مقایسه کارایی بهینه سازی روش سطح پاسخ و الگوریتم رقابت استعماری در بررسی دمای راکتور و وزن کاتالیست در پیرولیز کاتالیستی تبدیل ضایعات پلاستیکی به سوخت

محمد عبداله پور[۱]، سید حسین هاشمی[۲]، بهروز میرزایی[۳]، محسن رسولی[۴]

تاریخ دریافت مقاله: ۹۳/۱۱/۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۳/۱۲/۲۶

چکیده:

از روش‌های مطلوب جهت تبدیل انواع زباله‌های پلاستیکی، روش تجزیه حرارتی (پیرولیز) است. وجود کاتالیست می‌تواند بهبود فرایند تبدیل و به حداقل رساندن دما و زمان لازم به منظور فرایند شکست مولکول‌های بزرگ پلیمری به مولکول‌های کوچک را به دنبال داشته باشد. بکارگیری این روش از یک طرف سبب حفاظت از محیط زیست شده و از طرف دیگر، جایگزین مناسبی برای ذخایر نفت و گاز است. در این مقاله، یک مدل توسعه یافته ریاضی ارائه شده و با استفاده از دو روش سطح پاسخ و الگوریتم رقابت استعماری مدل مورد نظر و پارامترهای موثر بر آن به منظور ارائه بهترین شرایط انجام فرایند پیرولیز کاتالیستی برای دو سوخت مایع و گاز مورد مطالعه قرارگرفته است. در این مطالعه، شرایط دمای ۵۶۱/۹۲ درجه سانتی‌گراد و وزن کاتالیست ۱/۳۳ گرم برای سوخت مایع و همچنین دمای ۵۶۰/۷۴ درجه سانتی‌گراد و وزن کاتالیست ۱ گرم به عنوان شرایط بهینه برای سوخت گازی تعیین شد. همچنین همگرایی و نزدیکی نتایج دو روش تاییدکننده صحت روش و پاسخ نهایی است، به طوری که میزان همبستگی نتایج برای سوخت مایع طبق تحلیل واریانس ۹۸/۸ درصد و برای سوخت گازی ۹۶/۵ درصد به دست آمده است.

کلمات کلیدی:

الگوریتم رقابت استعماری، پیرولیز کاتالیستی، روش‌شناسی سطح پاسخ، ضایعات پلاستیکی ، مدیریت زباله‌های پلیمری

۱) کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه محقق اردبیلی (نویسنده مسئول) M.abdollahpour@yahoo.com
۲) دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه محقق اردبیلی hosseinhashmei@gmail.com
۳) استادیار گروه مهندسی شیمی، دانشگاه محقق اردبیلی mirzayib@uma.ac.ir
۴) دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه محقق اردبیلی mohsen.6969@yahoo.com

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

مقدمه

امروزه فراوانی زباله‌های پلاستیکی یکی از چالشی‌ترین مشکلات زیستی در سطح جهان به حساب می‌آید[۱۰]. با توجه به نبود مدیریت کافی در جمع‌آوری و دفع مناسب زباله‌های شهری و صنعتی به ویژه زباله‌های پلاستیکی، فرایند بازیافت می‌تواند یک فرصت مناسب در جمع‌آوری این گونه زباله‌ها باشد. با این کار علاوه بر حفظ و حراست از محیط زیست، منبعی جهت تولید سوخت ایجاد می‌شود[۱۲،۳۳،۲۲]. از روش‌های مطلوب جهت تبدیل انواع زباله‌های پلاستیکی از قبیل پلی اتیلن‌ها[۶،۲۷] ، پلی پروپیلن‌ها[۸،۷] و پلی استایرن‌ها[۵] به سوخت‌های با ارزش، روش تجزیه حرارتی (پیرولیز[1]) است. فرایند تجزیه مواد پلیمری با اعمال حرارت بالا در این روش صورت می‌گیرد که در نهایت، سوخت‌های مایع جدید از آن تولید می‌شود. از آنجایی که شکست حرارتی زباله‌های پلاستیکی درجه حرارت نسبتا بالایی را احتیاج دارد و سوخت محصول از آن برای کیفیت مطلوب‌تر به فرآوری بیش‌تری نیازمند است، می‌توان به منظور تجزیه پلیمرهای ضایعات پلاستیکی روش کرکینگ (پیرولیز) کاتالیستی را به کار گرفت. وجود کاتالیست می‌تواند بهبود فرایند تبدیل و به حداقل رساندن دما و زمان لازم به منظور فرایند شکست مولکول‌های بزرگ پلیمری به مولکول‌های کوچک را به دنبال داشته باشد [۲۶،۱۷،۱]. امروزه به دلیل جنبه اقتصادی کاهش هزینه‌ای در فرایند پیرولیز کاتالیستی، این فرایند و کاتالیزورهای مورد استفاده در آن بسیار حائز اهمیت می‌باشند. کاتالیزورهای مختلفی در فرایند شکست کاتالیزوری به منظور تبدیل زباله-های پلاستیکی به کار برده می‌شوند که از رایج‌ترین آنها می‌توان به انواع زئولیت‌های تجاری[۲۴]، سیلیکا آلومینا[۳۰،۱۴،۱۳] و کاتالیزور چایز[2] [۲۱] اشاره نمود. ویژگی‌ها و کیفیت محصولات پیرولیز در اثر حرارت و در حضورکاتالیزور با توجه به ترکیب مواد اولیه متفاوت است [۲۰]. محققان بسیاری بر روی کاتالیزورهای فرایند شکست کاتالیزوری مطالعاتی را صورت داده‌اند. بسیاری از نتایج مطالعات تجربی فرایند تبدیل زباله‌های پلاستیکی به سوخت، حاکی از اثر قابل توجه کاتالیزور زئولیت در روند تبدیل بهتر دارد [۱۸،۳۱]. سرانو[3] و همکارانش با مطالعات آزمایشگاهی به فعالیت قابل توجه جامد فوق اسیدی ZrO_2/SO_4 نسبت به کاتالیزورهای Al_2O_3/SO_4و$Pt/Al_2O_3/SO_4$ در فرایند پیرولیز کاتالیزوری، پی بردند[۳۲]. لوپز و همکارانش[4] بر روی فرایند تجزیه حرارتی بر اثر کاتالیزور با هدف تولید سوخت از زباله‌های پلاستیکی مطالعات آزمایشگاهی انجام دادند که نتایج مطالعاتی آنها نشان داد زئولیت جهت تولید سوخت با محتوای گازهای غنی از جزء پروپان و بوتان حتی در صورتی که ساختار مواد خام مورد نظر به طور عمده از پلی اولفین‌ها باشد، بسیار اثرگذار است [۲۰]. پندا[5] برای فرایند پیرولیز کاتالیستی جهت تولید سوخت مایع از زباله‌های پلاستیکی با کاتالیزور کائولن مطالعه‌ای از دید تجربی انجام داد که نتایج از عملکرد موثر این کاتالیزور در روند فرایند شکست حکایت

