



Use of response surface method for modeling and optimization of harvesting of *Chlorella sorokiniana* pa.91 with Fe₃O₄/PACl from municipal wastewater

S. akbari¹, F. Qaderi^{1*}, H. Amini Rad¹

¹Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Civil Engineering, Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

ABSTRACT: Microalgae have the potential to produce valuable substances for pharmaceutical purposes as well as serve as a food source, providing bioactive compounds and ingredients for cosmetics. However, harvesting microalgae is a crucial step in the mass production of various high-value products derived from microalgae. This process often becomes a major bottleneck in downstream processing. It is essential to find effective and cost-effective harvesting methods for industrial applications. Among several harvesting methods, magnetic flocculation offers the benefits of modest operation, energy savings, and quick separation. This study investigates the harvesting process of *Chlorella sorokiniana* pa.91 microalgae using a novel flocculation process involving nano-Fe₃O₄ coated with PACl. In this research, we have used the chemical co-precipitation method to prepare nanoparticles. Using the response surface method to optimize the most important parameters of the magnetic flocculation harvesting process to check the microalgae removal efficiency, three variables of time, concentration of nanomaterials, and pH in the culture medium obtained from municipal wastewater have been investigated. The results demonstrated that the highest harvesting efficiency, nearly 90%, was achieved under the conditions of 3.5 g/L Fe₃O₄, a constant concentration of 0.075 g/L PACl, a harvesting duration of 40 minutes, and a pH level of 4. On the other hand, the lowest microalgae harvesting efficiency was observed under specific conditions: a composite nanoparticle concentration of 0.5 g/L per liter, a harvesting time of 27.5 minutes, and a pH of 6.5 resulting in a mere 22% efficiency. The rate of microalgal removal increased from 53% in the most alkaline condition to 75% in the most acidic environment. The highest harvesting efficiency, reaching 80%, was achieved under neutral pH conditions with a settling time of 53 minutes. Furthermore, the investigated combined method investigated enhances the flocculation effectiveness of microalgae. Based on the findings, it can be inferred that the efficiency of microalgae harvesting rises with longer duration, higher nanoparticle concentrations, and lower pH levels

Review History:

Received: Aug. 07, 2023

Revised: Nov. 21, 2023

Accepted: Dec. 03, 2023

Available Online: Dec. 14, 2023

Keywords:

Harvesting

microalgae

municipal wastewater

surface response method

Fe₃O₄/PACl composite nanoparticles

1- Introduction

Due to the growth of the world population and rising living standards in developing nations, microalgae have emerged as a novel biomass source. Microalgae are currently being cultured to produce high-value compounds in various industries, including fuel, nutraceuticals, pharmaceuticals, and wastewater treatment [1]. The basic steps of microalgal production include cultivation and harvesting [2]. It is estimated that the microalgae harvesting step represents 20–30% of the total biomass production cost[3]. In particular, low cell concentrations in cultures (0.5 to 5 g/L), small cell size (<30 μm), and the stability of cell suspension are major economic bottlenecks in microalgal biomass production [4]. Algal cells can be harvested by various methods such as centrifugation, sedimentation, flocculation, filtration, flotation or by a combination of these methods [5]. The current harvesting methods have various disadvantages,

including high costs, increased energy usage, and the need for time-intensive procedures [6]. However, magnetic separation is a quick and simple method due to its time-saving nature. And this method is low-energy and economical [7]. Magnetic separation is a simple technique that uses functionalized magnetic particles to adsorb cells and biomolecules from liquid solutions. This process operates through the influence of an external magnetic field [8]. Additionally, surface coating or modification of magnetic nanoparticles with various materials, such as polymers and surfactants, can improve both the stability of the NPs suspension and the harvesting efficiency[9]. Various types of flocculants have been used to harvest microalgal biomass, which can be broadly classified into three groups: inorganic metal salts (such as aluminum and iron salts such as Al₂(SO₄)₃, Fe₂(SO₄)₃, and FeCl₃, etc.), synthetic polymers (including polyelectrolyte and polyacrylamide), and natural polymers (such as chitosan

*Corresponding author's email: f.qaderi@nit.ac.ir



and starch) [10]. There are four mechanisms of microalgal cell flocculation in which microalgal cells flocculate through charge neutralization, bridging, and sweeping and facilitate the formation of aggregates or larger particles, thereby aiding the harvesting process [11]. A diverse and highly efficient flocculant for microalgae harvesting still needs to be developed, despite the availability of several flocculants and their performance, as well as their energy and operating costs. Additionally, by lowering expenses and promoting more sustainable microalgae production methods, the enhanced flocculants can aid in the growth and implementation of microalgae-based companies.

The objective of this current study is to develop an efficient magnetic separation method for recovering the algal cells of *Chlorella sorokiniana* pa.91 with Fe₃O₄/PACl composite nanoparticles from municipal wastewater.

2- Methodology

2- 1- Microalgal strain and cultivation

A new strain of *Chlorella sorokiniana* pa.91, which was previously isolated from the Gela dairy wastewater treatment plant (Amol, Iran), was selected and used in this study [12]. In this experiment, the influent from the preliminary settling tank of the wastewater treatment plant (WWTP) in Sari, Iran, was utilized as the microalgae culture medium. Microalgae cultivation experiments were conducted using 1000-mL Erlenmeyer flasks in volumes of 800 mL of culture medium. The flasks were kept at 28°C under 3000 Lx light intensity in a 12/12-h light/dark cycle.

2- 2- Preparation of magnetic nanoparticles

In this study, several substances, including FeCl₃·6H₂O, FeCl₂·4H₂O, and ammonium hydroxide (25 wt%), were used for the synthesis of nanoparticles. To adjust pH levels, 0.1 M HCl and 0.1 M NaOH were purchased from Merck. Fe₃O₄ magnetite nanoparticles were synthesized using the chemical co-precipitation method. For the synthesis, first, 0.99 g of FeCl₃·6H₂O and 2.7 g of FeCl₂·4H₂O are added to 100 ml of distilled water and mixed in a three-necked flask with a round bottom with a magnetic stirrer. Nitrogen was used to remove oxygen from the solution during the mixing process. When the solution was heated to 80°C, 10 mL of NH₄OH (25 wt%) was added dropwise to obtain a black precipitate, and the reaction was kept at 80°C for 30 minutes under continuous stirring. The black suspension obtained was separated using a permanent magnet, washed three times with distilled water and ethanol, and dried in a vacuum oven at 80 °C [1]. Then Fe₃O₄ nanoparticles were mixed with polyaluminum chloride in 50 ml of distilled water and shaken for 5 minutes in the incubator until they were completely mixed. Then a magnet was placed under the mixture to separate the top layer and the nanoparticle. After that, the separated material was dried at 80°C in an oven.

3- Results and Discussion

The response surface method is a statistical and mathematical approach used to analyze and optimize

Table 1. The results of microalgae harvesting efficiency in Fe₃O₄/PACl magnetic flocculation process

Run	time min	pH	Fe ₃ O ₄ /PACl g/L	HE
1	40	9	3.5	69.386
2	15	9	1.5	32.636
3	27.5	6.5	2.5	53.705
4	27.5	6.5	2.5	58.705
5	27.5	6.5	2.5	56.706
6	27.5	6.5	2.5	50.705
7	40	4	3.5	88.136
8	15	4	3.5	60.886
9	27.5	11.5	2.5	53.364
10	15	4	1.5	35.386
11	27.5	6.5	2.5	55.705
12	27.5	6.5	4.5	69.114
13	27.5	6.5	0.5	22.114
14	27.5	6.5	2.5	50.705
15	15	9	3.5	46.136
16	52.5	6.5	2.5	80.364
17	40	4	1.5	66.636
18	2.5	6.5	2.5	25.864
19	40	9	1.5	49.886
20	27.5	1.5	2.5	75.864

processes when different factors interact with each other. In this research, the design and modeling of the experiment were done using Design Expert software. Time, the concentration of composite nanoparticles, and pH as three independent parameters in CCD design were determined based on pre-test experiments, and the effects of each of the independent variables, interaction, and simultaneous variables were also investigated. Table 1 based on related literature and preliminary studies, the range of the parameters under examination was selected. The design included 20 experiments, with the best microalgae removal efficiency reaching 88% under specific conditions, such as a 40-minute harvesting period, a pH of 4, and a nanoparticle concentration (g/L) of 3.5. The lowest removal efficiency was obtained in The concentration is 0.5 g, and the pH of 6.5 is displayed for 27.5 minutes Also, the best efficiency is reported at a neutral pH equal to 80%.

The results of variance analysis show that the modified quadratic model effectively represents the design space and provides a good fit to the data. The results show that the proposed model adequately shows the relationships between the variables and the response. The F model value of 61.89 shows that the proposed model is statistically significant.

P-values less than 0.05 indicate that the conditions of the model are significant. The coefficient of determination value for this design, (R^2) 0.9823, indicates a strong relationship between independent variables and response values. Experimental results have been presented, showing that reducing pH and increasing two other parameters improve harvesting efficiency. The better harvesting of microalgae at acidic pH can be attributed to the fact that in acidic conditions, the surface charge of microalgae cells becomes more positive.

4- Conclusions

In this study, we investigate the impact of three independent variables nanoparticles concentration, harvesting time, and pH on the microalgae *Chlorella sorokiniana*.pa91 was investigated using various Fe₃O₄/PACl-based nanoparticles as adsorbents. The findings of our study showed that the magnetic flocculent method is very effective for harvesting and isolating microalgae from the culture medium, making it a valuable approach for industrial applications. This experiment the individual effects of each variable, their interactions, and their combined effects. The results showed that the separation efficiency increased significantly with increasing time and concentration of nanoparticles, and decreasing pH. The main aim was to determine the optimal conditions for nanomaterials concentration, harvesting time, and pH using Design Expert software. According to the results, achieving an efficiency of 90% requires a consistent concentration of 0.075 cationic flocculant, a pH of 4, a duration of 40 minutes, and a concentration of 3.5 g/L for Fe₃O₄/PACl nanoparticles. While the lowest efficiency, at 22%, was observed at pH 6.5 with a nanoparticle concentration of 0.5 g/L.

References

- [1] Z. Yin, R. Chu, L. Zhu, S. Li, F. Mo, D. Hu, C. Liu, Application of chitosan-based flocculants to harvest microalgal biomass for biofuel production: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 145 (2021) 111159.
- [2] P. Fraga-García, P. Kubbutat, M. Brammen, S. Schwaminger, S. Berensmeier, Bare iron oxide nanoparticles for magnetic harvesting of microalgae: from interaction behavior to process realization, *Nanomaterials*, 8(5) (2018) 292.
- [3] M.G. Savvidou, M.M. Dardavila, I. Georgiopoulou, V. Louli, H. Stamatis, D. Kekos, E. Voutsas, Optimization of microalga *Chlorella vulgaris* magnetic harvesting, *Nanomaterials*, 11(6) (2021) 1614.
- [4] S. Wang, A. Stiles, C. Guo, C. Liu, Harvesting microalgae by magnetic separation: a review. *Algal Res* 9: 178–185, in, 2015.
- [5] S. Li, T. Hu, Y. Xu, J. Wang, R. Chu, Z. Yin, F. Mo, L. Zhu, A review on flocculation as an efficient method to harvest energy microalgae: mechanisms, performances, influencing factors and perspectives, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 131 (2020) 110005.
- [6] Y. Fu, F. Hu, H. Li, L. Cui, G. Qian, D. Zhang, Y. Xu, Application and mechanisms of microalgae harvesting by magnetic nanoparticles (MNPs), *Separation and Purification Technology*, 265 (2021) 11851.
- [7] S. Li, T. Hu, Y. Xu, J. Wang, R. Chu, Z. Yin, F. Mo, L. Zhu, A review on flocculation as an efficient method to harvest energy microalgae: mechanisms, performances, influencing factors and perspectives, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 131 (2020) 110005.
- [8] Y. Fu, F. Hu, H. Li, L. Cui, G. Qian, D. Zhang, Y. Xu, Application and mechanisms of microalgae harvesting by magnetic nanoparticles (MNPs), *Separation and Purification Technology*, 265 (2021) 11851.
- [9] A.A. Markeb, J. Llimós-Turet, I. Ferrer, P. Blánquez, A. Alonso, A. Sánchez, J. Moral-Vico, X. Font, The use of magnetic iron oxide based nanoparticles to improve microalgae harvesting in real wastewater, *Water research*, 159 (2019) 490-500.
- [10] A. Pugazhendhi, S. Shobana, P. Bakonyi, N. Nemestóthy, A. Xia, G. Kumar, A review on chemical mechanism of microalgae flocculation via polymers, *Biotechnology Reports*, 21 (2019) e00302.
- [11] C.N. Ogbonna, E.G. Nwoba, Bio-based flocculants for sustainable harvesting of microalgae for biofuel production. A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 139 (2021) 110690.
- [12] P. Asadi, H.A. Rad, F. Qaderi, Comparison of *Chlorella vulgaris* and *Chlorella sorokiniana* pa. 91 in post treatment of dairy wastewater treatment plant effluents, *Environmental Science and Pollution Research*, 26 (2019) 29473-29489.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

S. akbari, F. Qaderi, H. Amini Rad, Use of response surface method for modeling and optimization of harvesting of *Chlorella sorokiniana* pa.91 with Fe₃O₄/PACl from municipal wastewater, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 56(2) (2024) 41-44.

