



University of Tehran Press

**Journal of Environmental Studies**  
Vol. 50, No. 1, Spring 2024

Journal Homepage: [www.Jes.ut.ac.ir](http://www.Jes.ut.ac.ir)  
Print ISSN: 1025-8620 Online ISSN 2345-6922

**Experimental Investigation on the Synthesis and Evaluation of the Role of Biodiesel Fuel Prepared from Salicornia Plant to Reduce CO and NO<sub>x</sub> Pollutant Emissions in Combustion Systems**

Azam Karimian<sup>1</sup>, Seyed Hadi Pourhoseini<sup>2</sup>

1. Department of Organic Chemistry, Faculty of Science, University of Gonabad, Gonabad, Iran. Email: [a-karimian@gonabad.ac.ir](mailto:a-karimian@gonabad.ac.ir)
2. Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Gonabad, Gonabad, Iran. Email: [hadipoorhoseini@gonabad.ac.ir](mailto:hadipoorhoseini@gonabad.ac.ir)

---

**Article Info**

**ABSTRACT**

**Research Article:**  
**Research Paper**

**Article history:**

Received 15 January 2024  
Received in revised form  
24 February 2024  
Accepted 15 March 2024  
Publish online 21 May 2024

**Keywords:**

CO and NO<sub>x</sub> pollutants,  
Environmentally friendly  
biodiesel, Oil extraction,  
Salicornia

This work explains the optimized synthesis process and preparation of a novel environmentally friendly biodiesel from Salicornia as a drought-resistant and saltwater tolerant plant. Also, it presents the comparative results on thermal and emission characteristics due to the application of this biodiesel in a combustion system. For this purpose, after obtaining the Salicornia plant seeds, the effects of the extraction methods on the performance of the oil extraction process were investigated. The results showed that compared to other methods, the ultrasonic probe extraction method achieved the highest oil efficiency. The synthesis of biodiesel from salicornia seed oil was carried out in the presence functionalized nano catalysts during transesterification reaction. The results of gas chromatography revealed a high percentage of unsaturated fatty acids and a low percentage of saturated fatty acids in the profile of biodiesel fatty acids. Among the unsaturated fatty acids, the dominant acid was linoleic acid (61%), and among the saturated fatty acids, the dominant acid was palmitic acid (8.4%). Finally, in order to investigate the emission performance of biodiesel, a blend of the synthesized biodiesel with diesel fuel (B10) was prepared and burned by a burner in a laboratory furnace. Then, using a KIGAS 310 gas analyzer, the concentrations CO and NO<sub>x</sub> pollutant emissions at the outlet of the furnace were measured and compared with diesel fuel. The obtained results showed that compared to diesel fuel the B10 blend fuel reduces the emission of CO and NO<sub>x</sub> 14% and 34%, respectively.

---

**Cite this article:** Karimian, A., Pourhoseini, S. H. (2024). Experimental Investigation on the Synthesis and Evaluation of the Role of Biodiesel Fuel prepared From Salicornia Plant to Reduce CO and NO<sub>x</sub> Pollutant Emissions in Combustion Systems. *Journal of Environmental Studies*, 50 (1), 81- 96.

DOI: <http://doi.org/10.22059/JES.2024.371067.1008470>

© The Author(s). **Publisher:** University of Tehran Press.



DOI: <http://doi.org/10.22059/JES.2024.371067.1008470>

---

## Extended Abstract

### Introduction

In the recent years there is a high interest among the researchers to find the new and environmental friend energy resources. Biodiesels are renewable fuels, which are considered among the best commercial fuel to replace liquid fuels in combustion equipment. The most famous procedure of biodiesel production is through a refinery process called transesterification. During this reaction, oil derived from a raw feedstock such as seeds and animal fats or oil derived from a waste feedstock such as waste cooking oil or used engine oil combined with methanol. Consequently, biodiesel feedstock availability and sustainability are the most important determining factors in the widespread application and generalization of biodiesel. The present work aims to introduce a novel biodiesel fuel produced from *Salicornia* as a low-water, drought-resistant and saltwater tolerant plant and presents the optimized oil extraction and biodiesel transesterification process. Finally, the application results of the produced biodiesel fuel were investigated by comparing the emission performance of synthesized biodiesel with diesel fuel in the combustion process in a liquid fuel burner.

### Materials and methods

The *Salicornia* plant seeds were cleaned, and washed to eliminate any sticky residue and dried at 50 °C for 24 h. techniques including the Soxhlet method in the hexane, Clevenger system in the mixture of water/hexane, and the ultrasonic probe method in the hexane were used for extracting oil from grounded seeds. The solid-liquid ratio of 1:3 of gr ground seeds to ml solvent was used for oil extraction. The  $\text{ZnFe}_2\text{O}_4@\text{SO}_3\text{H}$  and  $\text{ZnFe}_2\text{O}_4@\text{NH}_2$  nanoparticles for the transesterification were synthesized.

The transesterification reaction took place in a round bottom flask. Extracted oil and methanol were added together in a ratio of 1:5 (v/v), in a total volume of 1000 ml. The heterogeneous nano catalysts of  $\text{ZnFe}_2\text{O}_4@\text{SO}_3\text{H}$  or  $\text{ZnFe}_2\text{O}_4@\text{NH}_2$  (2.5 g) were also added to the mixture and heated under reflux for 4 h with stirring. After cooling to room temperature, the catalyst was separated by a simple magnet and recovered after washing. The liquid mixture stayed for 12 h in a separating funnel to separate the upper biodiesel from the lower glycerol layer. The biodiesel layer was washed with distilled water and dried with  $\text{CaCl}_2$ . To investigate the emission performance of the produced biodiesel, a fuel mixture of 10% of the extracted biodiesel fuel with diesel fuel (B10) was prepared and combusted by a liquid fuel burner with a maximum heat capacity of 120,000 Kcal/hr in a laboratory furnace and after reaching a steady state, the concentration of carbon monoxide (CO) and nitrogen oxides (NOx) pollutant emissions were measured by a KIGAS gas analyzer.

### Results and discussion

The results from the extraction methods demonstrated that the most oil yield obtained (30%) was related to the ultrasonic probe technique. The FT-IR spectrum confirmed the synthesis of  $\text{ZnFe}_2\text{O}_4@\text{SO}_3\text{H}$  and  $\text{ZnFe}_2\text{O}_4@\text{NH}_2$  nanoparticles. The results showed that  $\text{ZnFe}_2\text{O}_4@\text{NH}_2$  nanoparticles have higher catalytic activity compared to  $\text{ZnFe}_2\text{O}_4@\text{SO}_3\text{H}$  for the preparation of biodiesel. According to the GC results, the main fatty acids observed in the composition of produced biodiesel are unsaturated fatty acids such as linoleic acid (61%), oleic acid (22.5%) and linolenic acid (3.11%), along with saturated fatty acids including palmitic (8.4%) and stearic acid (2%). Due to the presence of oxygen in the structure of biodiesels, these fuels have a better mixing with air, and as a result, more complete mixing and combustion reduce the CO emission compared with diesel fuel. Also, lower heating value and having no nitrogen component decrease the NOx emission during the combustion process of biodiesel. Compared with diesel fuel, the emission reduction for CO and NOx were as much as 14% and 34%, respectively.

### Conclusion

The extraction of seed oil of the drought-resistant plant *Salicornia* was done by three methods: Soxhlet, Clevenger and ultrasonic probe for biodiesel production. The results showed that the highest efficiency was obtained from the ultrasonic probe method. The resulting oil was converted into biodiesel in the presence of synthesized  $\text{ZnFe}_2\text{O}_4@\text{SO}_3\text{H}$  and  $\text{ZnFe}_2\text{O}_4@\text{NH}_2$  nanoparticles in reaction with methanol. Functionalized nanoparticles with amine group showed higher efficiency for biodiesel production than nanoparticles functionalized with sulfonic acid group due to their smaller size, more surface accessibility and more activity. The composition of fatty acids in the obtained profile of biodiesel was also identified by gas chromatography technique. The results showed that the most important fatty acids identified are linoleic acid, oleic acid, palmitic acid and linoleic acid. Also, the results show that compared to diesel fuel the B10 blend fuel reduces the emission of CO and NOx as much as 14% and 34%, respectively.