1) Pyrolysis
2) chays
3) Serano
4) López et al
5) Panda

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

داشت، هرچند در مقایسه‌ای که با اثر کاتالیزور سیلیکا آلومینا حاصل از مطالعات تجربی سایر محققان صورت داد به اثرگذاری بهتر کاتالیزور سیلیکا آلومینا برای به حداقل رساندن زمان واکنش و بهبود روند تبدیل به نسبت کاتالیزور کائولن پی برد [۲]. با توجه به پارامترهای عملیاتی مهم از قبیل زمان و دما در فرایند پیرولیز کاتالیستی، الکس و همکارانش [۱۹] با مطالعات آزمایشگاهی به بررسی اهمیت این دو پارامتر عملیاتی بر روند فرایند شکست مواد پلیمری پرداختند. نتیجه یافته‌های آنها از تأثیر قابل توجه دما در بهبود فرایند تبدیل جهت ارتقای کیفیت محصولات حاکی است. از دید بهینه‌سازی شرایط عملیاتی حاکم بر فرایند تجزیه با توجه به اثر کاتالیزور و رآکتور خاص فرایند پیرولیز کاتالیزوری، تنها تعداد کمی از محققان از جمله کومار و سینق[1] [۲۹]، ایستادی و همکاران[2] [۱۱] و همچنین ادوین راج و همکاران[3] [۹] به بهینه سازی و کنترل پارامترهای عملیاتی تمرکز کرده‌اند. استفاده از روش های تحلیلی و اخیرا استفاده از الگوریتم های جدید نتایج جالب توجهی در بهینه سازی پارامترهای عملیاتی حاکم بر مدل‌های فرایندی به دست آورده است. از این میان، الگوریتم رقابت استعماری توانایی بسیار بالایی در یافتن نقطه بهینه در مقایسه با الگوریتم های کلونی مورچه و ژنتیک دارد [۲۸،۱۶]. در مقایسه با روش‌های تحلیلی، این الگوریتم که جزو الگوریتم های متاهیوریستیک طبقه بندی می شود، در مدت زمان معقول و با تعداد تکرار کمتر در حل مسائل معروفی چون فروشنده دوره گرد[4] موفق ظاهر شده است[۲۵]. به دلیل پیچیده بودن مدل فرایندی و احتمال وجود نقاط بهینه محلی[5] در تابع مدل و معرفی آن به عنوان نقطه بهینه از این روش استفاده شده است. ساختار منحصر بفرد الگوریتم رقابت استعماری که در ادامه توضیح کامل تری از آن ارائه می شود، توانایی جالب توجهی در فرار از این نقاط بهینه محلی و یافتن نقطه بهینه اصلی به خود اختصاص داده است.

در این مقاله، اصلاح مدل محققین پیشین به همراه ارائه یک مدل توسعه یافته برای فرایند شکست کاتالیزوری به منظور افزایش تبدیل و بهبود کیفیت سوخت با توجه به کنترل و بهینه نمودن دمای بالای راکتور در فرایند پیرولیز زباله‌های پلاستیکی مورد مطالعه قرار گرفته است و با استفاده از روش سطح پاسخ و الگوریتم رقابت استعماری، بررسی دقیق‌تری از چگونگی تاثیر پارامترهایی همچون دمای رآکتور و وزن کاتالیست در بهبود فرایند صورت گرفته است.

مواد و روش ها

روش سطح پاسخ (RSM)

روش‌شناسی سطح پاسخ مجموعه‌ای از روش‌های آماری و ریاضی است که برای مدل‌سازی و تحلیل فرایندهای مهندسی مفید است. همچنین RSM در رابطه بین پارامترهای قابل کنترل و سطوح پاسخ بدست آمده مقداردهی می‌کند.

1) Kumar&Singh
2) Istadi et al
3) Edwin Raj et al
4) Traveling Salesmen Problem (TSP)
5) Local Optimum

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

ارتباط بین یک دسته از متغیرهای مستقل و پاسخ y با یک مدل ریاضی که مدل رگرسیونی نامیده می‌شود، تخمین زده می‌شود. زمانی که بیش از دو متغیر مستقل وجود داشته باشد، مدل رگرسیونی، چندگانه نامیده می‌شود. به‌طور عمومی، مدل رگرسیونی چندگانه با q عدد متغیر مستقل به شکل زیر نوشته می‌شود:

معادله رگرسیونی تخمین زده شده عبارت است از: $\hat{y} = X\hat{\beta}$ همچنین می‌توان آن را به‌صورت زیر هم نشان داد:

$$\hat{y}_i = \hat{\beta}_i + \sum_{j=1}^{q} \hat{\beta}_j x_{ij} \qquad i = 1, 2, \ldots, n. \tag{۱}$$

مدل چندگانه رگرسیونی می‌تواند در فرم ماتریس به‌صورت زیر نوشته شود:

$y = X\beta + e$ Y (۲) یک بردار مشاهدات ($n*1$) است، X یک ماتریس سطوح متغیرهای مستقل $n*k$ است، β یک بردار $k*1$ ثوابت رگرسیونی و e یک بردار $n*1$ خطاهای تصادفی است[۵].

اگر X یک ماتریس $k*k$ باشد، سیستم خطی $y=X\beta+e$ دارای یک حل لیست اسکویر[1] منحصر بفرد است که با رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\hat{\beta} = (X'X)^{-1}X'y \tag{۳}$$

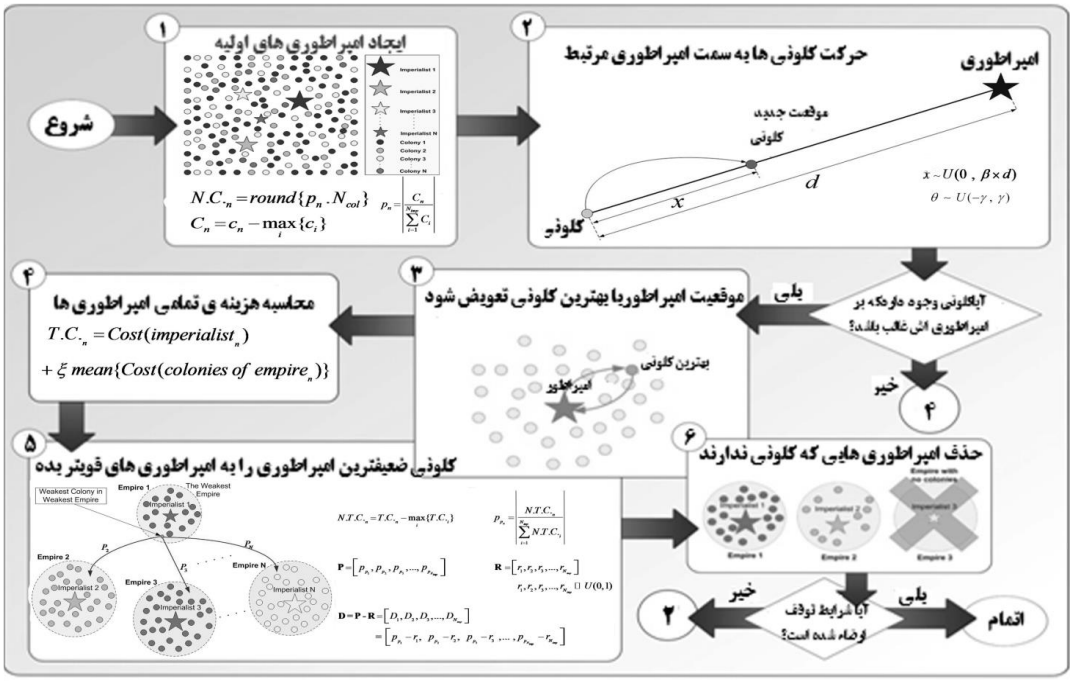
طراحی‌های زیادی برای برازش مدل درجه دوم وجود دارد. محبوب‌ترین این روش‌ها، طراحی مرکب مرکزی[2] (CCD) است. این طراحی شامل نقاط فاکتوریلی (از طراحی 2^qو طراحی 2^{q-k} فاکتوریل جزیی)، نقاط مرکزی و نقاط محوری است [۲۳]. هنگامی که وجود انحناء میان سطوح پارامترها دارای اهمیت باشد، اضافه کردن نقاط بیش‌تر به سطوح عوامل می‌تواند به تعیین دقیق رفتار تابع پاسخ بینجامد. با قراردادن نقاط جدید در طول محوری فضای بین سطوح عوامل، روش طراحی مرکب مرکزی حاصل می‌شود [۱۵]. برای افزایش تأثیر نقاط محوری می‌بایستی این نقاط در فاصله خاصی از نقاط اصلی (نقاط اصطلاحا فاکتوریلی) قرار گیرند. در روش طراحی مرکب مرکزی هر عامل در پنج سطح، محوری پایین، فاکتوریل پایین، مرکزی، فاکتوریل بالا و محوری بالا تغییر داده می‌شوند. ولی باید مد نظر داشت که این روش، با روش پنج سطحی فاکتوریل متفاوت است و در عین حال با تعداد کم‌تری از آزمایش پاسخ های کاملی را ارائه می کند[۵]. در اینجا، با استفاده از نرم افزار دیزاین اکسپرت[3] روش سطح پاسخ برای مدل اجرا شده و نمودارهای آن استخراج شده است.