DOI: 10.22060/ceej.2023.22600.8002





استفاده از روش سطح پاسخ برای مدل سازی و بهینه سازی برداشت ریز جلبک *Chlorella sorokiniana* pa.91 با $Fe_3O_4/PACl$ از محیط کشت فاضلاب شهری

سارا اکبری، فرهاد قادری*، حسن امینی راد

گروه مهندسی عمران محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۱۶
بازنگری: ۱۴۰۲/۰۸/۳۰
پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۱۲
ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۹/۲۳

کلمات کلیدی:

برداشت
ریز جلبک
فاضلاب شهری
روش سطح پاسخ
نانو ذره کامپوزیتی $Fe_3O_4/PACl$

خلاصه: ریز جلبکها به عنوان یک منبع پایدار برای تولید محصولات زیستی با ارزش مورد توجه هستند و کاربردهایی در صنایعی مانند افزودنیهای غذایی، ترکیبات زیست فعال، داروسازی و آرایشی پیدا می کنند. با این حال، یکی از چالشهای اصلی در استفاده از ریز جلبکها برای این اهداف، برداشت کارآمد زیست توده می باشد که به عنوان یک گلوگاه اصلی در پردازش پایین دست عمل می کند. یکی از مکانیزمهای جایگزین برای برداشت ریز جلبک از محیط کشت استفاده از روش منعقدکننده مغناطیسی است. در این مطالعه، فرآیند برداشت ریز جلبک بومی *Chlorella sorokiniana* pa.91 را با استفاده از $PACl/Fe_3O_4$ در فرآیند لخته سازی مورد بررسی قرار داده شده است. در این تحقیق از نانوذرات Fe_3O_4 سنتز شده به روش هم رسوبی برای برداشت ریز جلبکها استفاده شد. با استفاده از روش سطح پاسخ، برای بررسی راندمان حذف، بهینه سازی مهمترین پارامترهای فرآیند برداشت انعقاد مغناطیسی شامل زمان، غلظت نانومواد و pH در محیط کشت حاصل از فاضلاب شهری بررسی شده است. تجزیه و تحلیل تجربی نشان داد که بالاترین راندمان برداشت تقریباً ۹۰ درصد، در شرایط ۳/۵ گرم در لیتر Fe_3O_4 غلظت ثابت ۰/۰۷۵ گرم در لیتر PACI، زمان برداشت ۴۰ دقیقه و pH_۴ به دست آمده است از طرفی کمترین مقدار راندمان برداشت ریز جلبک در شرایطی که مقدار نانو ذره کامپوزیتی برابر با ۰/۵ گرم در لیتر، مدت زمان برداشت ۲۷/۵ دقیقه و pH ۶/۵ برابر با ۲۲ درصد گزارش شده است. در این میان، بازی ترین حالت از pH که برابر با ۱۱/۵ است راندمان حذف ریز جلبک ۵۳٪ و در اسیدی ترین حالت برابر ۷۵٪ می باشد و همانطور میزان بیشترین راندمان برداشت در pH خنثی با مدت زمان ته نشینی ۵۳ دقیقه برابر با ۸۰٪ مشاهده شده است. مقدار ضریب تعیین برای این طرح $(R^2) = ۰/۹۸۲۳$ به دست آمده، نشان دهنده رابطه قوی بین متغیرهای مستقل و مقادیر پاسخ است. علاوه بر این، حالت ترکیبی مورد مطالعه قرار گرفته راندمان لخته سازی ریز جلبکها را بهبود می بخشد. از نتایج به دست آمده می توان استنباط کرد با افزایش زمان و غلظت نانو ذرات و کاهش pH راندمان برداشت ریز جلبک افزایش خواهد بود.

۱- مقدمه

از کاربردهای مهم ریز جلبک می توان در تصفیه لندفیل^۱ و شیرابه اشاره کرد. با توجه به افزایش جمعیت و توسعه شهرنشینی، به طور نامحدودی حجم زباله های جامد شهری در حال افزایش می باشد. تراوش تدریجی شیرابه از محل دفن زباله می تواند وارد آب های زیرزمینی شود و خطرات بالقوه جدی برای محیط اطراف و سلامت عمومی ایجاد کند [۲]. در حال حاضر، انواع روش های فیزیکی و شیمیایی، بیولوژیکی یا ترکیبی را می توان برای تصفیه شیرابه های زباله استفاده شود، مانند اکسیداسیون شیمیایی، تبادل یونی، غشاء، فرآیندهای تصفیه بیولوژیکی هوازی و بی هوازی. در این میان ریز جلبکها نوعی ارگانسیم معمولی با ویژگی های سرعت رشد سریع

با توجه به رشد جمعیت جهانی و افزایش استانداردهای زندگی در اقتصادهای در حال توسعه، ریز جلبکها منبع جدیدی از زیست توده هستند. این میکروارگانسیمها به دلیل کاربردهای تجاری متنوع در صنایع مختلف از جمله غذا، خوراک، سوخت و تصفیه فاضلاب، توجه زیادی را از سوی محققان به خود جلب کرده اند. ریز جلبکها محصولات ارزشمندی را ارائه می دهند که می توانند برای مصارف انسانی و سایر اهداف، مورد استفاده قرار گیرند و آن ها را به موجوداتی بسیار مفید تبدیل می کند [۱].

1 Landfill

* نویسنده عهده دار مکاتبات: f.qaderi@nit.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.



و سازگاری محیطی خوب هستند و می‌توانند CO₂ را برای فتوسنتز برای تولید لیپیدهای بیولوژیکی تثبیت کنند و بحران انرژی را کاهش دهند [۳]. کشت ریزجلبک‌ها با شیرابه می‌تواند هزینه‌های تصفیه و تولید زیست‌توده ریزجلبک‌ها را به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهد، زیرا می‌تواند مواد مغذی فراوانی را برای رشد جلبک‌ها تامین کند و به‌طور همزمان اصلاح فاضلاب و تولید منابع زیستی را محقق کند [۴]. از طرفی دفع بی‌رویه فاضلاب در حال حاضر در همه جوامع در سرتاسر جهان در اولویت قرار دارد. آلودگی خاک ناشی از تخلیه بی‌رویه زباله به محیط‌زیست، به ویژه زباله‌های سمی، یک پدیده جهانی است. آلودگی خاک با فلزات سنگین به دلیل اثرات نامطلوب اکولوژیکی بالقوه آن به یک نگرانی زیست‌محیطی حیاتی تبدیل شده است. اثرات فاضلاب‌های صنعتی و شهری بر روی خاک‌های کشاورزی به‌طور گسترده مستند شده است [۵]. میکرو و ماکرو جلبک‌ها پتانسیل جذب بالایی را برای بسیاری از آلاینده‌ها نشان داده‌اند و برای اصلاح مکان‌های به شدت آلوده استفاده می‌شوند. از ریزجلبک‌ها برای حذف یون‌های فلزی از خاک‌های آلوده از طریق جذب زیستی و تجمع زیستی استفاده شده است. استفاده از گیاهان آبی، به ویژه میکرو جلبک، با پتانسیل انباشت فلز از محیط اطرافشان محبوبیت زیادی پیدا کرده است [۶].

با این حال، یک چالش عمده در تولید انبوه زیست‌توده ریزجلبک‌ها نبود روش مناسب برای برداشت کارآمد و جداسازی زیست‌توده از محیط کشت است. برای دستیابی در مقیاس بزرگ و کارآمد در طول کشت، یک فرآیند بهبود یافته برای به دست آوردن محصول نهایی با موفقیت ضروری است. ریزجلبک‌ها منابع زیست‌توده امیدوارکننده‌ای هستند، زیرا این موجودات فتوسنتزی دارای سرعت رشد بالایی هستند و به راحتی کشت می‌شوند و مقادیر زیادی لیپید را در مقایسه با سایر مواد اولیه تولید می‌کنند [۷]. از چندین مرحله اصلی تولید اجزای ریزجلبک، برداشت، به انرژی و زمان بیشتری نیاز دارد [۸]. این مرحله، ۲۰ تا ۳۰ درصد از هزینه کل فرآیند را تشکیل می‌دهد و اندازه کوچک سلول‌های ریزجلبکی (۲۰-۲ میکرومتر) و پایداری کلونیدی سوسپانسیون آن‌ها در محیط رشد فرآیند برداشت را گران‌تر و دشوارتر می‌کند [۹]. علیرغم روش‌های برداشت زیادی که توسط محققان در سرتاسر جهان اجرا می‌شود، نوع، ارزش و خواص یک محصول، میزان رسوب‌گذاری، زنده‌مانی سلول، بازیافت محیط کشت، تراکم و اندازه سلول، روش برداشت مناسبی را برای استفاده در مقیاس بزرگ تعیین می‌کند. یک روش برداشت ایده‌آل باید برای اکثر انواع ریزجلبک‌ها مناسب باشد و باید به بازیابی زیست

توده بالایی دست یابد و حداقل انرژی را با هزینه عملیاتی مصرف کند [۱۰]. روش‌های برداشت فعلی که به‌طور گسترده برای ریزجلبک‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند عبارت‌اند از انعقاد، لخته‌سازی، شناورسازی، فیلتراسیون غشایی، ساتریفیوژ و ته‌نشینی [۱۱]. هر روش مزایا و معایب خاص خود را از نظر برداشت و بازیابی زیرجلبک دارد. در میان تکنیک‌های مختلف بررسی‌شده، لخته‌سازی به‌عنوان امیدوارکننده‌ترین و کارآمدترین روش برای برداشت ریزجلبک‌ها، به‌ویژه در عملیات‌های مقیاس بزرگ، برجسته می‌شود. این روش به دلیل سادگی، مقرون به صرفه بودن و مصرف نسبتاً کم انرژی بسیار مورد توجه قرار گرفته است و آن را به گزینه‌ای مناسب برای کاربردهای صنعتی تبدیل می‌کند [۱۲].

انواع مختلفی از لخته‌سازها برای برداشت زیست‌توده میکروجلبکی استفاده شده‌اند که می‌توان آن‌ها را به‌طور کلی به سه گروه طبقه‌بندی کرد: نمک‌های فلزات معدنی (مانند نمک‌های آلومینیوم و آهن مانند $Al_2(SO_4)_3$ ، $Fe_2(SO_4)_3$ و $FeCl_3$ ، و غیره، پلیمرهای مصنوعی (شامل پلی‌الکترولیت و پلی‌اکریل آمید)، و پلیمرهای طبیعی (مانند کیتوسان و نشاسته) [۱۳]. این لخته‌سازها از طریق مکانیسم‌های خنثی‌سازی بار، پل زدن و جارو کردن کار می‌کنند و تشکیل سنگدانه‌ها یا ذرات بزرگ‌تر را تسهیل می‌کنند و در نتیجه به فرآیند برداشت کمک می‌کنند [۱۴]. با وجود در دسترس بودن فلوکولانت‌های مختلف و عملکرد آن‌ها و همچنین با توجه به هزینه‌های انرژی و عملیاتی آن‌ها، هنوز نیاز به توسعه یک منعقدکننده همه‌کاره و بسیار کارآمد برای برداشت ریزجلبک وجود دارد. هم‌چنین منعقدکننده بهبود یافته می‌تواند منجر به افزایش راندمان برداشت، کاهش هزینه‌ها و فرآیندهای تولید ریزجلبک پایدارتر شود و از توسعه و کاربرد صنایع مبتنی بر ریزجلبک حمایت بیشتری کند. تحقیقات و نوآوری مستمر در این زمینه برای یافتن بهترین لخته‌ساز که نیازهای خاص گونه‌های مختلف ریزجلبک‌ها و سیستم‌های تولید در مقیاس بزرگ را برآورده می‌کند، ضروری است.

نانوذرات مغناطیسی ابزاری سریع و مؤثر برای گرفتن سلول‌های جلبک زنده ارائه می‌کنند و جداسازی آسان، آن‌ها را با استفاده از تکنیک‌های مغناطیسی کم انرژی، تسهیل می‌کنند [۱۵]. این رویکرد فرآیندهای برداشت ریزجلبک‌ها را ساده می‌کند و پتانسیل برای کاربردهای مختلف دارد و به‌عنوان یکی از امیدوارکننده‌ترین روش‌ها در نظر گرفته می‌شود. مزایای این روش سریع، انرژی کارآمد، کم هزینه، سازگار با محیط‌زیست، مقیاس‌پذیر و آلودگی کمی را ایجاد می‌کند [۱۶]. جداسازی مغناطیسی یک تکنیک ساده

سئو و همکاران^۸ (۲۰۱۶) نانوذره Fe_3O_4 را با چهار نوع سورفکتانت‌های کاتیونی به ادغام هم در آورده‌اند. در این مطالعه، راندمان برداشت و اثرات تخریب سلولی سه سورفکتانت کاتیونی ستریمونیوم بروماید^۹، ستیل پیریدینیم کلرید^{۱۰} و ستیل پیریدینیم بروماید^{۱۱} مورد ارزیابی قرار گرفت. نانوذرات Fe_3O_4 کامپوزیت شده با ستریمونیوم بروماید، با بازدهی ۶/۹۶٪ برداشت ریزجلبک در دوز ۴۶/۰ گرم ذره در هر گرم سلول از موثرترین آن‌ها بود [۲۱]. گوپتا و همکاران^{۱۲} (۲۰۱۴) در عملکرد یک پلیمر کاتیونی مبتنی بر نمک آمونیوم چهارتایی را طراحی و توسعه داده و کارایی آن را برای برداشت ریزجلبک آب شیرین ارزیابی کردند. عملکرد لخته‌سازی پلیمر (پلی‌آمین) از نظر کارایی بازیابی زیست‌توده برای ریزجلبک سندسموس^{۱۳} استفاده کردند. نتایج نشان داد که به دلیل وزن مولکولی بالا، راندمان بازیابی زیست‌توده پلیمر در دوز بسیار کم (۸ میلی‌گرم در لیتر) بیش از ۹۰٪ بود، در حالی که راندمان بازیابی زیست‌توده‌های مشابه، کیتوسان و آلوم در دوزهای ۸۰ و ۲۵۰ میلی‌گرم در لیتر این مقدار بدست آمده است [۲۲].

با وجود بررسی اثر نانوماده بر ریزجلبک‌های مختلف در شرایط کشت سنتز شده در تحقیقات گذشته، هیچ گونه بررسی از لحاظ تاثیر زمان، مقدار نانو ذره و pH به همراه افزودن نانوماده کامپوزیتی $PACl/Fe_3O_4$ بر برداشت این نوع ریزجلبک بومی *Chlorella sorokiniana pa.91* در محیط کشت فاضلاب شهری خام نشده است. با توجه به اینکه در خصوص بهینه‌سازی شرایط کشت ریزجلبک‌ها، شرایط بهینه برای گونه‌های مختلف ریزجلبک‌ها می‌تواند متفاوت باشد، بنابراین در این پژوهش با بهره‌گیری از روش سطح پاسخ - طرح مرکب^{۱۴} غلظت $Fe_3O_4/PACl$ در محیط کشت، فاضلاب شهر ساری به بررسی اثر مستقل، برهمکنش و همزمان سه فاکتور زمان، مقدار نانو ذره و pH تولیدی ریزجلبک روی کمیت و با به کارگیری اندرکنش غلظت کلرلا سوروکینینا پرداخته شد و نانو ماده کامپوزیتی سعی در ارتقای بهره‌وری کلی فرآیند شد. بنابراین هدف پژوهش حاضر، بهینه‌سازی برداشت ریزجلبک کلرلا سوروکینینا با تغییر شرایط ذکر شده بود.

است که از ذرات مغناطیسی عامل دار برای جذب سلول‌ها و مولکول‌های زیستی از محلول‌های مایع استفاده می‌کند. این فرآیند توسط یک میدان مغناطیسی خارجی هدایت می‌شود [۱۷]. ذرات مغناطیسی می‌توانند از طریق نیروهای مختلف مانند فعل و انفعالات الکترواستاتیکی، پیوند هیدروژنی و نیروهای واندروالس به سلول‌های ریزجلبک بچسبند. این فعل و انفعالات تشکیل یک پیوند ذره - سلول مغناطیسی را امکان‌پذیر می‌کند و امکان برداشت موثر و انتخابی ریزجلبک‌ها را با استفاده از روش‌های جداسازی مغناطیسی فراهم می‌کند [۱۸].

در سال‌های گذشته نانوذرات کامپوزیتی به طور مکرر در برداشت استفاده شده و توسط محققان مورد مطالعه قرار گرفته است. یین و همکاران^۱ (۲۰۲۱) از ریزجلبک کلرلا ولگاریس با استفاده از Fe_3O_4 -chitosan برای برداشت و جداسازی سلول‌های ریزجلبک استفاده کرده‌اند. راندمان برداشت برای کلرلا ولگاریس در مدت ۳ دقیقه با استفاده از Fe_3O_4 -chitosan و نسبت وزنی ۳:۱ و غلظت ۵/۰ گرم در لیتر تحت pH ۳، ۹۷/۶۳٪ به دست آمد [۱۹].