## مطالعه آزمایشگاهی سنتز و بررسی نقش سوخت زیستی تهیه شده از گیاه سالیکورنیا برای کاهش انتشار آلاینده‌های CO و NO<sub>x</sub> سیستم‌های احتراقی

اعظم کریمیان<sup>۱</sup>، سید هادی پورحسینی<sup>۲</sup>

۱. گروه شیمی آلی، دانشکده علوم، مجتمع آموزش عالی گناباد، گناباد، ایران. رایانامه: [a-karimian@gonabad.ac.ir](mailto:a-karimian@gonabad.ac.ir)  
 ۲. گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، مجتمع آموزش عالی گناباد، گناباد، ایران. رایانامه: [hadipoorhoseini@gonabad.ac.ir](mailto:hadipoorhoseini@gonabad.ac.ir)

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>پژوهش حاضر به فرآیند سنتز و تولید یک سوخت زیستی (بیودیزل) جدید از سالیکورنیا به عنوان گیاه مقاوم به خشکسالی و آب شور و دوستدار محیط‌زیست و بررسی مقایسه‌ای انتشار آلاینده‌ی سوخت بیودیزل سنتز شده در یک سیستم احتراقی پرداخته است. استخراج روغن بذر گیاه سالیکورنیا توسط سه روش سوکسله، کلونجر و پروب اولتراسونیک انجام شده و روغن استحصال شده در حضور نانوکاتالیست‌های عامل‌دار شده طی واکنش شیمیایی ترانس استریفیکاسیون به بیودیزل تبدیل گردید. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که تولید بیودیزل با استفاده روش پروب اولتراسونیک بیشترین بازدهی را نسبت به سایر روش‌ها دارد. همچنین آنالیز بیودیزل با استفاده از کروماتوگرافی گازی، درصد بالای اسیدهای چرب غیراشباع و درصد پایینی از اسیدهای چرب اشباع شده را در پروفایل اسیدهای چرب بیودیزل نشان می‌دهد. به طوری که در میان اسیدهای چرب غیراشباع اسید غالب لینولئیک اسید (۶۱ درصد) و در میان اسیدهای چرب اشباع اسید غالب پالمیتیک (۸/۴ درصد) می‌باشد. به منظور بررسی عملکرد آلاینده‌ی بیودیزل سنتز شده در فرآیند احتراق، ترکیبی از بیودیزل با سوخت دیزل با نسبت ۱۰ درصد (B10) تهیه و توسط یک مشعل در یک کوره آزمایشگاهی محترق گردید. سپس توسط دستگاه آنالیز گازهای احتراقی KIGAS ۳۱۰ غلظت آلاینده‌های CO و NO<sub>x</sub> در خروجی کوره اندازه‌گیری و با سوخت دیزل مقایسه گردید. نتایج انتشار آلاینده‌ی نشان می‌دهد که سوخت ترکیبی B10 تهیه شده از بیودیزل سنتز شده انتشار آلاینده CO و NO<sub>x</sub> را در مقایسه با سوخت دیزل به ترتیب ۱۴ و ۳۴ درصد کاهش می‌دهد.</p>	<p>نوع مقاله: مقاله پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۲۵</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۲/۰۵</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۵</p> <p>تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۳/۰۱</p> <p><b>کلیدواژه‌ها:</b>            استخراج روغن، آلاینده‌های CO و NO<sub>x</sub>، سالیکورنیا، سوخت زیستی سازگار با محیط‌زیست</p>

**استناد:** کریمیان، اعظم؛ پورحسینی، سید هادی. (۱۴۰۳). مطالعه آزمایشگاهی سنتز و بررسی نقش سوخت زیستی تهیه شده از گیاه سالیکورنیا برای کاهش انتشار آلاینده‌های CO و NO<sub>x</sub> سیستم‌های احتراقی. نشریه محیط‌شناسی، ۵۰(۱)، ۸۱-۹۶.

DOI: <http://doi.org/10.22059/JES.2024.371067.1008470>

DOR: 20.1001.1.10258620.1403.50.1.6.3

© نویسنده‌گان.

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران.



DOI: <http://doi.org/10.22059/JES.2024.371067.1008470>

## ۱. مقدمه

آلودگی‌های زیست‌محیطی سوخت‌های فسیلی از یک سو و محدود بودن و کاهش ذخایر این سوخت‌ها و رشد روزافزون مصرف انرژی از سوی دیگر باعث شده تا در سال‌های اخیر علاقه زیادی در بین محققان برای یافتن منابع انرژی جدید و دوستدار محیط‌زیست با ویژگی تجدیدپذیر بودن و انتشار آلاینده‌های پایین ایجاد شود (Moradkhani et al., 2024; Lani et al., 2024; Soleimani Alyar & Nejatian et al., 2023; Pazoki & Ghasemzadeh., 2020; Heidary., 2017). بیودیزل‌ها سوخت‌های تجدیدپذیر هستند که جزو بهترین سوخت‌های تجاری برای جایگزینی سوخت‌های مایع در تجهیزات احتراق محسوب می‌شوند (Kaya et al., 2021; Tosun & Özcanl., 2021). معروف‌ترین فرآیند تولید زیست سوختی (بیودیزل)، واکنش شیمیایی ترانس استریفیکاسیون است (Vasić et al., 2020) که در طی این واکنش، روغن حاصل از مواد اولیه خام مانند دانه‌ها و چربی‌های حیوانی (Sebayang et al., 2023) یا روغن حاصل از مواد زائد مانند ضایعات روغن پخت و پز یا روغن موتور استفاده شده (Al-Hamamre et al., 2023) همراه با متانول در حضور کاتالیزور اسیدی یا بازی به متیل استرها (بیودیزل) و گلیسرین تبدیل می‌شود. مواد اولیه با ترکیب اسیدهای چرب متنوع می‌توانند برای تولید بیودیزل مورد استفاده قرار گیرند. در نتیجه، در دسترس بودن و پایداری مهمترین فاکتورهای تعیین‌کننده در کاربرد و تولید گسترده سوخت زیستی است.

## ۲. پیشینه پژوهش

یکی از مواد اولیه مطلوب برای تولید بیودیزل روغن پالم است که در مناطق گرمسیری رشد می‌کند. امروزه اندونزی و مالزی بیش از ۸۵ درصد عرضه جهانی را تشکیل می‌دهند. به طور کلی روغن پالم در مقایسه با سایر خوراکی‌های بیودیزل، بیشترین راندمان روغن را دارد. این مزیت روغن پالم را به عنوان مطلوب‌ترین خوراک بیودیزل مطرح کرده است. تحقیقات متعددی در مورد تولید و خواص بیودیزل روغن پالم (Pourhoseini et al., 2021; Lim et al., 2020) و کاربرد آن در مهندسی حرارتی و سیستم‌های احتراق انجام شده است (Abu-Hamdeh et al., 2020). سویا یک حبوبات فصل خنک است که در آمریکای شمالی و آمریکای جنوبی و آسیا قابل کشت است. ایالات متحده و برزیل بزرگترین تولیدکنندگان سویا در جهان هستند (Dos Santos et al., 2019; Xie & Wang., 2020; Mapossa et al., 2017; Shi et al., 2020). آفتابگردان و کلزا به دلیل محتوای مناسب روغن دانه از دیگر مواد اولیه معمولی برای تولید بیودیزل به حساب می‌آیند (Dehghani & Haghighi., 2017; Ni & Meunier., 2007).

همان‌طور که در بالا اشاره شد، در دسترس بودن و پایداری خوراک بیودیزل مهمترین عوامل تعیین‌کننده در کاربرد و تولید گسترده بیودیزل هستند. خشکسالی‌های متناوب و کاهش ذخایر آب شیرین به عنوان چالش‌های عظیم و پیچیده‌ای که جهان ما با آن مواجه است و نیاز به رشد گیاهان با میزان کمتر مصرف آب برای تهیه بیودیزل را برجسته کرده است. با این حال، گیاهان نخل، آفتابگردان و سویا که به عنوان متعارف‌ترین مواد اولیه بیودیزل‌ها هستند را نمی‌توان در این جغرافیای چالش برانگیز کشت کرد. این محدودیت‌ها بر کشت گیاهان با مصرف میزان آب کمتر و استفاده از منابع آب نامتعارف و بی‌کیفیت برای تولید بیودیزل تاکید دارند. علاوه بر این، گیاهان با این شرایط را می‌توان در بسیاری از نقاط جهان به ویژه بیابان و مناطق کم درآمد کشت کرد که همچنین باعث رونق اقتصادی در این مناطق نیز خواهد شد.

با توجه به این حقایق، اثر حاضر درصدد معرفی یک سوخت بیودیزل جدید تولید شده از گیاه سالیکورنیا به عنوان یک گیاهی مقاوم به کم‌آبی، خشکی و آب شور، و همچنین بررسی نتایج کاربردی بیودیزل تولید شده در یک مشعل روغنی بر افزایش عملکرد و کاهش انتشار آلودگی‌ها می‌باشد. از آنجایی که گونه‌های شورزی ذاتا در شرایطی با تنش‌های قلیایی و شوری رشد پیدا کرده‌اند، در حفاظت از خاک‌های شور بسیار اهمیت دارند و در سایر تنش‌های محیطی از جمله خشکی نیز پایدارند (Zhang et al., 2022; Eganathan et al., 2006). سالیکورنیا گیاهی که تاکنون به عنوان شورپسند یا نمک‌خواه شناخته شده است، با برگ‌های آبدار نمکین آن در گرمای جهنمی و خاک رقت‌انگیز، با مقداری بیشتر از آبیاری معمولی آن هم با آب شور دریا رشد و نمو می‌کند. این گیاهان، گیاهانی مفید برای بیابان‌زدایی

نیز می‌باشند. بنابراین، گیاه شورزی سالیکورنیا در کشور ایران که با مشکلات کم آبی و خشکسالی روبه‌رو است به خوبی رشد می‌کند و به فراوانی یافت می‌شود.

