



طرح تحقیق پایان نامه مقطع کارشناسی ارشد

— مشخصات دانشجو و اساتید:

مشخصات دانشجو:

نام و نام خانوادگی: علی عبداللهی
شماره دانشجویی: ۴۰۳۱۴۲۹۸۰۰۹ رشته تحصیلی: مهندسی شیمی
(گرایش طراحی فرآیند)

مشخصات استاد راهنما:

نام و نام خانوادگی: عباس محمدی
مرتبه دانشگاهی: استادیار

۲. اطلاعات مربوط به پایان نامه:

عنوان پایان نامه	
فارسی:	ارزیابی چرخه عمر و تحلیل فنی-اقتصادی پیرولیز ضایعات پلاستیکی پلی اتیلن ترفتالات
انگلیسی:	Life Cycle Assessment and Techno-Economic Analysis for Pyrolysis of Polyethylene Terephthalate (PET) Plastic Wastes
واژگان کلیدی (۵ تا ۷ کلمه):	
فارسی:	پسماند پلاستیکی، پیرولیز، ارزیابی چرخه عمر، گازهای گلخانه‌ای، بازیافت شیمیایی
انگلیسی:	Plastic Waste, Pyrolysis, Life Cycle Assessment, Greenhouse Gases, Chemical Recycling
تعداد واحد پایان نامه: ☐ ۴ واحد ☒ ۶ واحد	
نوع تحقیق: ☐ بنیادی ☒ کاربردی ☐ توسعه‌ای	

توجه: ۱- این طرح توسط دانشجو با راهنمایی استاد راهنما تکمیل شود.

۲- جهت تایپ متون فارسی از خط B Nazanin و متون انگلیسی Times New Roman

آیا موضوع پارسا در راستای مأموریت‌های سه‌گانه دانشگاه قم و یا نقشه جامع علمی کشور می‌باشد؟ (اگر بله مورد ذکر شود)

بله ■ خیر □

این پژوهش در راستای مأموریت «تغییر اقلیم و محیط‌زیست» دانشگاه قم بوده و با تمرکز بر کاهش اثرات زیست‌محیطی پسماندهای پلاستیکی و تحلیل انتشار گازهای گلخانه‌ای، به توسعه راهکارهای پایدار مدیریت پسماند کمک می‌کند.

آیا پایان‌نامه جز یکی از موارد نیاز محور، تقاضا محور یا فناورانه می‌باشد؟ (اگر بله با ارائه مستندات)

بله □ خیر ■

(برای توضیحات تکمیلی دو مورد فوق، به انتهای فایل مراجعه گردد)

بیان مسأله و ضرورت انجام تحقیق:

۳

۳-۱- مقدمه

گسترش تولید و مصرف جهانی پلاستیک‌ها به‌ویژه پلی‌اتیلن ترفتالات (PET)^۱ در دهه‌های اخیر، پیامدهای زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی قابل توجهی ایجاد کرده است. PET به دلیل ویژگی‌هایی چون استحکام مناسب، شفافیت بالا، وزن کم و قابلیت شکل‌پذیری، در صنایع بسته‌بندی نوشیدنی، مواد غذایی و تولید الیاف مصنوعی کاربرد گسترده‌ای یافته است. اما همین گستردگی مصرف، همراه با نرخ پایین جمع‌آوری و بازیافت، موجب انباشت چشمگیر پسماندهای PET در محیط‌زیست شده است؛ پسماندهایی که به دلیل مقاومت بالا در برابر تخریب طبیعی، می‌توانند صدها سال در طبیعت باقی بمانند و موجب آلودگی اکوسیستم‌های خشکی و دریایی و تشکیل میکروپلاستیک‌ها شوند. در کنار این مسئله، روش‌های مرسوم مدیریت پسماند نظیر دفن و سوزاندن نیز خود با چالش‌هایی مانند انتشار گازهای گلخانه‌ای، تولید ترکیبات سمی، اشغال زمین و هزینه‌های بالای زیست‌محیطی مواجه هستند.

افزایش نگرانی‌ها نسبت به تغییرات اقلیمی و محدودیت منابع طبیعی موجب شده است رویکرد «اقتصاد چرخشی»^۲ به‌عنوان یک چارچوب نوین برای مدیریت پایدار منابع و کاهش تولید پسماند مورد توجه قرار گیرد. در این چارچوب، فناوری‌های بازیافت شیمیایی به‌ویژه فرآیند پیرولیز^۳، به‌عنوان یکی از گزینه‌های کلیدی برای بازیابی انرژی و مواد از پسماندهای پلاستیکی مطرح شده‌اند. پیرولیز با تبدیل PET به محصولات با ارزش افزوده مانند روغن پیرولیز، گاز

^۱ Polyethylene Terephthalate (PET)

^۲ Circular Economy

^۳ Pyrolysis

سوختی و کربن جامد، می‌تواند نقش مهمی در کاهش آلودگی‌ها و جایگزینی بخشی از مصرف سوخت‌های فسیلی ایفا کند.

با وجود مزایای بالقوه پیرولیز، ارزیابی جامع پایداری این فناوری مستلزم بررسی همزمان اثرات زیست‌محیطی و اقتصادی است. ابزارهای تحلیلی مانند ارزیابی چرخه عمر (LC) و تحلیل هزینه چرخه عمر (LCC) می‌توانند با ارائه تصویری جامع از اثرات upstream و downstream، دیدگاهی دقیق برای تصمیم‌گیری سیاست‌گذاران، سرمایه‌گذاران و طراحان فرایند فراهم کنند. از سوی دیگر، پژوهش‌های مختلف نشان می‌دهند که عملکرد زیست‌محیطی و اقتصادی پیرولیز به شدت تحت تأثیر نوع خوراک، پارامترهای فرایندی، مقیاس تولید و فناوری مورد استفاده قرار دارد. بنابراین، نیاز است یافته‌های پژوهش‌های موجود به صورت نظام‌مند گردآوری، مقایسه و تحلیل شوند تا تصویری یکپارچه از پایداری زیست‌محیطی و اقتصادی پیرولیز ضایعات PET ارائه شود.

۳-۲- تعریف (بیان) مسئله

افزایش سریع تولید و مصرف پلاستیک در دهه‌های اخیر یکی از چالش‌های بنیادی زیست‌محیطی و اقتصادی جهان معاصر شده است. پلی‌اتیلن ترفتالات (PET) به دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فردی مانند وزن کم، شفافیت بالا، مقاومت مکانیکی مناسب و قابلیت شکل‌پذیری، کاربردی گسترده در صنایع متعدد، به‌ویژه در بسته‌بندی نوشیدنی‌ها، مواد غذایی و تولید الیاف مصنوعی یافته است (Geyer et al., 2017).