گروولو و همکاران^۲ (۲۰۱۸) در خصوص استفاده از نانو کامپوزیت‌های مغناطیسی $polyethyleneimine-Fe_3O_4$ برای راندمان برداشت ریزجلبک‌های کلرلا زوفینگینسیس^۳، کلرلا ولگاریس^۴، کلرلا سوروکینینا^۵، کلرلا الیسویدیا^۶، بوتریوکوکوس بروئی^۷ بررسی‌های لازم را انجام دادند. در این مطالعه، نانوذرات مگنتیت (Fe_3O_4) توسط روش هم‌رسوبی از $FeCl_2$ و $FeCl_3$ در محیط قلیایی در دو دمای متفاوت سنتز شده‌اند؛ یکبار در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد و بار دیگر ۲۵ درجه سانتی‌گراد. نانو کامپوزیت Fe_3O_4-PEI دارای زتا پتانسیل مثبت می‌باشد که با افزایش pH محلول کاهش می‌یابد. در دوز ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر، بازدهی برداشت Fe_3O_4-PEI در pH = ۴ در ۱ دقیقه ۹۷-۶۸ دست آورده است، نتایج نشان می‌دهد که نانوذرات Fe_3O_4 سنتز شده در دمای پایین‌تر از ۲۵ درجه سانتی‌گراد می‌توانند برای برداشت مغناطیسی کارآمد، از سویه‌های مختلف جلبک استفاده شود. دمای پایین سنتز، ممکن است در نتیجه به کاهش هزینه برداشت ریزجلبک کمک کند [۲۰].

8 Seo et al
9 Cetrimonium bromide (CTAB)
10 Cetylpyridinium chloride (CPC)
11 Cetylpyridinium bromide (CPB)
12 Gupta et al
13 Scenedesmus Sp
14 CCD-RSM

1 Yin et al
2 Gerulová et al
3 Chlorella zofingiensis
4 Chlorella vulgaris
5 Chlorella sorokiniana
6 Chlorella ellipsoidea
7 Botryococcus braunii

جدول ۱. مشخصات فاضلاب تصفیه‌خانه ساری [۲۴]

Table 1. Specifications of Sari treatment plant wastewater

پارامتر	واحد	جریان ورودی فاضلاب	ته نشینی اولیه	پساب تصفیه شده ثانویه
COD	(mg L ⁻¹)	۴۱۰	۲۷۲	۱۶
TSS	(mg L ⁻¹)	۲۷۵	۱۰۲	۲
BOD5	(mg L ⁻¹)	۲۰۵	۱۳۶	۵۸
نیترات	(mg L ⁻¹)	۳۵	۳۵	۰/۸
فسفات	(mg L ⁻¹)	۳	۳	۱/۵
pH	-	۷/۸	۷/۸	۸/۱

۲- مواد و روش

در این مطالعه تجربی-آزمایشگاهی از چندین ماده از جمله نمک کلرید آهن شش ظرفیتی^۱، نمک کلرید آهن چهار ظرفیتی^۲ و آمونیوم هیدروکسید^۳ (۲۵ درصد وزنی) براساس سنتز نانو ذره استفاده شد. برای تنظیم سطوح pH، ۱/۰ مولار HCl و ۱/۰ مولار NaOH از Merck خریداری شده است. تجهیزات مورد استفاده در طول آزمایش شامل، یک ترازو (Radwag AS 120.R2) برای اندازه‌گیری وزن اجسام و مواد، از اتوکلاو جهت استریل نمودن، یک همزن با عملکرد مغناطیسی برای گرم کردن و مخلوط کردن نمونه، و pH متر برای اندازه‌گیری اسیدیته یا قلیایی بودن محلول استفاده شده است. علاوه بر این، یک پمپ‌هوادهی و اسپکتروفتومتر برای فرآیندها و اندازه‌گیری‌های آزمایش استفاده شد. ترکیب این مواد اولیه و تجهیزات، اجرای پژوهش را تسهیل کرد و امکان اندازه‌گیری دقیق و جمع‌آوری داده‌ها را در طول تحقیق فراهم کرد.

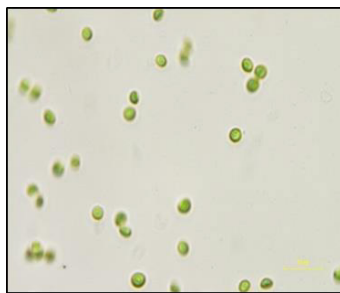
۲-۱- جداسازی جلبک و شرایط رشد

در این آزمایش، پساب حاصل از تصفیه‌خانه ساری به عنوان محیط کشت ریزجلبک مورد استفاده قرار گرفت، پساب شهری، محیطی است که به

- 1 FeCl₃.6H₂O
- 2 FeCl₂.4H₂O
- 3 NH₄OH

راحتی در دسترس و مقرون به صرفه می‌باشد. قبل از تلقیح فاضلاب، محیط کشت (فاضلاب شهری) به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۱۲۱ °C در اتوکلاو قرار گرفت تا شرایط رشد بهینه ایجاد شود. برای حفظ ریزجلبک‌ها به‌عنوان یک بانک برای استفاده در آینده، ارلن‌های حاوی کشت‌ها در یخچال در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. در طول فرآیند تلقیح، از هود آزمایشگاهی برای حفظ شرایط استریل و جلوگیری از آلودگی نمونه‌ها استفاده شد. این روش‌ها برای اطمینان از زنده بودن و یکپارچگی کشت‌های ریزجلبک در طول آزمایش اجرا شدند. نمونه ریزجلبک *Chlorella sorokinii-ana pa.91* در این مطالعه بر اساس یافته‌های تحقیقات قبلی از پساب تصفیه‌خانه لبنی گلا واقع در شهرک صنعتی آمل جداسازی شده است [۲۳]. ویژگی‌ها فاضلاب به عنوان محیط کشت ریزجلبک در جدول ۱ خلاصه شده است.

به طور کلی برای تهیه هر محلول زیستی نیاز به مایه تلقیح است. این مایه از همان میکروارگانیسمی تهیه می‌شود که قرار است تکثیر شود و حدود ۱۰-۵٪ حجم نهایی راکنور را شامل می‌شود. برای این کار محیط کشت درون ارلن مایه‌های ۱۰۰۰ میلی لیتری با حجم کاری ۸۰۰ میلی لیتر ریخته و روی ارلن با پنبه و کاغذ آلومینیوم کاملاً پوشانده شد. سپس در اتوکلاو در دما ۱۲۱ درجه سانتی‌گراد و مدت ۱۵ دقیقه استریل شده اند، برای حفظ شرایط استریل زیر هود آزمایشگاهی، ۱۰٪ حجمی از مایه تلقیح



ب



الف

شکل ۱. الف) نمونه ریز جلبک خالص سازی شده ب) تصویر میکروسکوپی ریز جلبک *Chlorella sorokiniana pa.91* [۲۳]

Fig. 1. a) Purified microalgae sample b) Microscopic image of *Chlorella sorokiniana pa.91* microalgae

اولیه موجود در یخچال آزمایشگاه به محیط کشت اضافه شد. سپس ارلن حاوی مایه تلقیح درون هود شیمیایی قرار داده شد و توسط پمپ هوا در شرایط دمایی ۲۸ درجه سانتی‌گراد و همچنین تحت شدت نور وارده بر سطح ارلن مایرها توسط لامپ LED به طور متوسط برابر Lux 3000 با دوره روشنایی- تاریکی (۱۲ ساعت-۱۲ ساعت) کشت داده شد و بعد از ۷ روز به فاز لگاریتمی رسید.

۲-۳- آزمایش و برداشت ریز جلبک

به منظور ارزیابی کارایی برداشت، از روش‌های آزمایشی استاندارد جارتست^۱ استفاده شد. برداشت ریز جلبک با افزودن مستقیم منعقدکننده مغناطیسی $Fe_3O_4/PACl$ به محلول ریز جلبک انجام شد. غلظت‌های مختلفی از نانوذرات به بشر ۵۰ میلی‌لیتری وارد شده و به مدت ۲ دقیقه با سرعت ۱۲۰ دور بر دقیقه به هم زده شدند تا از اختلاط مناسب با ریز جلبک‌ها اطمینان حاصل شود. پس از آن، یک آهنربا برای جدا کردن نانوذرات از محلول ریز جلبک استفاده شد. به عنوان شاهد، نمونه‌ای از محلول ریز جلبک بدون منعقدکننده نیز مورد آزمایش قرار گرفت. تنظیم pH جلبک در محدوده ۵/۱-۵/۱۱ با استفاده از HCl یا NaOH مورد بررسی قرار گرفت. برداشت ریز جلبک با توجه به مقدار نانو ذره برحسب گرم در ۵۰ میلی‌لیتر بشر محاسبه می‌شود.

۲-۴- فرمول محاسبه بازده برداشت زیست توده

برای تعیین راندمان برداشت *Chlorella sorokiniana pa.91* چگالی نوری سوسپانسیون میکرو جلیبک در طول موج ۶۸۰ نانومتر به دست

۲-۲- سنتز نانو ذره Fe_3O_4 و منعقد کننده $Fe_3O_4/PACl$

نانوذرات مگنتیت Fe_3O_4 به روش هم‌رسوبی شیمیایی سنتز شده‌اند. جهت سنتز ابتدا ۹۹/۰ گرم از نمک $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ و ۷/۲ گرم از نمک $FeCl_2 \cdot 4H_2O$ به ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر داخل راکتور اضافه و مخلوط حاصل در بالن سه دهانه مخلوط شده و روی استیبرر کاملاً هم زده می‌شود. سپس این محلول به مدت ۳۰ دقیقه با عبور گاز نیتروژن، اکسیژن زدایی گردید تا به دمای ۸۰ درجه برسد. هنگامی که محلول تا دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد گرم شد، ۱۰ میلی‌لیتر (۲۵ درصد وزنی) NH_4OH قطره قطره به آن اضافه شد تا رسوب سیاه رنگی بدست آید و واکنش به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد تحت هم‌زدن مداوم نگهداری شد. بعد از پایان واکنش، رسوب نانو ذرات Fe_3O_4 توسط یک آهنربا از محیط واکنش جدا گردیده و سه مرتبه با آب مقطر و اتانول شستشو داده شده و سپس در آن نمونه را خشک کرده‌ایم [۱]. سپس نانوذرات Fe_3O_4 با پلی آلومینیوم کلرید (PACl) در ۵۰ میلی‌لیتر آب مقطر مخلوط شده و به مدت ۵ دقیقه در

جدول ۲. محدوده متغیرات مستقل

Table 2. Range of independent variables

متغیر مستقل	حد پایین	حد بالا
زمان (دقیقه)	۱۵	۴۰
pH	۴	۹
غلظت نانو ذره (g/l)	۱/۵	۳/۵

آمد. در نهایت، راندمان برداشت فرآیند، از رابطه (۱) محاسبه شد.

$$HE\% = \frac{OD_0 - OD_1}{OD_0} \times 100 \quad (1)$$

CCD با توجه به پیش‌آزمایش‌ها و محدوده‌ی تغییرات هر متغیر مستقل مشخص شده‌اند.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- برداشت ریزجلبک با استفاده از منعقدکننده مغناطیسی $Fe_3O_4/PACI$

جدول (۳) نتایج آزمایش‌های طراحی شده و کارایی حذف ریزجلبک‌ها با استفاده از لخته‌سازی ذرات مغناطیسی را نشان می‌دهد. این اطلاعات در مورد متغیر پاسخ، شرایط آزمایشی، و مقادیر بازده حذف مربوطه را ارائه می‌دهد. این داده‌ها امکان ارزیابی و مقایسه تنظیمات مختلف تجربی و تأثیر آن‌ها بر کارایی حذف ریزجلبک‌ها با استفاده از لخته‌سازی ذرات مغناطیسی را فراهم می‌کند. این طرح شامل ۲۰ آزمایش بود و بالاترین راندمان حذف ریزجلبک با ۸۸٪ در شرایط خاص به دست آمد. این شرایط شامل زمان برداشت به مدت ۴۰ دقیقه، مقدار ۴ pH و غلظت نانوذره 3.5 (g/L) بود. این یافته اثربخشی پارامترهای انتخاب شده را در دستیابی به سطح بالایی از راندمان حذف ریزجلبک با استفاده از روش لخته‌سازی ذرات مغناطیسی نشان می‌دهد. از طریق مقایسه نقاط مرکزی آزمایش‌های برداشت ریزجلبک با استفاده ترکیب نانوذرات آهن و منعقدکننده کاتیونی، افزایش قابل توجهی در راندمان برداشت مشاهده می‌شود. تقریباً ۹۰٪ در صورت ترکیب با منعقدکننده کاتیونی بهبود یافته است. این نشان می‌دهد که افزودن منعقدکننده کاتیونی یک اثر هم افزایی دارد، فرآیند کلی برداشت ریزجلبک‌ها را بهبود می‌بخشد و در نتیجه کارایی بالاتری دارد.

که در آن، OD_0 جذب اولیه کشت ریزجلبک در طول موج 680 نانومتر است و OD_1 جذب در همان طول موج مایع رویی است که پس از اعمال میدان مغناطیسی از لخته‌های ذرات ریزجلبک جدا می‌شود. مقادیر OD_0 و OD_1 با اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شد.

