

پیرولیز لاستیک‌های فرسوده با گرمایش القایی و بهینه‌سازی فرآیند از روش سطح پاسخ

Pyrolysis of Worn Tires by Induction Heating and Optimization of This Process Using Response Surface Methodology

چکیده

یکی از راهکارهایی که برای مدیریت بحران لاستیک‌های فرسوده اتخاذ می‌شود، پیرولیز لاستیک فرسوده و تولید سوخت مایع از آن است که همواره با چالش‌هایی از جمله نیاز به خرد کردن لاستیک‌ها به ابعاد کوچک و خارج کردن سیم‌های فولادی موجود در لاستیک‌ها همراه است؛ بنابراین طراحی راکتوری کارآمد با هدف برطرف کردن چالش‌های ذکر شده و بهینه‌سازی پارامترهای اثرگذار جهت دستیابی به حداکثر سوخت تولیدی، یکی از مهم‌ترین اقدامات لازم در پیرولیز لاستیک‌های فرسوده در مقیاس صنعتی است. در این راستا راکتوری نوین که در آن از سیستم گرمایش القایی برای پیرولیز لاستیک‌های فرسوده استفاده شده‌است، طراحی و ساخته شد. مهم‌ترین پارامترهای اثرگذار بر افزایش تولید سوخت شامل دما، جرم لاستیک ورودی به راکتور، دبی گاز نیتروژن، تعداد مفتول‌های فولادی موجود در راکتور و اندازه ذرات لاستیک ورودی به راکتور بودند. این پارامترها در راستای به‌دست آوردن مقدار بیشینه سوخت تولیدی، به‌کمک مدلسازی فرآیند به روش سطح پاسخ (Response Surface Methodology) بهینه‌سازی شدند. نتایج نشان داد که میزان بیشینه راندمان سوخت تولیدی، در دمای ۵۷۵ درجه سلسیوس، با تعداد مفتول ۲۰ عدد، در دبی نیتروژن ۲ لیتر بر دقیقه، با جرم ورودی ۲۵۰ گرم و اندازه ذرات ۲۵ سانتیمتر مربع به‌دست آمده و مقدار آن برابر با ۴۱/۶ درصد وزنی است.

کلمات کلیدی: پیرولیز، گرمایش القایی، MSR، مدیریت پسماند، بهینه‌سازی

نوع مقاله: پژوهشی

مرتضی بداغ‌آبادی^۱، فرهاد قادری^۲، امیرحسین سیاح‌زاده^{۳*}

۱- دانش‌آموخته کارشناس‌یار ارشد مهندسی عمران - محیط‌زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

۲- دانشیار گروه مهندسی محیط‌زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

۳- استادیار گروه عمران، دانشکده مهندسی عمران و معماری، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

a.sayahzade@malayeru.ac.ir

ایمیل نویسندگان و عهده‌دار مکاتبات:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۳۰

مقدمه

اشاره کرد (Athanassiades، ۲۰۱۳؛ Jouhara و همکاران، ۲۰۱۸). سیستم‌های متداول پیرولیز لاستیک‌ها از رآکتورهای فولادی و گرمایش از طریق شعله استفاده می‌کنند. در این روش انرژی حرارتی ابتدا به جداره راکتور داده شده و سپس از طریق تماس، از جداره به لاستیک‌ها منتقل می‌شود. از این رو نیاز است تا سیم‌های فولادی موجود در لاستیک‌ها پیش از فرایند خارج شده و لاستیک‌ها برای افزایش سطح تماس تا حد ممکن خرد شوند (Kordoghli و همکاران، ۲۰۱۶). در این روش، انرژی زیادی صرف گرم کردن جداره راکتور شده که آورده‌ای ندارد و همچنین به علت طولانی بودن فرایند، بخش زیادی از انرژی حرارتی از طریق آگزوز محفظه سوخت و تبادل گرمایی با محیط پیرامون تلف می‌شود. عمده هدف صنعت پیرولیز لاستیک‌های فرسوده، استحصال انرژی از این پسماند می‌باشد لذا استفاده از راهکارهای کاهش انرژی مصرفی و هزینه فرایند از مهم‌ترین مسائل نیازمند مطالعه در این صنعت می‌باشد (Laresgoiti و همکاران، ۲۰۰۴؛ Lucia و همکاران، ۲۰۱۳). این تحقیق به منظور برطرف ساختن چالش‌های ذکر شده از سیستم گرمایش القایی برای پیرولیز لاستیک‌های فرسوده، انجام شده است. در یک سیستم گرمایش القایی، با ایجاد یک میدان مغناطیسی در یک سیم‌پیچ، اجسام رسانای موجود در فضای داخلی سیم‌پیچ که در تماس فیزیکی با سیم‌پیچ هم نیستند در معرض یک میدان مغناطیسی قرار می‌گیرند و پدیده‌ای به نام جریان گردابی و شار الکتریسیته در آنها ایجاد می‌شود. این دو پدیده منجر به افزایش دمای سریع در فلزات موجود در سیم‌پیچ شده و منجر به گرم شدن و یا حتی ذوب شدن اجسام رسانا نیز می‌شود (Bodaghabadi و همکاران، ۲۰۲۳). از طرفی می‌دانیم که بسته به نوع لاستیک‌ها، تقریباً ۱۰ تا ۲۰ درصد وزنی لاستیک‌ها را سیم‌های فولادی که رسانا هستند تشکیل می‌دهند. از این رو استفاده از گرمایش القایی برای پیرولیز لاستیک‌های فرسوده با انتقال درونی حرارت

طی برآوردی که در کالیفرنیا انجام شد، مشخص گردید که در سال ۱۹۹۰ مقدار ۲۷ میلیون حلقه لاستیک تبدیل به ضایعات شده است که این میزان در سال ۲۰۰۲ به ۳۴ میلیون حلقه لاستیک رسیده است (Peace و همکاران، ۲۰۰۶). بدیهی است که این مقادیر با رشد جمعیت در سال‌های آینده بیشتر و بیشتر خواهند شد. لاستیک‌ها به دلیل مقاوم بودن نسبت به تجزیه شدن، خاصیت تجمعی بسیار زیادی را از خود در خاکچال‌ها نشان می‌دهند و منجر به پوشش سطح و حجم زیادی از خاکچال‌ها می‌شوند که تجمع این مواد منجر به ایجاد آلودگی در محیط شده و همچنین شانس رخ دادن آتش سوزی‌های اتفاقی که آلودگی بسیار زیادی به همراه خواهند داشت را بالا می‌برند (Juma و همکاران، ۲۰۰۷). اخیراً کشورها راهکارهای مختلفی را برای مهار کردن و به‌کارگیری لاستیک‌های فرسوده انجام داده‌اند، یکی از این روش‌ها برای مقابله با این حجم از زائدات، تبدیل آنها به سوخت‌های مایع، جامد و گازی قابل استفاده در صنایع مختلف می‌باشد. یکی از فرآیندهایی که برای تبدیل لاستیک‌های فرسوده به سوخت‌های جامد، مایع و گازی استفاده می‌شود، فرایند پیرولیز است. پیرولیز یا آذرک افت به معنای حرارت دادن مواد آلی در غیاب اکسیژن می‌باشد تا پیوندهای بین ترکیبات هیدروکربنی موجود شکسته شده و در نهایت، شکل گازها، مایعات قابل سوخت و پسماندهای جامد را به خود بگیرند (Athanassiades، ۲۰۱۳). در پیرولیز لاستیک‌های فرسوده تمامی محصولات تولید شده ارزشمند بوده و دارای کاربرد فراوان در صنعت هستند. پیرولیز لاستیک‌های فرسوده یک فرایند کاملاً گرماگیر بوده و از چالش‌های موجود در این صنعت می‌توان به نیاز به خرد کردن لاستیک‌ها، خارج کردن سیم‌های فولادی و صرف زمان و انرژی زیاد برای انجام فرایند

تغییر نرخ گرمایش در طول آزمایشات، مفتول‌های فولادی به قطر 3 mm و ارتفاع 20 cm در راکتور قرار داده شد. پیش از انجام هر آزمایش ابتدا دمای راکتور تا 500 درجه سانتیگراد افزایش داده شده و 30 دقیقه در این دما نگه‌داشته شد. سپس گرمایش متوقف شده و زمانی که دمای راکتور به 200 درجه سانتیگراد رسید؛ درب آن باز شده و لاستیک‌ها به داخل آن منتقل شدند. سپس برای خارج کردن اکسیژن درون راکتور به مدت 5 دقیقه گاز نیتروژن با دبی 3 لیتر بر دقیقه به درون راکتور فرستاده شد. در انتهای فرایند، پس از رسیدن دمای راکتور به 200 درجه سانتیگراد درب آن باز شده و مواد برای خنک‌سازی و توزین خارج شدند.

۲-۲- پارامترهای مستقل و وابسته

در این پژوهش دما، تعداد مفتول‌های فولادی، جرم لاستیک ورودی به راکتور، اندازه ذرات لاستیک ورودی به راکتور و دبی نیتروژن به‌عنوان پارامترهای مستقل در نظر گرفته شدند. پارامتر وابسته نیز راندمان سوخت مایع تولیدی بود که برای محاسبه آن از رابطه (1) استفاده شد و در آن m_{oil} و m_{tire} به ترتیب جرم سوخت مایع تولید شده و جرم لاستیک ورودی به راکتور بر حسب گرم می‌باشند.

$$R (\%) = \left(\frac{m_{oil}}{m_{tire}} \right) \times 100\% \quad (1)$$

۲-۳- روش طراحی آزمایشات

برای طراحی آزمایش‌ها از روش سطح پاسخ در محیط نرم‌افزار Design Expert 13 استفاده شد (Akbari و همکاران، 2024؛ Ah-madi و همکاران، 2023). در مجموع 50 آزمایش در محدوددهای تعریف شده برای پارامترهای مستقل، طراحی و انجام شد و در هر آزمایش، پارامتر وابسته (راندمان سوخت مایع تولیدی) محاسبه گردید. محدوددهای تعریف شده برای پارامترهای مستقل با توجه

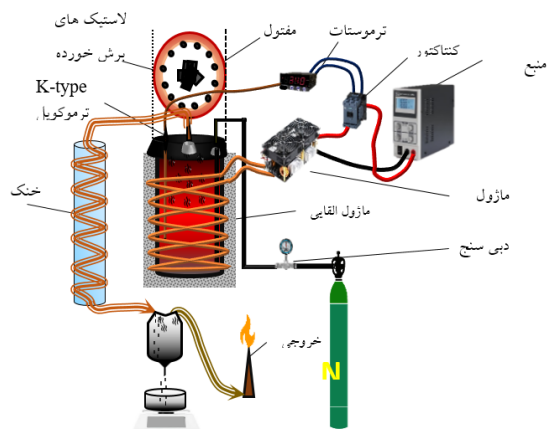
به درون راکتور، منجر به افزایش نرخ گرمایش، کاهش زمان و انرژی مصرفی فرایند می‌شود (Bodaghabadi و همکاران، 2023؛ Mrad و El Samra، 2020؛ Faghieh Nasiri و همکاران، 2025). در این تحقیق به بهینه‌سازی پارامترهای دما، نرخ گرمایش، اندازه ذرات ورودی، دبی گاز حامل و جرم ذرات ورودی با استفاده از روش سطح پاسخ در نرم‌افزار Design Expert 13 پرداخته شده‌است.

مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد و راکتور مورد استفاده

لاستیک‌های فرسوده از خاکچالی در شهرستان آزادشهر جمع‌آوری شده و پس از شست‌وشو در اندازه‌های موردنظر، خرد شدند. برای ساخت سیستم گرمایش القایی از یک ماژول القایی zvs 2500، یک منبع تغذیه 2000 وات و یک کوئل القایی ساخته شده از لوله مسی به قطر 6 mm استفاده شد. از یک استوانه سفالی ساخته شده بر پایه کائولن در مرکز کوئل به‌عنوان محفظه انجام واکنش استفاده شد. برای سنجش و کنترل دما از ترموکوپل تیپ K با پراب 15 mm متصل به ترموستات Sunward استفاده گردید. به این صورت که با رسیدن دمای درون راکتور به دمای تنظیم شده ترموستات، کنتاکتور قرار گرفته در مسیر، جریان ورودی به ماژول القایی را قطع کرده و گرمایش متوقف می‌شود. برای خنک‌سازی بخارات تولیدی و جمع‌آوری سوخت مایع تولیدی، از یک کوئل خنک‌کننده به قطر 10 cm و ارتفاع 90 cm ساخته شده با لوله مسی به قطر 10 mm و در تماس مستقیم با آب استفاده شد. برای خارج کردن اکسیژن اولیه و همچنین انتقال بخارات تولیدی به خنک‌کننده‌ها از جریان نیتروژن با خلوص 99/99% متصل به دبی سنج استفاده گردید. مقدار انرژی حرارتی منتقل شده در گرمایش القایی تابع میزان فلزات موجود در راکتور می‌باشد. از این رو برای تنظیم و

به پیش‌آزمایش‌ها تعیین شد (دما ۳۵۰ تا ۵۷۵°C تعداد مفتول‌های فولادی از ۱۰ تا ۲۰ عدد، جرم لاستیک ورودی از ۱۵۰ تا ۲۵۰g، اندازه ذرات لاستیک ورودی از ۱۰ تا ۲۵ cm² و دبی نیتروژن از ۰/۵ تا ۶/۵ $\frac{lit}{min}$). شرایط هر یک از ۵۰ آزمایش در جدول ۲ نشان داده شده است. پارامترهای دما، تعداد مفتول‌های فولادی، جرم لاستیک ورودی، اندازه ذرات لاستیک ورودی و دبی نیتروژن به ترتیب با نمادهای Temp، SR، Mass، Size و Flow نشان داده شده است. پارامترهای دما، تعداد مفتول‌های فولادی، جرم لاستیک ورودی، اندازه ذرات لاستیک ورودی و دبی نیتروژن به ترتیب با نمادهای Temp، SR، Mass، Size و Flow نشان داده شده‌اند.



شکل ۱. نمای شماتیک سیستم پیرولیز لاستیک‌های فرسوده با استفاده از گرمایش القایی

جدول ۱. نتایج راندمان میزان سوخت مایع تولیدی در طراحی CCD

ردیف	Temp (C°)	SR	Mass (g)	Size (cm ²)	Flow ($\frac{lit}{min}$)	راندمان (%)
۱	۴۲۵	۲۰	۱۵۰	۲۵	۵	۲۲
۲	۵۰۰	۵	۲۰۰	۲۰	۳/۵	۲۵
۳	۵۷۵	۱۰	۲۵۰	۲۵	۵	۲۲/۴
۴	۵۷۵	۲۰	۲۵۰	۱۵	۲	۲۸
۵	۴۲۵	۱۰	۱۵۰	۱۵	۲	۳۷/۳۳
۶	۵۷۵	۱۰	۲۵۰	۱۵	۲	۲۴
۷	۴۲۵	۲۰	۱۵۰	۱۵	۵	۲۳/۳۳
۸	۵۰۰	۱۵	۳۰۰	۲۰	۳/۵	۲۱/۶۶

۹	۵۷۵	۱۰	۱۵۰	۲۵	۲	۲۶/۶۶
۱۰	۵۰۰	۲۵	۲۰۰	۲۰	۳/۵	۳۰
۱۱	۵۷۵	۲۰	۱۵۰	۲۵	۲	۳۰
۱۲	۵۷۵	۱۰	۱۵۰	۲۵	۵	۱۳/۳۳
۱۳	۵۰۰	۱۵	۲۰۰	۲۰	۳/۵	۲۶
۱۴	۵۷۵	۲۰	۱۵۰	۲۵	۵	۱۵/۳۳
۱۵	۴۲۵	۱۰	۲۵۰	۲۵	۵	۱۶
۱۶	۴۲۵	۱۰	۱۵۰	۲۵	۲	۳۶
۱۷	۵۷۵	۲۰	۲۵۰	۱۵	۵	۳۱/۲
۱۸	۶۵۰	۱۵	۲۰۰	۲۰	۳/۵	۲۱
۱۹	۴۲۵	۱۰	۱۵۰	۲۵	۵	۳۲
۲۰	۵۰۰	۱۵	۲۰۰	۲۰	۳/۵	۲۳
۲۱	۵۰۰	۱۵	۲۰۰	۲۰	۳/۵	۲۵
۲۲	۵۰۰	۱۵	۱۰۰	۲۵	۲/۵	۲۶
۲۳	۴۲۵	۲۰	۲۵۰	۲۰	۲	۱۴/۸
۲۴	۴۲۵	۲۰	۱۵۰	۲۵	۲	۲۵/۳
۲۵	۵۷۵	۱۰	۲۵۰	۲۵	۵	۲۲
۲۶	۴۲۵	۱۰	۱۵۰	۲۵	۵	۲۶/۶۶
۲۷	۵۷۵	۱۰	۲۵۰	۲۵	۲	۲۹/۶
۲۸	۵۰۰	۱۵	۲۰۰	۲۰	۳/۵	۲۲/۵
۲۹	۵۷۵	۱۰	۱۵۰	۲۵	۲	۲۱/۳۳
۳۰	۵۷۵	۲۰	۲۵۰	۲۵	۲	۴۱/۶
۳۱	۵۰۰	۱۵	۲۰۰	۲۰	۰/۵	۲۹/۵
۳۲	۴۲۵	۱۰	۲۵۰	۲۵	۲	۱۷/۶
۳۳	۴۲۵	۱۰	۲۵۰	۲۵	۵	۱۷/۶
۳۴	۵۰۰	۱۵	۲۰۰	۲۰	۳/۵	۲۳/۵
۳۵	۵۰۰	۱۵	۲۰۰	۲۰	۳/۵	۲۰
۳۶	۵۷۵	۲۰	۲۵۰	۲۵	۵	۳۲
۳۷	۳۵۰	۱۵	۲۰۰	۲۰	۳/۵	۲۰
۳۸	۵۷۵	۲۰	۱۵۰	۲۵	۵	۱۴/۶۶
۳۹	۵۰۰	۱۵	۲۰۰	۲۰	۳/۵	۱۷
۴۰	۴۲۵	۲۰	۱۵۰	۲۵	۲	۳۴/۶۶
۴۱	۵۰۰	۱۵	۲۰۰	۲۰	۳/۵	۲۵
۴۲	۴۲۵	۲۰	۲۵۰	۲۵	۲	۲۰/۴
۴۳	۵۰۰	۱۵	۲۰۰	۲۰	۳/۵	۲۳

مدل دارد؛ لذا از این مدل می توان برای طراحی استفاده کرد. همچنین با مقایسه بین مقادیر پاسخ پیش بینی شده و نتایج واقعی آزمایشگاهی در شکل ۲ می توان دریافت تطابق خوبی بین راندمان سوخت تولیدی پیش بینی شده توسط مدل و راندمان سوخت تولید شده در آزمایشات وجود دارد.

