتور بستر ثابت کاتالیستی مقایسه شده است. این مقایسه در جدول (۳) آورده شده است. همانطور که مشخص است مقایسه بین مقادیر بدست آمده با مقادیر آزمایشگاهی نشان دهنده دقت مدل پیشنهادی است [۱۸].

جدول ۳- اعتبار سنجی مدل از طریق مقایسه میزان تبدیل

سیکلوهگزان

دما	میزان تبدیل سیکلوهگزان (مقادیر آزمایشگاهی)	میزان تبدیل سیکلوهگزان (مقادیر مدلسازی)
۴۲۳	۰,۰۷۱۴	۰,۰۷۳۵
۴۴۸	۰,۱۴۳۴	۰,۱۴۷۶
۴۷۳	۰,۳۰۱۰	۰,۳۰۵۲
۴۹۸	۰,۵۷۹۳	۰,۵۸۴۲
۲۳	۰,۸۸۱۲	۰,۸۸۶۶
۵۴۴	۰,۹۹۰۳	۰,۹۹۷۱

جدول ۱- شرایط عملیاتی و مشخصات راکتور

پارامتر	مقدار
قطر ذرات کاتالیست (میلی متر)	۳,۵۵
تخلخل بستر کاتالیستی	۰,۳۹
ترکیب خوراک بر حسب جزء مولی	
C ₆ H ₁₂	۰,۱۰
Ar	۰,۹۰
دمای ورودی (کلوین)	۵۰۰
فشار ورودی (پاسکال)	۱,۰۱۳×۱۰ ^۵
دبی مولی خوراک (مول بر ساعت)	۹۴۳,۱۳
طول راکتور (متر)	۳
قطر راکتور (متر)	۰,۷۲

۳- مدل سینتیکی

سرعت واکنش دی هیدروژناسیون سیکلوهگزان توسط معادله (۲) بیان می شود [۳]:

$$r_c = \frac{-k \left(\frac{K_P P_C}{P_{H_2}^3} - P_B \right)}{1 + \left(\frac{K_B K_P P_C}{P_{H_2}^3} \right)} \quad (2)$$

در معادله فوق، k ثابت سرعت، K_B ثابت تعادلی جذب رای بنزن و K_P ثابت تعادلی سرعت هستند که معادلات آنها در زیر آورده شده است [۱۴]:

$$k = 0.221 \exp\left(\frac{-4270}{T}\right) \quad (3)$$

$$K_B = 2.03 \times 10^{-10} \exp\left(\frac{6270}{T}\right) \quad (4)$$

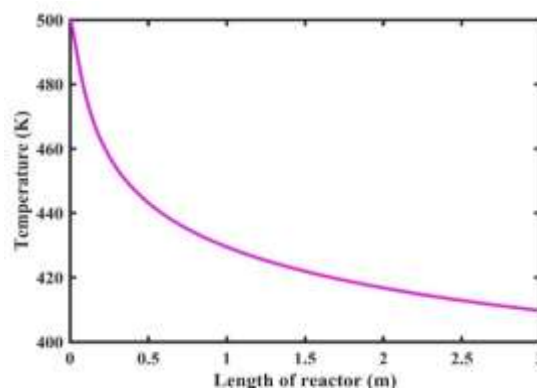
$$K_P = 4.89 \times 10^{35} \exp\left(\frac{3190}{T}\right) \quad (5)$$

۴- مدل ریاضی

مدلسازی ریاضی همواره به عنوان یک ابزار سودمند جهت بررسی رفتار راکتور ها و تعیین مقادیر پارامتر های خروجی در کنار پیش بینی شرایط فرایند شناخته شده است. همچنین مدلسازی ریاضی نقش مهمی را در بهبود عملکرد راکتور ایفا می کند [۱۵-۱۷]. در این مطالعه، مدلسازی راکتور دی هیدروژناسیون سیکلوهگزان بر اساس یک مدل ریاضی یک بعدی همگن انجام شده است. این مدل بر اساس شرایط پایدار طراحی شده که در آن جریان خوراک به صورت محوری از روی بستر کاتالیستی همگن عبور می کند. همچنین خواص فیزیکی مربوط به اجزای شرکت