پسماندهای PET به دلیل مقاومت بسیار بالا در برابر تجزیه طبیعی، می‌توانند برای قرن‌ها در محیط باقی بمانند و موجب آلودگی گسترده اکوسیستم‌های خشکی و آبی شوند (Jambeck et al., 2015). تجمع این پسماندها در محیط‌زیست علاوه بر آسیب مستقیم به حیات وحش، منجر به تشکیل میکروپلاستیک‌ها و ورود آن‌ها به زنجیره غذایی می‌شود که پیامدهای بالقوه‌ای برای سلامت انسان و اکوسیستم‌های جهانی دارد (Jambeck et al., 2015). از سوی دیگر، روش‌های سنتی مدیریت پسماند مانند دفن در محل‌های دفن زباله یا سوزاندن با چالش‌های فراوانی مواجه هستند که شامل اشغال زمین، تولید شیرابه، انتشار گازهای گلخانه‌ای و ترکیبات سمی مانند دیوکسین‌ها می‌باشد (Hopewell et al., 2009).

پلاستیک‌های متداول از جمله پلی‌اتیلن (PE)، پلی‌پروپیلن (PP)، پلی‌استایرن (PS)، پلی‌وینیل کلراید (PVC) و پلی‌اتیلن ترفتالات (PET) عمدتاً از پلیمرهای مبتنی بر نفت و سوخت‌های فسیلی تولید می‌شوند که این موضوع نگرانی‌های جدی در مورد پایداری بلندمدت، تغییرات اقلیمی و تخفیف منابع طبیعی را ایجاد کرده است (Thompson et al., 2009). میزان تولید جهانی پسماند پلاستیکی در حال افزایش نمایی است؛ پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۵۰ این میزان به حدود ۲۶ میلیارد تن برسد (Guglielmi, 2017). در سطح جهانی، نرخ بازیافت پلاستیک‌ها تنها در محدوده ۰ تا ۳۰ درصد است و مقدار زیادی از پسماندها همچنان سوزانده یا دفن می‌شود (Kosior et al., 2018).

کمبود سیستم‌های کارآمد بازیافت و مدیریت پسماند، همراه با ناکافی بودن اجرای اصول اقتصاد چرخشی، موجب نگرانی‌های جدی شامل افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای، کاهش منابع طبیعی و ایجاد آلودگی‌های پایدار و بلندمدت در محیط‌زیست شده است (Hopewell et al., 2009).

در سال‌های اخیر، رویکرد اقتصاد چرخشی به عنوان الگویی نوین برای مواجهه با بحران زیست‌محیطی مورد توجه قرار گرفته است (Geissdoerfer et al., 2017). در این چارچوب، تبدیل پسماندهای پلاستیکی به مواد یا انرژی ارزشمند نقش مهمی در کاهش مصرف منابع طبیعی و تضعیف آلودگی محیط‌زیست ایفا می‌کند (Ranta et al., 2018). اقتصاد خطی سنتی که از استخراج مواد اولیه، تولید، مصرف و دفع تشکیل شده است، به‌طور اجتناب‌ناپذیر مسائلی مانند کاهش منابع و تخریب محیط‌زیست را در پی دارد (Sariatli, 2017).

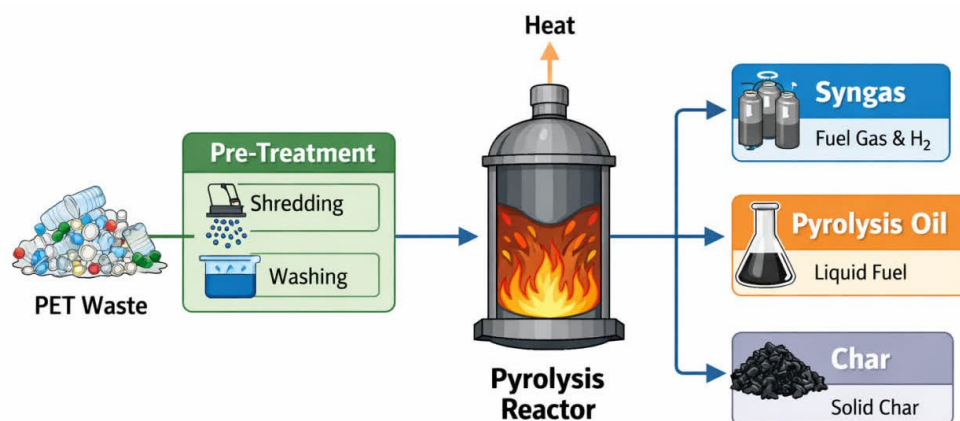
فناوری‌های پیشرفته‌ای توسعه یافته‌اند که می‌توانند کارایی بازیافت شیمیایی را افزایش داده و اثرات زیست‌محیطی را به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهند (Dai et al., 2022). روش‌های بازیافت شیمیایی مانند پیرولیز، گازی‌سازی و فرآیندهای هیدروترمال امکان بازیابی مواد ارزشمند از پسماندهای پلاستیکی را فراهم می‌کنند (Ragaert et al., 2017). علاوه بر این، استفاده از کاتالیزورهای فلزی و تکنیک‌های پردازش پیشرفته می‌تواند کارایی تبدیل پسماندهای پلاستیکی به هیدروکربن‌های مفید را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد (Chauhan et al., 2026).

فرآیند پیرولیز به عنوان یکی از کارآمدترین و مؤثرترین روش‌ها برای ارزش‌افزایی پسماندهای پلاستیکی شناخته شده است (Yuliansyah et al., 2015). پیرولیز فرآیندی است که در آن مواد پلیمری در شرایط دمایی بالا (معمولاً ۳۵۰ تا ۵۰۰ درجه سلسیوس) و در غیاب اکسیژن تجزیه شده و به محصولات با ارزش اقتصادی مانند روغن پیرولیز، گاز (متان، اتان، پروپان و غیره) و کربن جامد (کک) تبدیل می‌شود (Tiwari, 2018 & Das). در مقایسه با سوزاندن، پیرولیز به دلیل انجام در محیط بدون اکسیژن، انتشار آلاینده‌های مضر مانند دیوکسین‌ها و ترکیبات فنولی را به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌دهد (Chauhan et al., 2026). برخلاف بازیافت مکانیکی که نیازمند جداسازی دقیق انواع پلاستیک است، در فرآیند پیرولیز می‌توان پسماندهای پلاستیکی چندلایه و مخلوط را مستقیماً و بدون نیاز به عملیات جداسازی پیچیده به محصولات مفید تبدیل کرد (Sekar et al., 2022).

محصولات حاصل از پیرولیز PET، هیدروکربن‌های سبکی هستند که می‌توانند به صورت خالص یا مخلوط به عنوان سوخت در موتورهای درونی سوز، توربین‌های گازی یا برای تولید انرژی الکتریکی استفاده شوند (Yuliansyah et al., 2015). این امر علاوه بر کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و تقویت امنیت انرژی، موجب کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و تقویت اصول اقتصاد چرخشی می‌شود (Gartzen Lopez et al., 2017).

تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که فناوری پیرولیز می‌تواند تا ۴۷ درصد کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن نسبت به روش سوزاندن کنترل شده (WtE) را فراهم کند و روغن تولید شده دارای بازده انرژی سرمایه‌گذاری شده (EROI) بیش از یک است (Almohamadi et al., 2021). پژوهش‌هایی که بر روی پیرولیز پسماندهای پلاستیکی انجام شده است، نشان می‌دهد که این فناوری می‌تواند نرخ بازگشت سرمایه (IRR) بیش از ۱۵ درصد را در شرایط اقتصادی مناسب

ایجاد کند (Almohamadi et al., 2021). در تصویر (۱) به ارائه مراحل و محصولات فرآوری PET با استفاده از روش پیرولیز پرداخته شده است.