1) Least square
2) Central Composite design
3) Design Expert 7.0.2

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

الگوریتم رقابت استعماری[۱]

این الگوریتم که در سال ۲۰۰۷ توسط آقای آتش پز ارائه شد، با مدل‌سازی ریاضی فرایند تکامل اجتماعی ـسیاسی، الگوریتمی برای حل مسائل ریاضی بهینه سازی ارائه می‌دهد. از لحاظ کاربرد، این الگوریتم در دسته الگوریتم‌های بهینه سازی تکاملی همچون الگوریتم‌های ژنتیک[۲]، بهینه سازی انبوه ذرات[۳]، بهینه سازی کلونی مورچگان[۴] ، تبرید فلزات شبیه سازی شده[۵] قرار می‌گیرد[۳].



شکل ۱) شماتیک حلقه اصلی الگوریتم رقابت استعماری[۳]

همانند همه الگوریتم‌های قرار گرفته در این دسته، الگوریتم رقابت استعماری نیز مجموعه اولیه‌ای از جواب‌های احتمالی را تشکیل می‌دهد. این جواب‌های اولیه در الگوریتم ژنتیک با عنوان "کروموزوم"، در الگوریتم ازدحام ذرات با عنوان "ذره" و در الگوریتم رقابت استعماری نیز با عنوان "کشور" شناخته می‌شوند. الگوریتم رقابت استعماری با روند خاصی که در ادامه می‌آید، این جواب‌های اولیه (کشورها) را بتدریج بهبود داده و در نهایت، جواب مناسب مساله

1) Imperialist Competitive Algorithm - ICA
2) Genetic Algorithms
3) Particle Swarm Optimization (PSO)
4) Ant Colony Optimization
5) Simulated Annealing

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

بهینه سازی (کشور مطلوب) را در اختیار می‌گذارد. همانند دیگر الگوریتم‌های تکاملی، این الگوریتم نیز با تعدادی جمعیت اولیه تصادفی که هر کدام از آنها یک «کشور» نامیده می‌شوند، شروع می‌شود. تعدادی از بهترین عناصر جمعیت (معادل نخبه‌ها در الگوریتم ژنتیک) به عنوان امپریالیست انتخاب شده و باقیمانده جمعیت نیز به عنوان مستعمره در نظر گرفته می‌شوند. استعمارگران بسته به قدرتشان، این مستعمرات را با یک روند خاص به سمت خود می‌کشند. بروز انقلاب، تغییرات ناگهانی را در ویژگی های اجتماعی سیاسی یک کشور ایجاد می‌کند. در الگوریتم رقابت استعماری، انقلاب با جابجایی تصادفی یک کشور مستعمره به یک موقعیت تصادفی جدید مدلسازی می‌شود. انقلاب از دیدگاه الگوریتمی باعث می‌شود کلیت حرکت تکاملی از گیر کردن در دره های محلی بهینگی نجات یابد که در بعضی موارد باعث بهبود موقعیت یک کشور شده و آن را به یک محدوده بهینگی بهتری می‌برد[۳]. این قسمت مزیت این روش نسبت به سایر الگوریتم‌هاست که در هر مرحله تکرار تمامی کلونی های باقیمانده را در سطح تابع توزیع کرده و احتمال اشتباه در یافتن نقطه بهینه اصلی را کاهش می‌دهد. قدرت کل هر امپراطوری، به هر دو بخش تشکیل دهنده آن یعنی کشور امپریالیست (به عنوان هسته مرکزی) و مستعمرات آن بستگی دارد. در حالت ریاضی، این وابستگی با تعریف قدرت امپراطوری به صورت مجموع قدرت کشور امپریالیست، به اضافه درصدی از میانگین قدرت مستعمرات آن مدل شده‌است. با شکل‌گیری امپراطوری‌های اولیه، رقابت امپریالیستی میان آنها شروع می‌شود. هر امپراطوری که نتواند در رقابت استعماری، موفق عمل کرده و بر قدرت خود بیفزاید (و یا حداقل از کاهش نفوذش جلوگیری کند)، از صحنه رقابت استعماری حذف خواهد شد. بنابراین، بقای یک امپراطوری، وابسته به قدرت آن در جذب مستعمرات امپراطوری‌های رقیب و به سیطره در آوردن آنها خواهد بود. در نتیجه، در جریان رقابت‌های امپریالیستی، بتدریج بر قدرت امپراطوری‌های بزرگ‌تر افزوده شده و امپراطوری‌های ضعیف‌تر حذف خواهند شد. امپراطوری‌ها برای افزایش قدرت خود مجبور خواهند شد موجبات مستعمرات خود را نیز فراهم آورند[۴].

مدل توسعه یافته از برازش داده‌های آزمایشگاهی فرایند پیرولیز کاتالیستی توسط روش سطح پاسخ استخراج شده و ضمن بهینه سازی، به الگوریتم رقابت استعماری خوراک می شود و در نهایت، با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

نتایج و بحث

با استفاده از نرم افزار دیزاین اکسپرت تعداد ۱۳ آزمون برای به دست آوردن میزان بازدهی سوخت مایع و گاز طبق جدول (۲) طرح ریزی شد. طبق این طرح‌ریزی، دو متغیر اصلی مورد مطالعه در این آزمایش یعنی دمای رآکتور و وزن کاتالیست هر کدام در سه سطح طبقه بندی شدند و در نتیجه، دو متغیر پاسخ بازدهی سوخت مایع و بازدهی سوخت گازی از نتایج آزمایش ها به دست آمد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

جدول ۱) سطوح کدگذاری شده و واقعی متغیرها بر اساس طراحی نرم افزار

متغیر	سطح کدگذاری شده متغیر				
	پایین ترین	پایین	مرکز	بالا	بالاترین
	$-\alpha$= -۱/۴۱۴	-۱	۰	+۱	$+\alpha$= +۱/۴۱۴
دمای رآکتور (درجه سانتی گراد)(X_1)	۴۷۹	۵۰۰	۵۵۰	۶۰۰	۶۲۱
مقدار کاتالیست (گرم)(X_2)	۰/۹	۱	۱/۲۵	۱/۵	۱/۶

جدول ۲) مقادیر بازدهی سوخت ها حاصل از آزمایش در سطوح متغیرهای درگیر در مساله بر اساس طراحی نرم افزار

آزمایش ها	دما (درجه سانتی گراد)	وزن کاتالیست (گرم)	بازدهی سوخت مایع (درصد)	بازدهی سوخت گاز (درصد)
۱	۵۰۰	۱	۱۵/۰۹	۲۶/۹۴
۲	۶۰۰	۱	۱۹/۴۲	۲۹/۰۹
۳	۵۰۰	۱/۵	۲۰/۵۷	۲۷/۳۴
۴	۶۰۰	۱/۵	۲۴/۱۸	۲۲/۴۵
۵	۴۷۹	۱/۲۵	۱۸/۲۳	۱۸/۳۸
۶	۶۲۱	۱/۲۵	۲۳/۵۷	۲۵/۲۶
۷	۵۵۰	۰/۹	۲۷/۷۵	۳۱/۹۸
۸	۵۵۰	۱/۶	۲۸/۸۳	۳۱/۰۴
۹	۵۵۰	۱/۲۵	۲۹/۰۴	۲۸/۴۴
۱۰	۵۵۰	۱/۲۵	۲۹/۲۵	۲۹/۰۷
۱۱	۵۵۰	۱/۲۵	۲۶/۶۷	۳۰/۳۳
۱۲	۵۵۰	۱/۲۵	۳۰/۱۸	۲۷/۶۳
۱۳	۵۵۰	۱/۲۵	۲۶/۶۹	۳۰/۴۲

با استفاده از تحلیل‌های ANOVA و بر اساس مدل برازش شده بـه داده‌هـای آزمایشـگاهی مشـاهده شـده محققـین پیشین، مدل توسعه یافته زیر به منظور بهبود بازدهی سوخت مایع و گاز به دست آمد.