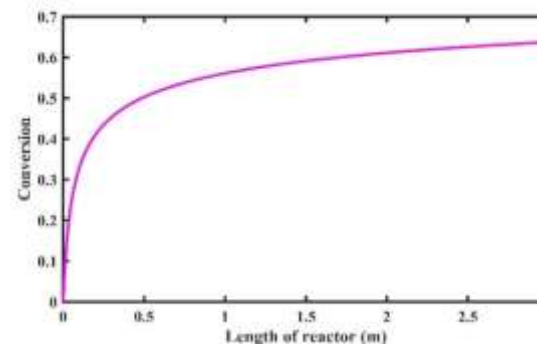
۶- نتایج و بحث

نتایج شبیه‌سازی راکتور دی‌هیدروژناسیون سیکلوهگزان در قالب نمودارهایی که در ادامه درج شده، آورده شده است. شکل (۲) نشان‌دهنده منحنی تغییرات دما در طول راکتور دی‌هیدروژناسیون سیکلوهگزان است. همانطور که مشخص است، در ابتدای راکتور به دلیل غلظت بالای واکنش دهنده‌ها و در نتیجه سرعت بالای واکنش دی‌هیدروژناسیون سیکلوهگزان که واکنشی گرماگیر است کاهش دمای سریعی اتفاق می‌افتد. پس از مدتی با کاهش سرعت واکنش، شیب منحنی تغییرات دما کمتر می‌شود و در نهایت همانطور که در نمودار مشخص است دما تا پایان راکتور تقریباً ثابت می‌ماند.



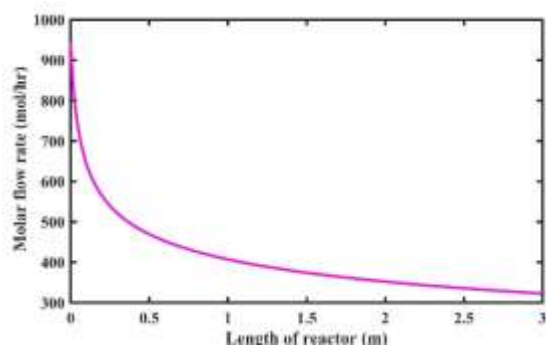
شکل ۲- منحنی تغییرات دما در راکتور دی‌هیدروژناسیون سیکلوهگزان

شکل (۳) نمایانگر میزان تبدیل سیکلوهگزان در طول راکتور است. همانطور که مشخص است، در ابتدای راکتور به دلیل غلظت بالای واکنش دهنده‌ها و در نتیجه سرعت بالای واکنش، میزان تبدیل بطور قابل توجهی افزایش یافته است. سپس، کاهش سرعت واکنش منجر به تغییرات کمتری در میزان تبدیل می‌شود تا اینکه میزان تبدیل به مقدار نهایی خود یعنی ۰٫۶۵۷ در انتهای راکتور می‌رسد.