جدول ۲. نتایج آنالیز واریانس مدل راندمان سوخت تولیدی

منبع	درجات آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F آماره	مقدار p احتمال
مدل	۲۰	۱۹۶۲۳۲	۹۸۱۱۲	۶۲۱۱	> ۰.۰۰۰۱
(X ₁)	۱	۳۷۰	۳۷۰	۲۳۴	۰.۱۳۶۹
(X ₂)	۱	۱۸۲۸	۱۸۲۸	۱۱۵۷	۰.۰۰۲۰
(X ₃)	۱	۲۵۲۸	۲۵۲۸	۱۶۰۰	۰.۰۰۰۴
(X ₄)	۱	۳۰۷۱۴	۳۰۷۱۴	۱۹۴۴۱	> ۰.۰۰۰۱
(X ₅)	۱	۷۴۰۴	۷۴۰۴	۴۶۸۶	> ۰.۰۰۰۱
X ₁ X ₂	۱	۱۲۴۹۸	۱۲۴۹۸	۷۹۱۱	> ۰.۰۰۰۱
X ₁ X ₃	۱	۹۶۱۸۵	۹۶۱۸۵	۶۰۸۸۳	> ۰.۰۰۰۱
X ₁ X ₄	۱	۲۴۵۷	۲۴۵۷	۱۵۵۵	۰.۰۰۰۵
X ₁ X ₅	۱	۲۳۹۸	۲۳۹۸	۱۵۱۸	۰.۰۰۰۵
X ₂ X ₃	۱	۱۱۱۶۰	۱۱۱۶۰	۷۰۶۴	> ۰.۰۰۰۱
X ₂ X ₄	۱	۰۶۴۹۸	۰۶۴۹۸	۰۴۱۱۳	۰.۵۲۶۳
X ₂ X ₅	۱	۳۴۲۴	۳۴۲۴	۲۱۶۷	> ۰.۰۰۰۱
X ₃ X ₄	۱	۹۶۰۵	۹۶۰۵	۶۰۸۰	> ۰.۰۰۰۱
X ₃ X ₅	۱	۳۳۷	۳۳۷	۲۱۳	۰.۱۵۵۱
X ₄ X ₅	۱	۱۰۱۸۹	۱۰۱۸۹	۶۴۴۹	> ۰.۰۰۰۱
X ₁ ²	۱	۱۹۸۲	۱۹۸۲	۱۲۵۵	۰.۰۰۱۴
X ₂ ²	۱	۲۹۶۸	۲۹۶۸	۱۸۷۸	۰.۰۰۰۲
X ₃ ²	۱	۰۰۶۶۲	۰۰۶۶۲	۰۰۴۱۹	۰.۸۳۹۲
X ₄ ²	۱	۰۳۱۶۸	۰۳۱۶۸	۰۲۰۰۵	۰.۶۵۷۶
X ₅ ²	۱	۰۸۳۹۸	۰۸۳۹۸	۰۵۳۱۶	۰.۴۷۱۸
باقیمانده	۲۹	۴۵۸۲	۱۵۸		
عدم تناسب	۲۲	۳۸۳۵	۱۷۴	۱۶۳	۰.۲۶۰۱
خطای خالص	۷	۷۴۷	۱۰۷		
کل	۴۹	۲۰۰۸۱۴			

۱۳/۳۳	۵	۲۵	۱۵۰	۱۰	۵۷۵	۴۴
۱۸	۵	۲۵	۲۵۰	۲۰	۴۲۵	۴۵
۲۳/۵	۳/۵	۲۰	۲۰۰	۱۵	۵۰۰	۴۶
۱۷/۶	۵	۱۵	۲۵۰	۲۰	۴۲۵	۴۷
۱۶	۲	۱۵	۲۵۰	۱۰	۴۲۵	۴۸
۲۰	۲	۱۵	۱۵۰	۲۰	۵۷۵	۴۹
۲۵	۳/۵	۲۰	۲۰۰	۱۵	۵۰۰	۵۰

نتایج و بحث

۳-۱- معرفی و ارزیابی مدل فرآیند

رابطه بین پنج متغیر مستقل و متغیر وابسته فرآیند پیرولیز با استفاده از روش سطح پاسخ به صورت معادله (۲) مدل سازی شد.

$$Y(\%) = 230.916 - 0.246391X_1 - 6.0434X_2 - 0.97303X_3 + 2.21X_4 + 0.670283X_5 + 0.00527X_1 X_2 + 0.001462X_1 X_3 - 0.00778889X_1 X_4 + 0.00230833X_1 X_5 + 0.00747X_2 X_3 + 0.019X_2 X_4 + 0.041375X_2 X_5 + 0.0231X_3 X_4 + 0.0012975X_3 X_5 - 0.237917X_4 X_5 - 0.000139911X_1^2 + 0.03852X_2^2 + 0.0000182X_3^2 - 0.0442222X_4^2 - 0.00648X_5^2 \quad (2)$$

در رابطه (۲)، Y راندمان سوخت مایع تولیدی بر حسب % است. در رابطه (۲)، X₁، X₂، X₃، X₄ و X₅ به ترتیب متناظر با متغیرهای مستقل دما، تعداد مفتول های فولادی، جرم لاستیک ورودی به راکتور، دبی نیتروژن ورودی، و اندازه ذرات لاستیک ورودی به راکتور هستند.

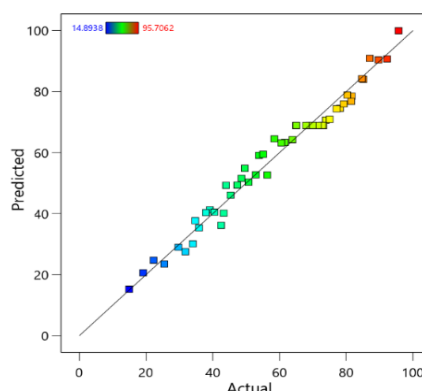
برای ارزیابی و اعتبارسنجی مدل فرآیند، از آنالیز واریانس (ANOVA) استفاده شد (جدول ۲). در جدول ۲، مقدار ۶۲،۱۱ به دست آمده برای آماره F مدل، مقدار بزرگی است و تنها ۰،۰۱٪ احتمال دارد که مقدار F به این بزرگی به دلیل نویز ایجاد شود. همچنین مقدار احتمال p برای عدم تناسب مدل برابر با ۰،۲۶۰۱، به دست آمده که نشان از معناداری مدل دارد. ۲R پیش بینی شده و ۲R تعدیل شده به ترتیب برابر با ۰،۹۲۶۸ و ۰،۹۶۱۵ محاسبه شده که اختلاف کم آنها نشان از معناداری

مفتول‌های فولادی برابر با ۲۰ عدد، جرم ورودی به راکتور برابر با ۲۵۰ گرم و دبی نیتروژن برابر با ۲ لیتر در دقیقه و ثابت هستند، با افزایش اندازه ذرات ورودی به راکتور از ۱۵ تا ۲۵ سانتی‌متر مربع، میزان راندمان سوخت مایع تولید شده از ۲۹٫۶۵٪ به ۴۰٫۳۹٪ افزایش یافته‌است. علت این افزایش در راندمان سوخت مایع تولیدی را می‌توان با نحوه رفتار سیستم گرمایش القایی توجیه کرد. در کویل القایی تمرکز خطوط جریان در کویل، در نقطه میانی ارتفاع کویل قرار دارد. این تمرکز به این مفهوم است که فلزات که در این نقطه قرار دارند با سرعت بیشتری نسبت به فلزات که با فاصله از این نقطه قرار دارند گرم می‌شوند (El-Haggar, ۲۰۰۷).

طی مشاهدات انجام شده حین انجام تست‌ها، در جرم‌های ثابت از مواد ورودی به راکتور، ارتفاع بیشتری از راکتور توسط مواد ورودی با اندازه‌های بزرگ‌تر اشغال می‌شد. به بیان دیگر می‌توان گفت که ستون تشکیل شده از لاستیک‌های خرد شده در راکتور در حالتی که ذرات ورودی اندازه بزرگ‌تری داشتند ستونی با ارتفاع بیشتر بود. این افزایش ارتفاع، لاستیک‌ها را به مرکز کویل یعنی نقطه‌ای که تمرکز خطوط میدان بیشتر است نزدیک کرده و این منجر به افزایش نرخ گرمایش، میزان تخریب و میزان سوخت مایع تولید شده در مدت زمان ثابت می‌شود.

۳-۲-۳- تأثیر تعداد مفتول‌های فولادی

شکل ۳-ج نشان می‌دهد در شرایطی که دما برابر با ۵۷۵، جرم ورودی برابر با ۲۵۰ گرم، دبی گاز حامل برابر با ۲ لیتر در دقیقه و اندازه ذرات ورودی برابر با ۲۵ سانتی‌متر مربع و ثابت هستند، با افزایش تعداد مفتول‌های فولادی از ۵ به ۲۵ عدد، میزان راندمان سوخت مایع تولید شده از ۲۷٫۰۴٪ به ۴۸٫۶۹٪ افزایش می‌یابد. علت این رفتار را می‌توان در نحوه عملکرد سیستم گرمایش القایی و اثر نرخ گرمایش بر فرایند پیرولیز جست و جو کرد. میزان



شکل ۲. مقایسه نتایج واقعی و مدل برای راندمان سوخت مایع تولیدی در فرایند پیرولیز لاستیک‌های فرسوده با استفاده از سیستم گرمایش القایی

۳-۲- اثر هر یک از متغیرهای مستقل بر پاسخ

۳-۲-۱- تأثیر دما

شکل ۳-الف تأثیر دما بر راندمان سوخت مایع تولیدی را در شرایطی که تعداد مفتول‌های فولادی برابر با ۲۰ عدد، جرم ورودی برابر با ۲۵۰ گرم، دبی گاز حامل برابر با ۲ لیتر در دقیقه و اندازه ذرات ورودی برابر با ۲۵ سانتی‌متر مربع و ثابت هستند، نشان می‌دهد. با افزایش دما از ۴۲۵ تا ۵۷۵، میزان راندمان سوخت مایع تولید شده از ۲۱٫۳۸٪ به ۴۰٫۳۹٪ و میزان تخریب ایجاد شده از ۴۴٫۳٪ به ۵۹٫۵٪ افزایش می‌یابد. این افزایش راندمان در سوخت مایع تولیدی و میزان تخریب ایجاد شده را می‌توان اینگونه توجیه کرد که محوریت اصلی فرایندهای تخریب گرمایی بر این اصل استوار است که با افزایش دما جنبش مولکولی مواد افزایش می‌یابد و مواد را می‌توان تا دمایی حرارت داد که میزان جنبش مولکولی آنها به حدی افزایش یابد که پیوند بین اتم‌ها از بین رفته و بافت ماده وارد فاز تخریب شود. دمایی که تخریب در آن آغاز می‌شود برای هر ماده متفاوت است و بستگی زیادی به خواص ذاتی ماده دارد.

