

## Optimization of Microalgae Harvesting and Separation Process by Electrical Coagulation in Biodiesel Production Cycle Using Response Surface Methodology

H. Mohammad-Ghasemnejad Maleki<sup>1\*</sup>, M. Almassi<sup>2</sup> and N. Nasirian<sup>3</sup>

1. Department of Mechanization and Biosystem Engineering, Shoushtar Branch, Islamic Azad University, Shoushtar, Iran
2. Department of Mechanization and Biosystem Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
3. Department of Mechanization and Biosystem Engineering, Shoushtar Branch, Islamic Azad University, Shoushtar, Iran

Received: 4 July 2020

Accepted: 12 November 2020

### Abstract

**Introduction:** Algae have demonstrated to be an efficient bio energy source because in contrast to sugarcane, soybean, canola and oil palm, they are not edible, less expensive to produce, grow faster, allow higher yield and production rate per hectare, do not require clean water to grow, and have the potential of reducing carbon emission. Harvesting microalgae biomass is a major challenge due to its small size (typically a few micrometer) and low concentration in the culture medium (0.5–2 gL<sup>-1</sup>). The main goal of this study was to demonstrate the proof of principle for harvesting microalgae using electro-coagulation-flocculation and to investigate the influence of several important variables on the efficiency of the electro-coagulation-flocculation in harvesting and separating *Dunaliella salina* microalgae from the culture medium. This is a native species and halophyte microalgae with a different culture medium from the fresh water in terms of salinity and electrical conductivity.

**Materials and Methods:** In order to investigate such effects, five control variables (independent) were included: material of the electrodes on both levels of aluminum and iron, current intensity in the range of 300 to 1000 mA, time for electro-coagulation-flocculation (5 to 20 minutes), the electrode gap (1 to 3 cm), and the stirring speed between 0 to 400 rpm on the recovery efficiency as the response variable (dependent). Experiments were designed based on multi factors response surface method (combining categorical with numeric factors). The experiments were conducted inside a batch reactor with an effective volume of 250 mm which is made of Pyrex glass. Two electrodes with dimensions of 5 × 5 cm and a surface area of 25 cm<sup>2</sup> with distance of 2 cm from bottom of the reactor vertically and in different stages were placed inside the reactor with distances of 1, 2 and 3 cm. The Voltage and the required current in the reactor were provided with a digital DC power supply. The main pilot in shape of cubic rectangular which is made of plexiglass with dimensions 35 × 28 × 18 cm and the effective volume of 14 liters was designed and built in order to test the results of optimal experiments. To design an experiment, statistical analysis and optimization was used from the software Design-Expert.



**Results and Discussion:** In this study, the modified quadratic model was used to fit the microalgae recovery efficiency data obtained from each batch test. The coefficients of determination ( $R^2$ ) adjusted and predicted were respectively more than 0.98, 0.96 and 0.90, which indicated that the modified quadratic model could describe the microalgae recovery efficiency in the batch tests of this study successfully. The results specified that the linear effect of control variable on the recovery efficiency was very significant statistically. Moreover, with increasing the electric current intensity variable and ECF time or reducing the distance between the electrodes the recovery efficiency has increased significantly. Furthermore, by increasing stirrer speed from 0 to 200 rpm the amount of recovery efficiency increased and by increasing stirrer speed from 200 to 400 rpm the amount of recovery efficiency decreased. The results showed that aluminum electrodes on the recovery of microalgae from the culture medium are more efficient than iron electrodes. In this study, the optimal operating conditions for maximization of the microalgae recovery efficiency were explored. The maximum microalgae recovery efficiency of 98.06% was obtained at the current intensity of 999 mA, the time of 20 min, the electrode gap of 1.39 cm, the stirring speed of 222 rpm and with aluminum as electrode material.

**Conclusion:** In this study, the effect of five control variables (independent) including current intensity, electrode gap, ECF time, stirring speed and electrode material on the response variable (dependent), namely the recovery efficiency of *Dunaliella salina* microalgae from the culture medium, was examined. The modified quadratic model was used to fit the microalgae recovery efficiency data obtained from each batch test. The experimental results in different stages of our study indicated that the harvesting efficiency of the ECF process could be improved with optimized settings in different stages. In order to achieve the maximum efficiency regarding economic factors as well as energy and environment, the second part of an article by the same research group on the same topic is recommended. However, as the ECF process is complicated on a large scale, a pilot study is required to further adjust the harvesting efficiency and make alterations in current density and electrode plate distance in the ECF harvester so as to develop such technology and make commercial use of it in the future.