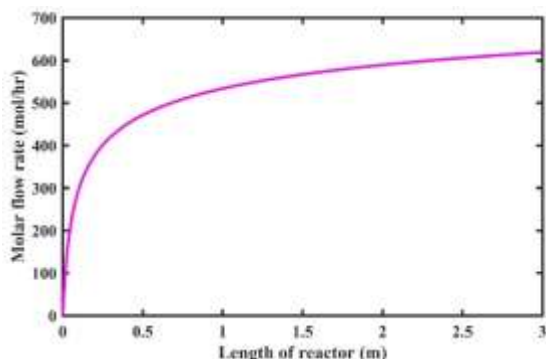


شکل ۳- منحنی تغییرات میزان تبدیل سیکلوهگزان در راکتور دی‌هیدروژناسیون سیکلوهگزان

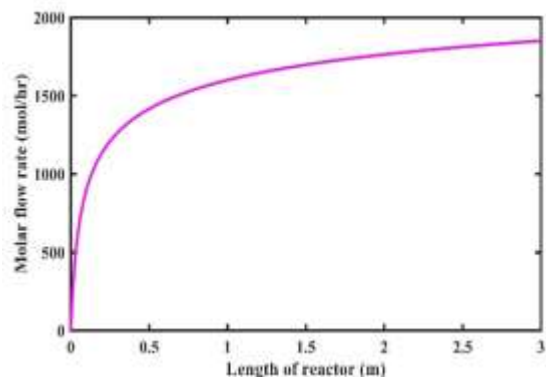
تغییرات دبی‌های مولی سیکلوهگزان، بنزن و هیدروژن در طول راکتور، در اشکال (۴) تا (۶) نمایش داده شده است. در ابتدا به دلیل غلظت بالای واکنش دهنده‌ها و در نتیجه سرعت بالای واکنش، شدت تغییرات دبی‌های مولی زیاد است. پس از آن، با کاهش قابل توجه سرعت واکنش نسبت به ابتدای راکتور، شدت تغییرات دبی‌های مولی تا حد قابل توجهی کاهش می‌یابد. طبق نمودارهای مذکور، با وارد کردن ۹۴۳ مول بر ساعت سیکلوهگزان به عنوان خوراک به راکتور، ۶۱۸ مول بر ساعت بنزن و ۱۸۵۱ مول بر ساعت هیدروژن به عنوان محصولات واکنش بدست خواهد آمد.



شکل ۴- منحنی تغییرات دبی مولی سیکلوهگزان در راکتور دی‌هیدروژناسیون سیکلوهگزان



شکل ۵- منحنی تغییرات دبی مولی بنزن در راکتور دی‌هیدروژناسیون سیکلوهگزان



شکل ۶- منحنی تغییرات دبی مولی هیدروژن در راکتور دی‌هیدروژناسیون سیکلوهگزان

جدول ۴- پارامترهای ورودی الگوریتم ژنتیک در کنار متغیرهای تصمیم‌ساز و محدوده تغییرات

نام متغیر	مقدار
دمای ورودی (کلوین)	$400 \leq T_0 \leq 600$
فشار عملیاتی (اتمسفر)	$0.5 \leq P_0 \leq 1.5$
دبی مولی خوراک (مول بر ساعت)	$8000 \leq F_{t_0} \leq 11000$

جدول ۵- نتایج بهینه سازی

مقدار	متغیر هدف
میزان تولید بنزن (مول بر ساعت)	۶۱۵,۳۷
مقدار	متغیرهای تصمیم‌ساز
دمای ورودی (کلوین)	۵۸۳,۷۲
فشار عملیاتی (اتمسفر)	۱,۰۷
دبی مولی خوراک (مول بر ساعت)	۱۰۰۱۷,۴۳

۷- نتیجه گیری

در این پژوهش فرایند تولید بنزن و هیدروژن توسط واکنش دی‌هیدروژناسیون سیکلوهگزان پیشنهاد و مدل‌سازی شده است. به این منظور یک راکتور بستر ثابت کاتالیستی که از کاتالیست پلاتین و اکسید الومینیوم استفاده می‌کند در نظر گرفته شده است. در ادامه، اطلاعات مربوط به شبیه‌سازی و مدل‌سازی راکتور ذکر شده و نتایج شبیه‌سازی که شامل نمودارهای تغییرات دما، دبی‌های مولی اجزای شرکت کننده در واکنش و میزان تبدیل واکنش‌دهنده است ارائه شده‌اند. طبق نتایج، در ابتدای راکتور تغییرات محسوسی در دما، میزان تبدیل و دبی‌های مولی اجزاء واکنش رخ می‌دهد. اما پس از گذشت زمان هنگامی که سرعت واکنش کاهش می‌یابد، تغییرات متغیرهای مذکور کمتر شده و تقریباً به مقدار ثابتی می‌رسند. در پایان از الگوریتم ژنتیک در حالت تابع هدف سینگل جهت بهینه‌سازی عملکرد راکتور پیشنهادی دی‌هیدروژناسیون سیکلوهگزان استفاده شده است که در نتیجه آن میزان تولید بنزن در راکتور بهینه‌سازی شده به مقدار قابل توجهی افزایش یافته است.