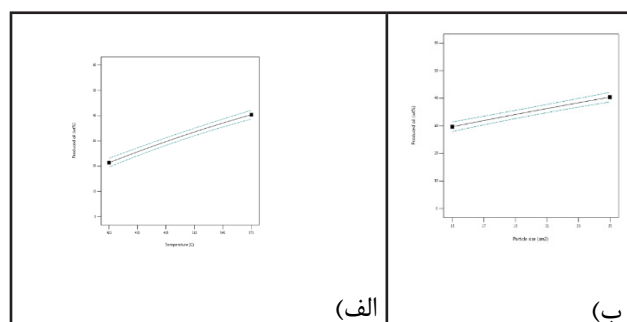
۳-۲-۲- تأثیر اندازه ذرات ورودی

شکل ۳-ب نشان می‌دهد در شرایطی که دما برابر با ۵۷۵، تعداد

بیشتر فولادی بر این اثر غلبه کرده است به طوری که نه تنها کاهش یا ثباتی در روند راندمان تولید سوخت مایع مشاهده نمی‌شود، بلکه روند افزایشی شده است.

۳-۲-۵- تأثیر دبی نیتروژن

شکل ۳-ج نشان می‌دهد در شرایطی که دما برابر با ۵۷۵، تعداد مفتول‌های فولادی برابر با ۲۰ عدد، جرم ورودی به راکتور برابر با ۲۵۰ گرم و اندازه ذرات ورودی برابر با ۲۵ سانتی‌متر مربع و ثابت هستند، با افزایش دبی نیتروژن ورودی به راکتور از ۲ تا ۵ لیتر در دقیقه، میزان راندمان سوخت مایع تولید شده از ۴۰،۳۹٪ به ۳۳،۲۷٪ کاهش یافته است. علت اصلی استفاده از گاز حامل، خارج کردن هر چه سریع‌تر بخارات شکل گرفته در فرایند و جلوگیری از احتمال وقوع واکنش‌های ثانویه و کاهش راندمان سوخت مایع تولیدی می‌باشد (Arion و همکاران، ۲۰۰۱). اما از آنجا که این گاز با دمای محیط (دمایی بسیار پایین‌تر از دمای راکتور) وارد راکتور می‌شود، توزیع حرارت در راکتور را دچار تغییر می‌کند. علت این کاهش، تبادل گرمایی گاز حامل با بخارات تولید شده درون سیستم و کاهش دمای بخارات تولید شده می‌باشد. این کاهش دما منجر به این می‌شود که بخشی از بخارات، پیش از رسیدن به خنک‌کننده و در محیط راکتور تبدیل به مایع شوند و سپس در محیط راکتور ترکیبات آنها دچار شکست مجدد شده و تبدیل به گازهای غیر قابل مایع شدن بشوند که این وضعیت، کاهش راندمان سوخت مایع تولیدی را به همراه داشته است.



انرژی منتقل شده به راکتور در سیستم گرمایش القایی، تابعی مستقیم از میزان فلزات موجود در راکتور می‌باشد. لذا می‌توان دریافت که با افزایش میزان فلزات درون راکتور، میزان انرژی منتقل شده توسط سیستم گرمایش القایی افزایش می‌یابد (Jouhara و همکاران، ۲۰۱۸؛ Rüdüsüli و همکاران، ۲۰۱۲؛ Sa-bogal و همکاران، ۲۰۲۱). افزایش میزان انرژی منتقل شده به مفهوم افزایش دما در مدت زمان کوتاه‌تر در سیستم و یا به عبارتی افزایش نرخ گرمایش در سیستم می‌باشد. افزایش نرخ گرمایش به این مفهوم است که مواد و محیط درون راکتور، در بازه زمانی کوتاه‌تری به دمای مورد نظر رسیده‌اند. با توجه به ثابت بودن زمان واکنش در هر تست، نرخ بالاتر گرمایش بیانگر این موضوع است که مواد درون راکتور مدت زمان بیشتری را در محدوده دمایی مد نظر سپری کرده‌اند. یعنی علاوه بر اینکه مواد با سرعت بیشتری به دمای تخریب رسیده‌اند، مدت زمان بیشتری را هم در آن دما سپری کرده‌اند که این به مفهوم ایجاد شکست بیشتر در بافت لاستیک‌ها، افزایش میزان تخریب و در نهایت افزایش میزان سوخت مایع تولیدی می‌باشد.

۳-۲-۴- تأثیر جرم ورودی به راکتور

شکل ۳-د نشان می‌دهد در شرایطی که دما برابر با ۵۷۵، تعداد مفتول‌های فولادی برابر با ۲۰ عدد، دبی گاز حامل برابر با ۲ لیتر در دقیقه و اندازه ذرات ورودی برابر با ۲۵ سانتی‌متر مربع و ثابت هستند، با افزایش جرم ورودی به راکتور از ۱۵۰ تا ۲۵۰ گرم، میزان راندمان سوخت مایع تولید شده از ۳۰٪ به ۴۰،۳۹٪ افزایش یافته است. حضور جرم بیشتر لاستیک‌های موجود در راکتور، به معنای حضور سیم‌های فولادی بیشتر، انتقال انرژی حرارتی بیشتر به راکتور و البته افزایش انرژی مورد نیاز برای تخریب کامل لاستیک‌های موجود در راکتور می‌باشد. روند افزایشی قابل مشاهده در شکل نشان می‌دهد با اینکه میزان انرژی لازم برای تخریب کامل لاستیک‌ها با افزایش جرم آنها افزایش می‌یابد اما حضور سیم‌های

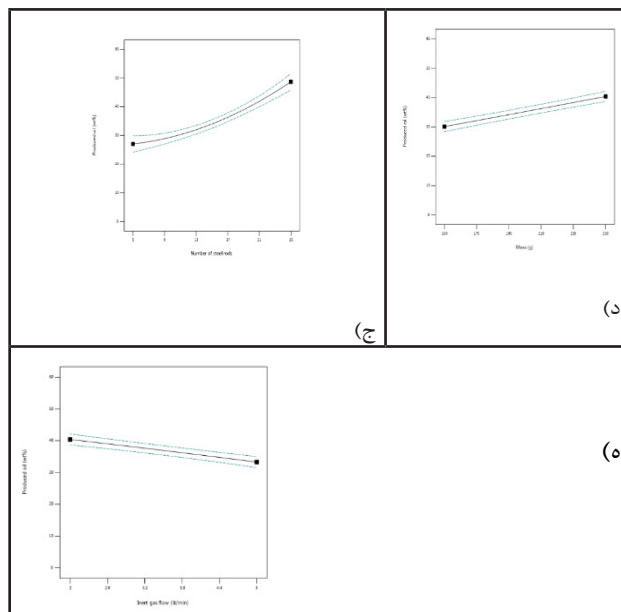
افزایش راندمان سوخت مایع تولیدی می‌شود. این رو می‌توان گفت که افزایش دما، اثر تعداد مفتول‌های فولادی را بهبود بخشیده‌است.

۳-۳-۲- دما و جرم ورودی

شکل ۴-ب اثر برهمکنش بین دما و جرم ورودی به راکتور را بر راندمان سوخت مایع تولیدی در شرایطی که تعداد مفتول‌های فولادی برابر با ۲۰ عدد، دبی نیتروژن ورودی برابر با ۲ لیتر در دقیقه و اندازه ذرات ورودی برابر با ۲۵ سانتی‌متر مربع و ثابت هستند، نشان می‌دهد. افزایش شیب خطوط موجود در نمودار، با افزایش دما از ۴۲۵ به ۵۷۵ در حین افزایش جرم ورودی، نشان از اثر هم‌افزایی پارامترهای دما و جرم ورودی به راکتور دارد. افزایش جرم ورودی بیشتر به راکتور به مفهوم حضور فلزات بیشتر، نرخ گرمایش بالاتر و توزیع بهتر حرارت در راکتور می‌باشد. لذا می‌توان اینگونه استدلال کرد که افزایش جرم علاوه بر اینکه سبب شده‌است تا مواد درون راکتور در مدت زمان کمتری به دمای مورد نظر برسند، با توزیع بهتر حرارت نیز باعث شده‌است تا قسمت‌های بیشتری از مواد درون راکتور به دمای مناسب برای تخریب برسند. در نتیجه راندمان سوخت مایع تولیدی با افزایش همراه بوده است. این رو می‌توان گفت که پارامترهای جرم ورودی و دما اثر هم‌افزایی داشته‌اند.

۳-۳-۳- دما و دبی نیتروژن

شکل ۴-ج اثر برهمکنش بین دما و دبی نیتروژن ورودی به راکتور را بر راندمان سوخت مایع تولیدی در شرایطی که تعداد مفتول‌های فولادی برابر با ۲۰ عدد، جرم ورودی برابر با ۲۵۰ گرم و اندازه ذرات ورودی برابر با ۲۵ سانتی‌متر مربع و ثابت هستند، نشان می‌دهد. هر چند که اختلاف شیب خطوط منحنی‌ها نشان از اندرکنش ضعیف بین این دو پارامتر دارد، اما افزایش اندازه



شکل ۳. تغییرات راندمان سوخت تولیدی تحت تأثیر تغییر (الف) دما، (ب) اندازه ذرات ورودی، (ج) تعداد مفتول‌های فولادی، (د) جرم ورودی و (ه) دبی نیتروژن

۳-۳-۳- بررسی برهم‌کنش متغیرها

۳-۳-۱- دما و تعداد مفتول‌های فولادی

شکل ۴-الف اثر برهمکنش بین دما و تعداد مفتول‌های فولادی را بر راندمان سوخت مایع تولیدی در شرایطی که جرم ورودی برابر با ۲۵۰ گرم، دبی نیتروژن ورودی برابر با ۲ لیتر در دقیقه و اندازه ذرات ورودی برابر با ۲۵ سانتی‌متر مربع و ثابت هستند، نشان می‌دهد. افزایش شیب خطوط موجود در نمودار با افزایش تعداد مفتول‌های فولادی از ۱۰ به ۲۰ عدد در حین افزایش دما، نشان از اثر هم‌افزایی پارامترهای دما و تعداد مفتول‌های فولادی دارد. حضور فلزات بیشتر در راکتور به معنای نرخ گرمایش بالاتر و توزیع بهتر حرارت در راکتور می‌باشد. اینطور می‌توان استدلال کرد که دلیل هم‌افزایی دما و میزان مفتول‌های فولادی، افزایش نرخ گرمایش و توزیع بهتر حرارت و افزایش نرخ تخریب با افزایش دما می‌باشد. به این صورت که در دماهای بیشتر فلزات حرارت بیشتری را در راکتور توزیع می‌کنند که این منجر به افزایش نرخ تخریب و

جبری شیب خط قرمز نسبت به خط مشکی، با افزایش دبی و کاهش راندمان سوخت مایع تولیدی در شکل، نشان از اندر کنش کاهنده بین پارامترهای دما و دبی نیتروژن دارد. علت وقوع این اندر کنش کاهنده را می‌توان تبادل دمایی بین دبی نیتروژن ورودی با دمای محیط و محیط راکتور و خروج انرژی حرارتی از محیط راکتور توسط نیتروژن ورودی بیان کرد.

