

طراحی و شبیه‌سازی سیستم پیرولیز تایر ضایعاتی با بهره‌گیری از سیستم‌های خورشیدی فتوولتائیک و کلکتورهای سهموی خطی (PTSC)

یاور خالدیان^{۱*} و پژمان خالدیان^۲

۱- مدیر واحد مکانیک پخت و فینیشینگ لاستیک بارز کردستان

۲- مدیر اداره پخت و فینیشینگ لاستیک بارز کردستان

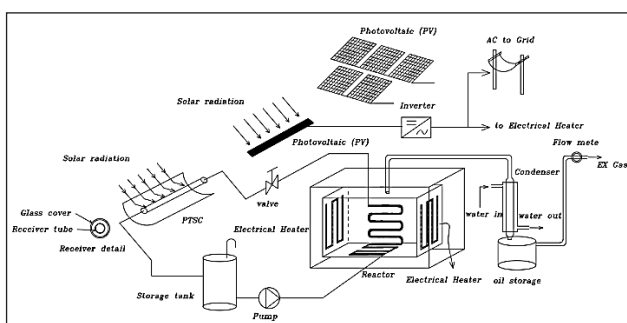
Mechanic.yavar@yahoo.com

چکیده: بازیافت تایر یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های صنعت تایر و محیط‌زیست است. در این پژوهش یک سیستم تمام خورشیدی پیرولیز تایرهای اسکرپ، طراحی، ساخت و مورد شبیه‌سازی قرار گرفته است. برای تأمین نیازهای انرژی راکتور پیرولیز از پانل‌های فتوولتائیک و کلکتورهای سهموی خطی استفاده و نتایج تجربی و شبیه‌سازی دستگاه مورد بررسی قرار گرفته است. میزان نیاز روزانه به انرژی برای راکتور برابر با ۴۰ kWh تعیین شده است، که در حالت سالانه به ۱۴,۴ MWh رسیده است. سیستم فتوولتائیک با توان تولیدی سالانه ۱۹,۲ MWh، که ۳۳,۳٪ بیشتر از نیاز مصرفی است، قادر به تأمین کامل انرژی الکتریکی راکتور و فروش برق مازاد ۴,۸ MWh در سال به شبکه است. افزون بر این، استفاده از کلکتور سهموی خطی به عنوان پیش گرمکن راکتور منجر به صرفه‌جویی ۶۲,۸۹٪ در مصرف انرژی الکتریکی و کاهش میانگین توان الکتریکی مصرفی به ۵,۰۳ kW شد که به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای هزینه‌های عملیاتی سیستم را کاهش می‌دهد. فرایند پیرولیز تایرهای اسکرپ در دماهای مختلف مورد آزمایش قرار گرفت و ارزش حرارتی روغن استخراجی، درصد وزنی محتوای کربن در زغال به‌دست‌آمده و ارزش حرارتی آن محاسبه شد.

واژه‌های کلیدی: پیرولیز، لاستیک ضایعاتی و فرسوده، محیط‌زیست، سیستم‌های خورشیدی فتوولتائیک-کلکتورهای خورشیدی PTSC