شکل ۱- مراحل و محصولات حاصل از فرآوری PET با استفاده از روش پیرولیز

علاوه بر این، توسعه فناوری پیرولیز در سطح جهانی با چالش‌های نظارتی و سیاستی مختلفی روبه‌رو است (Sorunmu et al., 2020). کشور هند یکی از منسجم‌ترین چارچوب‌های قانونی برای فناوری پیرولیز را ایجاد کرده است که شامل دستورالعمل‌های عملیاتی استاندارد، طبقه‌بندی‌های سطح ایالتی و سازوکار مسئولیت توسعه‌یافته تولیدکننده (EPR) می‌باشد (Hossain et al., 2022). در مقابل، در ایالات متحده آمریکا ساختار مقرراتی پراکنده‌ای وجود دارد؛ برخی ایالت‌ها پیرولیز را به عنوان فعالیت تولیدی طبقه‌بندی می‌کنند، در حالی که مقررات فدرال همچنان آن را در دسته سوزاندن قرار می‌دهد (Johnson, 2023). همچنین اتحادیه اروپا هنوز بازیافت شیمیایی را به طور رسمی در دستورالعمل چارچوب پسماند خود ادغام نکرده است (Geueke et al., 2018). علاوه بر این، ممنوعیت واردات پسماند پلاستیکی توسط چین در سال ۲۰۱۸ جریان جهانی پسماند پلاستیکی را به طور قابل توجه تغییر داده است (Liu, 2023 & Liu, 2023).

در سال‌های اخیر، هوش مصنوعی (AI) و یادگیری ماشین (ML) به عنوان ابزارهایی تحول‌آفرین برای پیشبرد تحقیقات مرتبط با پیرولیز مطرح شده‌اند (Timilsina et al., 2024). مدل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی می‌توانند مجموعه‌های بزرگ داده‌های آزمایشگاهی را تحلیل کرده و روابط پنهان میان متغیرهای عملیاتی و نتایج شیمیایی را شناسایی کنند (Rajpurohit et al., 2025). الگوریتم‌های یادگیری نظارت شده مانند جنگل تصادفی، ماشین بردار پشتیبان، گرادیان بوستینگ و شبکه‌های عصبی با موفقیت برای پیش‌بینی بازده روغن، ارزش حرارتی بالاتر (HHV) و ترکیب گاز حاصل از مخلوط‌های پلیمری ناهمگن به کار گرفته شده‌اند (Mondal, 2024 & Hooda). روش‌های یادگیری بدون نظارت و ترکیبی نیز امکان خوشه‌بندی انواع خوراک و شناسایی ناهنجاری‌ها را فراهم می‌کنند (Chen et al., 2023). مدل‌سازی جانشین و الگوریتم‌های تکاملی نیز تحول قابل توجهی در بهینه‌سازی چندهدفه فرآیند پیرولیز ایجاد کرده‌اند (Wang et al., 2024).

این مدل‌ها امکان شناسایی شرایط بهینه پارتو را فراهم می‌کنند که در آن‌ها بازده روغن، کارایی انرژی و کاهش تولید کربن جامد به طور همزمان متعادل می‌شوند (Wang et al., 2024). همچنین ادغام الگوریتم‌های مدل‌سازی جانشین با شاخص‌های پایداری مانند بازده انرژی سرمایه‌گذاری شده (EROI) موجب شده است که کاربرد این روش‌ها از بهینه‌سازی تجربی به طراحی جامع فرآیند گسترش یابد (Zhao et al., 2026).

بحث‌ها در مورد چگونگی پاسخ‌گویی به بحران اقلیمی در سراسر جهان در حال انجام است. بر این اساس، «جامعه کم‌کربن» مورد تأکید قرار گرفته و نظام «اقتصاد چرخشی» توجه زیادی را به خود جلب کرده است (Geissdoerfer et al., 2017). برای آن‌که خالص انتشار دی‌اکسید کربن «صفر» شود، به جای ساختار خطی سنتی که با حجم زیادی از پسماند پایان می‌یابد، به یک ساختار اقتصادی نیاز است که در آن منابع به صورت مستمر در چرخه باقی بمانند (Sariatli, 2017).

پلاستیک‌ها یکی از پرمصرف‌ترین مواد هستند و در کل زنجیره از تولید تا دفع، مقدار زیادی گازهای گلخانه‌ای (GHG) منتشر می‌کنند (Seigné-Itoiz et al., 2015). تجزیه پلاستیک مدفون بیش از ۵۰۰ سال طول می‌کشد (Urtuvia et al., 2014).

۳-۳- ضرورت انجام تحقیق

با توجه به افزایش چشمگیر تولید و مصرف پلاستیک‌ها در سطح جهان، مدیریت پسماندهای حاصل از این مواد به یکی از چالش‌های اساسی زیست محیطی تبدیل شده است. بر اساس مطالعات انجام شده، پسماندهای پلاستیکی، به‌ویژه پلی‌اتیلن ترفتالات (PET) در طول زمان و به دلیل مقاومت بالا در برابر تجزیه طبیعی، موجب آلودگی‌های زیست محیطی و تهدیداتی برای سلامت اکوسیستم‌ها و سیستم‌های زیستی انسان می‌شوند (Jambeck et al., 2015). علاوه بر این، روش‌های سنتی مانند دفن و سوزاندن پسماندهای پلاستیکی، اثرات منفی قابل توجهی بر محیط زیست دارند، از جمله انتشار گازهای گلخانه‌ای و ترکیبات سمی نظیر دی‌وکسین‌ها (Hopewell et al., 2009).

در مقابل، فناوری‌های نوین مانند فرآیند پیرولیز، پتانسیل بالایی در کاهش حجم پسماندهای پلاستیکی و تبدیل آن‌ها به سوخت‌های هیدروکربنی با ارزش اقتصادی دارند. اما توسعه و افزایش بهره‌وری این فناوری نیازمند ارزیابی‌های جامع از جنبه‌های زیست محیطی و اقتصادی آن است، تا بتوان انتخاب‌های بهینه در سطح فناوری و سیاست‌گذاری را انجام داد. در این راستا، ارزیابی چرخه عمر (LCA) و تحلیل هزینه چرخه عمر (LCC) ابزارهای مؤثری در تعیین مقیاس‌پذیری، پایداری و تأثیرات زیست محیطی و اقتصادی این فناوری‌ها هستند (ISO, 2006).

بررسی‌های پیشین عمدتاً بر جنبه‌های فنی و زیست محیطی تمرکز داشته و کمتر به هم‌افزایی اثرات اقتصادی و زیست محیطی حین فرآیندهای پیرولیز توجه شده است؛ در نتیجه، برآوردهای ناصحیح و ناقص از پایداری این فناوری‌ها صورت گرفته است. این نقیصه، اهمیت انجام مطالعه‌ای جامع که بتواند تأثیرات اقتصادی و زیست محیطی فرآیند پیرولیز PET را در قالب یک رویکرد تلفیقی بررسی کند، را برجسته می‌سازد.