۳-۳-۴- دما و اندازه ذرات ورودی

شکل ۵-د اثر برهمکنش بین دما و اندازه ذرات ورودی به راکتور را بر راندمان سوخت مایع تولیدی در شرایطی که تعداد مفتول‌های فولادی برابر با ۲۰ عدد، جرم ورودی برابر با ۲۰۰ گرم و دبی نیتروژن ورودی برابر با ۵ لیتر در دقیقه و ثابت هستند، نشان می‌دهد. افزایش اندازه جبری شیب خط قرمز نسبت به خط مشکی، با افزایش اندازه ذرات ورودی و افزایش راندمان سوخت مایع تولیدی نشان از برهمکنش هم‌افزایی بین پارامترهای دما و اندازه ذرات ورودی دارد. علت این هم‌افزایی، افزایش نرخ گرمایش با افزایش اندازه ذرات ورودی به راکتور می‌باشد. علت این اثر کاهنده، کم اهمیت شدن اثر اندازه ذرات ورودی با افزایش دما در میزان تخریب ایجاد شده در بافت لاستیک‌ها می‌باشد.

۳-۳-۵- تعداد مفتول‌های فولادی و جرم ورودی

در شکل ۴-ه اثر برهمکنش بین تعداد مفتول‌های فولادی و جرم ورودی به راکتور را بر راندمان سوخت مایع تولیدی در شرایطی که دیگر پارامترهای اثرگذار مانند دما برابر با ۵۷۵، اندازه ذرات ورودی برابر با ۲۵ سانتی‌متر مربع و دبی نیتروژن ورودی برابر با ۵ لیتر در دقیقه و ثابت هستند، نشان می‌دهد. افزایش اندازه جبری شیب خط قرمز نسبت به خط مشکی، با افزایش جرم ورودی به راکتور و افزایش راندمان سوخت مایع تولیدی نشان از برهمکنش هم‌افزایی بین پارامترهای تعداد

مفتول‌ها و جرم ورودی به راکتور دارد. علت این هم‌افزایی، توزیع بهتر حرارت، افزایش نرخ گرمایش و انرژی ورودی به راکتور با افزایش تعداد مفتول‌های فولادی می‌باشد. اینگونه می‌توان بیان کرد که افزایش تعداد مفتول‌های فولادی، اثر مثبت افزایش جرم بر راندمان سوخت مایع تولیدی را بهبود بخشیده‌است.

۳-۳-۶- تعداد مفتول‌های فولادی و دبی نیتروژن

شکل ۴-و اثر برهمکنش بین تعداد مفتول‌های فولادی و جرم ورودی به راکتور را بر راندمان سوخت مایع تولیدی در شرایطی که دیگر پارامترهای اثرگذار مانند دما برابر با 575°C ، اندازه ذرات ورودی برابر با ۲۵ سانتی‌متر مربع و جرم ورودی برابر با ۲۰۰ گرم و ثابت هستند، نشان می‌دهد. موازی بودن خطوط مربوط به سطوح مختلف دبی نیتروژن ورودی و عدم وجود اختلاف بین شیب خطوط نشان می‌دهد که این دو پارامتر برهمکنش قابل ملاحظه‌ای با هم نداشته‌اند.

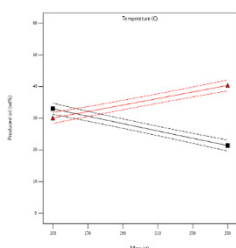
۳-۳-۷- تعداد مفتول‌های فولادی و اندازه ذرات ورودی

شکل ۴-ز اثر برهمکنش بین تعداد مفتول‌های فولادی و اندازه ذرات ورودی به راکتور را بر راندمان سوخت مایع تولیدی در شرایطی که دیگر پارامترهای اثرگذار مانند دما برابر با ۵۷۵، جرم ورودی برابر با ۲۵۰ گرم و دبی نیتروژن ورودی برابر با ۵ لیتر در دقیقه و ثابت هستند، نشان می‌دهد. افزایش اندازه جبری شیب خط قرمز نسبت به خط مشکی، با افزایش تعداد مفتول‌های فولادی ورودی به راکتور و افزایش راندمان سوخت مایع تولیدی نشان از برهمکنش هم‌افزایی بین پارامترهای تعداد مفتول‌ها و اندازه ذرات ورودی به راکتور دارد. علت این هم‌افزایی، توزیع بهتر حرارت، افزایش نرخ گرمایش و انرژی ورودی به راکتور با افزایش تعداد مفتول‌های و افزایش اندازه ذرات ورودی می‌باشد. اینگونه می‌توان بیان

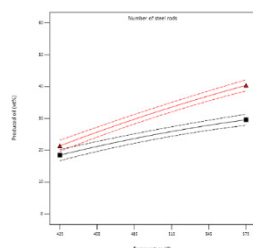
هم‌افزایی این است که با افزایش جرم ورودی، افزایش نرخ گرمایش که در اثر افزایش اندازه ذرات ورودی ایجاد می‌شود، با نزدیک‌تر شدن ذرات بزرگ‌تر به نقطه مرکزی کوپل القایی، تشدید شده‌است. اینگونه می‌توان بیان کرد که افزایش جرم ورودی به راکتور، اثر مثبت افزایش اندازه ذرات ورودی بر راندمان سوخت مایع تولیدی را افزایش داده است.

۳-۳-۱۰- دبی نیتروژن و اندازه ذرات ورودی

شکل ۴-۴ اثر برهمکنش بین دبی نیتروژن و اندازه ذرات ورودی به راکتور را بر راندمان سوخت مایع تولیدی در شرایطی که دیگر پارامترهای اثرگذار مانند دما برابر با ۵۷۵، تعداد مفتول‌های فولادی برابر با ۲۰ عدد و جرم ورودی برابر با ۲۰۰ گرم و ثابت هستند، نشان می‌دهد. کاهش اندازه جبری شیب خط قرمز نسبت به خط مشکی، با افزایش ذرات ورودی به راکتور و کاهش راندمان سوخت مایع تولیدی، نشان از برهمکنش کاهنده بین پارامترهای دبی نیتروژن و اندازه ذرات ورودی به راکتور دارد. علت این اثر کاهنده می‌توان بیان کرد که زمانی که سطوح بالاتر دبی نیتروژن ورودی منجر به خروج بیشتر انرژی حرارتی از راکتور و کاهش راندمان سوخت مایع تولیدی می‌شود، افزایش اندازه ذرات ورودی با نزدیک‌تر کردن ذرات به نقطه مرکزی کوپل، میزان انرژی حرارتی ورودی به راکتور در واحد زمان را افزایش داده و اثر کاهنده دبی نیتروژن بر راندمان سوخت مایع تولیدی را کاهش داده است.



(ب)



(الف)

کرد که افزایش تعداد مفتول‌های فولادی، اثر مثبت افزایش سطح ذرات ورودی بر راندمان سوخت مایع تولیدی را بهبود بخشیده‌است.

۳-۳-۸- دبی نیتروژن و جرم ورودی

شکل ۴-۴ اثر برهمکنش بین میزان جرم و دبی نیتروژن ورودی به راکتور را بر راندمان سوخت مایع تولیدی در شرایطی که دیگر پارامترهای اثرگذار مانند دما برابر با ۵۷۵، تعداد مفتول‌های فولادی برابر با ۲۰ عدد و اندازه ذرات ورودی برابر با ۲۵ سانتی‌متر مربع و ثابت هستند، نشان می‌دهد. کاهش اندازه جبری شیب خط قرمز نسبت به خط مشکی، با افزایش دبی نیتروژن ورودی به راکتور و کاهش راندمان سوخت مایع تولیدی نشان از برهمکنش کاهنده بین پارامترهای جرم و دبی نیتروژن ورودی به راکتور دارد. علت این اثر کاهنده، خروج انرژی حرارتی از راکتور توسط نیتروژن ورودی و توزیع بهتر حرارت، افزایش نرخ گرمایش و انرژی ورودی به راکتور با افزایش میزان جرم ورودی می‌باشد. اینگونه می‌توان بیان کرد که افزایش جرم ورودی به راکتور، اثر منفی افزایش دبی بر راندمان سوخت مایع تولیدی را کاهش داده است.