(Akhami et al., 2003; Akhami., 2007; Maleki Delarestaghi et al., 2018). گیاه سالیکورنیا در جنوب، شمال و شمال غربی و بخش‌های مرکزی ایران از جمله اصفهان (بستر رودخانه زاینده‌رود)، کرج (دشت نمک مردآباد)، خوزستان (نزدیک مجتمع پتروشیمی ماهشهر)، هرمزگان (نزدیک روستای مرآدانام) و حاشیه دریاچه ارومیه رشد می‌کند. به دلیل وجود خاک‌های شور و تنوع آب و هوا در ایران و وجود زیستگاه‌های گسترده شور در بیابان‌های گرم و معتدل، به نحوی شرایط برای پرورش این گونه مطلوب است (Akhami., 2006). در این مطالعه ابتدا بذر گیاه برداشت شده از مناطق شورزی ایران طی مراحل اولیه شستشو و آماده استخراج قرار گرفت. سپس به سه روش استفاده از سیستم سوکسله، کلونجر و پروب اولتراسونیک استخراج روغن بهینه از بذر پودر شده انجام شد. در ادامه، توسط دو کاتالیست اسیدی و بازی  $ZnFe_2O_4@SO_3H$  و  $ZnFe_2O_4@NH_2$  به ترتیب، واکنش ترانس استریفیکاسیون و تبدیل روغن به زیست سوختی صورت گرفت. در نهایت، نتایج کاربردی زیست سوخت تولید شده از طریق مقایسه عملکرد آلاینده‌ی بیودیزل سنتز شده با سوخت دیزل در فرایند احتراق در یک مشعل سوخت مایع مورد بررسی قرار گرفت.

### ۳. روش‌شناسی پژوهش

#### ۳-۱. مواد و دستگاه‌های مورد استفاده

شکل (۱) تصویر گیاه سالیکورنیا را نشان می‌دهد. بذر سالیکورنیا از این گیاه مقاوم به خشکی و آب شور از دشت نمک مردآباد کرج جمع‌آوری شد. سایر مواد شیمیایی و حلال‌ها از شرکت مرک خریداری شد. دستگاه پروب اولتراسونیک با قدرت ۴۰۰ وات، محدودیت دمای عملیاتی ۲۵-۱۰۰ و فرکانس در محدوده ۰-۲۰ KHz به کار گرفته شد. دستگاه کروماتوگرافی گازی (GC)، مدل Agilent 6890 N مجهز به آشکارساز FID برای بررسی پروفایل اسیدهای چرب استفاده شد. طیف FT-IR توسط دستگاه ۷۸۰ Perkin Elmer ثبت شد. مورفولوژی نانوکاتالیست‌ها توسط دستگاه Mira 3-XMU FE-SEM مشاهده گردید.



شکل ۱. مزرعه سالیکورنیا در دشت‌های شور ایران (Ranjbar et al., 2017)

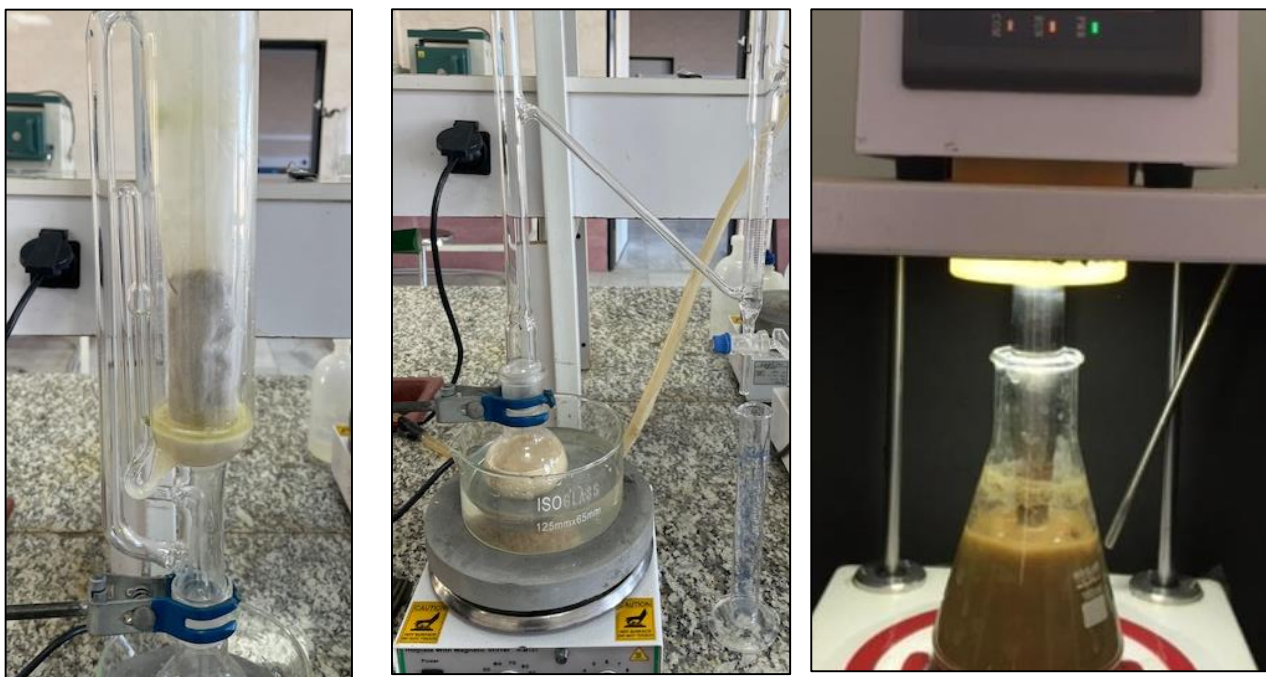
در این مطالعه پس از تمیز کردن بذرها، برای حذف هر آلودگی چسبیده، دانه‌های سالیکورنیا چندین مرتبه با آب شسته شد و به مدت ۲۴ ساعت در آن معمولی با دمای ۵۰ قرار داده شد تا خشک شود و سپس در آسیاب پودر شد. شکل (۲) بذر گیاه سالیکورنیا و پودر حاصل از آسیاب شدن آن را نشان می‌دهد.



شکل ۲. بذر گیاه سالیکورنیا و پودر حاصل از آن

### ۲-۳. روش‌های استخراج روغن از دانه‌های گیاه

انتخاب روش استخراج یک جنبه مهم است که بر کیفیت و بازدهی روغن تاثیر می‌گذارد. بنابراین، برای به دست آوردن بهترین بازدهی روغن، سه روش استخراج روغن از جمله سیستم سوکسله (Soxhlet extractor) در حلال هگزان، دستگاه کلونجر (Clevenger apparatus) در مخلوط مساوی حلال آب و هگزان، و روش پروب اولتراسونیک (Ultrasonic Probe) در حلال هگزان انجام شد. در همه روش‌ها، ۳۰ گرم از نمونه بذر سالیکورنیا آسیاب شده با ۹۰ میلی‌لیتر حلال مخلوط شد و تحت حرارت قرار داده شد. پس از پایان استخراج، حلال توسط یک تبخیرکننده چرخشی حذف شد تا روغن خالص به دست آید. روغن به دست آمده بعد از سرد شدن وزن و در یخچال نگهداری شد. شماتیک روش‌های استخراج روغن در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳. استخراج روغن به روش سوکسله (سمت چپ)، استخراج روغن به روش کلونجر (وسط)، استخراج روغن به روش پروب التراسونیک (سمت راست).

### ۳-۳. نانوذرات مغناطیسی $ZnFe_2O_4@NH_2$ و $ZnFe_2O_4@SO_3H$

#### ۱-۳-۳. سنتز نانوذرات مغناطیسی $ZnFe_2O_4$

به محلولی از سیتریک اسید (۳ گرم) در ۲۰ میلی‌لیتر آب مقطر همراه با همزدن، ۴ گرم اسیدنیتریک اضافه گردید. سپس ۰/۵ گرم  $Zn(NO_3)_2$  و ۲ گرم  $Fe(NO_3)_3$  اضافه شد و مخلوط به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۵۰ تحت حرارت قرار گرفت. pH سوسپانسیون به وجود آمده توسط محلول آمونیوم ۲۵ درصد به ۴/۵- رسید. در ادامه به مدت ۲ ساعت رفلاکس شد و سپس با افزایش حرارت و سوختن و تولید پودر سیاه رنگ، نانو ذرات مغناطیسی  $ZnFe_2O_4$  تولید شد.

#### ۲-۳-۳. اصلاح نانوذرات مغناطیسی $ZnFe_2O_4$ با سیلیکا

نانوذرات  $ZnFe_2O_4$  سنتز شده از مرحله قبل (۰/۵ گرم) در ۲۵ میلی‌لیتر آب مقطر و ۱۰۰ میلی‌لیتر اتانول توسط امواج فراصوت به مدت ۲۰ دقیقه پراکنده شد. پس از آن ۲۵٪  $NH_4OH$  (۴ میلی‌لیتر) تحت هم زدن مداوم اضافه شد و سپس تترااتیل ارتوسیلیکات (TEOS، ۰/۲ میلی لیتر) به صورت قطره ای و همراه با همزدن و در دمای اتاق اضافه گردید. همزدن روی همزن مغناطیسی به مدت ۲۴ ساعت ادامه یافت تا زمانی که سیلیس روی سطح  $ZnFe_2O_4$  تشکیل شود. نانوذرات اصلاح شده با سیلیکا با استفاده از آهنربای بیرونی، از مخلوط جدا