**Key words:** *Electro-coagulation, microalgae, harvesting, recovery efficiency*

## بهینه سازی فرآیند برداشت و جدا سازی ریز جلبک به روش انعقاد الکتریکی در چرخه تولید بیودیزل با استفاده از روش سطح پاسخ

حیدر محمدقاسم نژادملکی<sup>۱\*</sup>، مرتضی الماسی<sup>۲</sup> و نیما نصیریان<sup>۳</sup>

۱- استادیار گروه مکانیزاسیون و مهندسی بیوسیستم، واحد شوشتر، دانشگاه آزاد اسلامی، شوشتر، ایران

۲- استادیار گروه مکانیزاسیون و مهندسی بیوسیستم، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۳- استادیار گروه مکانیزاسیون و مهندسی بیوسیستم، واحد شوشتر، دانشگاه آزاد اسلامی، شوشتر، ایران

### تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۱۴

پذیرش نهایی: ۱۳۹۹/۰۸/۲۲

### چکیده

یکی از گلوگاه های موجود در فرآیند تولید انبوه زیست توده ریز جلبک در چرخه تولید بیودیزل، نبود روش مناسب برای برداشت و جداسازی زیست توده از محیط کشت است. یکی از مکانیزم های جایگزین برای برداشت ریز جلبک از محیط کشت، استفاده از روش انعقاد الکتریکی است. در این تحقیق به منظور بررسی کارایی و یافتن پارامترهای بهینه فرآیند انعقاد الکتریکی در برداشت و جدا سازی ریز جلبک دونالیلا سالینا، اثرات پنج متغیر کنترلی (مستقل) شامل: جنس الکتروود، شدت جریان، مدت زمان انعقاد، فاصله الکتروود، سرعت هم زنی، بر روی بازده جداسازی به عنوان متغیر واکنشی (وابسته)، آزمایش هایی بر اساس روش سطح پاسخ چند عاملی با عامل های ترکیبی کمی و کیفی طراحی و انجام شد. نتایج نشان داد که اثر خطی متغیر های کنترلی مورد مطالعه روی بازده جدا سازی بسیار معنی دار است. بطوریکه با افزایش متغیر های شدت جریان الکتریکی و مدت زمان انعقاد و یا کاهش فاصله الکتروودها بازده جداسازی به طور معنی دار ( $p < 0.01$ ) افزایش یافته است. همچنین با افزایش دور هم زن میزان بازده جدا سازی با یک شیب تند افزایش و سپس با یک شیب ملایم کاهش یافته است. نتایج نشان داد که الکتروودهای آلومینیوم در جداسازی ریز جلبک از محیط کشت نسبت به الکتروودهای آهنی کارا تر است. حداکثر بازده جدا سازی با ۹۸ درصد با الکتروود آلومینیوم و با اعمال شدت جریان ۹۹۹ میلی آمپر، فاصله الکتروود ها ۳۹/۱ سانتی متر، طول مدت انعقاد ۲۰ دقیقه، سرعت هم زن ۲۲۲ دور در دقیقه، حاصل گردید.

**کلمات کلیدی:**  
برداشت زیست توده،  
انعقاد الکتریکی،  
بازده جداسازی،  
ریز جلبک

\* عهده دار مکاتبات

Email:  
heydar.ghasemnejad@gmail.com

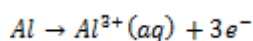
## مقدمه

ریزجلبک‌ها، کارخانه‌های سلولی وابسته به نور است که ضمن انجام عمل فتوسنتز، دی اکسید کربن را به سوخت‌های زیستی و سایر ترکیبات ارزشمند تبدیل می‌نماید (۱۶). امروزه ریزجلبک به عنوان یکی از مناسب‌ترین ماده اولیه برای تولید سوخت‌های گیاهی شناخته شده است لذا تحقیقات زیادی در راستای صنعتی نمودن تولید این محصول در دست اجرا می باشد. یکی از گلوگاه‌های موجود در فرآیند تولید انبوه زیست توده ریزجلبک، نبود روش مناسب برای برداشت و جداسازی زیست توده از محیط کشت است. اندازه کوچک (۳ تا ۳۰ میکرومتر)، تعداد و غلظت کم سلول‌ها در محیط کشت (کمتر از ۵۰۰ میلی گرم در لیتر در برخی واحدهای صنعتی) عمده ترین دلیل پایین بودن بازده برداشت و هزینه بالای آن می باشد (۸). در حال حاضر مکانیزم‌های معمول که در برداشت و جمع آوری ریزجلبک‌ها در سراسر جهان استفاده می شوند از قبیل سانتریفوژ، رسوب گذاری و فلوکولاسیون<sup>۱</sup> نشان می دهد که این مکانیزم‌ها علی‌رغم کار بودن، هزینه بالایی بین ۳۵ تا ۵۰ درصد کل هزینه تولید سوخت‌های زیستی را به همراه دارد (۸، ۲۰). از دیگر روش‌های برداشت می توان انعقاد بیولوژیکی و انعقاد شیمیایی را نام برد که هر دوی این‌ها، علاوه بر هزینه بالای برداشت به علت افزودن ماده لخته ساز، آلودگی محیط زیست و میزان سمیت محصول را افزایش می دهند (۲۰). بنابر این با توجه به اهمیت موضوع، برای افزایش راندمان و کاهش هزینه می‌توان انواع مکانیزم‌های جایگزین در فرآیند برداشت ریزجلبک از محیط کشت را بررسی و شرایط بهینه آنها را تعیین نمود.