۲-۵- طراحی آزمایش

روش‌شناسی سطح پاسخ یک رویکرد آماری و ریاضی است که برای تجزیه و تحلیل و بهینه‌سازی فرآیندها به کار می‌رود، زمانی که عوامل مختلف با یکدیگر تعامل دارند. در این پژوهش، طراحی آزمایش و مدل‌سازی با استفاده از نرم‌افزار Design Expert انجام شده است. با استفاده از روش‌شناسی سطح پاسخ^۱، پژوهشگران می‌توانند آزمایش‌ها را طراحی کنند، داده‌ها را جمع‌آوری کنند و مدل‌های ریاضی را برای درک ارتباط بین متغیرهای ورودی (عوامل مستقل) و پاسخ خروجی (کارایی برداشت) ارتقاء دهند. این روش به آن‌ها اجازه می‌دهد تا تأثیرگذارترین عوامل را شناسایی کنند و مقادیر بهینه‌ی آن‌ها را برای دستیابی به نتیجه‌ی مطلوب بهبود دهند. در این تحقیق، از طراحی مرکب مرکزی (CCD) همراه با RSM برای طراحی و مدل‌سازی متغیرهای تأثیرگذار استفاده شده است [۲۵]. زمان، غلظت نانوذرات کامپوزیتی و pH به عنوان سه پارامتر مستقل در طراحی

جدول ۳. نتایج راندمان برداشت ریز جلبک در فرآیند انعقاد مغناطیسی Fe₃O₄/PACl

Table 3. The results of microalgae harvesting efficiency in Fe₃O₄/PACl magnetic flocculation process

راندمان برداشت	غلظت Fe ₃ O ₄ /PACl g/L	pH	زمان (min)	شماره آزمایش واحد
۶۹/۳	۳/۵	۹	۴۰	۱
۳۲/۶	۱/۵	۹	۱۵	۲
۵۳/۷	۲/۵	۶/۵	۲۷/۵	۳
۵۸/۷	۲/۵	۶/۵	۲۷/۵	۴
۵۶/۵	۲/۵	۶/۵	۲۷/۵	۵
۵۶/۷	۲/۵	۶/۵	۲۷/۵	۶
۸۸/۱	۳/۵	۴	۴۰	۷
۶۰/۸	۳/۵	۴	۱۵	۸
۵۳/۳	۲/۵	۱۱/۵	۲۷/۵	۹
۳۵/۳	۱/۵	۴	۱۵	۱۰
۵۵/۷	۲/۵	۶/۵	۲۷/۵	۱۱
۶۹/۱	۴/۵	۶/۵	۲۷/۵	۱۲
۲۲/۳	۰/۵	۶/۵	۲۷/۵	۱۳
۵۰/۷	۲/۵	۶/۵	۲۷/۵	۱۴
۴۶/۱	۳/۵	۹	۱۵	۱۵
۸۰/۳	۲/۵	۶/۵	۵۲/۵	۱۶
۶۶/۶	۱/۵	۴	۴۰	۱۷
۲۵/۸	۲/۵	۶/۵	۲/۵	۱۸
۴۹/۸	۱/۵	۹	۴۰	۱۹
۷۵/۸	۲/۵	۱/۵	۲۷/۵	۲۰

۳-۳- مدل ریاضی و اعتبارسنجی آماری

= معادله کدگذاری شده

$$54.68 + 12.99X_1 - 6.12X_2 + 10.87X_3 - 2.24X_1X_2 - 0.25X_1X_3 - 1.75X_2X_3 - 0.157X_1^2 + 2.71X_2^2 - 2.034X_3^2 \quad (2)$$

= معادله واقعی

$$-3.174X_1 + 1.51X_2 - 4.36X_3 - 0.0719X_1X_2 - 0.020X_1X_3 - 0.7X_2X_3 - 0.001X_1^2 + 0.43X_2^2 - 2.034X_3^2 \quad (3)$$

بر اساس داده‌های ارائه شده در جدول (۱)، مدل چند جمله‌ای درجه دوم اصلاح شده بهترین تناسب برای رابطه بین پاسخ و متغیرهای یافت شده است. معادله کدگذاری شده که در رابطه (۱) ارائه شده است، امکان بهینه‌سازی پاسخ را با در نظر گرفتن سطوح متغیرها در شکل کدگذاری شده آن‌ها فراهم می‌کند. همچنین، معادله واقعی حاصل که در رابطه (۲) ارائه شده است، رابطه واقعی بین متغیرها و پاسخ را فراهم می‌کند و امکان بهینه‌سازی و تحلیل بیشتر را فراهم می‌کند. این معادلات نمایشی ریاضی از رابطه بین متغیرها و پاسخ ارائه می‌دهند و امکان تحلیل و بهینه‌سازی بیشتر فرآیند را فراهم می‌کنند.

در روابط داده شده، راندمان حذف ریز جلبک‌ها به صورت درصد پس از

نشان‌دهنده رابطه قوی بین متغیرهای مستقل و مقادیر پاسخ است. این مقدار R^2 بالا نشان می‌دهد که اکثریت تنوع در پاسخ را می‌توان با متغیرهای مستقل در مدل توضیح داد. نشان‌دهنده برازش خوب مدل با داده‌های تجربی است و اثربخشی مدل را در پیش‌بینی متغیر پاسخ نشان می‌دهد. مقدار $\text{Predicted } R^2$ ۰/۹۲۱۴ و $\text{Adjusted } R^2$ ۰/۹۶۶۵ می‌باشد که نشان می‌دهد اختلاف این دو کمتر از ۰/۲ است. مطابقت مدل دلالت بر این دارد که با نتایج تجربی مشاهده شده سازگار است و نمایش خوبی از داده‌ها ارائه می‌دهد. این نشان می‌دهد که مدل به طور دقیق روابط بین متغیرها و پاسخ را ضبط می‌کند و آن را به ابزاری قابل اعتماد برای پیش‌بینی و درک سیستم مورد مطالعه تبدیل می‌کند.

۳-۴- نتایج گرافیکی RSM در برداشت لخته‌ساز مغناطیسی

شکل (۲) ارائه شده مقایسه بین مقادیر پاسخ پیش‌بینی شده و مقادیر واقعی به دست آمده از آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. این نمودار به عنوان ابزاری برای ارزیابی تناسب کلی مدل ارائه شده عمل می‌کند. از شکل، مشهود است که مدل به طور دقیق کارایی حذف ریزجلبک را پیش‌بینی می‌کند، که همراستایی قوی با داده‌های آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.

اثر مجزا هر متغیر بر برداشت ریزجلبک در فرآیند انعقاد مغناطیسی $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PACl}$

در اشکال زیر هر نمودار انتقال، یک متغیر ارائه می‌شود در حالی که متغیرهای باقی مانده در نقطه مرکزی قرار می‌گیرند.

۳-۴-۱ اثر زمان در فرآیند انعقاد مغناطیسی $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PACl}$

در معادله کدگذاری فرآیند انعقاد مغناطیسی، ضریب تغییرات زمان برداشت ۱۲/۹۹+ است که نشان می‌دهد زمان برداشت بیشترین تأثیر خطی را بر راندمان برداشت ریزجلبک‌ها در این فرآیند دارد. این نشان می‌دهد که افزایش زمان برداشت، تأثیر قابل توجهی بر کارایی برداشت ریزجلبک با استفاده از انعقاد مغناطیسی خواهد داشت.

مطابق شکل (۳) در شرایط ثابتی که pH ۶/۵ و غلظت $2/5 \text{ g/L}$ راندمان برداشت ریزجلبک با افزایش زمان از ۵/۲ تا ۵/۵۲ دقیقه از ۲۲٪ به ۸۸٪ افزایش داشته است. بیشترین برداشت در زمان ۴۰ دقیقه برداشت تقریباً ۹۰٪ بدست آمده است.

هنگامی که این آزمایش به صورت مجزا (با استفاده از نانوذره مغناطیسی) به کار می‌رود، شباهت زیادی به فرآیند انعقاد مغناطیسی دارد و در هر دو

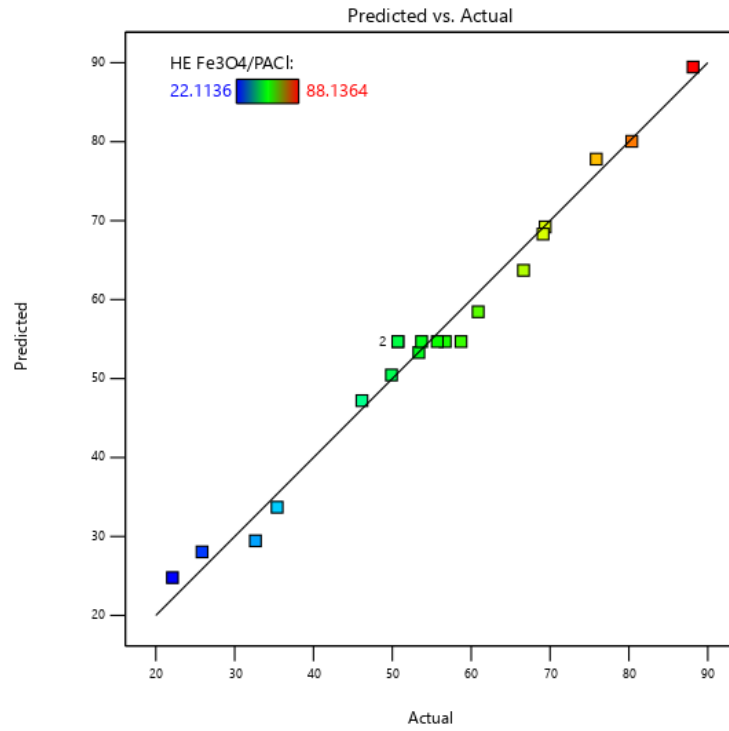
مدت زمان مشخصی بر حسب دقیقه بیان می‌شود. متغیرهای X_1 ، X_2 ، X_3 به ترتیب نشان‌دهنده زمان، pH و غلظت نانو ذرات کامپوزیتی هستند. این روابط بینش‌هایی را در مورد تأثیر زمان، pH و غلظت نانوذرات بر اثربخشی حذف ریزجلبک‌ها ارائه می‌دهد. معادله بر حسب فاکتورهای کدگذاری شده اجازه می‌دهد تا پیش‌بینی‌هایی در مورد پاسخ بر اساس سطوح خاص هر عامل انجام شود. مقادیر کد شده +۱ و -۱ به ترتیب نشان‌دهنده سطوح بالا و پایین عوامل هستند. این معادله کدگذاری شده به ویژه برای تعیین تأثیر نسبی عوامل با مقایسه ضرایب مرتبط با هر عامل مفید است. ضرایب نشان‌دهنده جهت و میزان تأثیر هر عامل بر پاسخ است.

نتایج تحلیل واریانس، نشان می‌دهد که مدل درجه دوم اصلاح شده به طور موثری، فضای طراحی را نشان می‌دهد و تناسب خوبی برای داده‌ها فراهم می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی به اندازه کافی روابط بین متغیرها و پاسخ را نشان می‌دهد. مدل F مقدار 89/61 نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی از نظر آماری معنادار است. این به این معنی است که احتمال بسیار کمی (۰/۰۱٪) وجود دارد که چنین مقدار F بزرگی می‌تواند به طور تصادفی رخ دهد، که نشان می‌دهد نتایج مدل معنی‌دار هستند و به دلیل تغییرات تصادفی نیستند. مقدار P-values کمتر از ۰/۰۵ نشان می‌دهد که شرایط مدل قابل توجه است. مقدار آماری F این مدل بیانگر این است که جملات موجود در مدل تأثیر قابل توجهی بر پاسخ دارند. این کمک می‌کند تا اهمیت و ارتباط جملات در پیش‌بینی نتیجه مورد نظر تأیید شود. مقدار P-value عدم تناسب (۰/۵۴۷۰) نشان می‌دهد که مدل با خطای خالص از نظر آماری معنی‌دار نیست (۰/۵۴۷۰ < ۰/۰۰۰۱). بر اساس دلایل ارائه شده، مدل ریاضی توسعه‌یافته برای تعیین شرایط بهینه حذف ریزجلبک‌ها از پساب شهری، زمانی که نانوذره مغناطیسی آهن و منعقدکننده کاتیونی پلی آلومینیوم کلرید وجود دارند، مناسب است. این مدل بینش‌ها و پیش‌بینی‌های ارزشمندی را در مورد مؤثرترین پارامترها و سطوح مربوط به آنها برای دستیابی به حذف موثر ریزجلبک‌ها ارائه می‌کند.

دقت کافی^۱ برای این طراحی ۲۸/۷۶۲ به دست آمده است این نشان می‌دهد که مدل مورد استفاده دارای سیگنال‌های کافی برای به تصویر کشیدن فضای طراحی است که اعتبار و دقت آن را نشان می‌دهد و چارچوبی قابل اعتماد برای درک و پیش‌بینی متغیر پاسخ در پارامترهای طراحی مشخص شده ارائه می‌کند.

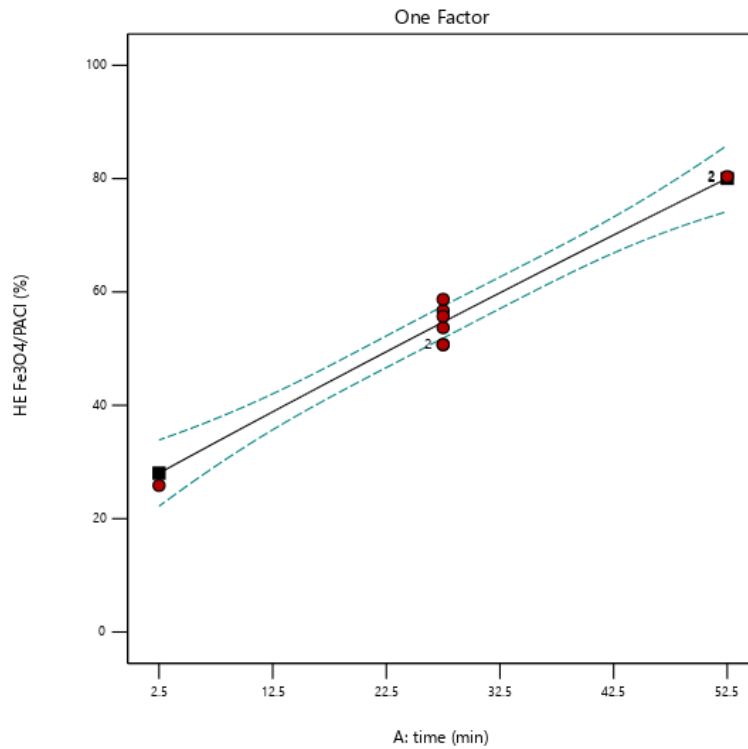
مقدار ضریب تعیین برای این طرح، (R^2) ۰/۹۸۲۳ به دست آمده،

1 Adeq Precision



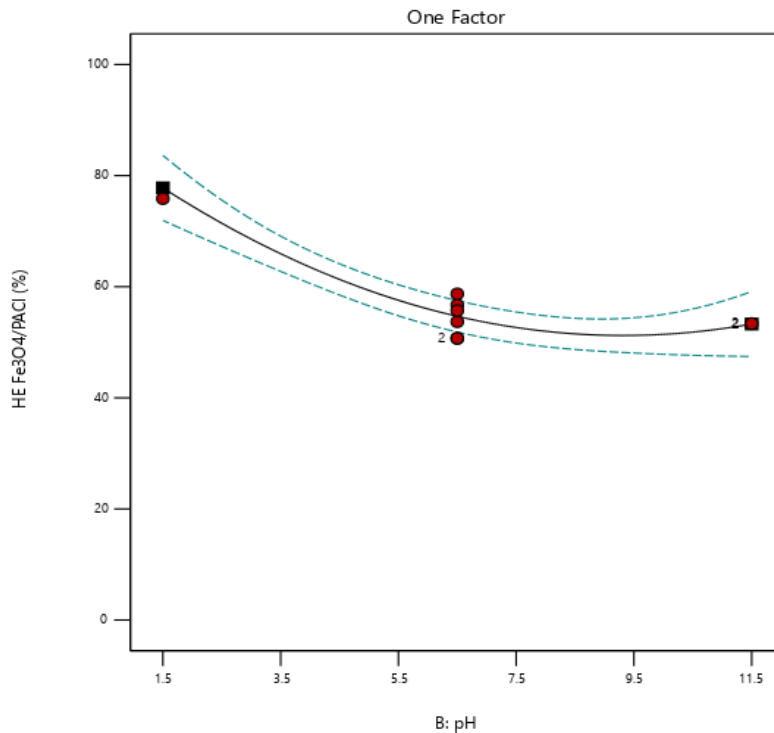
شکل ۲. ارزیابی نتایج واقعی و پیش‌بینی‌های مدل در فرآیند انعقاد مغناطیسی برای حذف ریز جلبک

Fig. 2. Evaluation of actual results and model predictions in magnetic flocculation process for microalgae removal



شکل ۳. اثر زمان در فرآیند انعقاد مغناطیسی

Fig. 3. Effect of time in magnetic flocculation process



شکل ۴. اثر pH در فرآیند انعقاد مغناطیسی Fe₃O₄/PACl

Fig. 4. Effect of pH in Fe₃O₄/PACl magnetic flocculation process

شوند و آن‌ها را جمع آوری کنند که منجر به افزایش راندمان برداشت می‌شود. علاوه بر این، محیط اسیدی ممکن است خواص فیزیکی و شیمیایی سطح سلول ریزجلبکی را نیز تغییر دهد و آن را پذیرای جذب و تجمع مغناطیسی توسط MNP ها کند. با این حال، توجه به این نکته مهم است که pH بهینه برای برداشت ممکن است بسته به گونه‌های ریزجلبکی خاص و نوع MNPs مورد استفاده متفاوت باشد [۲۶].