مقدمه

است. جهت انجام آزمایش لاستیک فرسوده به قطعات با سایز ۱۵ سانتی مترمکعب تقسیم و در دماهای مختلف مورد آزمایش قرار گرفته‌اند و نتایج مربوط به مواد خروجی از راکتور در دمای ۴۰۰ درجه ارزیابی شده‌اند. شکل ۱ شماتیکی از سیستم پیرولیز و اجزای آن را نشان می‌دهد. زمان آزمایش با توجه به خورشیدی بودن دستگاه از ساعت ۱۰:۰۰ عصر تا زمان ۱۵:۰۰ عصر در نظر گرفته شده است. اجزای اصلی سیستم پیرولیز خورشیدی شامل: مجموعه راکتور، مجموعه کندانسور، سیستم فتوولتائیک و اجزای آن، مجموعه PTSC و تجهیزات پایپینگ آن است. در مجموعه راکتور پیرولیز از دو نوع هیتر الکتریکی و گرمایشی پیش گرم‌کننده استفاده شده است. هیترهای گرمایشی پیش گرم‌کننده PTSC جهت تأمین دمای مورد نیاز سیستم استفاده شده است مجموعه کندانسور در خروجی راکتور قرار گرفته است. ساختمان کندانسور به‌صورت چهار لوله‌ای با تماس غیرمستقیم است و به این صورت عمل می‌کند که آب با دمای ۱۶ درجه سانتی‌گراد از یک‌طرف آن وارد و گازها و بخارات خروجی از راکتور از طرف دیگر وارد کندانسور می‌شود و پس از تبادل حرارت بین آب و گازهای خروجی، ذرات روغن موجود در گازهای خروجی کندانس شده و وارد مخزن ذخیره روغن می‌شوند و مابقی گازهای خروجی پس از عبور از فلومتر خارج می‌شوند.



شکل ۱- دیاگرام کلی سیستم ترکیبی پیرولیز خورشیدی با سیستم‌های فتوولتائیک و مجموعه پیش گرم‌کننده خورشیدی PTSC

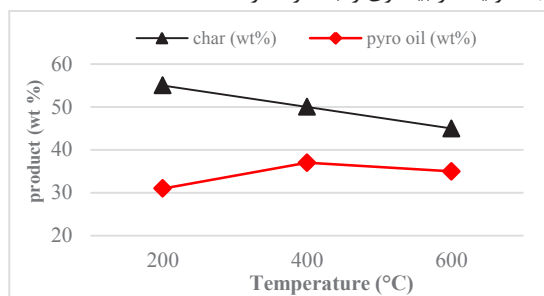
امروزه با افزایش جمعیت و توسعه یافتن جامعه، تقاضا برای مصرف انرژی به‌مرور بیشتر می‌شود از طرفی دیگر افزایش جمعیت منجر به افزایش ضایعات مختلف می‌شود [۱]. افزایش تدریجی جمعیت و تقاضای انرژی باعث می‌شود تا تکنیک‌ها و تکنولوژی‌های جایگزین و منابع موجود جدیدی مورد بررسی قرار بگیرند که می‌تواند بحران سوخت فعلی را کاهش دهند. سالانه میلیون‌ها تن لاستیک در سراسر جهان در محیط‌زیست رها می‌شود که دو سوم آن به دفن زباله‌ها منتقل می‌شود و یا به‌طور غیرقانونی دفع می‌شود و خطرات بسیار جدی زیست‌محیطی و سلامت عمومی را به‌همراه دارد [۲]. پیرولیز یکی از جدیدترین روش‌ها و تکنیک‌های ترموشیمیایی جالب و قابل‌اعتماد برای بازیابی انرژی از انواع مختلف پسماندهای زباله‌ای به‌ویژه لاستیک‌های اسکرپ است، باوجود تکنولوژی پیرولیز می‌توان زباله‌ها و پسماندهای جامد لاستیک‌های اسکرپ و فرسوده را به‌عنوان منابع ارزشمند انرژی در نظر گرفت. فاطمه پناز تجزیه و تحلیل اقتصادی پیرولیز لاستیک کهنه، پتانسیل و فرصت‌های جدید در صنعت پیرولیز تایر را مورد بررسی قرار داد در این مطالعه پتانسیل اقتصادی صنعت پیرولیز را براساس شرایط بازار در حال تحول ارزیابی کردند و پتانسیل بازار بالقوه را براساس حجم تایرهای کهنه‌ای که انتظار می‌رفت در ۲۰ سال آینده وارد بازار شود، را پیش‌بینی کردند [۳]. رانگشان، شبیه‌سازی و تجزیه و تحلیل فنی-اقتصادی در فرایند پیرولیز لاستیک زباله را انجام دادند. و روش‌های مختلف دفع لاستیک‌های زباله را بررسی کردند. در این پژوهش یک سیستم پیرولیز آزمایشگاهی کاملاً خورشیدی با ترکیب پنل‌های خورشیدی فتوولتائیک و همچنین سیستم PTSC به‌صورت مطالعه موردی در شرایط آب و هوایی کشور ایران، طراحی و مورد بررسی قرار داده شده است. از مزایای این سیستم نسبت به سایر سیستم‌های موجود استفاده از سیستم‌های تمام خورشیدی دوست‌دار محیط‌زیست مانند: سیستم فتوولتائیک به‌عنوان تأمین‌کننده انرژی راکتور و استفاده از سیستم PTSC به‌عنوان یک سیستم پیش گرم‌کن راکتور پیرولیز است.