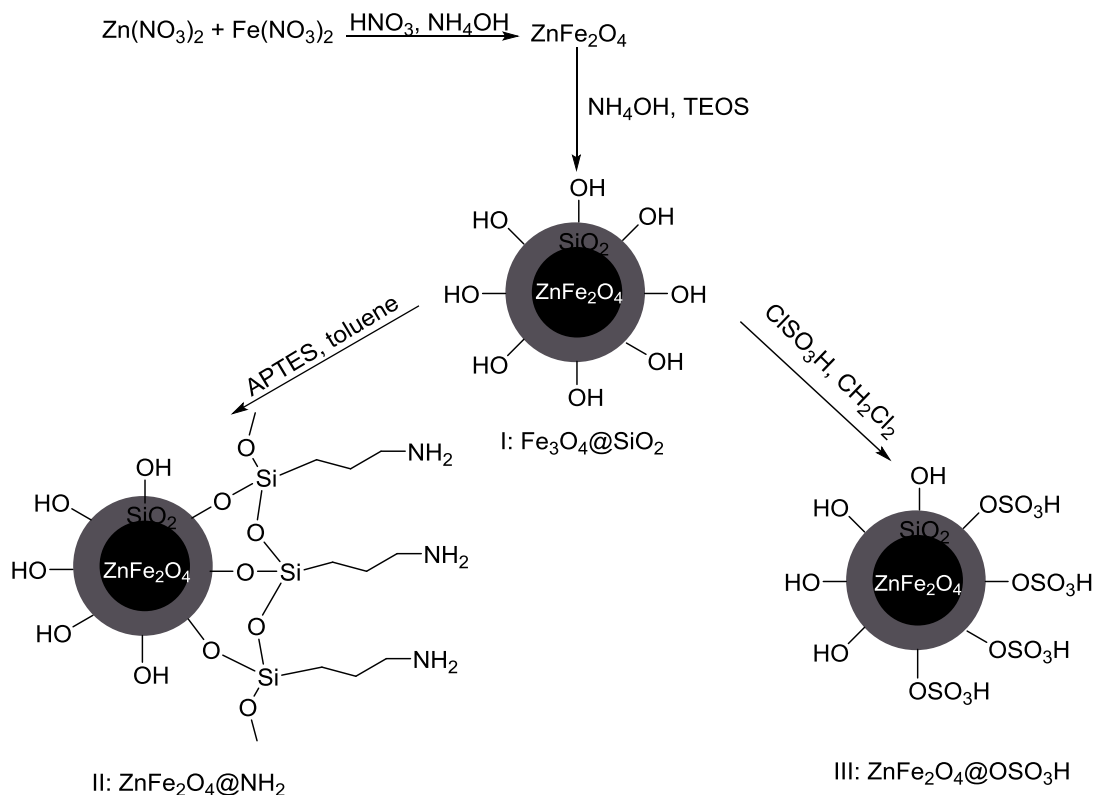
و شسته شد. سپس در آون تحت خلا در دمای ۶۰ به مدت یک شب قرار گرفت تا خشک گردد.

### ۳-۳-۳. عامل دار کردن سطح ناذرات مغناطیسی با APTES ( $ZnFe_2O_4@NH_2$ )

مقدار ۲/۵ گرم از نانوذرات  $ZnFe_2O_4-SiO_2$  داخل ۱۰۰ میلی لیتر تولوئن توسط امواج فراصوت به مدت ۳۰ دقیقه پخش شد. سپس ۳ میلی لیتر APTES (3-aminopropyl)triethoxysilane) به مخلوط اضافه شد. هم خوردن مخلوط روی هیتر استیرر تحت رفلاکس به مدت ۶ ساعت ادامه یافت. نانوذرات عامل دار شده پس از جداسازی با یک آهنربا، دو بار با آب مقطر و اتانول شسته شدند. سپس باقیمانده در آون با دمای ۶۰ به مدت ۱۲ ساعت قرار داده شد (Fei et al., 2023).

### ۳-۳-۴. عامل دار کردن سطح ناذرات مغناطیسی با $ClSO_3H$ ( $ZnFe_2O_4@SO_3H$ )

به مقدار ۰/۵ گرم از نانوذرات  $ZnFe_2O_4-SiO_2$  در ۲۰ میلی لیتر دی کلرومتان به مدت ۲۰ دقیقه همزده شد. سپس ۰/۱۵ میلی لیتر کلروسولفونیک اسید به صورت قطره‌ای به مخلوط اضافه گردید. پس از ۲ ساعت همزدن، نانوذرات جدا و با اتانول سرد شسته شد. سپس در آون تحت خلا در دمای ۶۰ به مدت ۴ ساعت قرار گرفت تا خشک گردد (Nozari et al., 2023). شکل (۴) شماتیک کلی سنتز نانو ذرات را نشان می‌دهد.



شکل ۴. شماتیک سنتز نانوذرات اصلاح شده  $ZnFe_2O_4$ .

### ۳-۴. روش انجام واکنش ترانس استریفیکاسیون (سنتز بیودیزل) در حضور کاتالیست های عامل دار شده با گروه اسیدی و بازی

روغن استخراج شده از گیاه سالیکورنیا با استفاده از واکنش ترانس استریفیکاسیون به بیودیزل تبدیل شد. برای این منظور در یک بالن رفلاکس ته گرد حاوی روغن، به نسبت ۵ برابر متانول اضافه شد. سپس ۲/۵ گرم از نانوکاتالیست های مغناطیسی  $ZnFe_2O_4@SO_3H$  یا

$ZnFe_2O_4@NH_2$  در حجم کل ۱۰۰۰ میلی لیتر به مخلوط اضافه شد. مخلوط به مدت ۴ ساعت تحت رفلکس همراه با همزدن روی هیتر استیرر قرار گرفت. نانوذرات مغناطیسی  $ZnFe_2O_4@SO_3H$  و  $ZnFe_2O_4@NH_2$  به روش‌های گزارش شده سنتز شدند. پس از اتمام واکنش، کاتالیزور با یک آهنربا از محیط واکنش بیرون کشیده شد تا بعد از شستشو، مجدد مورد استفاده قرار گیرد. مخلوط بیودیزل و گلیسرول تولید شده داخل قیف جداکننده ریخته شد و اجازه داده شد به مدت ۱۲ ساعت بماند تا دو ماده از یکدیگر جدا شود. گلیسرول در ته قیف نشست و به صورت کامل خارج شد. لایه بیودیزل در یک گیرنده جداگانه جمع آوری شده و متانول مازاد توسط تیخیرکننده حذف شد. سپس، بیودیزل برای سه بار با آب مقطر شستشو داده شد و با عامل خشک کننده  $CaCl_2$  تیمار گردید. در نهایت آنالیزهای FT-IR و گاز کروماتوگرافی برای بررسی تولید بیودیزل گرفته شد. شکل (۵) بیودیزل تولید شده از روغن گیاه سالیکورنیا را نشان می‌دهد.

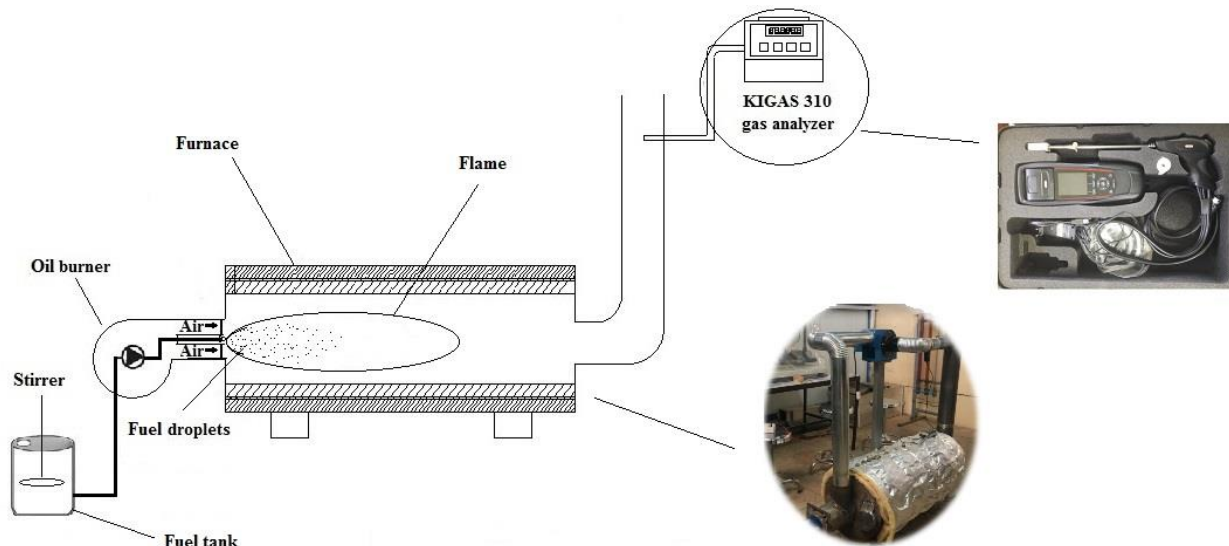


شکل ۵. سوخت زیستی تولید شده از روغن گیاه سالیکورنیا

### ۳-۵. عملکرد احتراقی و انتشار آلاینده‌ها

برای بررسی عملکرد انتشار آلاینده‌گی بیودیزل تولید شده، یک سوخت ترکیبی از ترکیب ۱۰ درصد از سوخت بیودیزل استحصال شده با سوخت دیزل تهیه شده (B10) و توسط یک مشعل سوخت مایع با ظرفیت حرارتی ماکزیمم  $120000 \text{ Kcal/hr}$  در یک کوره آزمایشگاهی به طول ۱۲۰۰ میلی‌متر و قطر داخلی ۵۰ میلی‌متر محترق گردید و پس از رسیدن به حالت پایا، غلظت آلاینده‌های منوکسیدکربن (CO) و اکسیدهای نیتروژن (NOx) در خروجی کوره ثبت شد و آزمایش با سوخت دیزل نیز تکرار گردید. برای اندازه‌گیری غلظت آلاینده‌ها از دستگاه آنالیز گازهای احتراقی KIGAS 310 استفاده شده است. این دستگاه قابلیت اندازه‌گیری غلظت آلاینده منوکسیدکربن تا ۵۰۰۰۰ پی‌پی‌ام (ppm) و نیز آلاینده اکسید نیتروژن تا ۵۰۰۰ پی‌پی‌ام را داراست. دقت اندازه‌گیری منوکسیدکربن و اکسید نیتروژن توسط این دستگاه به ترتیب  $\pm 5\%$  و  $\pm 5$  پی‌پی‌ام می‌باشد. برای اطمینان از صحت نتایج، تمام اندازه‌گیری‌ها دو بار تکرار و تجزیه و تحلیل عدم قطعیت بر اساس دقت تجهیزات و تکرارپذیری آزمایش انجام شده است. شکل (۶) شماتیک کوره آزمایشگاهی و سیستم اندازه‌گیری آلاینده‌های منوکسیدکربن و اکسید نیتروژن حاصل از فرایند احتراق سوخت سنتز شده را نشان می‌دهد.