۳-۳-۹- جرم و اندازه ذرات ورودی

شکل ۴-۴ اثر برهمکنش بین میزان جرم و اندازه ذرات ورودی به راکتور را بر راندمان سوخت مایع تولیدی در شرایطی که دیگر پارامترهای اثرگذار مانند دما برابر با ۵۷۵، تعداد مفتول‌های فولادی برابر با ۲۰ عدد و دبی نیتروژن ورودی برابر با ۵ لیتر در دقیقه و ثابت هستند، نشان می‌دهد. افزایش اندازه جبری شیب خط قرمز نسبت به خط مشکی، با افزایش میزان جرم ورودی به راکتور و افزایش راندمان سوخت مایع تولیدی، نشان از برهمکنش هم‌افزایی بین پارامترهای جرم و اندازه ذرات ورودی به راکتور دارد. علت این اثر

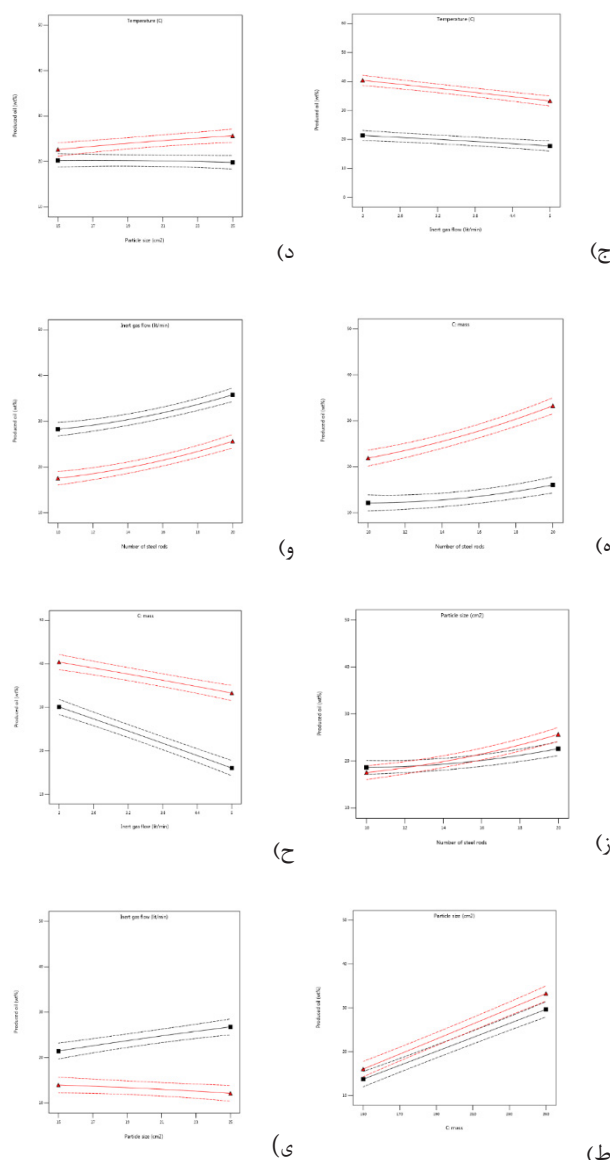
۳-۴- اثر هم زمان متغیرهای مستقل

۳-۴-۱- اثر همزمان دما و تعداد مفتول‌های فولادی

شکل ۵- الف تغییرات راندمان سوخت مایع تولیدی را نسبت به تغییرات همزمان دما و تعداد مفتول‌های فولادی در شرایطی که جرم ورودی به راکتور برابر با ۲۵۰ گرم و دبی نیتروژن برابر با ۲ لیتر در دقیقه و اندازه ذرات ورودی برابر با ۲۵ سانتی‌متر مربع و ثابت هستند، نشان می‌دهد. افزایش مفتول‌های فولادی در هر دما، منجر به افزایش راندمان سوخت مایع تولیدی شده و افزایش دما در هر تعداد از مفتول‌های فلزی نیز منجر به افزایش راندمان سوخت مایع تولیدی شده است. تا جایی که بیشترین راندمان سوخت مایع تولیدی با تعداد مفتول‌های فولادی ۲۵ عدد و در دمای ۵۷۵ رخ داده است.

۳-۴-۲- اثر همزمان دما و جرم ورودی

شکل ۵- ب تغییرات راندمان سوخت مایع تولیدی را نسبت به تغییرات همزمان دما و جرم ورودی به راکتور در شرایطی که تعداد مفتول‌های فولادی برابر با ۲۰ عدد و دبی نیتروژن برابر با ۲ لیتر در دقیقه و اندازه ذرات ورودی برابر با ۲۵ سانتی‌متر مربع و ثابت هستند، نشان می‌دهد. افزایش جرم ورودی به راکتور در دماهای پایین با ایجاد کاهش در راندمان سوخت مایع تولیدی همراه بوده اما در دماهای بالاتر، افزایش جرم ورودی با افزایش راندمان سوخت مایع تولیدی همراه بوده است. به طوری که میزان سوخت مایع تولیدی در دمای ۴۲۵ و جرم ۲۵۰ گرم در کمترین مقدار خود یعنی ۲۱٫۵٪ و در دمای ۵۷۵ و جرم ۲۵۰ گرم در مقدار بیشینه خود یعنی ۴۰٫۳۹٪ بوده است. همچنین در این شکل مشاهده می‌شود که افزایش دما در جرم‌های کمتر اثر چندانی بر افزایش راندمان سوخت مایع تولیدی نداشته است به این صورت که



شکل ۴. اثر متقابل متغیرهای مستقل (الف) دما و تعداد مفتول‌های فولادی، (ب) دما و جرم ورودی، (ج) دما و دبی نیتروژن، (د) دما و اندازه ذرات ورودی، (ه) جرم و تعداد مفتول‌های فولادی، (و) تعداد مفتول‌های فولادی و دبی نیتروژن، (ز) تعداد مفتول‌های فولادی و اندازه ذرات ورودی، (ح) جرم ورودی و دبی نیتروژن، (ط) جرم و اندازه ذرات ورودی

به تغییرات همزمان دما و اندازه ذرات ورودی به راکتور در شرایطی که تعداد مفتول‌های فولادی برابر با ۲۰ عدد و جرم ورودی به راکتور برابر با ۲۵۰ گرم و دبی نیتروژن برابر با ۲ لیتر در دقیقه و ثابت هستند، نشان می‌دهد. در تمامی دماها افزایش اندازه ذرات ورودی با افزایش راندمان سوخت مایع تولیدی همراه بوده و در تمامی اندازه‌های ذرات، افزایش دما افزایش راندمان سوخت مایع تولیدی را به همراه داشته است. به این صورت که در اندازه ذرات ۱۵ سانتی‌متر مربع و دمای ۴۲۵، راندمان سوخت مایع تولیدی در حالت کمینه خود یعنی ۱۴٪ و در اندازه ذرات ورودی ۲۵ سانتی‌متر مربع و دمای ۵۷۵ راندمان سوخت مایع تولیدی در حالت بیشینه خود یعنی ۴۰،۳۹٪ قرار دارد.

۳-۴-۵- اثر همزمان جرم ورودی و تعداد مفتول‌های فولادی

شکل ۵-۵ تغییرات راندمان سوخت مایع تولدی را نسبت به تغییرات همزمان میزان جرم و تعداد مفتول‌های فولادی ورودی به راکتور در شرایطی که دما برابر با ۵۷۵ و اندازه ذرات ورودی به راکتور ۲۵ سانتی‌متر مربع و دبی نیتروژن برابر با ۲ لیتر در دقیقه و ثابت هستند، نشان می‌دهد. در تمام جرم‌ها، با افزایش تعداد مفتول‌های فولادی، میزان راندمان سوخت مایع تولیدی افزایش یافته‌است و تعداد مفتول‌های فولادی ثابت، افزایش جرم نیز اثر افزایشی بر راندمان تولید سوخت مایع داشته است. به این صورت که در جرم ۲۵۰ گرم، با افزایش تعداد مفتول‌ها از ۵ به ۲۵ عدد، راندمان سوخت مایع تولیدی از مقدار کمینه خود یعنی ۲۷،۴٪ به مقدار بیشینه خود یعنی ۴۸،۶۹٪ افزایش یافته‌است. همچنین مشاهده می‌شود که در تعداد مفتول‌های برابر با ۲۵ عدد با افزایش جرم ورودی از ۱۵۰ تا ۲۵۰ گرم، راندمان سوخت مایع تولیدی از ۳۴،۵٪ به ۴۸،۳۹٪ افزایش پیدا کرده است.

در جرم ورودی ۱۵۰ گرم، افزایش دما از ۴۲۵ تا ۵۷۵ تنها ۳٪ تفاوت در راندمان سوخت مایع تولیدی ایجاد کرده است. این در حالی است که در جرم ورودی ۲۵۰ گرم، افزایش دما از ۴۲۵ تا ۵۷۵، با افزایشی ۲۰ درصدی در راندمان سوخت مایع همراه بوده است.

۳-۴-۳- اثر همزمان دما و دبی نیتروژن

شکل ۵-۳ تغییرات راندمان سوخت مایع تولیدی را نسبت به تغییرات همزمان دما و دبی نیتروژن ورودی به راکتور در شرایطی که تعداد مفتول‌های فولادی برابر با ۲۰ عدد و جرم ورودی به راکتور برابر با ۲۵۰ گرم و اندازه ذرات ورودی برابر با ۲۵ سانتی‌متر مربع و ثابت هستند، نشان می‌دهد. افزایش دبی نیتروژن در تمام دماها منجر به کاهش راندمان سوخت مایع تولیدی شده‌است و افزایش دما در هر دبی از نیتروژن منجر به افزایش راندمان سوخت مایع تولیدی شده‌است. به این صورت که مقدار راندمان سوخت تولیدی در دبی ۲ لیتر در دقیقه در دمای ۵۷۵ به مقدار بیشینه خود یعنی ۴۰،۳۹٪ و در دبی نیتروژن ۵ لیتر در دقیقه و دمای ۴۲۵ به مقدار کمینه خود یعنی ۱۷٪ رسیده است. این شکل همچنین نشان می‌دهد که در دبی‌های پایین، افزایش دما تأثیر بیشتری در افزایش راندمان سوخت مایع تولیدی نسبت به دبی‌های بیشتر داشته است. به این صورت که در دبی نیتروژن ۲ لیتر در دقیقه، افزایش دما از ۴۲۵ تا ۵۷۵ همراه با رشد ۲۰ درصدی در راندمان سوخت مایع تولیدی بوده است. این در حالی است که در دبی نیتروژن ۵ لیتر در دقیقه، افزایش دما از ۴۲۵ تا ۵۷۵ همراه با ایجاد تغییرات ۱۵ درصدی در راندمان سوخت مایع تولیدی بوده است.