مدل توسعه یافته کدگذاری شده فیت شده به داده‌های آزمایشگاهی سوخت مایع:

$$Y_1=+29.17+1.94*X_1+0.38*X_2-0.18*X_1*X_2-4.13*X_1^2-0.44*X_2^2+2.18*X_1^2*X_2-4.78*X_1^2*X_2^2 \quad (۴)$$

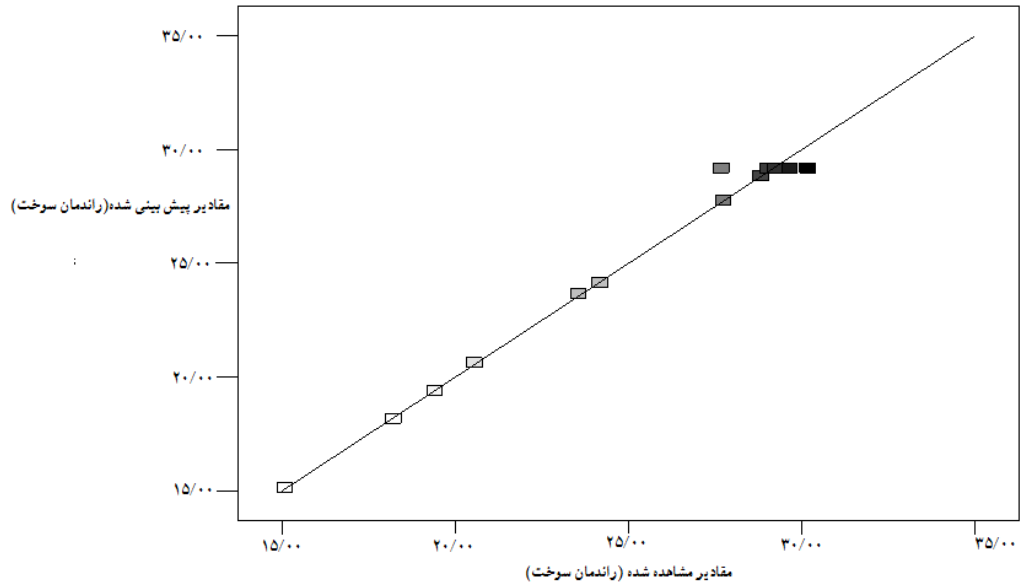
مدل توسعه یافته واقعی فیت شده به داده‌های آزمایشگاهی سوخت مایع :

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

$$Y_1 = -1991.2+7.19*Temp+1102.54*weight-3.848*Temp*weight-0.006*Temp^2-15.54*weight^2 +0.003*Temp^2 *weight-0.003*Temp^2* weight^2 \quad (۵)$$

جدول ۳) تحلیل ANOVA برای راندمان سوخت مایع

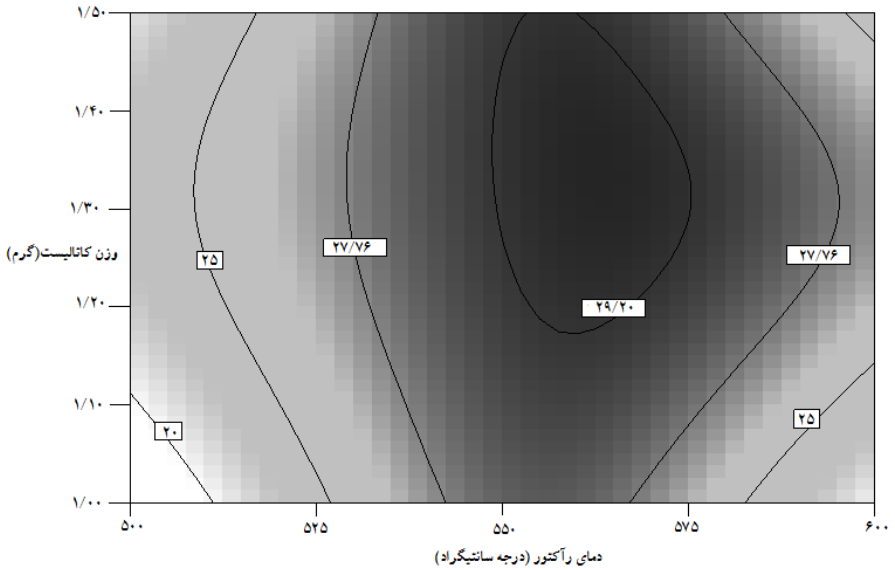
منبع خطا	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F Value	p-value Prob > F	
مدل	۳۰۶/۳۳	۷	۴۳/۷۶	۶۲/۴۷	۰/۰۰۰۱	معنادار
دمای رآکتور	۳۰	۱	۳۰	۴۲/۸۳	۰/۰۰۱۲	
وزن کاتالیست	۰/۵۸	۱	۰/۵۸	۰/۸۳	۰/۴۰۳۴	
باقی مانده	۳/۵	۵	۰/۷			
نقصان برازش	۰/۰۱۹	۱	۰/۰۱۹	۰/۰۲۲	۰/۸۹۰۲	غیرمعنادار
خطای خالص	۳/۴۸	۴	۰/۸۷			



شکل۲) نمودار میزان انحراف معیار نتایج آزمایشگاهی با مدل توسعه یافته برای سوخت مایع

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

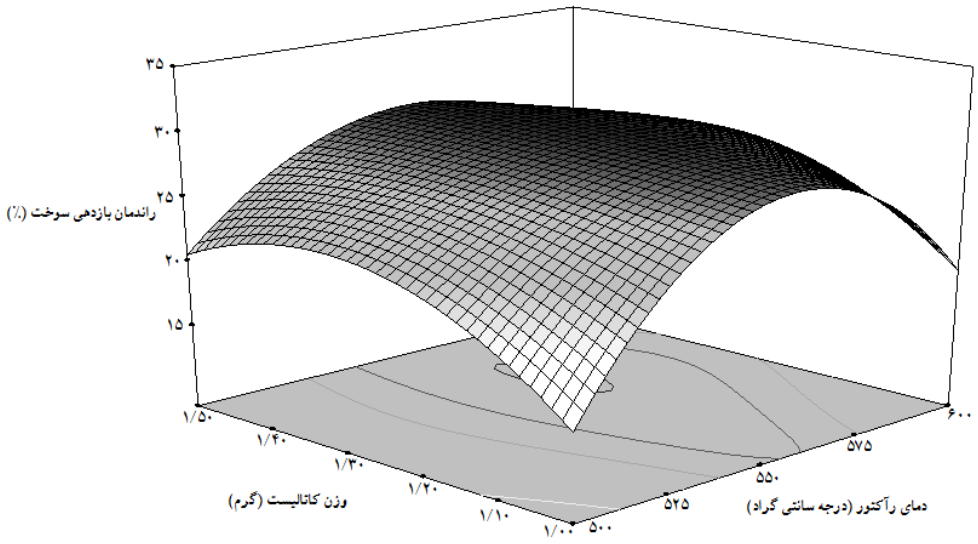
میزان انحراف معیار نتایج آزمایشگاهی با مدل توسعه یافته برای سوخت مایع در شکل (۲) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۲) قابل مشاهده است، با اصلاح و توسعه مدل بدست آمده محققین پیشین، میزان انحراف معیار(R^2) بهبود چشم‌گیری داشته است و به ۹۸/۸ درصد رسیده است. این میزان انحراف معیار حاکی از بهبود راندمان فرایند تبدیل است که تولید محصولات با کیفیت‌تری را منجر خواهد شد.



شکل ۳) مقایسه کانتورهای راندمان سوخت مایع تحت تاثیر وزن کاتالیست و دمای رآکتور

در شکل (۳) مقایسه کانتورهای راندمان سوخت مایع تحت تاثیر وزن کاتالیست و دمای راکتور نشان داده شده است. این شکل نمایانگر این موضوع است که می‌توان با هدایت وکنترل دمای راکتور مربوطه جهت رسیدن به تولید محصولات مطلوب امیدوار شد، هر چند اثرگذاری مثبت میزان کاتالیزور استفاده شده در روند بهبود بازده سوخت مایع انکارناپذیر است. به عنوان مثال، زمانی که میزان کاتالیزور بکار گرفته شده ۱/۱ و دمای راکتور ۵۰۸ است، میزان بازده محصول مایع ۲۰ خواهد بود که دلیل این امر عدم تامین انرژی کافی جهت فرایند شکست کاتالیزوری توسط دمای راکتور است. این در حالی است که وقتی دمای راکتور استفاده شده به حدود ۵۶۱ می‌رسد، با این میزان دما انرژی کافی جهت فعالسازی سایت‌های کاتالیزور به منظور فرایند تجزیه تامین شده است. از این‌رو، بازده سوخت مایع به حالت مطلوب و بهینه خود خواهد رسید.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]