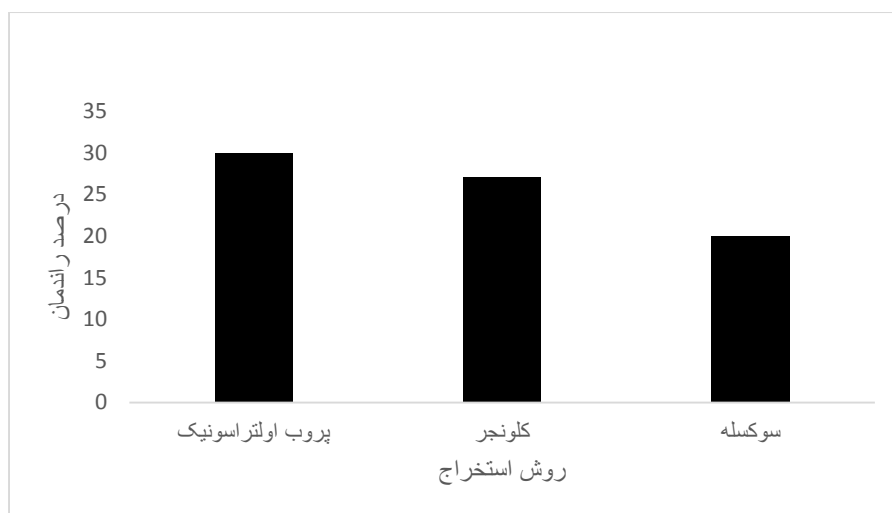


شکل ۶. شماتیک بستر اندازه‌گیری آلاینده‌های حاصل از احتراق بیودیزل

#### ۴. یافته‌های پژوهش و بحث

##### ۴-۱. تاثیر روش استخراج بر راندمان و سرعت استخراج روغن

شکل (۷)، بازدهی روغن به دست آمده از سه روش استخراج را نشان می‌دهد. نتایج واکنش نشان داد که حداکثر بازدهی به دست آمده (۳۰ درصد) مربوط به روش پروب اولتراسونیک در حلال غیرقطبی هگزان بود. علاوه بر این، روش پروب اولتراسونیک یک روش آسان و سریعی است. روش استفاده از سیستم کلونجر با ترکیب حلال آب و هگزان، راندمان ۲۷ درصد استخراج روغن را نشان می‌دهد که اختلاف کمی با روش استخراج قبل نشان می‌دهد ولی سرعت این روش کمتر و نیاز به زمان بیشتری دارد.

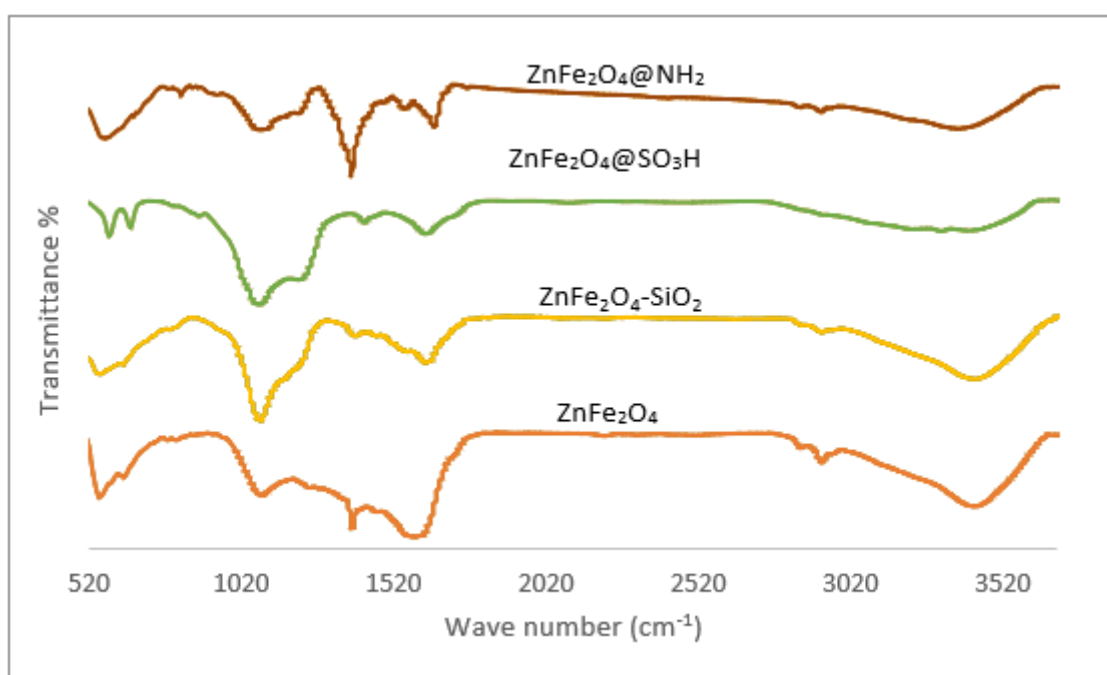


شکل ۷. بازدهی روغن به دست آمده از سه روش استخراج

##### ۴-۲. شناسایی نانوکاتالیزورهای $ZnFe_2O_4@NH_2$ و $ZnFe_2O_4@SO_3H$

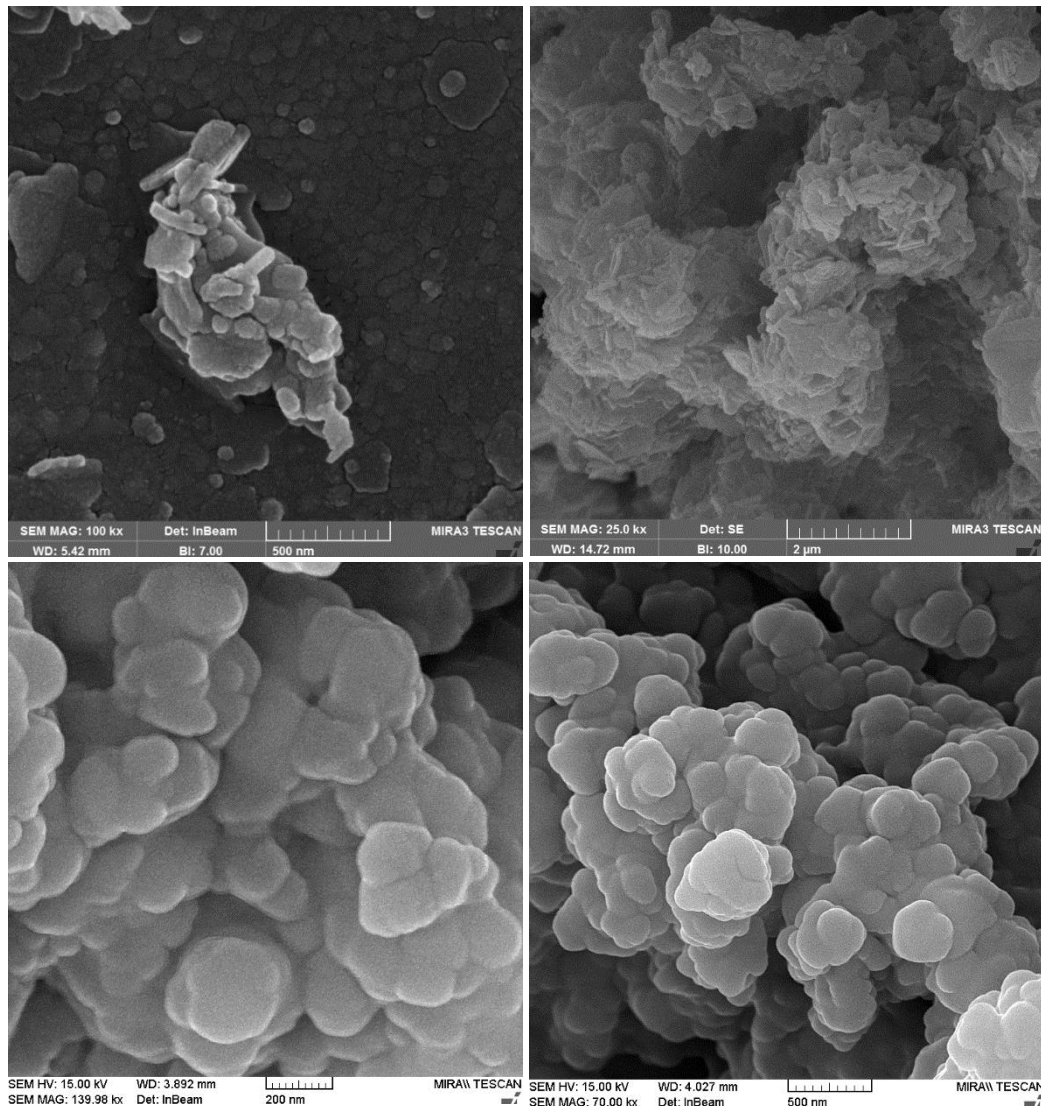
نانوذرات  $ZnFe_2O_4@NH_2$  و  $ZnFe_2O_4@SO_3H$  برای واکنش ترانس استریفیکاسیون، با یک روش آسان و کم هزینه سنتز شدند و سنتز