از سوی دیگر، با توجه به پیشرفت‌های روزافزون در حوزه فناوری‌های هوشمند و بهره‌گیری از داده‌کاوی و یادگیری ماشین در بهبود فرآیندهای مهندسی، تحلیل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی می‌تواند نقش مهمی در بهینه‌سازی عملیاتی و اقتصادی فرآیند پیرولیز ایفا کند (Hayoung Park et al., 2023). این رویکرد به‌ویژه در شرایط عدم قطعیت و نیاز به تحلیل سناریوهای مختلف، می‌تواند راهکاری پایدار و مقرون‌به‌صرفه برای توسعه فناوری‌های بازیافت پلاستیک باشد. در نتیجه، انجام مطالعه‌ای جامع و تلفیقی در حوزه ارزیابی چرخه عمر و تحلیل فنی-اقتصادی پیرولیز پسماندهای PET، به‌عنوان یک الزام حیاتی برای سیاست‌گذاران، پژوهشگران و فعالان صنعتی در جهت ارتقاء فناوری‌های پایدار و کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی و اقتصادی این مواد است (Hayoung Park et al., 2023). این پژوهش می‌تواند با ارائه راهکارهای مبتنی بر مدل‌های علمی و داده‌محور، راه را برای توسعه پایدار در مدیریت پسماندهای پلاستیکی و بهره‌برداری از منابع انرژی تجدیدپذیر هموار سازد.

۴-۱ پیشینه‌های فارسی

ارومیه‌ای (۱۳۹۵) در مقاله "بازیافت مخلوط ضایعات پلاستیکی پرمصرف پلی‌اتیلن ترفتالات (PET)، پلی‌پروپیلن (PP) و پلی‌اتیلن (PE) و تبدیل آن به محصولات با ارزش افزوده، اشتغال‌زایی و حفاظت از محیط زیست" چنین بیان می‌کنند: این پژوهش با هدف بهبود خواص مکانیکی و ایجاد ارزش افزوده از اختلاط ضایعات رایج شهری انجام شد. جامعه آماری شامل پرک‌های حاصل از ضایعات PET، PP و PE جمع‌آوری شده از پسماندهای شهری بود و چندین نسبت اختلاط به‌صورت آزمایشگاهی بررسی شد. حجم نمونه در قالب چند فرمولاسیون اختلاطی و تکرارهای آزمایشگاهی تعریف گردید. ابزار گردآوری داده‌ها شامل فرایند اکستروژن برای آلیاژی‌سازی، آزمون‌های خواص مکانیکی (کشش و ضربه)، و ارزیابی‌های فیزیکی-حرارتی بود. یافته‌ها نشان داد آمیزه حاوی ۸۰٪ PET و ۱۰٪ از هر یک از PP و PE بهترین تعادل خواص را ارائه می‌دهد و نسبت به سایر ترکیبات، استحکام و کارایی بالاتری دارد. نتایج بیانگر آن است که آلیاژی‌سازی ضایعات پلاستیکی می‌تواند علاوه بر کاهش آلودگی زیست‌محیطی، در تولید قطعات صنعتی و یدکی کاربرد داشته و زمینه اشتغال‌زایی را فراهم کند. این مطالعه بر مزیت اقتصادی بازیافت مکانیکی و نقش آن در اقتصاد سبز تأکید دارد.

اسماعیلی و همکاران (۱۳۹۱) در مقاله "پیرولیز حرارتی، روشی مناسب برای مدیریت ضایعات پلاستیکی" چنین بیان می‌کنند: این مقاله مروری-تحلیلی با هدف بررسی روش‌های مختلف مدیریت پسماند پلاستیکی و تمرکز ویژه بر پیرولیز حرارتی تدوین شد. جامعه آماری شامل مطالعات، گزارش‌ها و داده‌های آزمایشگاهی مرتبط با بازیافت حرارتی پلاستیک‌ها بود و نمونه‌گیری به‌صورت اسنادی انجام گرفت. ابزار گردآوری داده‌ها تحلیل منابع علمی، مقایسه فرایندهای دفن، بازیافت مکانیکی، بازیافت شیمیایی، سوزاندن و پیرولیز کاتالیستی و غیرکاتالیستی بود. یافته‌ها نشان داد پیرولیز می‌تواند ضایعات پلاستیکی را به سوخت‌های هیدروکربنی و مواد شیمیایی ارزشمند تبدیل

کند و تحت شرایط بهینه دما، زمان ماند و نوع کاتالیست، بازده و کیفیت محصول افزایش می‌یابد. همچنین مشخص شد طراحی صحیح راکتور و کنترل شرایط عملیاتی نقش کلیدی در کاهش هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری دارد. نتایج بر این نکته تأکید دارد که در صورت توسعه فناوری مناسب، پیرولیز می‌تواند جایگزین اقتصادی برای بخشی از سوخت‌های فسیلی بوده و به‌عنوان راهکاری کارآمد در مدیریت پایدار پسماندهای پلاستیکی مطرح شود.

۴-۲ پیشینه‌های خارجی

خانا و همکاران (۲۰۲۶) در مقاله "بهینه‌سازی چندهدفه هوش مصنوعی پیرولیز پسماند پلاستیک با ادغام شاخص بازگشت انرژی سرمایه‌گذاری برای بازیافت چرخشی پلیمرها" چنین بیان می‌کنند: این پژوهش با هدف بهینه‌سازی بازیابی محصول و کمینه‌سازی مصرف انرژی در پیرولیز پلاستیک انجام شد. جامعه آماری شامل ۳۱۲ داده آزمایشگاهی از پیرولیز پلی‌الفین‌ها، PET، نایلون و پلاستیک‌های مخلوط بود. ابزار گردآوری داده‌ها پایگاه داده تجربی، مدل‌های یادگیری ماشین (رگرسیون چندجمله‌ای، فرایند گاوسی و جنگل تصادفی) و الگوریتم NSGA-II برای تحلیل پارتو بود. همچنین از خودمزمگذار واریاسیونی شرطی به‌عنوان مدل مولد استفاده شد. یافته‌ها نشان داد مدل جنگل تصادفی بالاترین دقت پیش‌بینی را برای بازده روغن، ارزش حرارتی بالاتر (HHV) تشکیل کک و شاخص EROI دارد. شرایط بهینه در دمای ۴۰۰ تا ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۴۰ تا ۷۰ دقیقه حاصل شد. تحلیل فنی-اقتصادی و ارزیابی چرخه عمر نشان داد سناریوهای انرژی-مثبت با نرخ بازده داخلی بیش از ۱۵٪ و کاهش ۴۷٪ انتشار CO₂ نسبت به سوزاندن، عملکرد برتری دارند. این چارچوب داده‌محور، هم‌راستایی پیرولیز با اقتصاد چرخشی را تقویت می‌کند.