تکنیک‌های بهینه سازی روش‌های مفیدی جهت بدست آوردن بهترین شرایط عملیاتی سیستم و بهبود عملکرد آن هستند. بسته به نوع مسأله، روش‌های بهینه‌سازی مختلفی می‌توانند مورد استفاده قرار بگیرند. در این پژوهش، عملکرد راکتور دی‌هیدروژناسیون سیکلوهگزان توسط الگوریتم ژنتیک و روش بهینه‌سازی سینگل جهت بهینه‌سازی شده است. دبی مولی تولیدی بنزن که محصول اصلی واکنش است به عنوان تابع هدفی که باید حداکثر شود در نظر گرفته شده است. معادله زیر نشان‌دهنده تابع هدف است:

$$\text{Prod}_{\text{Ben}} = F_{\text{outBen}} - F_{\text{inBen}} \quad (6)$$

در اینجا به منظور بهینه‌سازی راکتور دی‌هیدروژناسیون سیکلوهگزان، دمای ورودی، فشار عملیاتی و دبی مولی کل خوراکی که وارد راکتور می‌شود به عنوان متغیرهای تصمیم‌ساز انتخاب شده‌اند.

همچنین، برای جلوگیری از افت فشار زیاد در طول راکتور، افت فشار راکتور بهینه‌سازی شده با در نظر گرفتن افت فشار راکتور صنعتی دی‌هیدروژناسیون سیکلوهگزان به عنوان تابع محدود کننده در نظر گرفته شده است. به علاوه، به منظور بالاتر بردن بازده تولید بنزن در راکتور بهینه‌سازی شده نسبت به راکتور عادی دی‌هیدروژناسیون سیکلوهگزان، بازده تولید بنزن به عنوان تابع محدود کننده انتخاب شده است. توابع محدود کننده‌ی مذکور در ذیل آورده شده‌اند:

$$\Delta P \leq 0.5 \text{ atm} \quad (7)$$

$$\text{Yield}_{\text{Ben}} \geq 0.1 \quad (8)$$

جداول ۴ و ۵ نشان‌دهنده پارامترهای ورودی الگوریتم ژنتیک در کنار متغیرهای تصمیم‌ساز و محدوده تغییرات آنهاست. با توجه به نتایج بهینه‌سازی، میزان تولید بنزن ۰,۸۸٪ افزایش را در راکتور بهینه‌سازی شده نسبت به راکتور عادی نشان داده است.

مراجع

- [1] B. Wang and G. F. Froment, "Dehydrogenation of cyclohexane on Pt (111) in a bulb reactor," *Catalysis Letters*, vol. 147, no. 3, pp. 663-673, 2017.
- [2] M. K. Szukiewicz and K. Kaczmarski, "Modeling of a Real-Life Industrial Reactor for Hydrogenation of Benzene Process," *Catalysts*, vol. 11, no. 4, p. 412, 2021.