شکل ۴) شکل سه بعدی اثرات دمای راکتور و وزن کاتالیزور در بهبود بازده سوخت مایع

شکل سه بعدی نتایج بدست آمده برای مدل بازده سوخت مایع با توجه به پارامترهای عملیاتی دمای راکتور و وزن کاتالیزور در شکل (۴) نشان داده شده است. در این شکل، تاثیر بیش‌تر درجه حرارت راکتور مربوطه نسبت به وزن کاتالیزور در بهبود بازده محصولات سوخت مایع قابل توجه است. در درجه حرارت پایین، بازده کم سوخت مایع مشاهده می‌گردد در حالی که با روند صعودی درجه حرارت راکتور، ارتقای بازده سوخت مایع دیده می‌شود که این امر با تاثیر و نقش درجه حرارت راکتور با تامین انرژی لازم برای فعالسازی سایت‌های فعال کاتالیزور به منظور فرایند شکست کاتالیزوری قابل توجیه است. به عبارتی دیگر، تامین انرژی به واسطه دمای راکتور برای فعالیت و اثرگذاری کاتالیزور در روند فرایند تبدیل (بهبود کیفیت سوخت مایع) علت سیر افزایشی بازده محصول مایع در شکل مربوطه است. از آنجایی که افزایش دمای راکتور بر فعالیت و عملکرد کاتالیزور اثر منفی و نامطلوب دارد، لذا همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، زمانی که دمای پیرولیز به میزان قابل توجهی بالارود، بازده مایع دچار روند کاهشی قابل توجهی می‌شود. به عنوان نمونه، در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد و وزن کاتالیزور ۱ گرم مقدار سوخت مایع تولیدی کاهش چشمگیری داشته و به بازده ۱۹/۴۲ درصد رسیده است. راندمان ۳۰/۲۲ درصد در شرایط بهینه در دمای ۵۶۱/۵ درجه سانتی‌گراد و وزن کاتالیزور ۱/۳۳ گرم به دست می آید.

مدل توسعه یافته ارائه شده توسط نرم افزار به صورت کدگذاری شده برای مقادیر راندمان سوخت گاز در رابطه (۶) آورده شده است:

$$Y_2=+29.18+2.43*X_1-0.33*X_2-1.76*X_1*X_2-3.73*X_1^2+1.11*X_2^2-1.23*X_1^2*X_2-3.12*X_1*X_2^2 \quad (۶)$$

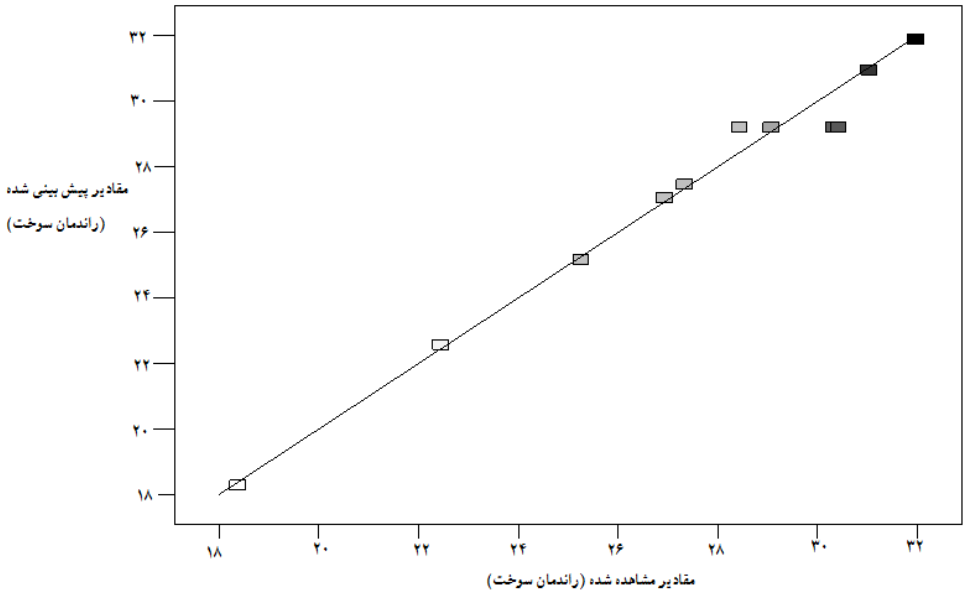
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

مدل توسعه یافته ارائه شده توسط نرم افزار به صورت واقعی برای مقادیر راندمان سوخت گاز در رابطه (۷) اورده شده است:

$$Y_2=+1083.6-2.4*Temp-1934.3*weight+4.5*Temp*weight+0.0009*Temp^2+566.5*weight^2-0.001*Temp^2*weight-0.99*Temp*weight^2 \quad (۷)$$

جدول۴) تحلیل ANOVA برای راندمان سوخت گاز

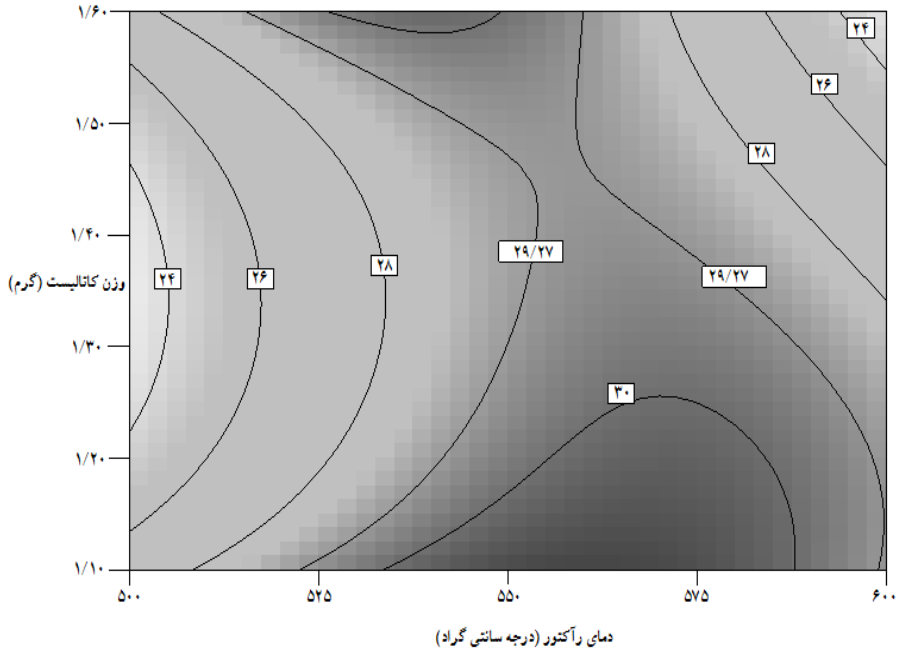
منبع خطا	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F Value	p-value Prob > F	
مدل	۱۶۳/۱	۷	۲۳/۳	۱۹/۷۱	۰/۰۰۲۳	معنادار
دمای رآکتور	۲۳/۶۷	۱	۲۳/۶۷	۲۰/۰۲	۰/۰۰۶۶	
وزن کاتالیست	۰/۴۴	۱	۰/۴۴	۰/۳۷	۰/۵۶۷۷	
باقی مانده	۵/۹۱	۵	۱/۱۸			
نقصان برازش	۰/۰۸۸	۱	۰/۰۸۸	۰/۰۶۱	۰/۸۱۷۷	غیرمعنادار
خطای خالص	۵/۸۲	۴	۱/۴۶			



شکل ۵) نمودار میزان انحراف معیار نتایج آزمایشگاهی با مدل توسعه یافته (سوخت گازی)