آریل و همکاران (۲۰۲۴) در مقاله "مروری بر ارزیابی چرخه عمر پیرولیز پسماندهای پلاستیکی" چنین بیان می‌کنند: این مقاله مروری با هدف تحلیل نظام‌مند مطالعات ارزیابی چرخه عمر (LCA) مرتبط با پیرولیز پسماندهای پلاستیکی و شناسایی شکاف‌های دانشی و چالش‌های روش‌شناختی انجام شده است. جامعه آماری شامل کلیه مقالات علمی منتشرشده درباره LCA پیرولیز پلاستیک‌ها در مجلات معتبر بین‌المللی بود که به‌صورت هدفمند انتخاب شدند. حجم نمونه شامل ده‌ها مطالعه موردی در مقیاس آزمایشگاهی، پایلوت و صنعتی است. ابزار گردآوری داده‌ها مرور نظام‌مند ادبیات، استخراج شاخص‌های زیست‌محیطی (مصرف انرژی، انتشار گازهای گلخانه‌ای، تولید پسماند ثانویه) و مقایسه روش‌های محاسباتی LCA بود. یافته‌های پژوهش نشان داد نتایج LCA پیرولیز به‌شدت تحت تأثیر نوع خوراک، پارامترهای فرایندی (دما، زمان ماند، کاتالیست)، مقیاس عملیات و فرضیات سیستم مرزی قرار دارد. همچنین مشخص شد نبود داده‌های به‌روز صنعتی و عدم استانداردسازی روش‌ها، قابلیت مقایسه نتایج را محدود کرده است. این مطالعه نتیجه می‌گیرد که اگرچه پیرولیز می‌تواند مکمل بازیافت مکانیکی و ابزاری مؤثر در اقتصاد چرخشی باشد، اما برای تصمیم‌گیری سیاستی و صنعتی، توسعه چارچوب‌های LCA یکپارچه و دقیق ضروری است.

یاداو و همکاران (۲۰۲۳) در مقاله "تحلیل فنی-اقتصادی و ارزیابی چرخه عمر پیرولیز سریع کاتالیزوری ضایعات پلاستیکی مخلوط" چنین بیان می‌کنند: این پژوهش با هدف ارزیابی هم‌زمان عملکرد اقتصادی و زیست‌محیطی یک واحد مفهومی پیرولیز سریع کاتالیزوری (CFP) انجام شد که روزانه ۲۴۰ تن ضایعات پلاستیکی مخلوط را پردازش می‌کند. جامعه آماری شامل سناریوهای مختلف فرایندی و ترکیب محصولات خروجی بود و حجم نمونه به‌صورت مدل‌سازی چندین حالت عملیاتی تعریف شد. ابزار گردآوری داده‌ها شامل مدل‌سازی تحلیل فنی-اقتصادی ((TEA، ارزیابی چرخه عمر ((LCA و تحلیل حساسیت پارامترهای کلیدی هزینه و انرژی بود. یافته‌ها نشان داد حداقل قیمت فروش MSP مخلوط آروماتیک‌های BTX برابر با ۱/۰۷ دلار به ازای هر کیلوگرم است و در صورت کاهش هزینه خوراک یا افزایش قیمت نفت خام، رقابت‌پذیری اقتصادی با محصولات بکر امکان‌پذیر می‌شود. نتایج LCA نشان داد مصرف انرژی زنجیره تأمین تا ۲۴٪ کاهش می‌یابد، اما انتشار گازهای گلخانه‌ای به ازای هر کیلوگرم محصول افزایش می‌یابد. این مطالعه نشان می‌دهد بهینه‌سازی طراحی فرایند و مدیریت محصولات جانبی، کلید بهبود پایداری CFP در مقیاس صنعتی است.

پارک و همکاران (۲۰۲۳) در مقاله "تحلیل اقتصادی اقتصاد چرخشی مبتنی بر روغن پیرولیز پلاستیک‌های پسماند: مطالعه موردی یک پردیس دانشگاهی" چنین بیان می‌کنند: هدف پژوهش، ارزیابی امکان‌سنجی اقتصادی، زیست‌محیطی و سیاستی تولید و استفاده از روغن پیرولیز در مقیاس دانشگاه بود. جامعه آماری شامل پسماند پلاستیکی تولیدی یک پردیس دانشگاهی و سناریوهای مدیریتی مختلف بود. حجم نمونه بر اساس میزان سالانه پسماند تولیدی برآورد شد. ابزار گردآوری داده‌ها شامل تحلیل سناریو، برآورد هزینه‌ها، محاسبه انتشار گازهای گلخانه‌ای و مقایسه با روش دفن یا سوزاندن سنتی بود. یافته‌ها نشان داد اجرای فناوری پیرولیز می‌تواند سالانه حدود ۴۲۵ میلیون وون سود اقتصادی (حدود ۳۵۴ هزار دلار) ایجاد کند و انتشار گازهای گلخانه‌ای را تا ۸۴۰ هزار کیلوگرم CO₂ معادل کاهش دهد. همچنین کیفیت سوخت تولیدی با استانداردهای زیست‌محیطی کره جنوبی سازگار بود. نتایج بیانگر آن است که استقرار اقتصاد چرخشی مبتنی بر پیرولیز در مقیاس محلی از منظر اقتصادی و زیست‌محیطی توجیه‌پذیر است.

جدول ۱- مروری بر مطالعات پیشین

محقق	سال	عنوان پژوهش	اهم نتایج
ارومیه‌ای	۱۳۹۵	بازيافت مخلوط ضایعات پلاستیکی پرمصرف PET، PE و PP و تبدیل آن به محصولات با ارزش افزوده	این پژوهش با هدف بهبود خواص مکانیکی و ایجاد ارزش افزوده از اختلاط ضایعات PET، PP و PE انجام شد. نمونه‌ها شامل پرک‌های حاصل از پسماندهای شهری بودند که در نسبت‌های مختلف و با فرایند اکستروژن آلیاژی شدند. آزمون‌های کشش، ضربه و ارزیابی‌های فیزیکی-حرارتی انجام گرفت. نتایج نشان داد ترکیب ۸۰٪ PET و ۱۰٪ از هر یک از PP و PE بهترین عملکرد مکانیکی را دارد. یافته‌ها بیانگر آن است که آلیاژی‌سازی ضایعات علاوه بر کاهش آلودگی زیست‌محیطی، قابلیت تولید قطعات صنعتی و ایجاد اشتغال را فراهم می‌کند و از نظر اقتصادی در چارچوب اقتصاد سبز توجیه‌پذیر است.