اثر افزایش pH اسیدی در فرآیند انعقاد مغناطیسی Fe₃O₄/PACl را می‌توان به عوامل متعددی نسبت داد.

- در مقادیر pH پایین‌تر، بار سطحی نانوذرات Fe₃O₄ و PACl مثبت‌تر می‌شود. این بار مثبت افزایش یافته، خنثی‌سازی سلول‌های ریزجلبک با بار منفی را افزایش می‌دهد، نیروهای جذاب‌تر را تقویت می‌کند و منجر به بهبود انعقاد و تجمع می‌شود.

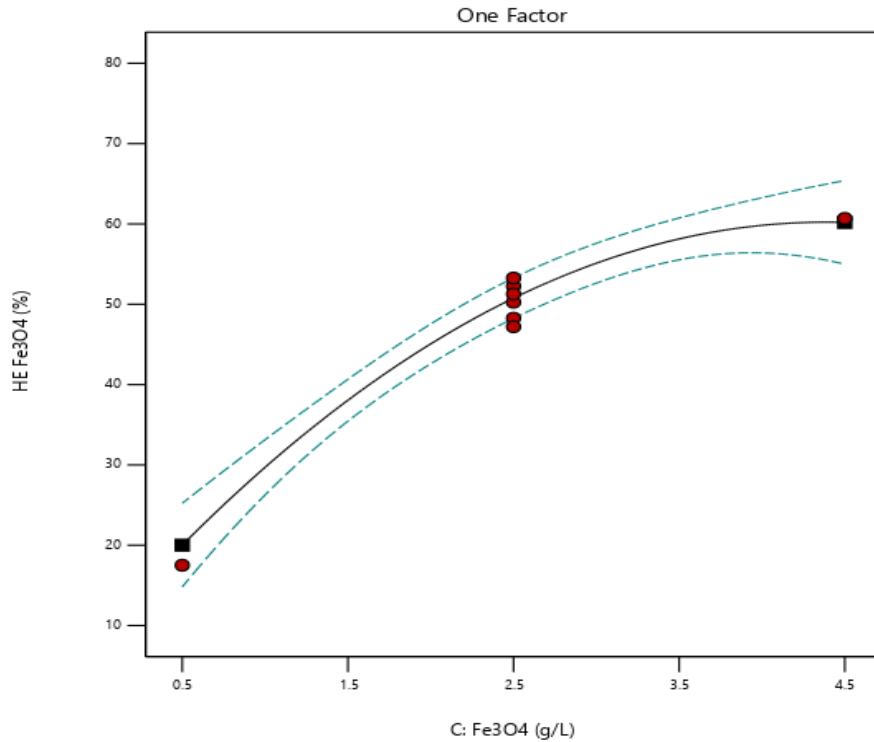
- کاهش pH به دلیل کاهش دافعه الکترواستاتیک بین نانوذرات و سلول‌های ریزجلبک، شرایط مساعدی را برای تشکیل دانه‌های بزرگ‌تر ایجاد می‌کند. این تجمع، ته نشین شدن و حذف ریزجلبک‌ها را از محیط

روش نشان می‌دهد که با گذشتن زمان راندمان حذف ریزجلبک از محیط کشت فاضلاب بیشتر خواهد شد و روند صعودی را نشان می‌دهد.

۳-۴-۲ اثر pH در فرآیند انعقاد مغناطیسی Fe₃O₄/PACl

نمودار ارائه شده در شکل (۴) اثر pH را بر راندمان برداشت ریزجلبک‌ها نشان می‌دهد، در حالی که زمان را در ۵/۲۷ دقیقه و مقدار نانومواد را در ۲/۵g/L ثابت نگه می‌دارد. نتایج نشان می‌دهد که کاهش pH تاثیر مثبتی بر راندمان برداشت ریزجلبک دارد. به طور خاص، در اسیدی‌ترین مقدار pH ۱/۵ راندمان برداشت به ۷۵٪ می‌رسد، در حالی که در قلیایی‌ترین مقدار pH ۱۱/۵ به ۵۳٪ کاهش می‌یابد.

برداشت بهتر ریزجلبک‌ها در pH اسیدی را می‌توان به این دلیل نسبت داد که در شرایط اسیدی، بار سطحی سلول‌های ریزجلبک مثبت‌تر می‌شود. این بار مثبت برهمکنش‌های الکترواستاتیکی قوی‌تر با نانوذرات مغناطیسی با بار منفی (MNPs) که برای برداشت استفاده می‌شوند را تسهیل می‌کند. در نتیجه، MNP ها می‌توانند به طور موثری به سلول‌های ریزجلبک متصل



شکل ۵. اثر غلظت نانو ذره $Fe_3O_4/PACI$ در فرآیند انعقاد مغناطیسی

Fig. 5. The effect of $Fe_3O_4/PACI$ nanoparticle concentration in magnetic flocculation process

شد. مقدار لخته‌سازهای مورد استفاده در فرآیند برداشت ریزجلبک‌ها بسیار مهم است زیرا به طور قابل توجهی بر هزینه و کارایی فرآیند برای تولید محصولات زیستی در مقیاس بزرگ تأثیر می‌گذارد. اگر دوز فلوکولانت بیش از حد باشد، می‌تواند منجر به هزینه‌های غیر ضروری شود و حتی ممکن است روند برداشت را مختل کند. از سوی دیگر، دوز ناکافی فلوکولانت ممکن است منجر به راندمان برداشت کمتر شود. بنابراین، یافتن دوز بهینه لخته‌سازها برای اطمینان از مقرون به صرفه بودن و راندمان بالای برداشت ریزجلبک در کاربردهای صنعتی ضروری است.

بررسی تأثیرات متقابل متغیرها بر برداشت ریزجلبک

۳-۴-۳ اثر متقابل زمان و pH در فرآیند انعقاد مغناطیسی $Fe_3O_4/PACI$

برای درک اینکه چگونه پارامترهای مختلف بر حذف ریزجلبک‌ها از فاضلاب شهری با استفاده از انعقاد مغناطیسی تأثیر می‌گذارند، باید تعاملات

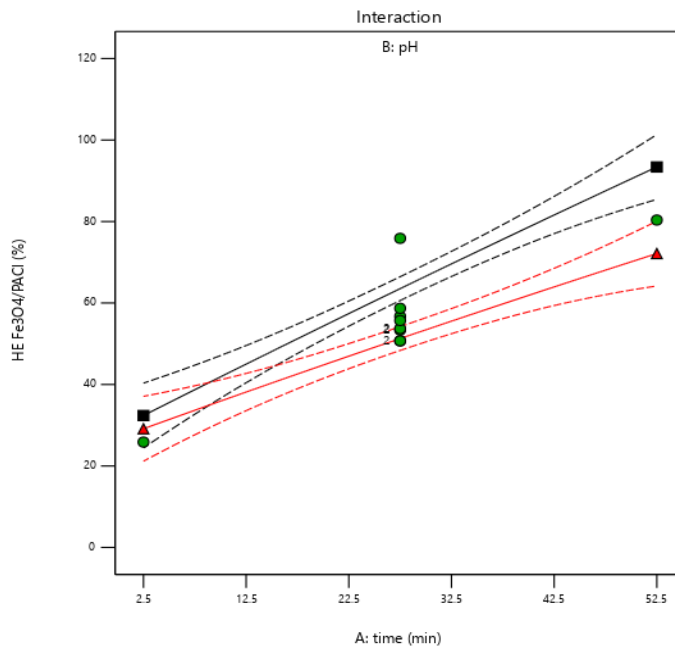
کشت تسهیل می‌کند.

- شرایط pH در محدوده اسیدی یک پتانسیل زتا بهینه ایجاد می‌کند که به تثبیت سیستم نانوذرات-ریزجلبک کمک می‌کند. این پایداری باعث انعقاد کارآمد و راندمان حذف بالاتر می‌شود.

- شرایط pH اسیدی ممکن است بر برهمکنش‌های بین گروه‌های عملکردی سطحی نانوذرات و زیست‌مولکول‌ها بر روی سطوح سلولی ریزجلبک تأثیر بگذارد و بر فرآیند انعقاد تأثیر بیشتری بگذارد.

۳-۴-۳ اثر غلظت نانو ذره در فرآیند انعقاد مغناطیسی $Fe_3O_4/PACI$

در شرایط ثابت pH ۶/۵ و زمان ۵/۲۷ دقیقه، منحنی تأثیر غلظت $Fe_3O_4/PACI$ بر حذف ریزجلبک‌ها با استفاده از فرآیند انعقاد مغناطیسی را نشان می‌دهد. با توجه به معادله کدگذاری شده به دست آمده از طرح RSM، غلظت $Fe_3O_4/PACI$ با ضریب خطی ۱۰/۸۷ + تأثیر قابل توجهی بر حذف ریزجلبک دارد. کمترین غلظت ۰/۵۵g/L باعث بازده ۲۲٪ شد، در حالی که بالاترین غلظت ۴/۵۵g/L منجر به بازده ۶۸٪ در فرآیند برداشت ریزجلبک



شکل ۶. اثر متقابل زمان و غلظت $Fe_3O_4/PACI$ در فرآیند انعقاد مغناطیسی

Fig. 6. Interaction effect of time and concentration of $Fe_3O_4/PACI$ in magnetic flocculation process

بین این عوامل را شناسایی کرد و اثرات تقویت کننده یا کاهش دهنده آن‌ها بررسی شوند. شکل (۶) در شرایطی که غلظت $Fe_3O_4/PACI$ ۲/۵g/L می‌باشد ترسیم شده است. با توجه به شکل در شرایط pH اسیدی، زمان به طور مثبت بر راندمان برداشت تأثیر می‌گذارد و اثر هم افزایی را نشان می‌دهد. می‌توان استنباط کرد که شرایط pH در طول فرآیند برداشت می‌تواند بر زمان مورد نیاز برای حذف موثر ریزجلیک‌ها تأثیر بگذارد.

۳-۴-۶- اثر متقابل pH و غلظت نانو ذره در فرآیند انعقاد مغناطیسی $Fe_3O_4/PACI$

شکل ۸ ارائه شده، نشان‌دهنده داده‌های به دست آمده در زمان ثابت ۲۷/۵ دقیقه است. زمانی که سطح pH اسیدی و غلظت نانوذرات بالا باشد، این دو عامل برهمکنش مثبتی دارند که منجر به هم‌افزایی در راندمان حذف ریزجلیک‌ها می‌شود. به عبارت دیگر، اثر ترکیبی pH اسیدی و غلظت بالای نانوذرات، کارایی کلی فرآیند را افزایش می‌دهد و منجر به حذف موثرتر ریزجلیک‌ها از محیط کشت می‌شود. افزایش غلظت از ۰/۵ تا ۴/۵ گرم در لیتر نشان داده است که بر راندمان حذف اثر مثبت دارد و از ۲۲٪ به ۶۹٪ رسیده است.

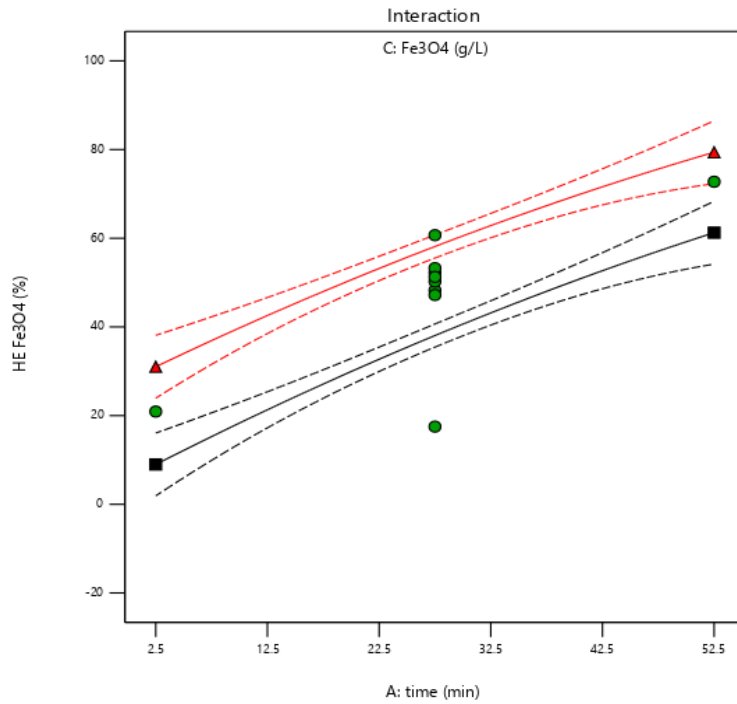
با توجه به نمودار افزایش pH از ۱/۵ به ۱۱/۵ بر راندمان اثر کاهشی راندمان حذف اثر افزایشی را نشان می‌دهد.

گذاشته است و هم‌چنین افزایش زمان از ۲/۵ تا ۵۲/۵ دقیقه بر روی راندمان حذف اثر افزایشی را نشان می‌دهد.

با توجه به نمودار افزایش pH از ۱/۵ به ۱۱/۵ بر راندمان اثر کاهشی راندمان حذف اثر افزایشی را نشان می‌دهد.