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

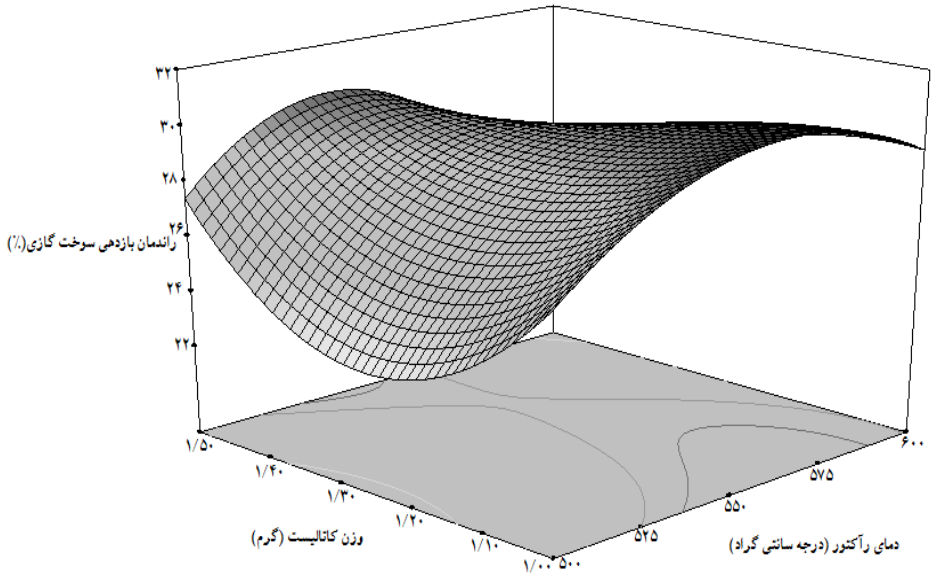
در شکل (۵) به وضوح قابل مشاهده است که اصلاح مدل توسعه یافته مدل محققین پیشین سبب بهبود بازده سوخت گازی خواهد شد و به همین دلیل، انتظار می‌رود محصول گازی باکیفیتی با توجه به نتایج آزمایشگاهی به دست آید. ضریب همبستگی برای بازده سوخت گازی با توجه به مدل توسعه یافته، ۹۸/۸ درصد است.



شکل ۶) مقایسه کانتورهای راندمان سوخت گاز تحت تاثیر وزن کاتالیست و دمای راکتور

شکل (۶) مقایسه کانتورهای راندمان سوخت گاز تحت تاثیر وزن کاتالیست و دمای راکتور را نشان می‌دهد. این شکل حاکی از نقش درجه حرارت راکتور و میزان کاتالیزور بکار گرفته در روند بهبود سوخت گازی است هرچند اثرگذاری درجه حرارت راکتور در بازده سوخت گازی نسبت به سوخت مایع بسیار کم جلوه می‌نماید. به عنوان مثال، برای سوخت گازی در دمای راکتور ۵۰۸ و وزن کاتالیزور ۱/۳۵ بازده سوخت بدست آمده ۲۴ است این در حالی است که همین میزان درصد بازدهی سوخت گازی در دمای راکتور ۵۸۹ و وزن کاتالیزور ۱/۵۸گرم نیز قابل مشاهده است.

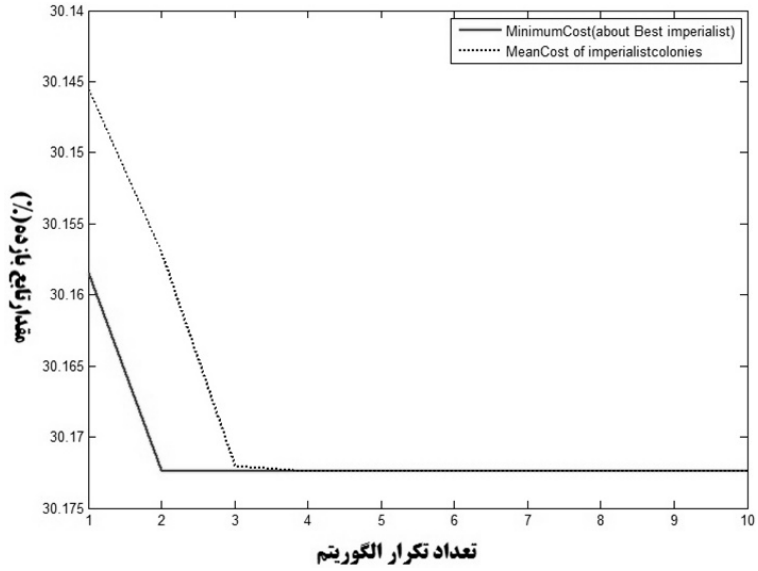
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]



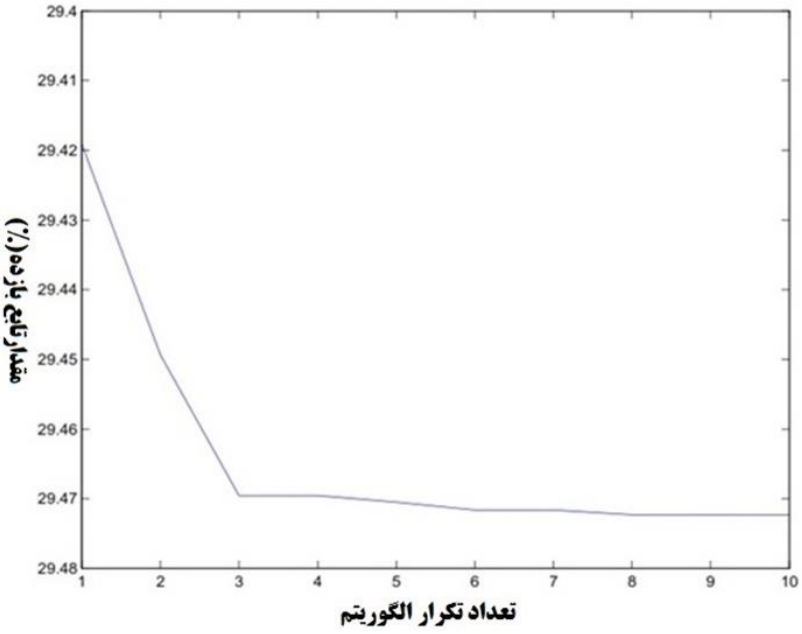
شکل۷) شکل سه بعدی اثرات دمای راکتور و وزن کاتالیزور در بازده سوخت گازی

شکل سه بعدی اثرات دمای راکتور و وزن کاتالیزور در بازده سوخت گازی در شکل (۷) نشان داده شده است. همان‌طور در این شکل نمایان است، نقش درجه حرارت در بهبود روند تولید محصولات گازی قابل توجه و حائز اهمیت است. هرچند بازده سوخت گازی و مایع تابع اثر درجه حرارت راکتور مربوطه می‌باشند ولی برای هر دو سوخت مورد نظر این اثرگذاری متفاوت است به گونه‌ای که در درجه حرارت بالای راکتور، بازده بالای سوخت گازی و بازده پایین سوخت مایع به دست می‌آید. در شکل (۷) افزایش قابل ملاحظه بازده سوخت گازی زمانی که افزایش چشمگیر در روند درجه حرارت راکتور دیده می‌شود، مورد توجه است. البته نباید به اثرگذاری کاتالیزور در بهبود فرایند تبدیل بی‌توجه بود. به عنوان مثال، زمانی که دمای راکتور ۵۵۴ و وزن کاتالیزور ۱/ ۳۸ است، میزان بازدهی سوخت گازی ۲۹/۲۷ است. این در حالی است که در دمای راکتور ۵۰۹ و وزن کاتالیزور ۱/۳۶ میزان بازدهی محصول گازی ۲۴ درصد است ولی با این وجود، نباید به روند افزایش بیش از حد دمای راکتور بی‌توجهی نمود. زیرا درجه حرارت بالای پیرولیز می‌تواند بر روی فعالیت کاتالیست اثر منفی بگذارد و به جای فعال‌سازی سایت‌های کاتالیزور سبب تخریب آن شود و در نتیجه، محصول گازی را به کیفیت نامطلوب سوق دهد. مقدار بهینه بازدهی ۳۲/۰۷ در شرایط دمای ۵۶۰/۷۴ درجه سانتی‌گراد و وزن کاتالیست ۱ گرم توسط نرم افزار تعیین شد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]



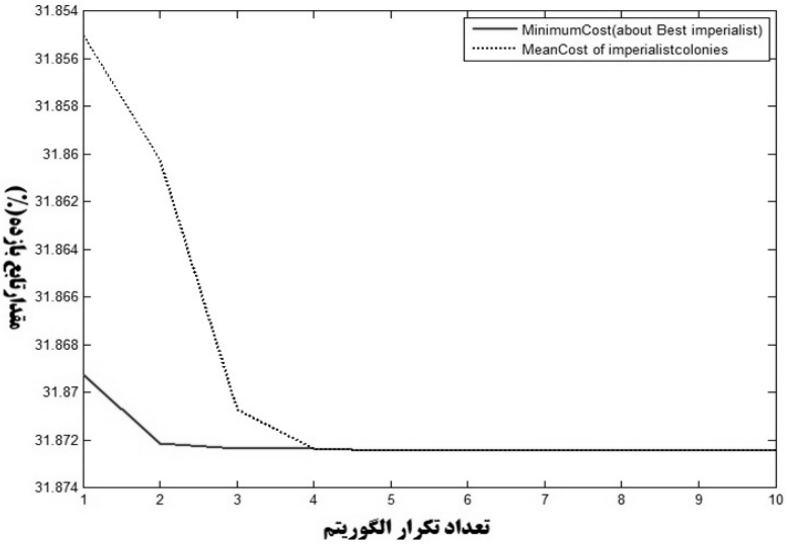
شکل ۸) همگرایی مقدار نهایی راندمان سوخت مایع در الگوریتم رقابت استعماری