محقق	سال	عنوان پژوهش	اهم نتایج
اسماعیلی و همکاران	۱۳۹۱	پیرولیز حرارتی، روشی مناسب برای مدیریت ضایعات پلاستیکی	این مقاله مروری-تحلیلی به بررسی روش‌های مدیریت پسماند پلاستیکی با تأکید بر پیرولیز حرارتی می‌پردازد. داده‌ها از مطالعات و گزارش‌های علمی گردآوری و روش‌های دفن، بازیافت مکانیکی، شیمیایی و سوزاندن مقایسه شدند. نتایج نشان داد پیرولیز کاتالیستی و غیرکاتالیستی قابلیت تبدیل ضایعات به سوخت‌های هیدروکربنی ارزشمند را دارد. طراحی مناسب راکتور و کنترل دما و زمان ملند نقش مهمی در افزایش بازده و کاهش هزینه‌ها دارد. این روش می‌تواند جایگزینی اقتصادی برای بخشی از سوخت‌های فسیلی و راهکاری مؤثر در مدیریت پایدار پسماند باشد.
خانا و همکاران	۲۰۲۶	بهینه‌سازی چندهدفه هوش مصنوعی پیرولیز پسماند پلاستیک با ادغام شاخص بازگشت انرژی سرمایه‌گذاری	این پژوهش با بهره‌گیری از ۳۱۲ داده آزمایشگاهی، چارچوب بهینه‌سازی چندهدفه مبتنی بر هوش مصنوعی برای پیرولیز پلاستیک ارائه داد. مدل‌های یادگیری ماشین و الگوریتم NSGA-II برای بهینه‌سازی بازده روغن و کمینه‌سازی مصرف انرژی به کار رفتند. نتایج نشان داد مدل جنگل تصادفی دقت بالاتری دارد و شرایط بهینه در دمای ۴۰۰-۴۵۰ درجه سانتی‌گراد حاصل می‌شود. تحلیل فنی-اقتصادی و LCA کاهش ۴۷٪ انتشار CO ₂ و نرخ بازده داخلی بیش از ۱۵٪ را نشان داد. این چارچوب داده‌محور موجب تقویت هم‌راستایی پیرولیز با اقتصاد چرخشی می‌شود.
آریل و همکاران	۲۰۲۴	مروری بر ارزیابی چرخه عمر پیرولیز پسماندهای پلاستیکی	این مقاله مروری نظام‌مند به تحلیل مطالعات LCA پیرولیز پلاستیک پرداخت و شکاف‌های دانشی را شناسایی کرد. مطالعات در مقیاس آزمایشگاهی تا صنعتی بررسی شدند. شاخص‌هایی مانند مصرف انرژی، انتشار گازهای گلخانه‌ای و پسماند ثانویه مقایسه گردید. نتایج نشان داد نوع خوراک، پارامترهای فرایندی و مرز سیستم تأثیر قابل توجهی بر نتایج دارند و نبود استانداردسازی، مقایسه‌پذیری را محدود می‌کند. توسعه چارچوب‌های دقیق و داده‌های صنعتی به‌روز برای تصمیم‌گیری پایدار ضروری است.
یاداو و همکاران	۲۰۲۳	تحلیل فنی-اقتصادی و ارزیابی چرخه عمر پیرولیز سریع کاتالیزوری ضایعات پلاستیکی مخلوط	این مطالعه عملکرد اقتصادی و زیست‌محیطی یک واحد پیرولیز سریع کاتالیزوری با ظرفیت ۲۴۰ تن در روز را ارزیابی کرد. با استفاده از TEA و LCA، حداقل قیمت فروش BTX برابر ۱/۰۷ دلار بر کیلوگرم برآورد شد. مصرف انرژی زنجیره تأمین تا ۲۴٪ کاهش یافت، اما انتشار گازهای گلخانه‌ای نسبت به تولید بکر افزایش نشان داد. تحلیل حساسیت نشان داد هزینه خوراک و سرمایه‌گذاری جداسازی از عوامل کلیدی هستند. بهینه‌سازی طراحی فرایند برای بهبود پایداری صنعتی ضروری است.
پارک و همکاران	۲۰۲۳	تحلیل اقتصادی اقتصاد چرخشی مبتنی بر روغن پیرولیز پلاستیک‌های پسماند	این پژوهش امکان‌سنجی اجرای فناوری پیرولیز در مقیاس پردیس دانشگاهی را بررسی کرد. با تحلیل سناریو و برآورد هزینه و انتشار، مشخص شد اجرای سیستم می‌تواند سالانه حدود ۴۲۵ میلیون وون سود اقتصادی و کاهش ۸۴۰ هزار کیلوگرم CO ₂ ایجاد کند. کیفیت سوخت تولیدی مطابق استانداردهای زیست‌محیطی بود. نتایج نشان داد اقتصاد چرخشی مبتنی بر روغن پیرولیز در مقیاس محلی از نظر اقتصادی و زیست‌محیطی توجیه‌پذیر است.

۵-۱ سوالات پژوهش

- (۱) چگونه پیرولیز ضایعات پلاستیکی PET می‌تواند از جنبه‌های فنی و اقتصادی در مقایسه با روش‌های سنتی بازیافت مکانیکی پلاستیک، کارایی بالاتری و درجه نوسازی بهتری داشته باشد؟
- (۲) آیا مسیر چرخه عمر محصول نهایی حاصل از پیرولیز پلاستیک PET (مثل روغن و مواد شیمیایی)، تأثیر محیط‌زیستی کمتری نسبت به تولید مواد اولیه از نفت خام و بازیافت متقابل پلاستیک دارد؟
- (۳) تأثیر متغیرهای فنی (نظیر دما، زمان، کاتالیزور، کیفیت پلاستیک ورودی) و اقتصادی (نظیر هزینه جمع‌آوری ضایعات پلاستیک، هزینه سرمایه‌گذاری، بهره‌وری) بر بهینه‌سازی فرآیند پیرولیز پلاستیک PET چیست؟

۵-۲ فرضیات پژوهش

- (۱) پیرولیز ضایعات پلاستیکی PET نسبت به بازیافت مکانیکی و روش‌های سنتی، هزینه‌های فنی و اقتصادی پایین‌تری داشته و بازده اقتصادی بالاتری برای پلاستیک مصرف شده فراهم می‌کند.
- (۲) تحلیل چرخه عمر پلاستیک در فرآیند پیرولیز نشان می‌دهد که انتشار گازهای گلخانه‌ای و تأثیرات محیط‌زیستی در مقایسه با تولید پلاستیک از منابع اولیه و بازیافت درجه پایین، به‌طور معناداری کاهش می‌یابد.
- (۳) شناسایی و بهینه‌سازی پارامترهای بحرانی فنی و اقتصادی پیرولیز پلاستیک PET، میسر می‌سازد که این فرآیند از لحاظ تجاری و صنعتی قابل‌تعمیم، پایدار و رقابتی باشد.
- (۴) فرآیند به صورت پیوسته فرض خواهد شد.

نوآوری این پژوهش در ارائه یک چارچوب تحلیلی منسجم برای بررسی فناوری پیرولیز پسماندهای پلی‌اتیلن ترفتالات (PET) از طریق تحلیل و ترکیب نظام‌مند مطالعات منتشر شده در ادبیات علمی نهفته است. در بسیاری از پژوهش‌های پیشین، هر یک از ابعاد فنی، زیست‌محیطی یا اقتصادی به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفته‌اند؛ در حالی که در این پژوهش با استفاده از داده‌ها و نتایج گزارش شده در منابع معتبر علمی، تلاش شده است این ابعاد به‌صورت یکپارچه تحلیل شوند. به این ترتیب، پژوهش حاضر با گردآوری و تحلیل نتایج مطالعات پیشین، تصویری جامع‌تر از عملکرد فناوری پیرولیز در مدیریت پسماندهای PET ارائه می‌دهد.