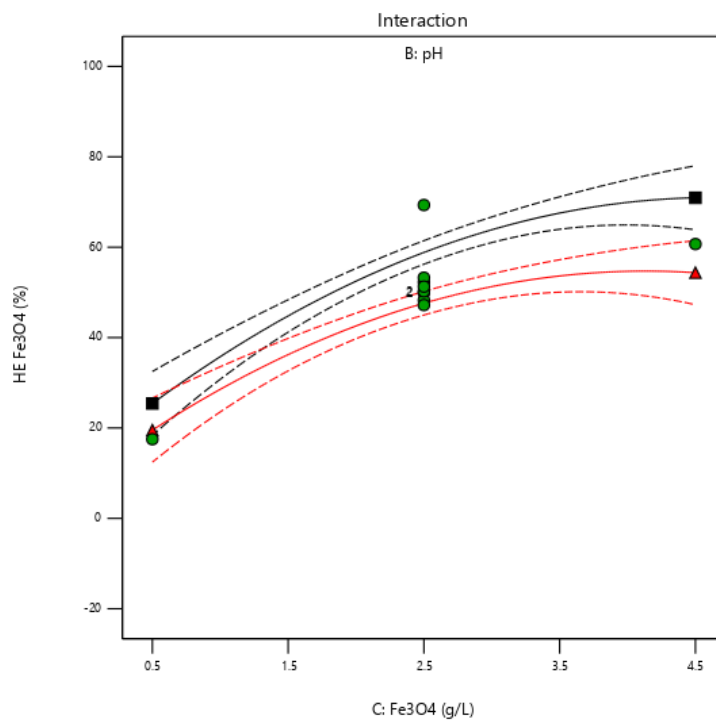
۳-۴-۵- اثر متقابل زمان و غلظت نانو ذره در فرآیند انعقاد مغناطیسی $Fe_3O_4/PACI$

اثر متقابل زمان و غلظت $Fe_3O_4/PACI$ در برداشت ریزجلیک به نحوه کار این دو عامل برای تأثیرگذاری بر کارایی فرآیند برداشت اشاره دارد. این بدان معناست که اثر ترکیبی زمان و غلظت نانوذرات بیش از مجموع اثرات فردی آن‌هاست. بازده حذف ریزجلیک‌ها ممکن است بسته به ترکیبات



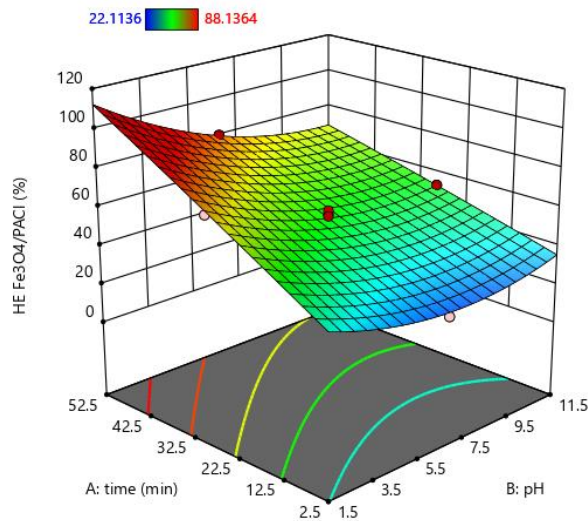
شکل ۷. اثر متقابل زمان و غلظت $Fe_3O_4/PACl$ در فرآیند انعقاد مغناطیسی

Fig. 7. Interaction effect of time and concentration of $Fe_3O_4/PACl$ in magnetic flocculation process



شکل ۸. اثر همزمان pH و غلظت $Fe_3O_4/PACl$ در فرآیند انعقاد مغناطیسی

Fig. 8. Interaction effect of pH and $Fe_3O_4/PACl$ concentration in magnetic flocculation process



شکل ۹. اثر همزمان pH و زمان بر راندمان برداشت ریز جلبک در فرآیند انعقاد مغناطیسی

Fig. 9. Simultaneous effect of pH and time on microalgae harvesting efficiency in magnetic flocculation process

و در سطوح pH اسیدی در مقایسه با سطوح pH قلیایی در بازه زمانی معین، راندمان حذف بالاتری دارد. بیشترین راندمان مربوط به غلظت ۵/۳ g/L در pH ۴ تقریباً ۹۰٪ می‌باشد.

افزایش مشاهده شده در راندمان برداشت در سطوح pH پایین با یافته‌های گوم و همکاران مطابقت دارد و نشان می‌دهد که در pH پایین‌تر، گونه با بار مثبت $Al(OH)_3$ توسط سلول‌های ریز جلبک که حامل بار منفی هستند جذب می‌شوند. این برهمکنش الکترواستاتیکی بین ذرات باردار مخالف به بهبود فرآیند برداشت کمک می‌کند. در سطوح pH ۱۰ و ۱۲، وجود $Al(OH)_4^-$ باعث کاهش توانایی آن برای جذب روی سلول‌های ریز جلبک می‌شود [۲۷].

۳-۴-۸- اثر همزمان زمان و غلظت $Fe_3O_4/PACI$

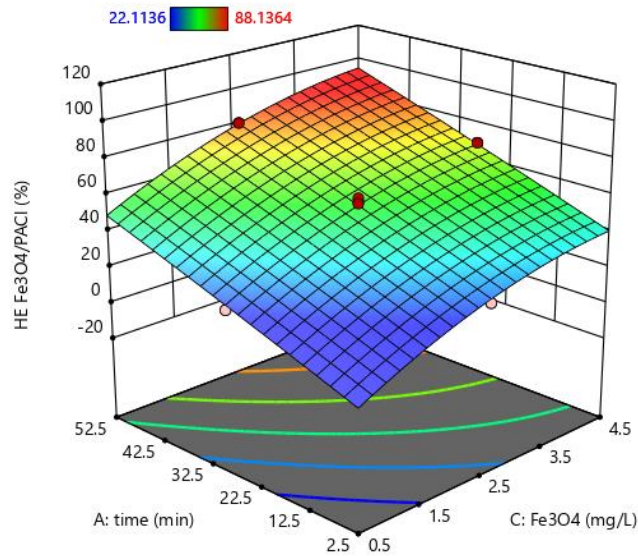
شکل (۱۰) اثر همزمان زمان و غلظت $Fe_3O_4/PACI$ بر برداشت ریز جلبک *Chlorella sorokiniana pa.91* از طریق انعقاد مغناطیسی در شرایط ثابت pH ۶/۵ مورد بحث قرار می‌دهد. روند تغییرات راندمان حذف مشابه موارد قبلی، با زمان پردازش طولانی‌تر و غلظت نانوذرات بالاتر افزایش می‌یابد. در تمام حالات، مدت زمان برداشت تأثیر مفیدی بر راندمان حذف دارد. با این وجود بیشترین راندمان حذف در زمان ۴۰ دقیقه و غلظت ۳/۵ g/L و کمترین راندمان در مدت زمان ۲۷/۵ دقیقه و غلظت

در مقادیر pH پایین‌تر، سلول‌های ریز جلبک ممکن است بار سطحی منفی‌تری داشته باشند، در حالی که مقادیر pH بالاتر می‌تواند منجر به بار سطحی مثبت‌تر روی نانوذرات شود. این تعامل جذب بین ذرات باردار مخالف را تسهیل می‌کند و به تجمع و انعقاد سلول‌های ریز جلبک کمک می‌کند. غلظت نانوذرات $Fe_3O_4/PACI$ بر تعداد ذرات موجود برای برهمکنش با سلول‌های ریز جلبک تأثیر می‌گذارد.

اثر ترکیبی متغیرها بر برداشت ریز جلبک

۳-۴-۷- اثر همزمان pH و زمان در فرآیند انعقاد مغناطیسی $Fe_3O_4/PACI$

نمودار پاسخ سطح سه بعدی، با غلظت ثابت نانوذرات $Fe_3O_4/PACI$ برابر ۵/۲ g/L برهمکنش pH و زمان انجام فرآیند برای راندمان برداشت ریز جلبک *Chlorella sorokiniana pa.91* نمایش می‌دهد. نمودار نشان می‌دهد که راندمان برداشت در زمان‌های فرآیند بالاتر و سطوح pH پایین‌تر افزایش می‌یابد. شکل (۹) رابطه بین سطوح pH و راندمان حذف یک فرآیند خاص را نشان می‌دهد. در pH ۴ و در بازه زمانی ۱۵ دقیقه، راندمان حذف ۶۰ درصد ثبت شده است. با این حال، در pH ۹، در مدت زمان مشابه ۱۵ دقیقه، راندمان حذف به ۳۲٪ کاهش می‌یابد. این نشان می‌دهد که



شکل ۱۰. اثر همزمان زمان و غلظت $Fe_3O_4/PACI$ بر راندمان برداشت ریزجلبک در فرآیند انعقاد مغناطیسی

Fig. 10. Simultaneous effect of time and concentration of $Fe_3O_4/PACI$ on microalgae harvesting efficiency in magnetic flocculation process

و غلظت 0.5 g/L ، 22% اتفاق می‌افتد. به طور خلاصه، اثر همزمان pH و غلظت نانوذرات در برداشت ریزجلبک می‌تواند قابل توجه باشد. کاهش pH می‌تواند راندمان برداشت را افزایش دهد و افزایش غلظت نانوذرات می‌تواند کارایی برداشت را بهبود بخشد.

۳-۵- شرایط بهینه متغیرها جهت برداشت ریزجلبک *Chlorella sorokiniana pa.91*

در فرآیند بهینه‌سازی عددی، اهداف خاصی برای هر متغیر تعیین می‌شود تا تاثیر آن بر کارایی برداشت ریزجلبک‌ها ارزیابی شود. هدف اصلی بهبود راندمان حذف در طول زمان و همزمان کاهش غلظت نانوذرات در فرآیند است. استفاده از روش سطح پاسخ (RSM)، شرایط بهینه برای برداشت ریزجلبک *Chlorella sorokiniana pa.91* با استفاده از $Fe_3O_4/PACI$ شامل pH اسیدی ۴، غلظت نانوذرات $5/3$ گرم در لیتر و زمان برداشت ۴۰ دقیقه تعیین شد که منجر به راندمان $\geq 89\%$ این شرایط به عنوان موثرترین روش برای دستیابی به سطح بالایی از راندمان حذف ریزجلبک توصیه می‌شود.

۳-۶- نتایج آزمایشگاهی برداشت ریزجلبک

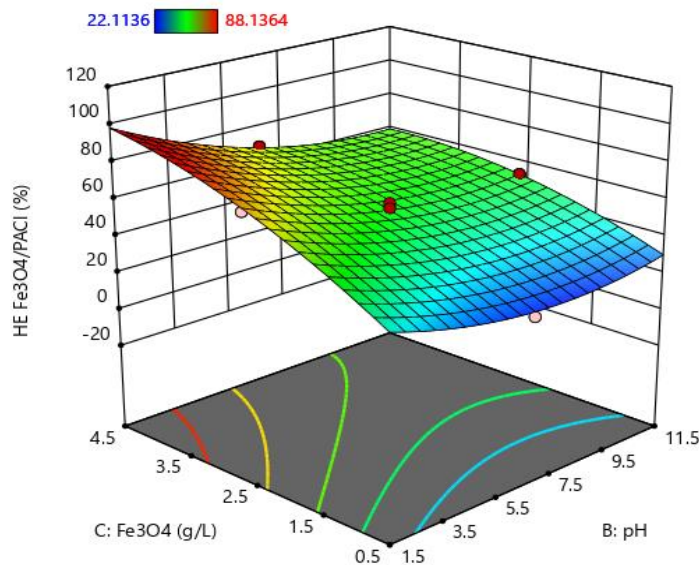
برای مطالعه فرآیند برداشت ریزجلبک *Chlorella sorokiniana*

0.5 g/L مشاهده شده است.

با این حال، در حضور از لخته‌ساز مغناطیسی $Fe_3O_4/PACI$ ، راندمان برداشت در شرایط مشابه به 90% افزایش یافت. این افزایش کارایی، همانطور که در شکل (۱۰) نشان داده شده است، تأثیر مفید استفاده از لخته‌ساز مغناطیسی $Fe_3O_4/PACI$ را نشان می‌دهد که منجر به راندمان بالاتر برداشت ریزجلبک در مقایسه با استفاده از نانوذرات Fe_3O_4 به تنهایی می‌شود. با افزایش مدت زمان و غلظت نانوذرات، این دو پارامتر یک برهمکنش هم‌افزایی از خود نشان دادند و متقابلاً تأثیر یکدیگر را تقویت کردند. اثر ترکیبی زمان طولانی و غلظت بالاتر نانوذرات منجر به افزایش کلی در کارایی و اثربخشی فرآیند مورد بررسی شد. تأثیر همزمان این عوامل به تأثیر مثبت معنادارتری بر نتیجه مطلوب کمک می‌کند که منجر به بهبود عملکرد و نتایج بهتر می‌شود.

۳-۴-۹- اثر همزمان pH و غلظت $Fe_3O_4/PACI$

شکل (۱۱) تاثیر تغییرات همزمان pH و غلظت $Fe_3O_4/PACI$ بر راندمان برداشت ریزجلبک در فرآیند انعقاد مغناطیسی در شرایط ثابت، زمان $27/5$ دقیقه نمایش داده شده است. از شکل نمایان است زمانیکه pH اسیدی‌تر، منجر به راندمان بهتر برداشت می‌شود. بیشترین راندمان حذف در pH ۴ و غلظت $3/5 \text{ g/L}$ برابر 88% و کمترین بازده برداشت در $6/5 \text{ pH}$



شکل ۱۱. اثر همزمان pH و غلظت $Fe_3O_4/PACI$ بر راندمان برداشت ریزجلبک در فرآیند انعقاد مغناطیسی

Fig. 11. Simultaneous effect of pH and $Fe_3O_4/PACI$ concentration on microalgae harvesting efficiency in magnetic process flocculation

کشت مایع را فراهم می‌کند. سرعت ته‌نشینی سریع به دلیل وجود PACI زمان کلی برداشت را کاهش می‌دهد. در روش‌های برداشت مرسوم بدون لخته‌ساز، ممکن است زمان بیشتری طول بکشد تا سلول‌های ریزجلبک به طور طبیعی ته‌نشین شوند که منجر به فرآیند برداشت زمان‌بر می‌شود. استفاده از PACI نه تنها زمان برداشت را بهبود می‌بخشد، بلکه کارایی کلی فرآیند برداشت ریزجلبک را نیز افزایش می‌دهد. جداسازی سلول‌های ریزجلبک در مدت زمان کوتاه‌تری را امکان‌پذیر می‌سازد و به بازده بالاتر و کاهش هزینه‌های عملیاتی مرتبط با برداشت کمک می‌کند. علاوه بر این، زمان برداشت سریع‌تر، قرار گرفتن ریزجلبک‌ها در شرایط نامطلوب را کاهش می‌دهد و باعث افزایش زنده‌مانی آن‌ها و حفظ کیفیت زیست توده برداشت شده می‌شود.

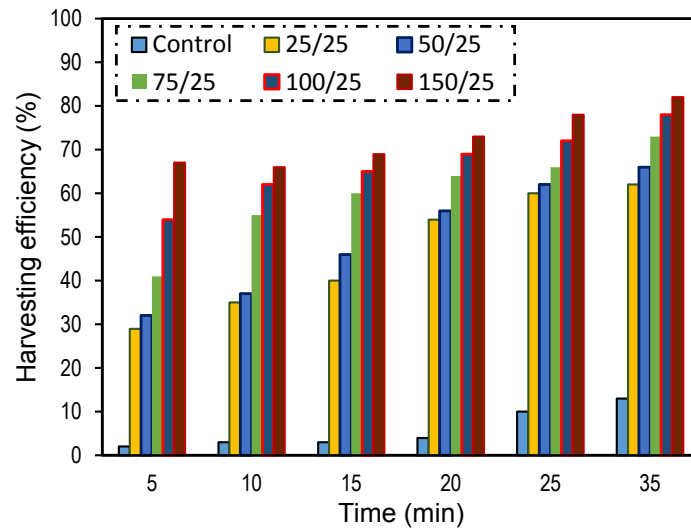
شکل (۱۳) تاثیر دوز لخته ساز مغناطیسی را بر راندمان برداشت ارائه می‌دهد. با افزایش دوز اثر برداشت ریزجلبک صعودی خواهد شد. در غلظت $25/25$ از $Fe_3O_4/PACI$ راندمان 63% و در غلظت $25/150$ راندمان به 82% رسید.