- [3] M. Farsi and A. Jahanmiri, "Mathematical simulation and optimization of methanol dehydration and cyclohexane dehydrogenation in a thermally coupled dual-membrane reactor," *international journal of hydrogen energy*, vol. 36, no. 22, pp. 14416-14427, 2011.
- [4] N. Kariya, A. Fukuoka, and M. Ichikawa, "Efficient evolution of hydrogen from liquid cycloalkanes over Pt-containing catalysts supported on active carbons under "wet-dry multiphase conditions"," *Applied Catalysis A: General*, vol. 233, no. 1-2, pp. 91-102, 2002.
- [5] M. Khademi, P. Setoodeh, M. Rahimpour, and A. Jahanmiri, "Optimization of methanol synthesis and cyclohexane dehydrogenation in a thermally coupled reactor using differential evolution (DE) method," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 16, pp. 6930-6944, 2009.
- [6] M. Khademi, M. Rahimpour, and A. Jahanmiri, "Differential evolution (DE) strategy for optimization of hydrogen production, cyclohexane dehydrogenation and methanol synthesis in a hydrogen-permselective membrane thermally coupled reactor," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 35, no. 5, pp. 1936-1950, 2010.
- [7] J. S. Rigden, *Hydrogen: The Essential Element*. Harvard University Press, 2003.
- [8] N. Kariya, A. Fukuoka, T. Utagawa, M. Sakuramoto, Y. Goto, and M. Ichikawa, "Efficient hydrogen production using cyclohexane and decalin by pulse-spray mode reactor with Pt catalysts," *Applied Catalysis A: General*, vol. 247, no. 2, pp. 247-259, 2003.
- [9] I. Dincer and A. S. Joshi, *Solar based hydrogen production systems*. Springer, 2013.
- [10] K. Akamatsu *et al.*, "Stable high-purity hydrogen production by dehydrogenation of cyclohexane using a membrane reactor with neither carrier gas nor sweep gas," *Journal of Membrane Science*, vol. 330, no. 1-2, pp. 1-4, 2009.
- [11] D. Koutsonikolas, S. Kaldis, V. Zaspalis, and G. Sakellaropoulos, "Potential application of a microporous silica membrane reactor for cyclohexane dehydrogenation," *International journal of hydrogen energy*, vol. 37, no. 21, pp. 16302-16307, 2012.
- [12] X. Wang, B. Wang, M. Wang, Q. Liu, and H. Wang, "Cyclohexane dehydrogenation in solar-driven hydrogen permeation membrane reactor for efficient solar energy conversion and storage," *Journal of Thermal Science*, pp. 1-11, 2021.
- [13] S. Kumar, T. Gaba, and S. Kumar, "Simulation of catalytic dehydrogenation of cyclohexane in zeolite membrane reactor," *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, vol. 7, no. 1, 2009.
- [14] B.-H. Jeong, K.-I. Sotowa, and K. Kusakabe, "Modeling of an FAU-type zeolite membrane reactor for the catalytic dehydrogenation of cyclohexane," *Chemical Engineering Journal*, vol. 103, no. 1-3, pp. 69-75, 2004.
- [۱۵] اصغر محمدی و علی فرضی، "مدلسازی و شبیه‌سازی تبدیل کاتالیستی مستقیم جزئی متان به متانول در یک راکتور بستر سیال"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۶، شماره ۵۲، بهار ۱۳۹۷، صفحه ۳۹۷-۴۰۷.
- [۱۶] علی حقیقی اصل، امین احمدپور و نرگس فلاح، "مدلسازی کاهش COD پساب صنایع پتروشیمی توسط روش‌های طراحی آزمایش و شبکه عصبی مصنوعی"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۶، شماره ۵۴، پاییز ۱۳۹۷، صفحه ۲۹۵-۳۰۷.
- [۱۷] مسعود خواجه نوری، فرشته مشکانی و مهران رضایی، "بررسی مدل ترمودینامیکی برای کاتالیست نیکل ارتقا یافته با اکسید سریم روی پایه اکسید منیزیم نانو کریستالی در فرایند ریفرمینگ خشک متان"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۶، شماره ۵۳، تابستان ۱۳۹۷، صفحه ۳۸۹-۳۹۶.
- [18] B.-H. Jeong, K.-I. Sotowa, and K. Kusakabe, "Catalytic dehydrogenation of cyclohexane in an FAU-type zeolite membrane reactor," *Journal of Membrane Science*, vol. 224, no. 1-2, pp. 151-158, 2003.