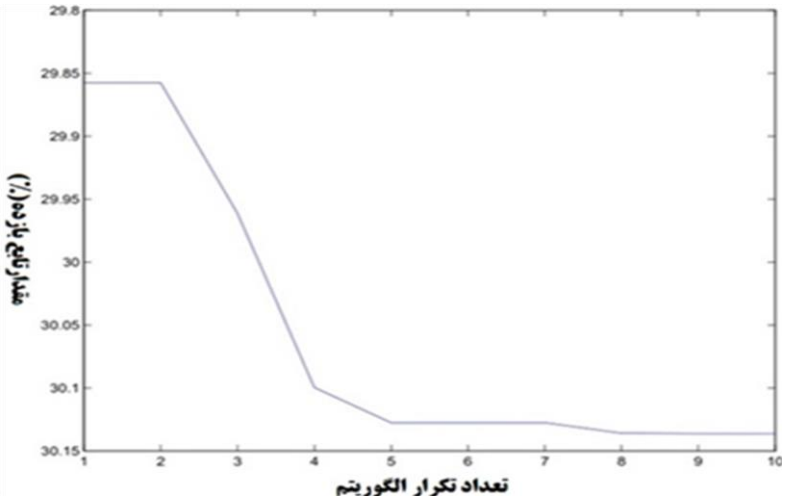
شکل ۹) همگرایی مقدار نهایی راندمان سوخت مایع در الگوریتم بهینه سازی انبوه ذرات

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

شکل (۸)همگرایی مقدار نهایی راندمان سوخت مایع در مقدار ۳۰/۱۷ را بعد از ۴ تکرار برای الگوریتم رقابت استعماری نشان می‌دهد. مقدار اصلی راندمان بهینه‌ای که توسط نرم افزار دیزاین اکسپرت معرفی شده ۳۰/۲۲ است که در شرایط دمایی ۵۶۱/۹۲ درجه سانتی‌گراد و وزن کاتالیست ۱/۳۳ گرم رخ می‌دهد. در شکل (۹) همگرایی این روش در الگوریتم بهینه سازی انبوه ذرات (PSO) نشان داده شده است. الگوریتم بهینه سازی انبوه ذرات بعد از ۸ بار تکرار با دقت کم‌تر در یافتن پاسخ صحیح مدل یعنی در مقدار ۲۹/۴۷ راندمان همگرا می شود.



شکل ۱۰) همگرایی مقدار نهایی راندمان سوخت گاز در الگوریتم رقابت استعماری



شکل ۱۱) همگرایی مقدار نهایی راندمان سوخت گاز در الگوریتم بهینه سازی انبوه ذرات

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

در شکل (۱۰) نیز همگرایی مقدار نهایی راندمان سوخت گاز را در الگوریتم استعماری در مقدار ۳۱/۸۷ درصد بعد از ۴ بار تکرار می‌بینیم. این مقدار بهینه توسط نرم افزار دیزاین اکسپرت ۳۲/۰۷ درصد در شرایط دمایی ۵۶۰/۷۴ درجه سانتی‌گراد و وزن کاتالیست ۱ گرم پیش بینی شده است. مقدار بهینه دوگانه که در آن هر دو سوخت مقدار راندمان بیشینه دارند، در شرایط دمایی ۵۵۵/۹۴ درجه سانتی‌گراد و ۱ گرم کاتالیست برای هر دو راندمان پیش بینی شده است به طوری که در این شرایط هر دو راندمان بالاترین مقدار را به نسبت سایر شرایط خواهند داشت و به عنوان بهترین محدوده انجام پیرولیز توصیه می‌شود. همان‌گونه که در شکل (۱۱) نشان داده شده است، در الگوریتم بهینه سازی انبوه ذرات بعد از ۸ بار تکرار مقدار نهایی ۳۰/۱۲ درصد به عنوان نتیجه بهینه سازی الگوریتم به دست می‌آید.

جدول ۵) مقایسه اختلاف مقادیر بهینه روش‌های سطح پاسخ، الگوریتم رقابت استعماری و الگوریتم بهینه‌سازی ذرات

نوع سوخت	بیشینه راندمان	راندمان بهینه روش سطح پاسخ	راندمان بهینه الگوریتم رقابت استعماری	راندمان بهینه الگوریتم بهینه سازی انبوه ذرات
مایع	۳۰/۱۸	۳۰/۲۲	۳۰/۱۷	۲۹/۴۷
گازی	۳۱/۹۸	۳۲/۰۷	۳۱/۸۷	۳۰/۱۲

همان‌طور که در جدول نشان داده شده است، الگوریتم رقابت استعماری با تعداد تکرار کمتر و دقت بالاتر نتایج بهتری را از الگوریتم بهینه سازی انبوه ذرات ایجاد کرده است.

نتیجه گیری

با توجه به حساسیت بالای موجود در موضوع استفاده بهینه از ضایعات پلاستیکی و با نگاهی به آینده رو به پایان سوخت‌های فسیلی، استفاده بهینه از این مواد تجزیه ناپذیر در محیط زیست مورد توجه است. امروزه راهکارهای مختلفی برای استفاده از مقدار انرژی باقیمانده در این ضایعات به کار می‌بندند چرا که با تخمین حدودی از مقدار بسیار فراوان آن در طبیعت می‌توان به عنوان منبع انرژی قابل اطمینانی از آن نام برد. روش پیرولیز سوختی یکی از روش‌های پرکاربرد و بهینه در تبدیل این نوع ماده به انرژی محسوب می‌شود. در این بین، روش‌های بسیاری برای پیدا کردن سطوح بهینه جهت ترسیم و پیش بینی بهترین مقادیر راندمان سوخت استفاده شده است. روش سطح پاسخ با استفاده از مدل‌های آماری پیشرفته یکی از روش‌های نوین و قدرتمند در تحلیل و یافتن نقاط بهینه پاسخ با استفاده از نمودارهای دو و سه بعدی است که رشد فزاینده استفاده از آن را نمی‌توان نادیده گرفت. همچنین استفاده از الگوریتم‌های جدید در یافتن نقاط بهینه یکی از

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

راهکارهای مناسب در تخمین و تعیین سطوح کارآمد است. الگوریتم رقابت استعماری یکی دیگر از روش‌های دقیق و قوی در مقایسه با الگوریتم‌های ژنتیک و کلونی مورچه است. در این تحقیق، مقایسه این دو روش در یافتن نقطه بهینه با توجه به مدل توسعه یافته بحث شد که مقدار بهینه راندمان برای سوخت مایع ۳۰/۲۲ درصد و برای سوخت گازی ۳۲/۰۷ درصد از طریق روش سطح پاسخ به دست آمد. برای هر دو روش، شرایط بهینه به ترتیب برای سوخت مایع و گاز مقدار وزن کاتالیست ۱/۳۳ و ۱ گرم و دمای راکتور ۵۶۱/۹۲ و ۵۶۰/۷۴ درجه سانتی‌گراد به دست آمد. مقدار راندمان بهینه برای سوخت مایع در روش سطح پاسخ ۳۰/۲۲ درصد و الگوریتم رقابت استعماری ۳۰/۱۷ درصد است. این مقدار برای سوخت گازی در روش سطح پاسخ ۳۲/۰۷ درصد و الگوریتم رقابت استعماری ۳۱/۸۷ درصد است. با اینکه اساس و مبنای این دو روش کاملا متفاوت است، ولی نزدیکی دو مقدار پاسخ نشانگر از قدرتمندی دو روش در ارائه پاسخ نهایی دقیق و استفاده از آنها به عنوان ابزار مناسبی جهت پیش‌بینی شرایط بهینه پاسخ خواهد بود. همچنین پاسخ های بهینه الگوریتم رقابت استعماری با الگوریتم بهینه سازی انبوه ذارت مقایسه گردید که در نتیجه آن، الگوریتم رقابت استعماری با تعداد تکرار کم‌تر و دقت بیش‌تر به جواب بهینه همگرا شد.