یکی از جنبه‌های مهم این پژوهش، توجه به ارتباط میان ارزیابی چرخه عمر (LCA) و تحلیل هزینه چرخه عمر (LCC) در مطالعات موجود است. در بسیاری از تحقیقات، این دو رویکرد به‌طور مستقل مورد بررسی قرار گرفته‌اند؛

در حالی که در این مطالعه با بررسی و مقایسه یافته‌های گزارش شده در منابع علمی، تلاش شده است ارتباط میان پیامدهای زیست‌محیطی و اقتصادی فرآیند پیرولیز بهتر تبیین شود. این رویکرد تحلیلی می‌تواند به درک دقیق‌تر پایداری فناوری‌های بازیافت پلاستیک کمک کند.

از دیگر جنبه‌های نوآورانه پژوهش حاضر، تحلیل تطبیقی نتایج مطالعات مختلف درباره عملکرد فناوری‌های پیرولیز در چارچوب اقتصاد چرخشی است. با بررسی منابع علمی مرتبط با مدیریت پسماند پلاستیک و بازیافت شیمیایی، تلاش شده است جایگاه پیرولیز به‌عنوان یکی از گزینه‌های بازیابی انرژی و مواد از پسماندهای پلاستیکی تبیین شود. در این راستا، یافته‌های مطالعات مختلف درباره تأثیر این فناوری بر کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، بازیابی منابع و ایجاد ارزش افزوده از پسماندهای پلاستیکی مورد تحلیل قرار گرفته است.

همچنین در این پژوهش با تحلیل نتایج منتشر شده درباره محصولات حاصل از پیرولیز پلاستیک، از جمله روغن پیرولیز، گاز و کربن جامد، نقش این محصولات در بهبود کارایی سیستم‌های مدیریت پسماند مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی و مقایسه این نتایج در منابع مختلف امکان شناسایی روندهای اصلی و چالش‌های موجود در توسعه فناوری پیرولیز را فراهم می‌کند.

در مجموع، نوآوری این پژوهش در تحلیل و یکپارچه‌سازی نظام‌مند یافته‌های علمی منتشر شده در حوزه پیرولیز پسماند PET، اقتصاد چرخشی و ارزیابی‌های زیست‌محیطی و اقتصادی است. این رویکرد با تکیه بر منابع کتابخانه‌ای معتبر، چارچوبی تحلیلی ارائه می‌دهد که می‌تواند به درک بهتر جایگاه فناوری پیرولیز در مدیریت پایدار پسماندهای پلاستیکی کمک کند و مبنایی برای مطالعات آینده و تصمیم‌گیری‌های مرتبط با توسعه فناوری‌های بازیافت پیشرفته فراهم آورد.

این پژوهش از نوع کاربردی بوده و اطلاعات موردنیاز از طریق تحلیل و استخراج نظام‌مند داده‌ها و نتایج گزارش شده در منابع علمی معتبر گردآوری خواهد شد. هدف روش‌شناختی پژوهش، ترکیب و تحلیل یافته‌های منتشر شده به‌منظور دستیابی به یک تصویر جامع از اثرات زیست‌محیطی و اقتصادی فرایند پیرولیز ضایعات پلی‌اتیلن ترفتالات (PET) است.

جامعه پژوهش و روش نمونه‌گیری

جامعه پژوهش شامل تمامی مطالعات علمی معتبر منتشر شده در حوزه‌های زیر است:

- ارزیابی چرخه عمر (LCA) پلاستیک‌ها و به‌ویژه پیرولیز PET
- تحلیل هزینه چرخه عمر (LCC) و تحلیل فنی - اقتصادی (TEA)
- فناوری‌های بازیافت شیمیایی و پیرولیز
- مطالعات مرتبط با اقتصاد چرخشی در مدیریت پسماند پلاستیک

روش و مراحل انجام پژوهش

- جستجو در پایگاه‌های معتبر بین‌المللی
- بررسی گزارش‌های صنعتی و استانداردهای بین‌المللی (مانند ISO 14040 و ISO 14044)
- استخراج داده‌های کلیدی
- طبقه‌بندی منابع براساس نوع مطالعه، فناوری مورد بررسی، محدوده سیستم و مفروضات LCA
- مقایسه سیستماتیک سناریوهای مختلف پیرولیز
- شبیه‌سازی سناریو/سناریوهای منتخب پیرولیز به منظور ایجاد داده‌های مورد نیاز تحلیل چرخه عمر
- بررسی تاثیر پارامترهای عملیاتی بر عملکرد فرایند و انجام آنالیز حساسیت
- انجام تحلیل چرخه‌عمر فرایند با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده از منابع و نتایج بخش شبیه‌سازی فرایند
- مقایسه تطبیقی نتایج LCA مطالعه حاضر با تحقیقات و فرآیندهای مشابه
- شناسایی نقاط داغ زیست‌محیطی و ارائه راه‌کارهایی پیشنهادی
- انجام تحلیل‌های اقتصادی و اقتصاد چرخشی مورد نیاز پژوهش

فهرست منابع:

۸

- ۱) ارومیه‌ای، ع. (۱۳۹۵). بازیافت مخلوط ضایعات پلاستیکی پرمصرف پلی‌اتیلن ترفتالات (PET)، پلی‌پروپیلن (PP) و پلی‌اتیلن (PE) و تبدیل آن به محصولات با ارزش افزوده، اشتغال‌زایی و حفاظت از محیط زیست. سومین کنفرانس بین‌المللی اقتصاد سبز، بابل‌سر. <https://civilica.com/doc/490793>
- ۲) اسماعیلی، ح.، باتمانی، م.، و انوری‌پور، ب. (۱۳۹۱). پیرولیز حرارتی، روشی مناسب برای مدیریت ضایعات پلاستیکی. کنفرانس بین‌المللی نفت، گاز، پتروشیمی و نیروگاهی.
- 3) Khanna, A., Lamba, B. Y., Jain, S., et al. (2026). Multi-objective AI optimization of plastic waste pyrolysis integrating energy return on investment for circular polymer recycling. *Polymers*, 18(9), 1062. <https://doi.org/10.3390/polym18091062>
- 4) Arielle, D. T. L., Nalume, W. G., & Gilbert, Y. (2024). *A review of the life cycle analysis for plastic waste pyrolysis*. Open Journal of Polymer Chemistry, 14(3), 1–21. <https://doi.org/10.4236/ojpcchem.2024.143006>
- 5) Das, P., & Tiwari, P. (2018). Thermal degradation study of waste polyethylene terephthalate (PET) under pyrolysis conditions. *Energy Conversion and Management*, 171, 1749–1758.
- 6) Dai, L., Zhou, N., Lv, Y., Cheng, Y., Wang, Y., Liu, Y., Cobb, K., Chen, P., Lei, H., & Ruan, R. (2022). Pyrolysis technology for plastic waste recycling: A state-of-the-art review. *Progress in Energy and Combustion Science*, 93, 101021. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2022.101021>
- 7) Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M., & Hultink, E. J. (2017). The circular economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757–768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
- 8) Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), e1700782.
- 9) Guglielmi, G. (2017). The plastic industry's future. *Science*, 356(6336), 692–693.
- 10) Hopewell, J., Dvorak, R., & Kosior, E. (2009). Plastics recycling: Challenges and opportunities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 2115–2126.