آن‌ها توسط آنالیزهای FT-IR و FE-SEM مورد بررسی قرار گرفت. طیف FT-IR نانوذرات  $ZnFe_2O_4$ ،  $ZnFe_2O_4-SiO_2$ ،  $ZnFe_2O_4@NH_2$  و  $ZnFe_2O_4@SO_3H$  در شکل (۸) نشان داده شده است. در تمام طیف‌ها باند جذبی در حدود  $580-600\text{ cm}^{-1}$  مربوط به ارتعاشات کششی Fe-O مشاهده می‌گردد. باند جذب در  $3300-3600\text{ cm}^{-1}$  متعلق به ارتعاشات کششی OH روی سطح و همچنین گروه‌های OH آب جذب شده می‌باشد. طیف FT-IR نانوذرات  $ZnFe_2O_4-SiO_2$  باندهای جذبی در نواحی  $880\text{ cm}^{-1}$  و  $1100\text{ cm}^{-1}$  مربوط به ارتعاشات کششی Si-O را نیز نشان می‌دهد. در طیف  $ZnFe_2O_4@SO_3H$ ، پیک‌های شاخص نزدیک به نواحی  $1120-1200\text{ cm}^{-1}$  و  $2850-3500\text{ cm}^{-1}$  مربوط به ارتعاشات کششی گروه سولفونیل و گروه هیدروکسی سولفونیک اسید است. در طیف FT-IR نانوذرات  $ZnFe_2O_4@NH_2$  باند ارتعاشی گروه هیدروکسیل مولکول آب در  $3350\text{ cm}^{-1}$  ظاهر شده است. پیک‌های شاخص در حدود  $1660\text{ cm}^{-1}$  و  $3300\text{ cm}^{-1}$  مربوط به ارتعاشات خمشی و کششی گروه  $NH_2$ ،  $2850\text{ cm}^{-1}$  و  $2950\text{ cm}^{-1}$  متعلق به گروه‌های  $CH_2$ ، به خوبی عامل‌دار شدن سطح نانوذرات با APTES را تایید می‌کند.



شکل ۸. طیف های FT-IR نانوذرات سنتز شده

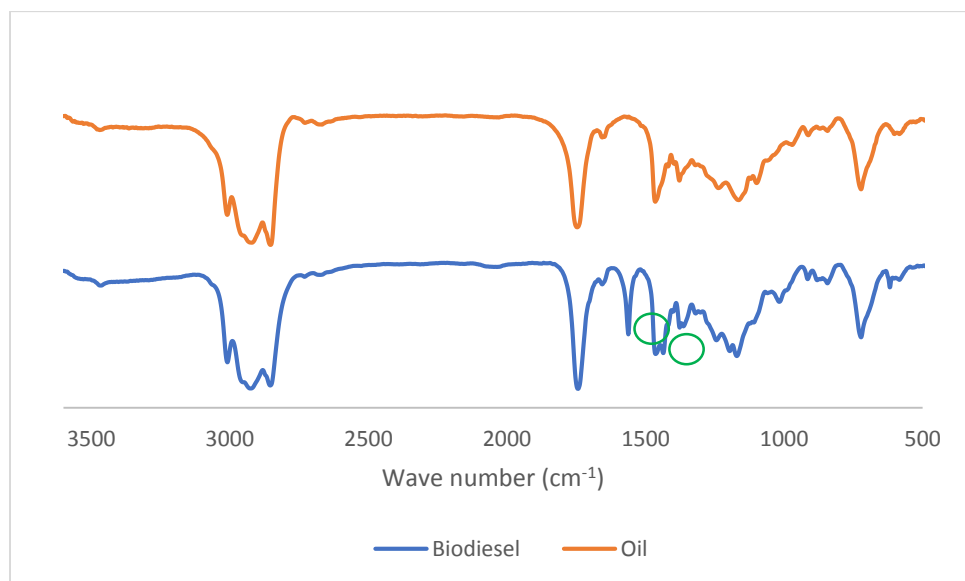
مورفولوژی و اندازه نانوذرات با آنالیز FE-SEM نیز مورد مطالعه قرار گرفت. با توجه به تصاویر شکل (۹)، نانو ذرات  $ZnFe_2O_4@SO_3H$  دارای تراکم تصادفی ذرات با شکل‌های نامنظم و دارای بافت فیبری در ابعاد حدود ۵۰ نانومتر می‌باشد در صورتی که نانوذرات اصلاح شده  $ZnFe_2O_4@NH_2$  به صورت کروی و یکنواختی بیشتر با کاهش اندازه نانوذرات به ۲۵ نانومتر پراکنده شده‌اند.



شکل ۹. تصاویر FE-SEM نانوذرات اصلاح شده (۱):  $ZnFe_2O_4@SO_3H$ ، (۲):  $ZnFe_2O_4@NH_2$

### ۳-۴. مقایسه واکنش ترانس استریفیکاسیون و سنتز بیودیزل در حضور کاتالیست‌های مغناطیسی $ZnFe_2O_4@SO_3H$ و $ZnFe_2O_4@NH_2$ و آنالیز داده‌ها

بازده واکنش ترانس استریفیکاسیون روغن دانه‌های سالیکورنیا برای سنتز بیودیزل با  $2/5$  گرم نانوکاتالیست  $ZnFe_2O_4@SO_3H$  و  $ZnFe_2O_4@NH_2$  به ترتیب در  $90^\circ$  و  $96^\circ$  درصد وزنی به دست آمد. افزایش کاتالیزور به  $3^\circ$  گرم باعث ایجاد اندکی افزایش راندمان واکنش تا حداکثر  $98\%$  درصد پس از  $4$  ساعت در حضور  $ZnFe_2O_4@NH_2$  شد. نانوکاتالیزورهای مغناطیسی به راحتی در تمام طول مدت واکنش توسط یک همزن مغناطیسی معلق شدند و در نهایت توسط یک آهنربا بدون نیاز به مراحل جداسازی بیشتر از محیط واکنش بیرون کشیده شدند. بنابراین، نتایج نشان داد نانوذرات  $ZnFe_2O_4@NH_2$  فعالیت کاتالیزوری بالاتری در مقایسه با  $ZnFe_2O_4@SO_3H$  و بسیاری از کاتالیزورهای معرفی شده برای تهیه بیودیزل نشان داد. به عبارتی، کاتالیزور اصلاح شده با گروه‌های بازی  $NH_2$ ، فعالیت و دسترسی آن را افزایش می‌دهد. همچنین، ترکیب شیمیایی نمونه‌های روغن سالیکورنیا و بیودیزل با استفاده از طیف‌سنجی FT-IR (شکل ۱۰) مورد بررسی قرار گرفت.



شکل ۱۰. طیف‌های FT-IR روغن و بیودیزل سنتز شده از گیاه سالیکورنیا

بررسی طیف‌ها نشان داد که تقریباً تمام قله‌های شناخته شده روغن در بیودیزل وجود دارد به جز فرکانس ارتعاش کششی در  $1435\text{ cm}^{-1}$  که به معنی وجود گروه متیل استر است از که از واکنش ترانس استریفیکاسیون متانول حاصل شده است. یکی دیگر از تفاوت‌های آشکار، وجود دو قله تیز کششی حدود  $1169\text{ cm}^{-1}$  و  $1199\text{ cm}^{-1}$  برای محصول بیودیزل است که به معنای وجود گروه‌های C-O-C است. در صورتی که در طیف مربوط به روغن فقط یک قله در  $1165\text{ cm}^{-1}$  دیده می‌شود. پیک‌های مشاهده شده در حدود  $1750\text{ cm}^{-1}$ ،  $1730\text{ cm}^{-1}$ ،  $1710\text{ cm}^{-1}$  و  $1640\text{ cm}^{-1}$  نیز مربوط به ارتعاشات کششی گروه‌های C=O، C-H، گروه‌های CH<sub>2</sub> و C-O در هر دو ترکیب روغن و بیودیزل می‌باشد.