بخش تجربی

در این پژوهش از تایر به‌عنوان مواد ورودی و تغذیه راکتور پیرولیز استفاده شده

برابر با ۱۷۱۰۳ W است. باتوجه به نتایج مربوط به عملکرد PTSC میانگین دمای سیال خروجی از کلکتور در طول بازه زمانی در نظر گرفته شده برابر با ۲۶۱ درجه سانتی گراد بوده که با تأمین این دما توسط کلکتور میانگین درصد صرفه جویی در مصرف برق راکتور برابر با ۶۲/۸۹٪ به دست می آید که میانگین میزان توان الکتریکی صرفه جویی شده معادل آن برابر با ۵۰۳ kW خواهد بود. این نتایج نشان می دهد که استفاده از کلکتور خورشیدی سهمی به عنوان پیش گرمکن راکتور، تأثیر قابل توجهی در کاهش مصرف انرژی الکتریکی دارد و به طور قابل ملاحظه ای هزینه های عملیاتی سیستم را کاهش می دهد.

شکل ۳ نتایج مربوط به تأثیر دما بر روی پارامترهای روغن و زغال سنگ (Char) مربوط به فرایند پیرولیز تابرهای اسکرپ به حجم ۱۵ cm³ در دماهای مختلف را نشان می دهد. باتوجه به نمودار مقدار روغن تولید شده با افزایش دما تا مقدار مشخصی زیاد و سپس با افزایش بیشتر دما این مقدار کاهش می یابد و هم زمان با این تغییرات دما، مقدار Char تولیدی تا دمای ثانویه کاهش و مقدار آن در نهایت با افزایش بیشتر دما، تقریباً ثابت می شود. دلیل اصلی این تغییرات این است که دمای بالاتر باعث تجزیه ثانویه بخارات روغن به گازهای مختلف شده و در نتیجه، تولید گاز بیشتری را به همراه دارد.



شکل ۳- نتایج مربوط تغییرات مقدار کربن و روغن تولیدی در دماهای مختلف

جدول ۱ خواص فیزیکی و شیمیایی مربوط به روغن استخراج شده از راکتور را نشان می دهد که با نتایج پژوهش محمد عبدالعزیز مقایسه شده است.

جدول ۱- اعتبارسنجی و مقایسه خصوصیات روغن خروجی از راکتور با نتایج محققان دیگر

ارزش حرارتی (MJ/kg)	ویسکوزیته	چگالی (kg/m ³)	نقطه اشتعال (C)	
۴۲،۵	۴،۵	۹۷۰	۳۳	Mohammad Abdul Aziz. (2018) [6]
۴۱،۳	۴،۸	۹۸۳	۳۵	مطالعه حاضر

جدول ۲ خواص مختلف مربوط به زغال (Char) به دست آمده از این پژوهش را در دمای ۴۰۰ درجه سانتی گراد نشان می دهد. مقادیر به دست آمده با پژوهش های دیگر مورد مقایسه قرار گرفته است.