- 11) Hossain, R., et al. (2022). Plastic waste management in India: Challenges, opportunities, and roadmap for circular economy. *Sustainability*, 14, 4425.
- 12) Hooda, S., & Mondal, P. (2024). Predictive modeling of plastic pyrolysis process for the evaluation of activation energy: Explainable artificial intelligence based comprehensive insights. *Journal of Environmental Management*, 360, 121189.
- 13) Jambeck, J. R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T. R., Perryman, M., Andrady, A., & Law, K. L. (2015). Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*, 347(6223), 768–771.
- 14) Johnson, J. (2023, June 6). EPA standing pat on pyrolysis regulations for now. *Plastics News*.
- 15) Kosior, E., Mitchell, J., & Crescenzi, I. (2018). Plastics recycling. In *Plastic environment* (Vol. 47, pp. 156–176). <https://doi.org/10.1039/9781788013314-00156>
- 16) Liu, C., & Liu, C. (2023). Exploring plastic-management policy in China: Status, challenges and policy insights. *Sustainability*, 15, 9087.
- 17) Ragaert, K., Delva, L., & Van Geem, K. (2017). Mechanical and chemical recycling of plastics: Opportunities and challenges. *Progress in Polymer Science*, 69, 1–22.
- 18) Ranta, V., Aarikka-Stenroos, L., Ritala, P., & Mäkinen, S. J. (2018). Exploring institutional drivers and barriers of the circular economy. *Resources, Conservation and Recycling*, 135, 70–82. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.08.017>
- 19) Sariatli, F. (2017). Linear economy versus circular economy. *Visegrad Journal on Bioeconomy and Sustainable Development*, 6(1), 31–34. <https://doi.org/10.1515/vjbsd-2017-0005>
- 20) Sekar, M., Ponnusamy, V. K., Pugazhendhi, A., Nižetić, S., & Praveenkumar, T. (2022). Production and utilization of pyrolysis oil from solid plastic wastes. *Journal of Environmental Management*, 302, 114046. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114046>
- 21) Seigné-Itoiz, E., Gasol, C. M., Rieradevall, J., & Gabarrell, X. (2015). Contribution of plastic waste recovery to greenhouse gas (GHG) savings in Spain. *Waste Management*, 46, 557–567. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.08.007>
- 22) Sorunmu, Y., Billen, P., & Spataro, S. (2020). A review of thermochemical upgrading of pyrolysis bio-oil. *GCB Bioenergy*, 12(1), 4–18. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12658>
- 23) Thompson, R. C., et al. (2009). Plastics, the environment and human health. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 364, 2153–2166.
- 24) Timilsina, M. S., et al. (2024). Optimizing pyrolysis and co-pyrolysis of plastic and biomass using artificial intelligence. *Energy Conversion and Management X*, 24, 100783.
- 25) Urtuvia, V., Villegas, P., González, M., & Seeger, M. (2014). Bacterial production of the biodegradable plastics polyhydroxyalkanoates. *International Journal of Biological Macromolecules*, 70, 208–213.
- 26) Wang, Y., Han, X., & Jiang, X. (2024). A surrogate shale oil model based on multi-objective fusion adaptive optimization. *Energy*, 291, 130273.
- 27) Yuliansyah, A. T., Prasetya, A., Ramadhan, M. A., & Laksono, R. (2015). Pyrolysis of plastic waste to produce pyrolytic oil as an alternative fuel. *International Journal of Technology*, 7, 1076–1083. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v6i7.1241>
- 28) Zhao, P., et al. (2026). Surrogate model-integrated deep reinforcement learning for temperature and pyrolysis behavior control. *Fuel*, 405, 136770.
- 29) Hayoung Park, J., Lee, S., Kim, H., & Choi, Y. (2023). *Techno-economic and life cycle assessment of plastic waste pyrolysis systems: A review*. *Journal of Cleaner Production*, 385, 135678.
- 30) ISO. (2006). *ISO 14040: Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework*. International Organization for Standardization.

ماموریت‌های دانشگاه قم: حکمرانی علوم انسانی و اسلامی، گردشگری، تغییر اقلیم و محیط زیست

سامانه نان: سامانه نظام‌نامه‌ها و نیازها (نان) مستقر در مؤسسه استنادی علوم و پایش علم و فناوری (ISC) است.

پارسا: پایان‌نامه دانشجویی کارشناسی ارشد و رساله دانشجویی دکتری می‌باشد.

پارسای نیازمحور: رساله‌ی دکتری یا پایان‌نامه کارشناسی ارشدی است که بر اساس یک نیاز پژوهشی، فناوری، مورد درخواست از سوی بخش‌های خارج از مؤسسه و یا ثبت شده در سامانه نظام ایده‌ها و نیازها (نان)، در پایگاه آی‌اس‌سی تعریف و اجرا می‌شود.

پارسای تقاضامحور: رساله‌ی دکتری یا پایان‌نامه کارشناسی ارشدی است که به صورت مستقیم از حمایت مالی نهادها، صنایع و مراکز خارج از مؤسسه اعتبار دریافت می‌کنند.

پارسای فناورمحور: رساله‌ی دکتری یا پایان‌نامه کارشناسی ارشدی است که از نوع پژوهش توسعه‌ای بوده و با اطلاعات علمی موجود در آن، منجر به خلق یکی از فناوری‌های نرم، سخت و تولید محصول دانش‌بنیان تجاری شده باشد و منجر به خلق ثروت و خدمت شود.

☐ صورتجلسه گروه ☐ کمیته تخصصی

(با حداقل سه نفر از اعضا)

موضوع تحقیق پایان نامه خانم/ آقای:

دانشجوی مقطع کارشناسی ارشد در جلسه

مورخ / / ۱۴ کمیته تخصصی گروه آموزشی دانشکده مطرح شد و به اتفاق آراء ☐ یا با تعداد رأی

از رأی مورد تصویب اعضا به شرح زیر قرار گرفت ☐ قرار نگرفت ☐.

ردیف	نام و نام خانوادگی	سمت و تخصص	نوع رأی	امضاء
۱				
۲				
۳				
۴				
۵				
۶				

صورت جلسه شورای تحصیلات تکمیلی دانشکده

موضوع تحقیق پایان نامه خانم/ آقای:

دانشجوی مقطع کارشناسی ارشد در جلسه

مورخ / / ۱۳..... شورای تحصیلات تکمیلی دانشکده مطرح شد و به اتفاق آراء ☐ یا با تعداد..... رأی

از..... رأی مورد تصویب اعضا به شرح زیر قرار گرفت ☐ قرار نگرفت ☐.

ردیف	نام و نام خانوادگی	سمت و تخصص	نوع رأی	امضاء
۱				
۲				
۳				
۴				
۵				
۶				
۷				
۸				
۹				
۱۰				