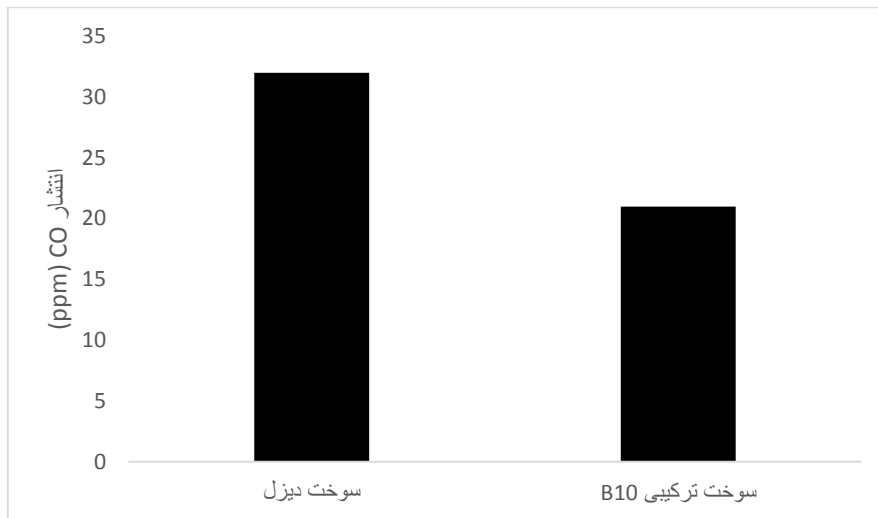
ترکیب اسیدهای چرب بیودیزل تولید شده با استفاده از آنالیز طیف سنجی گاز کروماتوگرافی (GC) در جدول (۱) خلاصه شده است. بر اساس نتایج GC، اسیدهای چرب اصلی مشاهده شده در ترکیب بیودیزل، اسیدهای چرب غیراشباع (USFA) مانند لینولئیک اسید C18:2 (۶۱ درصد)، اسید اولئیک C18:2 (۲۲/۵ درصد) و اسید لینولئیک C18:3 (۳/۱۱ درصد)، همراه با اسیدهای چرب اشباع (SFA) از جمله پالمیتیک C16:0 (۸/۴ درصد) و اسید استئاریک C18:0 (۲ درصد) بود. به عبارت دیگر، مشابه سایر بیودیزل‌ها، پالمیتیک اسید، استئاریک اسید، اولئیک اسید، لینولئیک اسید و لینولئیک اسید رایج‌ترین اسیدهای چرب برای تولید بیودیزل هستند.

جدول ۱. پروفایل اسیدهای چرب مشاهده شده در بیودیزل سنتز شده از گیاه سالیکورنیا

متیل استرهای اسید چرب موجود در بیودیزل سنتز شده																
اسید چرب	C14:0	C14:1	C16:0	C16:1	C17:0	C17:1	C18:0	C18:1	C18:2	C18:3	C20:0	C20:1	C20:2	C22:0	C24:0	C24:1
درصد	۰/۱۴	۰/۰۵	۸/۴۴	۰/۲۱	۰/۱۰	۰/۰۴	۲/۰۱	۲۰/۴۰	۶۰/۹۴	۳/۱۰	۰/۵۳	۰/۴۰	۰/۱۱	۰/۹۰	۰/۴۰	۰/۲۲

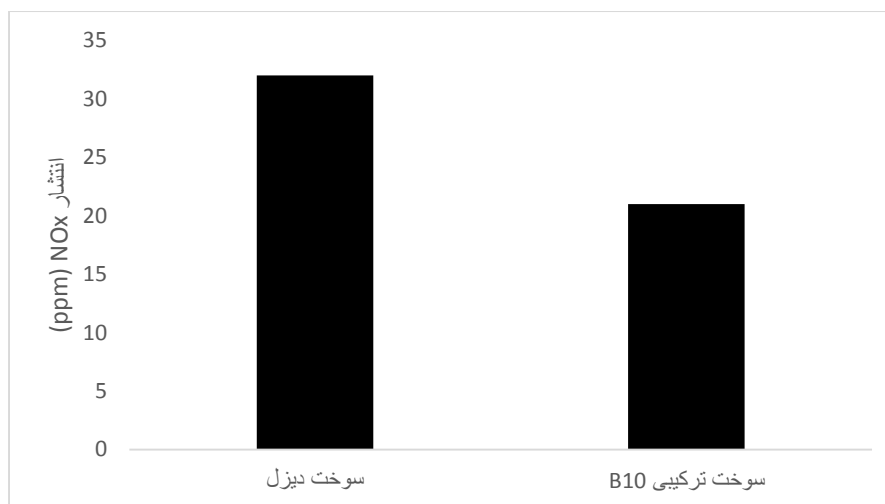
#### ۴-۴. مقایسه انتشار آلاینده‌های احتراقی

شکل (۱۱) غلظت آلاینده منوکسیدکربن (CO) خروجی از محفظه احتراق را برای سوخت دیزل و سوخت ترکیبی (B10) نشان می‌دهد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که ترکیب ۱۰ درصد از سوخت بیودیزل با سوخت دیزل غلظت آلاینده CO را در مقایسه با سوخت دیزل به میزان ۱۴ درصد کاهش می‌دهد. منوکسیدکربن نشان‌دهنده کیفیت احتراق مخلوط سوخت و هواست و هر چه فرایند اختلاط سوخت و هوا بهتر و کامل‌تر باشد میزان انتشار آلاینده منوکسیدکربن کمتر است. به دلیل وجود اکسیژن در ساختار بیودیزل‌ها این سوخت‌ها اختلاط بهتری با هوا داشته و در نتیجه اختلاط و احتراق کامل‌تر انتشار آلاینده منوکسیدکربن را کاهش می‌دهند.



شکل ۱۱. مقایسه غلظت آلاینده مونوکسیدکربن (CO) برای سوخت دیزل و سوخت ترکیبی بایودیزل- دیزل (B10)

شکل (۱۲) غلظت آلاینده اکسیدهای نیتروژن ( $\text{NO}_x$ ) را در خروجی محفظه احتراق نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود ترکیب بیودیزل سنتز شده با سوخت دیزل باعث کاهش آلاینده اکسید نیتروژن به میزان ۳۴ درصد شده است. ناکس حرارتی و ناکس سوختی مکانیسم‌های اصلی تشکیل آلاینده اکسید نیتروژن هستند. به دلیل وجود ترکیبات نیتروژن‌دار در سوخت‌های مایع، مکانیزم ناکس سوختی یکی از مکانیزم‌های مهم تشکیل ناکس است. این در حالی است که سوخت‌های بیودیزل فاقد ترکیبات نیتروژن‌دار بوده و در نتیجه این سوخت‌ها فاقد ناکس سوختی می‌باشند. همچنین ارزش حرارتی سوخت‌های بیودیزل کمتر از سوخت دیزل است و در نتیجه دمای شعله سوخت دیزل بیشتر از سوخت‌های بیودیزل است. بنابراین ناکس حرارتی نیز که مستلزم وجود دماهای شعله بالا برای شکستن پیوندهای سه گانه مولکول‌های نیتروژن موجود در هوای احتراق و ترکیب آن با اتم‌های اکسیژن است در سوخت‌های بیودیزل کمتر از سوخت‌های دیزل می‌باشد.



شکل ۱۲. مقایسه غلظت آلاینده اکسیدهای نیتروژن ( $\text{NO}_x$ ) برای سوخت دیزل و سوخت ترکیبی بایودیزل- دیزل (B10)

## ۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، استخراج روغن بذر گیاه مقاوم به خشکسالی سالیکورنیا توسط سه روش سوکسله، کلونجر و پروب اولتراسونیک برای

تولید بیودیزل انجام شده و انتشار آلاینده‌های احتراقی سوخت بیودیزل حاصله نسبت به سوخت دیزل مورد بررسی قرار گرفت. روغن حاصله در حضور نانوذرات سنتز شده  $ZnFe_2O_4@SO_3H$  و  $ZnFe_2O_4@NH_2$  در واکنش با متانول، به متیل استرهای اسید چرب (بیودیزل) تبدیل شد و نانوذرات سنتز شده با استفاده از آنالیزهای FT-IR و FE-SEM مشخصه‌یابی شدند. همچنین ترکیب اسیدهای چرب موجود در پروفایل متیل استرهای اسید چرب (بیودیزل) به دست آمده نیز با تکنیک کروماتوگرافی گازی مورد شناسایی قرار گرفت. در گام آخر برای بررسی عملکرد انتشار آلاینده‌ی بیودیزل تولید شده، یک سوخت ترکیبی از ترکیب ۱۰ درصد از سوخت بیودیزل با سوخت دیزل تهیه شده (B10) و توسط یک مشعل در یک کوره آزمایشگاهی محترق گردید و غلظت آلاینده‌های منوکسیدکربن (CO) و اکسیدهای نیتروژن (NOx) در خروجی کوره با استفاده از دستگاه آنالیز گازهای احتراقی KIGAS ۳۱۰ اندازه‌گیری و با مقادیر انتشار سوخت دیزل مقایسه گردید. مهم‌ترین نتایج به دست آمده به شرح زیر است:

۱. بیشترین بازدهی تولید روغن از روش پروب اولتراسونیک حاصل شد.
۲. نانوذرات عامل‌دار شده با گروه آمینی به دلیل اندازه کوچک‌تر، دسترسی بیشتر سطح و فعالیت بیشتر، بازدهی بالاتری برای تولید بیودیزل نسبت به نانوذرات عامل‌دار شده با گروه سولفونیک اسید نشان داد.
۳. لینولئیک اسید، اولئیک اسید، پالمیتیک اسید و لینولئیک اسید مهم‌ترین اسیدهای چرب تشکیل‌دهنده بیودیزل استحصالی هستند.
۴. به دلیل وجود اکسیژن در ساختار بیودیزل، این سوخت‌ها اختلاط بهتری با هوا داشته و در نتیجه اختلاط و احتراق کامل‌تر انتشار آلاینده منوکسیدکربن را کاهش می‌دهند به طوری که ترکیب ۱۰ درصد از سوخت بیودیزل استحصال شده با سوخت دیزل انتشار آلاینده منوکسیدکربن را در مقایسه با سوخت دیزل ۱۴ درصد کاهش داد.
۵. عدم وجود ترکیبات نیتروژن‌دار در بیودیزل باعث حذف آلاینده ناکس سوختی در فرایند احتراق این سوخت‌ها می‌شود. همچنین به دلیل ارزش حرارتی کمتر، دمای شعله بیودیزل کمتر از سوخت دیزل است که باعث می‌شود تا تشکیل آلاینده ناکس حرارتی نیز که وابسته به دمای شعله است نیز کاهش یابد به طوری که ترکیب ۱۰ درصد از سوخت بیودیزل استحصال شده با سوخت دیزل انتشار آلاینده اکسید نیتروژن را در مقایسه با سوخت دیزل ۳۴ درصد کاهش داد.