۳-۴-۴- اثر همزمان دما و اندازه ذرات ورودی

شکل ۵-۴ تغییرات راندمان سوخت مایع تولیدی را نسبت

۳-۴-۶- اثر همزمان تعداد مفتول‌های فولادی و دبی نیتروژن

شکل ۴-۴-۶ تغییرات راندمان سوخت مایع تولیدی را نسبت به تغییرات همزمان میزان دبی نیتروژن و تعداد مفتول‌های فولادی ورودی به راکتور در شرایطی که دما برابر با ۵۷۵ و اندازه ذرات ورودی به راکتور ۲۵ سانتی‌متر مربع و جرم ورودی به راکتور برابر با ۲۵۰ گرم و ثابت هستند، نشان می‌دهد. در تمام دبی‌های نیتروژن افزایش تعداد مفتول‌های فولادی منجر به افزایش راندمان سوخت مایع تولیدی شده‌است و تمام حالاتی که تعداد مفتول‌ها ثابت هستند، افزایش دبی نیتروژن منجر به کاهش راندمان سوخت مایع تولیدی شده‌است. به این صورت که در دبی نیتروژن برابر با ۲ لیتر در دقیقه، افزایش تعداد مفتول‌های فولادی از ۵ به ۲۵ عدد، منجر به افزایش راندمان سوخت مایع تولیدی از ۲۷٪ به ۴۸٫۶۹٪ شده‌است. همچنین مشاهده می‌شود که در تعداد مفتول‌های فولادی برابر با ۲۵ عدد، افزایش دبی نیتروژن از ۲ به ۵ لیتر در دقیقه، منجر به کاهش راندمان سوخت مایع تولیدی از ۴۸٫۶۹٪ به ۴۱٫۵٪ شده‌است.

۳-۴-۷- اثر همزمان تعداد مفتول‌های فولادی و اندازه ذرات ورودی

شکل ۴-۴-۷ تغییرات راندمان سوخت مایع تولیدی را نسبت به تغییرات همزمان اندازه ذرات ورودی و تعداد مفتول‌های فولادی ورودی به راکتور در شرایطی که دما برابر با ۵۷۵ و دبی نیتروژن برابر با ۲ لیتر در دقیقه و جرم ورودی به راکتور برابر با ۲۵۰ گرم و ثابت هستند، نشان می‌دهد. در هر تعداد از مفتول‌های فلزی، افزایش اندازه ذرات ورودی به راکتور، منجر به افزایش راندمان سوخت مایع تولیدی شده‌است و در تمام اندازه‌های ذرات ورودی به راکتور، افزایش تعداد مفتول‌های فولادی، منجر به افزایش راندمان سوخت مایع تولیدی

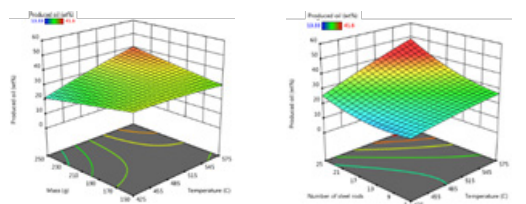
شده‌است. به این صورت که در اندازه ذرات ورودی برابر با ۲۵ سانتی‌متر مربع، افزایش تعداد مفتول‌های فولادی از ۵ به ۲۵ عدد، منجر به افزایش راندمان سوخت مایع تولیدی از ۲۷٫۴٪ به ۴۸٫۶۹٪ شده‌است. همچنین مشاهده می‌شود که در تعداد مفتول‌های فولادی برابر با ۲۵ عدد، افزایش اندازه ذرات ورودی از ۱۵ به ۲۵ سانتی‌متر مربع، منجر به افزایش راندمان سوخت مایع تولیدی از ۳۵٫۶٪ به ۴۸٫۶۹٪ شده‌است.

۳-۴-۸- اثر همزمان جرم ورودی و دبی نیتروژن

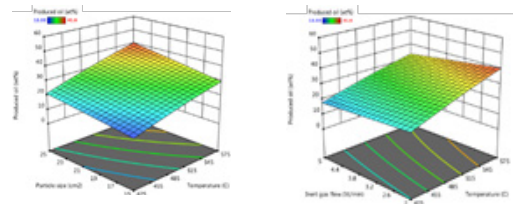
شکل ۴-۴-۸ تغییرات راندمان سوخت مایع تولیدی را نسبت به تغییرات همزمان دبی نیتروژن ورودی و میزان جرم ورودی به راکتور در شرایطی که دما برابر با ۵۷۵ و اندازه ذرات ورودی برابر با ۲۵ سانتی‌متر مربع و تعداد مفتول‌های فولادی برابر با ۲۰ عدد و ثابت هستند، نشان می‌دهد. در هر اندازه از دبی نیتروژن، افزایش جرم ورودی به راکتور، منجر به افزایش راندمان سوخت مایع تولیدی شده‌است و در تمام جرم‌های ورودی به راکتور، افزایش دبی نیتروژن ورودی، منجر به کاهش راندمان سوخت مایع تولیدی شده‌است. به این صورت که در دبی نیتروژن ورودی برابر با ۲ لیتر در دقیقه، افزایش جرم ورودی به راکتور از ۱۵۰ به ۲۵۰ گرم، منجر به افزایش راندمان سوخت مایع تولیدی از ۳۰٪ به ۴۰٫۳۹٪ شده‌است. همچنین مشاهده می‌شود که در مقدار جرم ورودی ۲۵۰ گرم، افزایش دبی نیتروژن ورودی از ۲ به ۵ لیتر در دقیقه، منجر به کاهش راندمان سوخت مایع تولیدی از ۴۰٫۳۹٪ به ۳۳٫۲۷٪ شده‌است.

۳-۴-۹- اثر همزمان جرم و اندازه ذرات ورودی

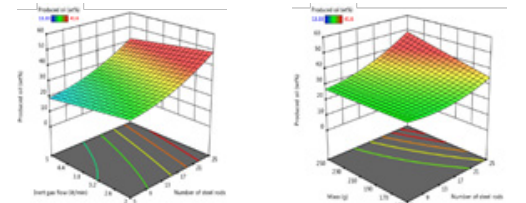
شکل ۴-۴-۹ تغییرات راندمان سوخت مایع تولیدی را نسبت به تغییرات همزمان اندازه و جرم ذرات ورودی به راکتور در شرایطی که دما برابر با ۵۷۵ و دبی نیتروژن ورودی برابر با ۲ لیتر در دقیقه و تعداد مفتول‌های فولادی برابر با ۲۰ عدد و



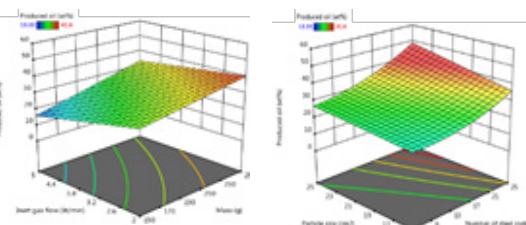
(الف) (ب)



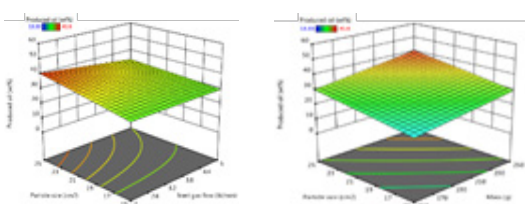
(ج) (د)



(ه) (و)



(ز) (ح)



(ط) (ی)

شکل ۵. اثر هم‌زمان متغیرهای الف) دما و تعداد مفتول‌های فولادی، ب) جرم ورودی و دما، ج) دما و دبی نیتروژن، د) دما و اندازه ذرات، ه) جرم و تعداد مفتول‌های فولادی، و) دبی نیتروژن و تعداد مفتول‌های فولادی، ز) تعداد مفتول‌های فولادی و اندازه ذرات ورودی، ح) جرم ورودی و دبی نیتروژن، ط) جرم و اندازه ذرات ورودی، ی) اندازه ذرات ورودی و دبی نیتروژن بر راندمان سوخت مایع تولیدی

ثابت هستند، نشان‌می‌دهد. در هر اندازه‌ای از ذرات ورودی، افزایش جرم ورودی به راکتور، منجر به افزایش راندمان سوخت مایع تولیدی شده‌است و در تمام جرم‌های ورودی به راکتور، افزایش اندازه ذرات ورودی، منجر به افزایش راندمان سوخت مایع تولیدی شده‌است. به این صورت که در میزان جرم ورودی برابر با ۲۵۰ گرم، افزایش اندازه ذرات ورودی به راکتور از ۱۵ به ۲۵ سانتی‌متر مربع، منجر به افزایش راندمان سوخت مایع تولیدی از ۳۰٪ به ۴۰٫۳۹٪ شده‌است. همچنین مشاهده می‌شود که در اندازه ذرات ورودی برابر با ۲۵ سانتی‌متر مربع، افزایش جرم ورودی از ۱۵۰ به ۲۵۰ گرم، منجر به افزایش راندمان سوخت مایع تولیدی از ۳۰٪ به ۴۰٫۳۹٪ شده‌است.

۳-۴-۱۰- اثر هم‌زمان دبی نیتروژن و اندازه ذرات ورودی

شکل ۵- تغییرات راندمان سوخت مایع را نسبت به تغییرات هم‌زمان اندازه و میزان دبی نیتروژن ورودی به راکتور در شرایطی که دما برابر با ۵۷۵ و جرم ذرات ورودی برابر با ۲۵۰ گرم و تعداد مفتول‌های فولادی برابر با ۲۰ عدد و ثابت هستند، نشان‌می‌دهد. در هر اندازه‌ای از ذرات ورودی، افزایش دبی نیتروژن ورودی به راکتور، منجر به کاهش راندمان سوخت مایع تولیدی شده‌است و در تمام دبی‌های نیتروژن ورودی به راکتور، افزایش جرم ذرات ورودی، منجر به افزایش راندمان سوخت مایع تولیدی شده‌است. به این صورت که در اندازه ذرات ورودی برابر با ۲۵ سانتی‌متر مربع، افزایش دبی نیتروژن ورودی به راکتور از ۲ به ۵ لیتر در دقیقه، منجر به کاهش راندمان سوخت مایع تولیدی از ۴۰٫۳۹٪ به ۳۳٫۲۷٪ شده‌است. همچنین مشاهده می‌شود که در دبی نیتروژن ورودی برابر با ۲ لیتر در دقیقه، افزایش اندازه ذرات ورودی از ۱۵ به ۲۵ سانتی‌متر مربع، منجر به افزایش راندمان سوخت مایع تولیدی از ۲۹٫۶۵٪ به ۴۰٫۳۹٪ شده‌است.