هنگامی که دوز بیشتری از منعقدکننده کاتیونی به کشت ریزجلبک اضافه می‌شود، بارهای منفی بیشتری را در سطح سلول‌های ریزجلبک خنثی

با استفاده از نانوذرات Fe_3O_4 و لخته‌ساز مغناطیسی $Fe_3O_4/PACI$ چندین پارامتر مستقل قبل از انجام آزمایش روش پاسخ سطحی بررسی شد. این آزمایش بر روی سه عامل کلیدی تمرکز داشت: زمان، pH و غلظت نانوذرات.

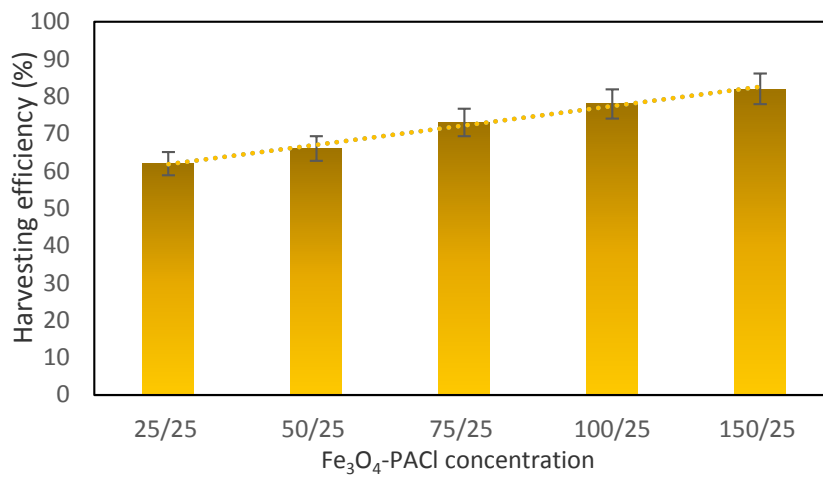
برداشت ریزجلبک با استفاده از ترکیبی از نانوذرات Fe_3O_4 و یک منعقدکننده کاتیونی به نام PACI انجام شد. منعقدکننده PACI مقدار از پیش تعیین شده و ثابت همراه با نانوذرات Fe_3O_4 برای تسهیل برداشت ریزجلبک‌ها اضافه شد. مقدار PACI برابر با 25 میلی‌گرم ثابت در نظر گرفته شد. همانطور که در نمودار مشاهده می‌شود با افزایش مقدار منعقدکننده برداشت صعودی است. با افزایش زمان تا 35 دقیقه و غلظت برداشت ($25/150$) $PACI/Fe_3O_4$ میلی‌گرم در لیتر به 82% رسیده است.

استفاده از کلرید پلی آلومینیوم، یک منعقدکننده کاتیونی، در برداشت ریزجلبک‌ها می‌تواند زمان برداشت را به میزان قابل توجهی کاهش دهد. PACI به عنوان یک لخته‌کننده عمل می‌کند، به این معنی که به تجمع سلول‌های ریزجلبک کمک می‌کند و باعث می‌شود آن‌ها به هم نزدیک شوند و توده‌های بزرگتری تشکیل دهند. این فرآیند تجمع در برداشت ریزجلبک‌ها بسیار مهم است زیرا امکان جداسازی آسان‌تر و سریع‌تر سلول‌ها از محیط



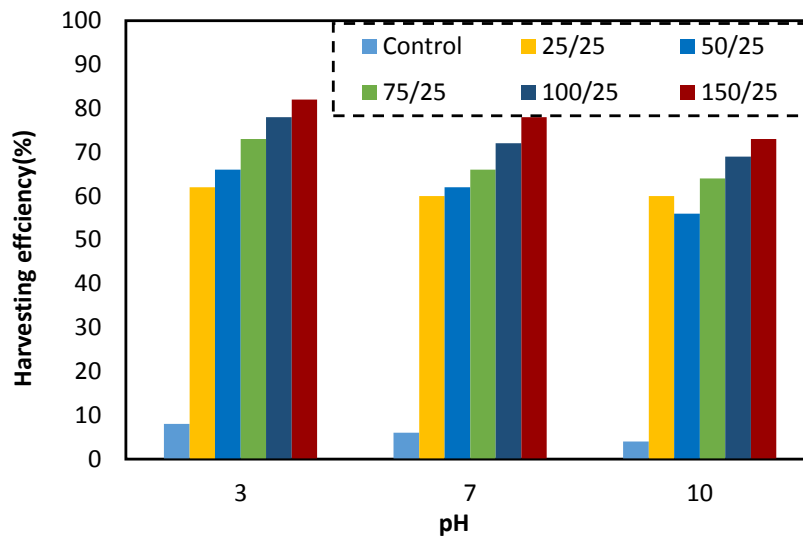
شکل ۱۲. بررسی اثر غلظت نانو ذره $Fe_3O_4/PACl$ و زمان در برداشت ریز جلبک *Chlorella sorokiniana* pa.91

Fig. 12. Investigating the effect of $Fe_3O_4/PACl$ nanoparticles and time on harvesting microalgae *Chlorella sorokiniana* pa.91



شکل ۱۳. اثر غلظت لخته ساز مغناطیسی در برداشت راندمان

Fig. 13. The effect of magnetic flocculant concentration on harvesting efficiency



شکل ۱۴. اثر pH مغناطیسی بر راندمان برداشت

Fig. 14. Effect of Magnetic pH on harvesting efficiency

گرفته می‌شود. این نیاز به مقادیر بیش از حد مواد شیمیایی و روش‌های انرژی‌بر را کاهش می‌دهد و به تولید زیست‌توده ریزجلبک‌های پایدارتر و کارآمدتر کمک می‌کند. در نتیجه، پلیمرهای کاتیونی به عنوان ابزاری موثر در کشت و برداشت ریزجلبک‌ها در مقیاس بزرگ برای کاربردهای مختلف در صنایعی مانند مواد غذایی، دارویی، سوخت‌های زیستی و تصفیه فاضلاب مورد توجه قرار گرفته‌اند.

منعقدکننده کاتیونی، کلرید پلی آلومینیوم، بارهای مثبت را روی سطح خود حمل می‌کنند. هنگامی که به محیط کشت ریزجلبک اضافه می‌شود، این ذرات منعقدکننده با بار مثبت می‌توانند با سلول‌های ریزجلبک با بار منفی تعامل داشته باشند. این فعل و انفعال منجر به تشکیل توده‌ها یا لخته‌های بزرگ‌تر می‌شود، زیرا بارهای مخالف سلول‌های ریزجلبک را جذب و به هم متصل می‌کنند. در این نوع ریزجلبک pH اسیدی، نقش مهمی در ارتقای کارایی برداشت ریزجلبک ایفا می‌کند. در یک محیط اسیدی، یون‌های H^+ فراوانی وجود دارد، با گذشت زمان، سلول‌های ریزجلبک در محدوده pH اسیدی فرصت بیشتری برای تماس و جذب این یون‌های H^+ دارند. این فرآیند بارهای سطحی سلول‌های ریزجلبک را خنثی می‌کند و دافعه الکترواستاتیکی آن‌ها را از یکدیگر کاهش می‌دهد. با کاهش دافعه الکترواستاتیکی، سلول‌های ریزجلبک به احتمال زیاد تجمع می‌یابند. در

می‌کند. این افزایش خنثی سازی باعث ایجاد نیروهای جاذبه قوی تر بین سلول‌ها می‌شود که منجر به لخته‌ها یا دانه‌های بزرگتر و متراکم تر می‌شود. در نتیجه، سرعت ته‌نشینی سلول‌های ریزجلبک سریع تر می‌شود و آن‌ها با سرعت بیشتری در کف محیط کشت می‌نشینند. با این حال، یک دوز بهینه برای منعقدکننده کاتیونی وجود دارد که فراتر از آن افزودن منعقدکننده بیشتر ممکن است باعث بهبود بیشتر در راندمان برداشت نشود. در برخی موارد، دوز بیش از حد منعقدکننده حتی ممکن است تأثیر منفی داشته باشد، باعث تجمع بیش از حد و مانع از فرآیند جداسازی شود. این می‌تواند منجر به مشکلاتی در به دست آوردن مایع رویی شفاف شود و باقیمانده‌های منعقدکننده بیش از حد ممکن است بر کیفیت زیست توده ریزجلبک‌های برداشت شده تأثیر منفی بگذارد.

پلیمرهای کاتیونی دارای گروه‌هایی با بار مثبت هستند که می‌توانند با سطوح دارای بار منفی سلول‌های ریزجلبک تعامل داشته باشند. هنگامی که این پلیمرهای کاتیونی وارد محیط کشت می‌شوند، پل‌هایی را بین سلول‌های ریزجلبک ایجاد می‌کنند. این فرآیند تجمع به ته‌نشین شدن سلول‌های ریزجلبک کمک می‌کند و جداسازی آن‌ها از محیط کشت را در طول فرآیند برداشت آسان تر می‌کند. استفاده از یک پلیمر کاتیونی در برداشت ریزجلبک یک رویکرد مقرون به صرفه و سازگار با محیط‌زیست در نظر

جدول ۴. عملکرد ذرات مغناطیسی مختلف در بازیابی ریز جلبک ها

Table 4. Performance of different magnetic particles in the recovery of microalgae

منبع	راندمان برداشت (%)	مقدار ماده	ریز جلبک	نانو ذره مغناطیسی
[۹]	۹۰ <	۱۰ g/L	<i>C. vulgaris</i>	Bare Fe ₃ O ₄
	۹۰ <	۲/۵ g/L	<i>C. vulgaris</i>	Y ₃ Fe ₅ O ₁₂
[۲۰]	۹۵	۲۰۰ mg/L	<i>C. zofngiensis</i>	Fe ₃ O ₄ -PEI
	۹۷	۲۰۰ mg/L	<i>C. vulgaris</i>	Fe ₃ O ₄ -PEI
	۹۰	۲۰۰ mg/L	<i>C. sorokiniana</i>	Fe ₃ O ₄ -PEI
	۹۷	۲۰۰ mg/L	<i>C. ellipsoidea</i>	Fe ₃ O ₄ -PEI
	۶۸	۲۰۰ mg/L	<i>B. braunii</i>	Fe ₃ O ₄ -PEI
[۳۰]	۹۰	۵ g/L	<i>C. vulgaris</i>	Fe ₃ O ₄ @Q-PP
[۳۱]	۹۳	۲۰ g/L	<i>C. vulgaris</i>	Fe ₃ O ₄ -PP
[۳۲]	۹۰	۶۰۰ mg/L	<i>C. pyrenoidosa</i>	Fe ₃ O ₄
	۸۵	۵۰۰ mg/L	<i>C. minutissima</i>	Fe ₃ O ₄
[۳۳]	۹۵	۲۰۰ mg/L	<i>Chlorella sp</i>	Fe ₃ O ₄ @Arginine

نتیجه، راندمان برداشت افزایش می‌یابد زیرا لخته‌های بزرگ‌تر در مقایسه با سلول‌های ریز جلبک منفرد، راحت‌تر از محیط کشت جدا می‌شوند. ترکیب بارهای سطحی مثبت منعقدکننده کاتیونی با کاهش دافعه الکترواستاتیکی به دلیل pH اسیدی، یک اثر هم‌افزایی ایجاد می‌کند. این فعل و انفعالات افزودنی تجمع سلول‌های ریز جلبک را افزایش می‌دهد و منجر به برداشت کارآمدتر و موثرتر می‌شود. به طور کلی، ترکیب منعقدکننده کاتیونی و pH اسیدی شرایط مطلوبی را برای تشکیل لخته‌های بزرگتر فراهم می‌کند، فرآیند جداسازی را ساده می‌کند و کارایی کلی برداشت ریز جلبک‌ها را بهبود می‌بخشد

رسوب‌گرانشی در لخته‌سازی معمولی جدا می‌شوند. استفاده از منعقدکننده مغناطیسی برای برداشت ریز جلبک‌ها به دهه ۱۹۷۰ برمی‌گردد، زمانی که مردم برای حذف جلبک‌های مضر از آب شیرین یا آب دریا از حل کاتیون اوتروفی دریاچه استفاده کردند. همانطور که تولید بیودیزل توسط ریز جلبک‌ها توجه زیادی را به خود جلب کرده است، تمرکز مغناطیسی به طور فزاینده‌ای برای جداسازی و بازیابی ریز جلبک‌های حاوی چربی برای تولید بیودیزل اعمال شد [۲۸]. ذرات مغناطیسی ایده آل دارای خواص مناسب از جمله برداشت کارآمد، قابلیت استفاده مجدد، پایداری و کم هزینه هستند. در این راستا، نانوذرات مغناطیسی (Fe₃O₄ (MNPs)) به دلیل سطح ویژه و فوق پارامغناطیس به طور گسترده‌ای برای برداشت ریز جلبک‌ها استفاده شدند [۲۹]. MNP ها معمولاً به صورت تک یا ترکیبی استفاده می‌شوند. جدول مقایسه‌ای (جدول ۴) عملکرد نانو ذره مغناطیسی مختلف را در فرآیند برداشت ریز جلبک در مرور ادبیات مطالعه شده ارائه می‌دهد. لازم به ذکر است که تنوع این نتایج به عوامل متعددی مانند انواع لخته‌سازها، گونه‌های ریز جلبک‌ها و شرایط آزمایشی

۳-۷- مقایسه کارایی برداشت ریز جلبک با انواع نانو ذره مغناطیسی

ذرات مغناطیسی با اندازه نانومتر و میکرومتر مجهز به اجزای سطحی بار مثبت، با برهمکنش الکترواستاتیکی بین ریز جلبک‌های بار منفی در کشت، تجمع ایجاد می‌کنند. برای جداسازی مغناطیسی، مواد توسط نیروی آهنربای خارجی به دلیل حرکت پارامغناطیس ذاتی به جای

بستگی دارد.

۳-۸- آنالیز اقتصادی

باشد. هزینه‌های کمتر این مطالعات عمدتاً به دلیل آماده‌سازی ساده و هزینه کم مواد مغناطیسی است. با این حال، نانو ذره مغناطیسی Fe_3O_4 مورد استفاده در این مطالعه قابل بازیافت می‌باشد که بر کاهش هزینه برداشت تاثیر زیادی دارد. در مقایسه با دیگر روش‌های برداشت که در تحقیقات دیگر گزارش شده است به طور مثال روش سانتریفیوژ، گران قیمت می‌باشد و نیاز به انرژی بالا دارد و احتمال آسیب سلولی در اثر نیروهای برشی بالا می‌باشد و روش فیلتراسیون احتمال رسوب و گرفتگی، هزینه‌های عملیاتی را افزایش می‌دهد و غشاها باید به طور منظم تمیز شوند. تحلیل هزینه کلی شامل در نظر گرفتن سرمایه گذاری سرمایه، هزینه‌های عملیاتی، تعمیر و نگهداری، نیروی کار و مقیاس‌پذیری است. به طور خلاصه، تحقیقات در مورد برداشت در مقیاس بزرگ ریزجلبک‌ها توسط MNP ها و ارزیابی خطرات زیست محیطی بالقوه کمیاب است و این موارد هنوز نیاز به مطالعه دارند.