جدول ۲- اعتبارسنجی و مقایسه خروجی پیرولیز با تحقیقات دیگر

ویژگی ها	Murillo et al. (2006) [5]	Mohammad Abdul Aziz. (2018) [6]	مطالعه حاضر
ارزش حرارتی (MJ/kg)	۳۳،۵۹	۳۱	۲۹،۵۱
کربن (%wt)	۹۰،۲۷	۸۳،۳۴	۸۰

نتیجه گیری و پیشنهادها

این پژوهش نشان داد که استفاده از سیستم های انرژی خورشیدی، شامل پانل های

به طور کلی بازده الکتریکی و توان الکتریکی کلکتور فتوولتائیک تابعی از دمای کلکتور است از طرفی توان خروجی اینورتر وابسته به بازده اینورتر است که طبق رابطه های بیان شده، محاسبه می شوند [۴].

$$P_{pv} = P_{PV,STC} f_{PV} \left(\frac{G}{G_{STC}} \right) (1 + \beta_{pv}(T_{pv} - T_{rc})) \quad (1)$$

که در این معادله P_{pv} توان تولیدی خروجی از کلکتور فتوولتائیک، G میزان شدت تابش خورشیدی، G_{STC} میزان تابش خورشیدی در حالت استاندارد β_{pv} ضریب دمایی بازده کلکتور، T_{pv} دمای کلکتور خورشیدی، T_{rc} دمای مرجع، P_{Invout} توان الکتریکی AC خروجی از اینورتر، P_{InvIn} توان DC ورودی به اینورتر و η_{Inv} بازده کلی مربوط به اینورتر است.

$$Q_{loss} = \frac{\pi 2 k_{eff} L}{\ln(D_{ci}/D_r)} (T_r - T_{ci}) + \frac{\pi D_r L \sigma (T_r^4 - T_{ci}^4)}{\frac{1}{\varepsilon_r} + \frac{1 - \varepsilon_c}{\varepsilon_c} \left(\frac{D_r}{D_{ci}} \right)} \quad (2)$$

که در این معادله Q_{loss} مقدار اتلاف حرارتی از لوله های حرارتی مربوط به کلکتور حرارتی، T_r دمای متوسط رسیور کلکتور و T_{ci} دمای سطح داخلی پوشش شیشه ای اطراف لوله کلکتور است و تابعی از پارامترهای مختلف مربوط به مقاومت حرارتی پوشش شیشه ای اطراف لوله حرارتی و همچنین دمای سطح داخلی پوشش شیشه ای یعنی پارامتر T_{ci} است.

$$P_u = F_R [\eta_{solar} I_s A_a - A_r U_L (T_{in} - T_{amb})] \quad (3)$$

در این معادله P_u مقدار انرژی مفید جذب شده توسط کلکتور، F_R ضریب تفکیک حرارتی کلکتور، η_{solar} بازده خورشیدی کلکتور، I_s میزان شدت تابش خورشیدی، A_a سطح دهانه کلکتور، A_r مساحت رسیور کلکتور، T_{in} دمای سیال ورودی کلکتور، T_{amb} دمای محیط اطراف و U_L ضریب اتلافات حرارتی کلی است که از طریق معادله زیر به دست می آید:

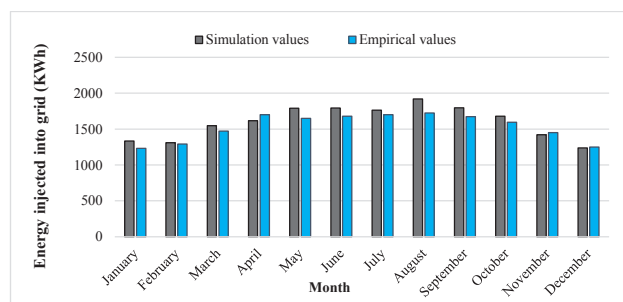
$$U_L = \left[\frac{A_r}{A_c (h_w + h_{r,c-a})} + \frac{1}{h_{r,r-c}} \right]^{-1} \quad (4)$$

$$h_{r,r-c} = \frac{\sigma (T_c + T_r)(T_c^2 + T_r^2)}{1/\varepsilon_r + (1/\varepsilon_c - 1) A_r/A_c} \quad (5)$$

نتیجه ها و بحث

نتایج مربوط به این پژوهش از دو رویکرد مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج عددی، شبیه سازی و تجربی سیستم فتوولتائیک و سیستم PTSC خورشیدی و نتایج تجربی عملکرد مربوط به راکتور پیرولیز و ویژگی پارامترهای مهم و اساسی مربوط به پیرولیز تابر.