## ۶. منابع

- Abu-Hamdeh, N. H., Bantan, R. A. R., Alimoradi, A., & Pourhoseini, S. H. (2020). The effect of injection pressure on the thermal performance and emission characteristics of an oil burner operating on B20 palm oil biodiesel-diesel blend fuel. *Fuel*, 278: 1-8.
- Akhani, H. (2006). Biodiversity of halophytic and sabkha ecosystems in Iran. *Sabkha ecosystems, Volume II: West and Central Asia*, 1-88.
- Akhani, H. (2007). Diversity, biogeography, and photosynthetic pathways of *Argusia* and *Heliotropium* (Boraginaceae) in South-West Asia with an analysis of phytogeographical units. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 155(3): 401-25.
- Akhani, H., Ghobadnejhad, M., & Hashemi, S. (2003). Ecology, biogeography and pollen morphology of *Bienertia cycloptera* Bunge ex Boiss. (Chenopodiaceae), an enigmatic C4 plant without Kranz anatomy. *Plant Biology*, 5(2):167-78.
- Al-Hamamre, Z., Sandouqa, A., Al-Saida, B., Shawabkeh, R. A., & Alnaief, M. (2023). Biodiesel production from waste cooking oil using heterogeneous KNO<sub>3</sub>/Oil shale ash catalyst. *Renewable Energy*, 211: 470-483.
- Dehghani, S., & Haghghi, M. (2017). Sono-sulfated zirconia nanocatalyst supported on MCM-41 for biodiesel production from sunflower oil: Influence of ultrasound irradiation power on catalytic properties and performance. *Ultrasonics Sonochemistry*, 35: 142-151.
- Dos Santos, T., Santos, E.C.S., Dias, J. P., Barreto, J., Stavale, F.L., & Ronconi, C. M. (2019). Reduced graphene oxide as an excellent platform to produce a stable Brønsted acid catalyst for biodiesel production. *Fuel*, 256: 1-10.
- Eganathan, P., SR Subramanian, H. M., Latha, R., & Srinivasa Rao C. (2006). Oil analysis in seeds of *Salicornia brachiata*. *Industrial Crops and Products*, 23(2): 177-179.
- Fei, L., Ali, F., Said, A., Tariq, N., Raziq, F., Ali, N., Arif, U., Akhter, M. S., Rahdar, A., & Bilal, M. (2023). Surface-



- functionalized spongy zinc ferrite as a robust visible-light driven nanocatalyst for wastewater remediation: characterization, kinetic, and mechanistic insight. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20: 1007–1018.
- Heidary, R. (2017). Effect of temperature on hydrothermal gasification of paper mill waste, case study: the paper mill in North of Iran. *Journal of Environmental Studies*, 43(1): 59-71.
- Kaya, T., Kutlar, O.A., & Taskiran, O.O. (2021). Evaluation of the partially premixed compression ignition combustion with diesel and biodiesel blended diesel at part load condition. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 24(2): 458-468.
- Lani, S. L., Ngadi, N., Haron, S., Inuwa, I. M., & Opotu, L. A. (2024). The catalytic effect of calcium oxide and magnetite loading on magnetically supported calcium oxide-zeolite catalyst for biodiesel production from used cooking oil. *Renewable Energy*, 222: 119846.
- Lim, S., Yap, C. Y., Pang, Y. L., & Wong, K. H. (2020). Biodiesel synthesis from oil palm empty fruit bunch biochar derived heterogeneous solid catalyst using 4-benzenediazonium sulfonate. *Journal of Hazardous Materials*, 390: 121532.
- Maleki Delarestaghi, R., Ghasemzadeh, R., Mirani, M., & Yaghoubzadeh, P. (2018). The comparison between different waste management methods of Tabas city with life cycle assessment assessment. *Journal of Environmental Science Studies*, 3(3): 782-793.
- Mapossa, A. B., Dantas, J., Silva, M. R., Kiminami, R. H. G. A., Costa, A. C. F. M., & Daramola, M. O. (2020). Catalytic performance of NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> and Ni<sub>0.3</sub>Zn<sub>0.7</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> magnetic nanoparticles during biodiesel production. *Arabian Journal of Chemistry*, 13(2): 4462-4476.
- Moradkhani, M. A., Hosseini, S. H., Song, M., & Teimoori, K. (2024). Comprehensive data-driven methods for estimating the thermal conductivity of biodiesels and their blends with alcohols and fossil diesels. *Renewable Energy*, 221: 119849.
- Nejatian, N., abbaspour, M., Javidan, P., Nia, M. Y., Shacheri, F., Azizi, H., Yavari Nia, M., Pazoki, A., Pazoki, M., Amiri M. J., & Abbasi, S. (2023). Evaluation of the vulnerability and pathways of groundwater pollution in the Zanjanrud river basin by an integrated modeling approach. *Modeling Earth Systems and Environment*, 1-14.
- Ni, J., & Meunier, F. C. (2007). Esterification of free fatty acids in sunflower oil over solid acid catalysts using batch and fixed bed-reactors. *Applied Catalysis A: General*, 333(1): 122–130.
- Nozari, A., Hassani, H., & Karimianb, A. (2023). ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>@SiO<sub>2</sub>-SO<sub>3</sub>H Magnetic Nanoparticles: A New, Efficient, and Recyclable Heterogeneous Nanocatalyst for Successful Synthesis of 5-Substituted-1H-tetrazoles. *Russian Journal of Organic Chemistry*, 59(8): 1–12.
- Pazoki, M., & Ghasemzadeh, R. (2020). Leachate Quality. In: *Municipal Landfill Leachate Management*. Environmental Science and Engineering. 101-127. Springer, Cham.
- Pourhoseini, S. H., Namvar-Mahboub, M., Hosseini, E., & Alimoradi, A. (2021). A comparative exploration of thermal, radiative and pollutant emission characteristics of oil burner flame using palm oil biodiesel-diesel blend fuel and diesel fuel. *Energy*, 217: 1-10.
- Ranjbar, G., Dehghany, F., Pirasteh Anosheh, H., & Pourmoghaddam, M. (2017). Salicornia, Sea water tolerant plant. *Publication of agricultural education*.
- Sebayang, A. H., Ideris, F., Silitonga, A. S., Shamsuddin, A. H., Zamri, M. F. M. A., Pulungan, M. A., Siahaan, S., Alfansury, M., Kusumo, F., & Milano, J. (2023). Optimization of ultrasound-assisted oil extraction from *Carica candamarcensis*; A potential Oleaginous tropical seed oil for biodiesel production. *Renewable Energy*, 211: 434-444.
- Shi, G., Yu, F., Yan, X., & Li, R. (2017). Synthesis of tetragonal sulfated zirconia via a novel route for biodiesel production. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 45(3): 311–316.
- Soleimani Alyar, S., & Yarahmadi, R. (2019). CO removal using single stage plasma- catalytic hybrid process in laboratory scale. *Journal of Environmental Studies*, 44(11): 721-733.
- Tajfar, I., Pazoki, M., Pazoki, A., Nejatian, N., & Amiri, M. (2023). Analysis of Heating Value of Hydro-Char Produced by Hydrothermal Carbonization of Cigarette Butts. *Pollution*, 9(3): 1273-1280.
- Tosun, E., & Özcanlı, M. (2021). Hydrogen enrichment effects on performance and emission characteristics of a diesel engine operated with diesel-soybean biodiesel blends with nanoparticle addition. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 24(3): 648-654.

- Vasić, K., Podrepšek, G. H., Knez, Ž., & Leitgeb, M. (2020). Biodiesel Production Using Solid Acid Catalysts Based on Metal Oxides. *Catalysts*, 10(2):237.
- Xie, W., & Wang, H. (2020). Immobilized polymeric sulfonated ionic liquid on core-shell structured Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub> composites: A magnetically recyclable catalyst for simultaneous transesterification and esterifications of low-cost oils to biodiesel. *Renewable Energy*, 145: 1709–1719.
- Zhang, X., Bai, L., & Esfandani-Bozchaloyi, S. (2022). Population Differentiation and Gene Flow of *Salicornia persica* Akhani (Chenopodiaceae). *International Journal of Cytology, Cytosystematics and Cytogenetics*, 75(2): 33-43.