۳-۵- بهینه‌سازی

در بهینه‌سازی عددی، شرایط مطلوب برای هر یک از پارامترهای مستقل و وابسته تعریف می‌شوند و بر اساس این اهداف تعیین شده، نرم‌افزار Design Expert راه‌حلی را پیشنهاد می‌دهد که بیشترین مطلوبیت را داشته باشد. هدف اصلی از بهینه‌سازی، رسیدن به بیشترین راندمان سوخت مایع تولیدی با صرف کمترین هزینه و انرژی ممکن است. از آنجا که دماهای بالاتر واکنش، به معنای صرف انرژی بیشتر و دبی‌های بالاتر نیتروژن به معنای صرف هزینه بیشتر در هر واکنش است، از این رو در به دست آوردن شرایط بهینه دما و دبی نیتروژن، تلاش بر این بود که این پارامترها کمینه شوند. پارامتر جرم ورودی در حالت بیشینه قرار گرفت به این دلیل که در سیستم‌های صنعتی ظرفیت سیستم از شاخصه‌های مهم آن برای انتخاب است و این موضوع که بتوان از بیشینه ظرفیت راکتور استفاده کرد در کاهش هزینه‌ها و به صرفه بودن فرایند بسیار اهمیت دارد. برش لاستیک‌ها برای رسیدن به اندازه ذرات کوچک‌تر، فرایندی همراه با صرف انرژی و هزینه است؛ لذا برای به دست آوردن شرایط بهینه، پارامتر اندازه ذرات در حالت بیشینه قرار داده شد. شرایط مربوط به پارامترها و شرایط بهینه محاسبه شده توسط نرم‌افزار در جدول ۳ نشان داده شده‌اند. شرایط بهینه ارائه شده، شرایطی است که با کمترین هزینه و انرژی ممکن، می‌توان این فرایند را انجام داد. لازم به ذکر است که ارزیابی دقیق اقتصادی بودن این شرایط نیازمند پژوهش‌های بیشتر می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

این مطالعه با هدف بررسی فرایند تولید سوخت مایع از لاستیک‌های فرسوده توسط سیستم گرمایش القایی و بهینه‌سازی این سیستم در راستای بیشینه کردن سوخت مایع تولیدی انجام شد. در این راستا پارامترهای دما، تعداد مفتول‌های فولادی، دبی نیتروژن، جرم ورودی و اندازه ذرات ورودی مورد مطالعه قرار گرفتند. همچنین با استفاده از روش سطح پاسخ تجزیه و تحلیل آماری نتایج، اثرات اصلی هر متغیر، اثرات ترکیبی و ارزیابی اندرکنش بین متغیرها بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که افزایش دما، تعداد مفتول‌های فولادی، جرم ورودی و اندازه ذرات ورودی در بازه‌های ذکر شده با افزایش راندمان تولید سوخت مایع همراه بوده و افزایش دبی نیتروژن منجر به کاهش راندمان تولید سوخت مایع شده است. همچنین نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از این سیستم اثر منفی اندازه ذرات ورودی که از چالش‌های سیستم‌های پیشین بوده را برطرف ساخته و نیاز به خرد کردن لاستیک‌ها را از بین برده است. لازم به ذکر است که طراحی و ساخت این سیستم در مقیاس صنعتی نیازمند تحقیقات بیشتر است.

سیاسگزاری IRM

جدول ۳. محدودیت‌های اعمال شده برای بهینه‌سازی

پارامتر	واحد	حد پایین	حد بالا	اهمیت	شرایط بهینه
دما		۴۲۵	۵۷۵	۳	۵۱۵۶
مفتول‌های فولادی	عدد	۲۰	۱۰	۳	۲۰
دبی نیتروژن		۲	۵	۳	۲
جرم	گرم	۱۵۰	۲۵۰	۳	۲۴۸
اندازه ذرات		۱۵	۲۵	۳	۲۵
راندمان سوخت	wt%	۱۳۳۳	۴۱۶	۵	۳۳۵۸

منابع

1. Ahmadi K., Qaderi F., Rahmaninezhad S. M., Shidpour R. (2023) Investigation of the effective parameters on the phenol removal from the groundwater by response surface method, *Journal of Applied Research in Water and Wastewater* 10 (2), 141. <https://doi.org/10.22126/arww.2024.9824.1314>
2. Akbari S., Qaderi F., Amini Rad H. (2024) Use of response surface method for modeling and optimization of harvesting of *Chlorella sorokiniana* pa. 91 with Fe₃O₄/PACl from municipal wastewater, *Amirkabir Journal of Civil Engineering* 56 (2), 181-202. <https://doi.org/10.22060/ceej.2023.22600.8002>
3. Arion, A., Baronnet, F., Lartiges, S. and Birat, J.P., 2001. Characterization of emissions during the heating of tyre contaminated scrap. *Chemosphere*, 42(5-7), pp.853-859. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(00\)00260-5](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(00)00260-5)
4. Athanassiades, E., 2013. Waste tyre pyrolysis: Sustainable recovery and reuse of a valuable resource (Doctoral dissertation, Imperial College London). http://easyaccess.lib.cuhk.edu.hk/login?url=http://search.proquest.com/docview/1780249748?accountid=10371%5Cnhttp://findit.lib.cuhk.edu.hk/852cuhk/?url_ver=Z39.88-2004&rft_val_fmt=info:ofi/fmt:kev:mtx:dissertation&genre=dissertations+%26+theses&sid=ProQ:P
5. Bodaghabadi, M., Qaderi, F. and Sayyahzadeh, A.H., 2023. Development of a novel induction-heated reactor to enhance the performance of waste tires pyrolysis. *Waste Management*, 162, pp.27-35. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.03.006>
6. El-Haggar, S. M., 2007. Current Practice and Future Sustainability, *Sustainable Industrial Design and Waste Management*, pp. 1-19. <https://doi.org/10.1016/B978-012373623-9/50003-4>
7. Faghhi Nasiri E., Qaderi F., Rahmaninezhad S.M. (2025) Using electro-peroxone process to remediate soil contaminated with phenol. *Iranica Journal of Energy & Environment*, 16 (1): 1-8; <https://doi.org/10.5829/ijee.2025.16.01.01>
8. Juma, M., Koreňová, Z., Markoš, J., Jelemensky, L. and Bafnec, M., 2007. Experimental study of pyrolysis and combustion of scrap tire. *Polymers for Advanced Technologies*, 18(2), pp.144-148. <https://doi.org/10.1002/pat.811>
9. Jouhara, H., Ahmad, D., Van Den Boogaert, I., Katsou, E., Simons, S. and Spencer, N., 2018. Pyrolysis of domestic based feedstock at temperatures up to 300 C. *Thermal Science and Engineering Progress*, 5, pp.117-143. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2017.11.007>
10. Kordoghli, S., Paraschiv, M., Khiari, B., Zagrouba, F. and Tazerout, M., 2016. Using oxides of alkaline-earth metals as catalysts in used tyres pyrolysis. *International Journal of ChemTech Research*, 9(8), pp.359-365.

11. Laresgoiti, M.F., Caballero, B.M., de Marco, I., Torres, A., Cabrero, M.A. and Chomón, M.J., 2004. Characterization of the liquid products obtained in tyre pyrolysis. *Journal of analytical and applied pyrolysis*, 71(2), pp.917-934. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2003.12.003>
12. Lucia, O., Maussion, P., Dede, E.J. and Burdío, J.M., 2013. Induction heating technology and its applications: past developments, current technology, and future challenges. *IEEE Transactions on industrial electronics*, 61(5), pp.2509-2520. <https://doi.org/10.1109/TIE.2013.2281162>
13. Mrad, M. and El-Samra, R., 2020. Waste tire management: Lebanon case study. *Journal of Waste Management and Disposal*, 3(1), p.101.
14. Peace, C., Petersen, G., Leary, M. and Wiggins, P., 2006. Technology Evaluation and Economic Analysis of Waste Tire Pyrolysis. Gasification, and Liquefaction, Integrated Waste Management Board.
15. Rüdüsüli, M., Schildhauer, T.J., Biollaz, S.M. and Van Ommen, J.R., 2012. Scale-up of bubbling fluidized bed reactors—A review. *Powder Technology*, 217, pp.21-38. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2011.10.004>
16. Sabogal, O.S., Valin, S., Thiery, S. and Salvador, S., 2021. Design and thermal characterization of an induction-heated reactor for pyrolysis of solid waste. *Chemical Engineering Research and Design*, 173, pp.206-214. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2021.07.018>

IRM

P Pyrolysis of Worn Tires by Induction Heating and Optimization of This Process Using Response Surface Methodology

Morteza bodaghabadi¹, Farhad Qaderi², Amirhossein sayahzadeh^{*3}

1. Master's student in Civil Engineering - Environment, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol,Iran
2. Associate Professor, Department of Environmental Engineering, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol,Iran
3. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Malayer University, Malayer,Iran

*Corresponding author Email: a.sayahzade@malayeru.ac.ir

Abstract

One of the solutions used to manage the crisis of used tires is its pyrolysis and the production of liquid fuel from it, which is always associated with challenges such as the need to shred the tires into small sizes and remove the steel wires in the tires; Therefore, designing an efficient reactor with the aim of solving the mentioned challenges and optimizing the effective parameters to achieve the maximum production fuel is one of the most important tasks required in the pyrolysis of worn tires on an industrial scale. In this regard, a new reactor was designed and built in which an induction heating system was used for the pyrolysis of worn tires. The most important parameters affecting the increase in fuel production included temperature, tire mass entering the reactor, nitrogen gas flow rate, the number of steel wires in the reactor and the size of the tire particles entering the reactor. These parameters were optimized with the help of process modeling by response surface methodology in order to obtain the maximum amount of produced fuel. The results showed that the maximum efficiency of the produced fuel was obtained at a temperature of 575 °C, with the number of wires of 20, at a nitrogen flow rate of 2 L/min, with an input mass of 250g and a particle size of 25cm², and its value is equal to 41.6% by weight.

Keywords: Pyrolysis, Induction Heating, RSM, Waste Management, Optimization