منابع

[1] Achyut, K., and Panda, R.K. 2013. "*Experimental Optimization of Process for the Thermo-catalytic Degradation of Waste Polypropylene to Liquid Fuel".* Advances in Energy Engineering (AEE), Vol. 1. Issue 3. pp. 145-149.

[2] Achyut, K. P. 2011. " *Studies on process optimization for production of liquid fuels from waste plastics".* PhD Thesis. Department of Chemical Engineering National Institute of Technology Rourkela.769008 (ORISSA). Pp. 24-29.

[3] Atashpaz-Gargari, E. and C. Lucas, "*Imperialist Competitive Algorithm: An Algorithm for Optimization Inspired by Imperialist Competition*", IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC 2007), pp. 4661-4667.

[4] Bo, X., Wen-Jing. G. 2014. "*Imperialist Competitive Algorithm*". Intelligent Systems Reference Library, Vol. 62, pp. 203-209.

[5] Bradly, N. 2007."*The response surface methodology".* Master of Science thesis. Department of Mathematical Sciences Indiana University South Bend. pp. 47-56.

[6] Cha, W.S., Kim SB., McCoy, B.J. 2002. "*Study of polystyrene degradation using continuous distribution kinetics in a bubbling reactor*". Korean Journal of Chemical Engineering, vol.19, pp. 239–245.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

[7] Chan,J.H., Balke, ST. 1997." *The thermal degradation kinetics of polypropylene. Part III, Thermo gravimetric analyses*". Polymer Degradation and Stability, vol. 57, pp.135–149.

[8] Dolezal, Z., Pacakova, V., Kovarova, J. 2001."*The effects of controlled aging and blending of low and high-density polyethylene polypropylene and polystyrene on their thermal degradation studied by Pyrolysis gas chromatography*", Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, vol. 57, pp.177-9.

[9] Edwin Raj, R., Kennedy, B.C. 2013. "*Optimization of process parameters in flash pyrolysis of waste tyres to liquid and gaseous fuel in a fluidized bed reactor",* Energy Conversion and Management, vol. 67. pp. 145–151.

[10] Gaurav,M., Arunkumar, K.N., Lingeowda. 2014. "*Conversion of LDPE plastic waste into liquid fuel by thermal degradation".* International Journal of Mechanical and Production Engineering, Vol. 2, pp. 2020-2092.

[11] Istadi, S. Suherman, Luqman Buchori . 2010. "*Optimization of Reactor Temperature and Catalyst Weight for Plastic Cracking to Fuels Using Response Surface Methodology",* Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis. Vol. 5, pp. 103 - 111.

[12] Jeya, M., Valli, V.P., Gnanavel, G., Thirumarimurugan, M. 2012. "*Alternate Fuel from Synthetic Plastics Waste – Review*". International of pharmaceutical and chemical sciences, Vol.1, pp. 720-724.

[13] Karagoz, S., Karayildirim T., Ucar S., Yuksel M., Yanik J. 2003." *Liquefaction of municipal waste plastics in VGO over acidic and non-acidic catalysts*", Fuel. vol. 82, pp. 415-423.

[14] Karagoz, S., Yanik, J., Uc¸ ar.S. Saglam, M., Song, C. 2003. "*Catalytic and thermal degradation of high-density polyethylene in vacuum gas oil over non-acidic and acidic catalysts*", Applied Catalysis A General, vol. 242, pp. 51–62.

[15] Karimi, P., Abdollahi, H., Aslan, N., Noaparast, M., Shafaei, S. Z. 2011. *"Application of Response Surface Method and Central Composite Design for Modeling and Optimization of Gold and Silver Recovery in Cyanidation Process"*. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, vol. 32, pp. 1–16.

[16] Khabbazi, A., Atashpaz-Gargari, E., Lucas, C. 2009. "*Imperialist Competitive Algorithm for minimum bit error rate beam forming*", Int. J. Bio-Inspired Comput., 1(1/2), pp. 125-133.

[17] Lee, S.Y. 2001."*Catalytic degradation of polystyrene over natural clinoptilolite zeolite*", Polymer Degradation and Stability, vol. 74, pp. 297–305.

[18] Lin, Y.H., Yang, M.H. 2005." *Catalytic reactions of post-consumer polymer waste over fluidized cracking catalysts for producing hydrocarbons"*, J Mol Catal A-Chem.vol, 231.pp. 113-122.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

[19] Lopez, A. I., de Marco, B.M., Caballero, M.F. 2011." *Influence of time and temperature on Pyrolysis of plastic waste in a semi-batch reactor*, vol. 10. Pp. 478-485.

[20] Lopez, A. I., de Marco, B.M., Caballero, M.F., Laresgoiti, A., Adrados, A. 2011." *Pyrolysis of municipal plastic wastes II: Influence of raw material composition under catalytic conditions",* Waste Management. Vol, 31. Issues 9–10, pp.1973–1983.

[21] Manos, G., Isman, Y., Papayannakos, Y.N., Gangas, N.H. 2001. "*Catalytic cracking of polyethylene over clay catalysts Comparison with an ultra-stable Y Zeolite*", Industrial & Engineering Chemistry Research. Vol, pp. 2220–2225.

[22] Moinuddin, S., Rashid, M., Rahman, M. 2012. "*Polystyrene (PS) waste plastic conversion into aviation /kerosene category of fuel by using fractional column distillation process"*. International journal of energy and environment, Volume. 3, Issue 6, pp.871-880.

[23] Montgomery, D.C. 2001. "*Design and Analysis of Experiments*", 5th ed. John Wiley & Sons, New York, USA, pp. 427–510.

[24] Mordi, R.C., Fields, R., Dwyer, J. 1994. "*Thrombolysisoflow density polyethylene catalyzed by zeolites*". Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, vol. 29, pp.45-48.

[25] Nemati, K., Shamsuddin, S.M., Saberi Kamarposhti, M. 2011." *Using Imperial Competitive Algorithm for Solving Traveling Salesman Problem and Comparing the Efficiency of the Proposed Algorithm with Methods in Use*", Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 5(10), pp. 540-543.

[26] Ohkita, H., Nishiyama, R., Tochihara, Y., Mizushima, T., Kakuta, N., Morioka, Y. 1993. "*Acid properties of silica-alumina catalysts and catalytic degradation of polyethylene*". Industrial & Engineering Chemistry Research, vol. 32, pp. 3112–3116.

[27] Onu, P., Vasile, C., Ciocılteu, S., Iojoiu, S., Darie, H. 1999. "*Thermal and catalytic decomposition of polyethylene and polypropylene*". Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, vol. 49, pp.145–153.

[28] Rajabioun, R., Atashpaz-Gargari, E., Lucas, C. 2008. "*Colonial Competitive Algorithm as a tool for Nash equilibrium point achievement*", Lect. Notes Comput. Sci., 5073, pp. 680-695.

[29] Sachin Kumar, R.K. 2014. "*Optimization of process parameters by response surface methodology (RSM) for catalytic pyrolysis of waste high-density polyethylene to liquid fuel"*. Journal of Environmental Chemical Engineering, Vol. 2, Issue 1.pp. 115–122.

[30] Sakata, Y., Uddin, M.A. 1999. "*Degradation of polyethylene and polypropylene into fuel oil by using solid acid and non-acid catalysts*". Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, vol. 51, pp. 135–155.

[31] Seo, Y.H., Lee, K.H., Shin, D.H. 2003." *Investigation of catalytic degradation of high-density*

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

polyethylene by hydrocarbon group type analysis". J Anal Appl Pyrol, vol, 70.pp. 383-398.

[32] Serrano, D., Aguado, J.M. Escola. 2000. "*Catalytic conversion of polystyrene over HMCM-41, HZSM-5and amorphous SiO2–Al_2O_3: comparison with thermal cracking"*, Applied Catalysis B: Environmental, Vol 25, Issues 2–3.pp. 181-189.

[33] UNEP. 2009. "*Converting waste plastics into resource Compendium of technologies in United Nations Environment Program*". Osaka. Pp. 54-59.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]