نتایج نشان می دهد که مقادیر مربوط به شبیه سازی با دقت بالایی نزدیک به نتایج تجربی است. مقدار توان تولیدی از کلکتور فتوولتائیک در حالت تجربی و شبیه سازی به ترتیب برابر با ۷۲/۹ و ۶۶/۲۶ kWh در روز است این در حالی است کل توان روزانه مورد نیاز راکتور برابر ۴۰ kWh است. که می توان برق مازاد را به شبکه فروخت. شکل ۲ مقایسه میزان تولید انرژی ماهانه از سیستم فتوولتائیک و شبیه سازی را در ماه های مختلف سال نشان می دهد.



شکل ۲- مقایسه مقدار توان تولید شده در طول ماه های مختلف سال در

شبیه سازی سیستم فتوولتائیک نسبت به نتایج تجربی

نتایج PTSC نشان می دهد که میانگین انرژی مفید جذب شده توسط کلکتور در شدت تابش های خورشیدی در بازه زمانی ساعت ۱۰:۰۰ الی ۱۵:۰۰، برابر ۱۴۷۵۴ w است. همچنین بیشترین مقدار انرژی جذب شده توسط کلکتور

پلاستیکی مورد استفاده قرار گیرند. بنابراین، این فرایند افزون بر حل مشکلات زیست محیطی ناشی از تایرهای دورافتاده، فرصتهای اقتصادی قابل توجهی را فراهم می آورد. با پیاده سازی این پیشنهادها، می توان سیستم پیرولیز تایر تقویت شده توسط انرژی خورشیدی را به یک راهکار پایدار، اقتصادی و زیست محیطی تبدیل کرد که به حل چالش های انرژی و مدیریت زباله کمک می کند.

فتولتاییک و کلکتورهای سهموی خطی، برای تأمین نیازهای انرژی راکتور پیرولیز تایرهای اسکرپ، یک راهکار کارآمد و پایدار است. فرایند پیرولیز تایرهای اسکرپ در دماهای مختلف منجر به تولید محصولات مفیدی مانند روغن با ارزش حرارتی 41.3 MJ/kg و زغال (Char) با محتوای کربن بالا (80٪) شده است. این محصولات می توانند در صنایع مختلف مانند تولید سوخت، مواد مغذی سوختی، و محصولات

مراجع

- [1] Hoang, T. A., & Van Le, V. (2017). The Performance of A Diesel Engine Fueled With Diesel Oil, Biodiesel and Preheated Coconut Oil. *International Journal of Renewable Energy Development*, 6(1).
- [2] Umeki, E. R., de Oliveira, C. F., Torres, R. B., & dos Santos, R. G. (2016). Physico-chemistry properties of fuel blends composed of diesel and tire pyrolysis oil. *Fuel*, 185, 236-242.
- [3] Goksal, F. P. (2022). An economic analysis of scrap tire pyrolysis, potential and new opportunities. *Heliyon*, 8(11).
- [4] Solar Assisted Pyrolysis of Plastic Waste: Pyrolysis oil Characterization and Grid-Tied Solar PV Power System.
- [5] Murillo, R., Aylón, E., Navarro, M. V., Callén, M. S., Aranda, A., & Mastral, A. M. (2006). The application of thermal processes to valorise waste tyre. *Fuel processing technology*, 87(2), 143-147.
- [6] Aziz, M. A., Rahman, M. A., & Molla, H. (2018). Design, fabrication and performance test of a fixed bed batch type pyrolysis plant with scrap tire in Bangladesh. *Journal of radiation research and applied sciences*, 11(4), 311-316.