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه تاثیر سه متغیر مستقل غلظت نانومواد، زمان برداشت و pH بر روی ریزجلبک *Chlorella sorokiniana.pa91* با استفاده از نانوذرات مختلف بر پایه $Fe_3O_4/PACI$ به عنوان جاذب مورد بررسی قرار گرفت. یافته‌های مطالعه ما نشان داد که روش لخته‌ساز مغناطیسی برای برداشت و جداسازی ریزجلبک‌ها از محیط کشت بسیار مؤثر است و آن را به یک رویکرد ارزشمند برای کاربردهای صنعتی تبدیل می‌کند. نانوذرات $Fe_3O_4/PACI$ به دلیل خواص مغناطیسی خود توانایی قابل توجهی در دستیابی به بازده بالا نشان دادند. این آزمایش اثرات فردی هر متغیر، تعاملات آن‌ها و اثرات ترکیبی آن‌ها را بررسی کرد. نتایج هر دو مدل یافته‌های آزمایشگاهی همسو بود. نتایج نشان داد با افزایش زمان و غلظت نانو ذرات و کاهش pH راندمان جداسازی به طور قابل توجهی افزایش یافته است. هدف اصلی تعیین شرایط بهینه غلظت نانومواد، زمان برداشت و pH با استفاده از نرم افزار Design Expert بود. بر این اساس برای دستیابی به بازده ۹۰٪ نتایج نشان داد که در محیط اسیدی pH ۴، زمان ۴۰ دقیقه و غلظت ۰/۷۵ / ۰/۳ / ۳/۵ گرم در لیتر می‌باشد و کمترین راندمان ۲۲ درصد در pH ۵/۶ با غلظت نانوذرات ۰/۷۵ / ۰/۵ / ۰/۳ گرم در لیتر مشاهده شده است.

منابع

[1] L. Xu, C. Guo, F. Wang, S. Zheng, C.-Z. Liu, A simple and rapid harvesting method for microalgae by in situ magnetic separation, *Bioresource technology*, 102(21)

تحقیق در مورد استفاده از MNPs برای برداشت ریزجلبک هنوز در مرحله آزمایشگاهی است. MNP ها پتانسیل بسیار خوبی از خود نشان می‌دهند زیرا می‌توانند به طور موثر سلول‌های ریزجلبکی را در زمان نسبتاً کوتاهی بازیابی کنند. هزینه یکی‌دیگر از چالش‌های بزرگ برداشت ریزجلبک، در مقایسه تجاری می‌باشد. در میان چندین روش برداشت، لخته‌سازی مغناطیسی دارای مزایای عملکرد متوسط، صرفه جویی در انرژی و جداسازی سریع را ارائه می‌دهد. برای اعمال لخته‌سازی مغناطیسی برای برداشت ریزجلبک‌ها در اجرا، هزینه عملیاتی ممکن است باعث نگرانی‌هایی شود. دو جنبه اصلی وجود دارد که باید برای تجزیه و تحلیل هزینه برداشت مغناطیسی ریزجلبک‌ها در نظر گرفته شود، مصرف مواد پوشش Fe_3O_4 و مصرف انرژی برای لخته‌سازی می‌باشد. مطالعه حاضر ثابت کرد که نانو ذرات مغناطیسی نیز عملکرد خوبی در برداشت جلبک دارند و فعال‌سازی مجدد آن‌ها برای کاهش بیشتر هزینه‌های قابل اجرا آسان‌تر است. بنابراین، نانو ذرات اصلاح شده سطح عملکرد خوبی در برداشت مغناطیسی داشتند، اما مقرون به صرفه بودن آن‌ها در کاربردهای صنعتی به تجزیه و تحلیل بیشتر برای ارزیابی امکان‌سنجی آن‌ها در عمل نیاز دارد. به منظور مقایسه بیشتر روش‌های مختلف لخته‌سازی از نظر تاثیر بر هزینه برداشت، ارزیابی اقتصادی اولیه برای برآورد هزینه کل لخته‌سازی مورد نیاز برای برداشت ریزجلبک *Chlorella sorokiniana pa.91* انجام شده است. هزینه کلی مواد آزمایشی برای سنتز نانو ماده کامپوزیتی شامل: نمک‌های کلرید آهن چهار ظرفیتی و کلرید آهن شش ظرفیتی به ازای هر ۱۰ کیلوگرم به ترتیب برابر با ۱۹۰ هزار تومن و ۱۳۰ هزار تومن از طرفی پلیمر PACI به مقدار ۵ گرم برابر با ۳۲۰ هزار تومن و هزینه ۱۰۰ سی‌سی آمونیاک (۲۵ درصد وزنی) ۱۲۰ هزار تومن بوده است تقریباً کل هزینه برای برداشت ۱ گرم زیست توده در مقیاس آزمایشگاهی برابر با ۷۰۰ هزار تومن تخمین زده شد. با بررسی هزینه کل مقایسه روش‌های مختلف برای برداشت ریزجلبک با لخته‌سازی مغناطیسی ($Fe_3O_4/PACI$) و همچنین مقایسه با مواد دیگر که پیش از انجام آزمایش بسیار کمتر می‌باشد به طور مثال برای هزینه تهیه مواد مانند کیتوسان به مقدار ۱۰ گرم، ۱۳۰۰۰۰۰ هزار تومن و پلیمر PEI، ۵ سی‌سی برابر با ۱۲۰۰۰۰۰ هزار تومن گزارش شده است که PACI به عنوان یک ماده پوششی نسبتاً کم هزینه با Fe_3O_4 توصیه می‌شود که برای لخته‌سازی مغناطیسی از نظر اقتصادی مقرون به صرفه

- scale microalgae harvesting unit based on coagulation, flocculation and sedimentation, *Separation and Purification Technology*, 259 (2021) 118171.
- [11] M.G. Savvidou, M.M. Dardavila, I. Georgiopolou, V. Louli, H. Stamatis, D. Kekos, E. Voutsas, Optimization of microalga *Chlorella vulgaris* magnetic harvesting, *Nanomaterials*, 11(6) (2021) 1614.
- [12] S. Li, T. Hu, Y. Xu, J. Wang, R. Chu, Z. Yin, F. Mo, L. Zhu, A review on flocculation as an efficient method to harvest energy microalgae: mechanisms, performances, influencing factors and perspectives, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 131 (2020) 110005.
- [13] A. Pugazhendhi, S. Shobana, P. Bakonyi, N. Nemestóthy, A. Xia, G. Kumar, A review on chemical mechanism of microalgae flocculation via polymers, *Biotechnology Reports*, 21 (2019) e00302.
- [14] C.N. Ogbonna, E.G. Nwoba, Bio-based flocculants for sustainable harvesting of microalgae for biofuel production. A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 139 (2021) 110690.
- [15] F. Wang, C. Guo, H.Z. Liu, C.Z. Liu, Immobilization of *Pycnoporus sanguineus* laccase by metal affinity adsorption on magnetic chelator particles, *Journal of Chemical Technology & Biotechnology: International Research in Process, Environmental & Clean Technology*, 83(1) (2008) 97-104.
- [16] J.Y. Seo, K. Lee, R. Praveenkumar, B. Kim, S.Y. Lee, Y.-K. Oh, S.B. Park, Tri-functionality of Fe₃O₄-embedded carbon microparticles in microalgae harvesting, *Chemical Engineering Journal*, 280 (2015) 206-214.
- [17] Y. Fu, F. Hu, H. Li, L. Cui, G. Qian, D. Zhang, Y. Xu, Application and mechanisms of microalgae harvesting by magnetic nanoparticles (MNPs), *Separation and Purification Technology*, 265 (2021) 118519.
- [18] S.-M. Taghizadeh, A. Berenjian, K.W. Chew, P.L. Show, H.F. Mohd Zaid, H. Ramezani, Y. Ghasemi, M.J. Raee, A. Ebrahiminezhad, Impact of magnetic immobilization on the cell physiology of green unicellular algae *Chlorella vulgaris*, *Bioengineered*, 11(1) (2020) 141-153.
- (2011) 10047-10051.
- [2] Z.T. Khanzada, S. Övez, Microalgae as a sustainable biological system for improving leachate quality, *Energy*, 140 (2017) 757-765.
- [3] C. Tang, X. Gao, D. Hu, D. Dai, M. Qv, D. Liu, L. Zhu, Nutrient removal and lipid production by the co-cultivation of *Chlorella vulgaris* and *Scenedesmus dimorphus* in landfill leachate diluted with recycled harvesting water, *Bioresource Technology*, 369 (2023) 128496.
- [4] X. Quan, R. Hu, H. Chang, X. Tang, X. Huang, C. Cheng, N. Zhong, L. Yang, Enhancing microalgae growth and landfill leachate treatment through ozonization, *Journal of Cleaner Production*, 248 (2020) 119182.
- [5] J. Adewumi, F.O. Ajibade, The pollution effects of indiscriminate disposal of wastewater on soil in semi-urban area, *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 19(3) (2015) 412-419.
- [6] B. Shahi Khalaf Ansar, E. Kavusi, Z. Dehghanian, J. Pandey, B. Asgari Lajayer, G.W. Price, T. Astatkie, Removal of organic and inorganic contaminants from the air, soil, and water by algae, *Environmental Science and Pollution Research*, (2022) 1-29.
- [7] A.K. Patel, P. Kumar, C.-W. Chen, V.S. Tambat, T.-B. Nguyen, C.-Y. Hou, J.-S. Chang, C.-D. Dong, R.R. Singhanian, Nano magnetite assisted flocculation for efficient harvesting of lutein and lipid producing microalgae biomass, *Bioresource technology*, 363 (2022) 128009.
- [8] S.M. Shaikh, M.K. Hassan, M.S. Nasser, S. Sayadi, A.I. Ayesh, V. Vasagar, A comprehensive review on harvesting of microalgae using Polyacrylamide-Based Flocculants: Potentials and challenges, *Separation and Purification Technology*, 277 (2021) 119508.
- [9] L.-D. Zhu, E. Hiltunen, Z. Li, Using magnetic materials to harvest microalgal biomass: evaluation of harvesting and detachment efficiency, *Environmental technology*, 40(8) (2019) 1006-1012.
- [10] A. Ortiz, M.J. García-Galán, J. García, R. Diez-Montero, Optimization and operation of a demonstrative full

- [26] L. Pérez, J.L. Salgueiro, R. Maceiras, Á. Cancela, Á. Sánchez, An effective method for harvesting of marine microalgae: pH induced flocculation, *Biomass and Bioenergy*, 97 (2017) 20-26.
- [27] J.A. Gomes, P. Daida, M. Kesmez, M. Weir, H. Moreno, J.R. Parga, G. Irwin, H. McWhinney, T. Grady, E. Peterson, Arsenic removal by electrocoagulation using combined Al-Fe electrode system and characterization of products, *Journal of hazardous materials*, 139(2) (2007) 220-231.
- [28] S.-F. Han, W. Jin, R. Tu, S.-H. Gao, X. Zhou, Microalgae harvesting by magnetic flocculation for biodiesel production: current status and potential, *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 36 (2020) 1-10.
- [29] T. Mathimani, N. Mallick, A comprehensive review on harvesting of microalgae for biodiesel—key challenges and future directions, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91 (2018) 1103-1120.
- [30] Y. Zhao, X. Wang, X. Jiang, Q. Fan, X. Li, L. Jiao, W. Liang, Harvesting of *Chlorella vulgaris* using Fe₃O₄ coated with modified plant polyphenol, *Environmental Science and Pollution Research*, 25 (2018) 26246-26258.
- [31] X. Wang, Y. Zhao, X. Jiang, L. Liu, X. Li, H. Li, W. Liang, In-situ self-assembly of plant polyphenol-coated Fe₃O₄ particles for oleaginous microalgae harvesting, *Journal of environmental management*, 214 (2018) 335-345.
- [32] S. Bharte, K. Desai, Harvesting *Chlorella* species using magnetic iron oxide nanoparticles, *Phycological Research*, 67(2) (2019) 128-133.
- [33] P. Liu, T. Wang, Z. Yang, Y. Hong, X. Xie, Y. Hou, Effects of Fe₃O₄ nanoparticle fabrication and surface modification on *Chlorella* sp. harvesting efficiency, *Science of the Total Environment*, 704 (2020) 135286.
- [19] Z. Yin, L. Zhang, D. Hu, S. Li, R. Chu, C. Liu, Y. Lv, J. Bao, M. Xiang, L. Zhu, Biocompatible magnetic flocculant for efficient harvesting of microalgal cells: Isotherms, mechanisms and water recycling, *Separation and Purification Technology*, 279 (2021) 119679.
- [20] K. Gerulová, A. Bartošová, L. Blinová, K. Bárťová, M. Dománková, Z. Garaiová, M. Palcut, Magnetic Fe₃O₄-polyethyleneimine nanocomposites for efficient harvesting of *Chlorella zofingiensis*, *Chlorella vulgaris*, *Chlorella sorokiniana*, *Chlorella ellipsoidea* and *Botryococcus braunii*, *Algal research*, 33 (2018) 165-172.
- [21] J.Y. Seo, R. Praveenkumar, B. Kim, J.-C. Seo, J.-Y. Park, J.-G. Na, S.G. Jeon, S.B. Park, K. Lee, Y.-K. Oh, Downstream integration of microalgae harvesting and cell disruption by means of cationic surfactant-decorated Fe₃O₄ nanoparticles, *Green Chemistry*, 18(14) (2016) 3981-3989.
- [22] J.K. Pittman, A.P. Dean, O. Osundeko, The potential of sustainable algal biofuel production using wastewater resources, *Bioresource technology*, 102(1) (2011) 17-25.
- [23] P. Asadi, H.A. Rad, F. Qaderi, Comparison of *Chlorella vulgaris* and *Chlorella sorokiniana* pa. 91 in post treatment of dairy wastewater treatment plant effluents, *Environmental Science and Pollution Research*, 26 (2019) 29473-29489.
- [24] A. Rad, The effect of Magnesium Aminoclay (MgAC) nanomaterials on *Chlorella sorokiniana* pa. 91 native microalgae growth in Sari culture medium, *Modares Civil Engineering journal*, 22(4) (2022) 121-156.
- [25] A. Tamadoni, F. Qaderi, Optimization of soil remediation by ozonation for PAHs contaminated soils, *Ozone: Science & Engineering*, 41(5) (2019) 454-472.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. akbari, F. Qaderi, H. Amini Rad, Use of response surface method for modeling and optimization of harvesting of *Chlorella sorokiniana* pa.91 with Fe₃O₄/PACl from municipal wastewater, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 56(2) (2024) 181-202.

DOI: 10.22060/ceej.2023.22600.8002