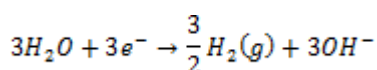
یکی از مکانیزم‌های جایگزین برای برداشت ریزجلبک از محیط کشت، استفاده از روش انعقاد الکتریکی است. این روش به دلیل انطباق و سازگاری با محیط زیست، در سال‌های اخیر مورد استقبال خیلی از

صنایع مانند تصفیه آب و فاضلاب و مدیریت پسابها و حذف آلاینده‌ها شده است. فرآیند انعقاد الکتریکی شامل ناپایدار سازی ذرات معلق، کلونیدی و محلول در یک محیط آبی با استفاده از جریان الکتریکی است که طی آن ذرات با کاهش بار سطحی بر نیروی واندروالسی<sup>۲</sup> بین خود غلبه کرده و تولید لخته می‌نماید (۵). در این روش اغلب از آلومینیوم و آهن به عنوان الکترو استفاده می‌شود (۲، ۶). با عبور جریان مستقیم از الکترو آند، این الکترو خورده شده و کاتیون‌های منعقد کننده را برای انجام واکنش‌های جداسازی به محلول وارد می کند. از اینرو در این روش نیازی به استفاده از مواد شیمیایی به عنوان منعقد کننده نیست. یون‌های فلزی حاصل از عبور جریان مستقیم از سلول الکترو شیمیایی، هیدرولیز گردیده و یون‌های فلزی هیدروکسید تولید می‌کنند (واکنش‌های ۱ تا ۳). میزان حلالیت ترکیبات هیدروکسی فلزی به pH محلول و قدرت یونی وابسته است. لخته‌های نامحلول  $Al(OH)_3$  عمدتاً در محدوده pH، ۶ تا ۷ تولید می شوند و نقش اصلی را در عمل برداشت و جداسازی ریزجلبک‌ها دارند (۲، ۶).

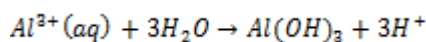
(۱) در آند



(۲) در کاتد



(۳) در محلول



نتایج تحقیقات گائو و همکاران<sup>۳</sup> در حذف و کنترل ریزجلبک در صنایع تصفیه آب با غلظت بین  $10^9 - 10^8 \times 0.55$  سلول در لیتر نشان می‌دهد که الکترو آلومینیوم در مقایسه با آهن موثرتر است و با صرف انرژی کمی به مقدار  $0.4 \text{ kWh/m}^3$  آب با بازده

2 - Van der Waals force

3 - Gao et al

1 - Flocculation

سطح موثر ۲۵ سانتی‌متر مربع که با فاصله ۲ سانتیمتر از کف راکتور به صورت عمودی و در مراحل مختلف با فاصله ۱، ۲ و ۳ سانتیمتر در داخل راکتور قرار داده شد. ولتاژ و جریان مورد نیاز در راکتور توسط یک منبع تغذیه دیجیتال جریانی مستقیم برق (Afzar Az ma، مدل JPS-403D) که توسط سیم به صورت تک قطبی به الکترودها وصل است، فراهم شد. جهت برقراری اختلاط یکنواخت در درون راکتور از یک هم زن مغناطیسی استفاده شد. پایلوت اصلی به شکل مکعب مستطیل از جنس پلکسی گلاس به ابعاد ۳۵ × ۲۸ × ۱۸ سانتی‌متر و به حجم موثر ۱۴ لیتر به منظور تست نتایج آزمایش‌های بهینه، طراحی و ساخته شد. جهت اختلاط بهتر محلول، از یک هم‌زن دیجیتال مکانیکی و پمپ هوا استفاده شد. تعداد ۴ عدد الکتروده (۲ عدد آند و ۲ عدد کاتد) به ابعاد ۲۰ × ۱۰ سانتی‌متر و به سطح موثر کل ۴۰۰ سانتی‌متر مربع در داخل راکتور اصلی طراحی شد (شکل ۱).

با رشد ریزجلبک، غلظت کشت افزایش یافت و بعد از ۱۰ روز، رشد لگاریتمی ریزجلبک به حداکثر رسید و بعد از این مرحله رشد ریزجلبک‌ها متوقف شد و عملاً تراکم آنها ثابت ماند و زمان برداشت شروع شد. در این مرحله با شمارش تعداد سلول‌ها بوسیله لام نئوبار و اندازه‌گیری دانسیته نوری بوسیله دستگاه اسپکتروفوتومتر میزان غلظت اولیه ریزجلبک در محیط کشت بر حسب سلول در لیتر تعیین گردید. سپس محیط کشت به درون راکتور منتقل شد. به منظور بررسی اثر جنس الکتروده، از الکترودهای آلومینیومی با خلوص ۹۹/۵ درصد (AI-1050) و الکترودهای آهنی (ST 37-2) استفاده شد. ناخالصی سطح الکترودها قبل از استفاده در راکتور بوسیله سمباده تمیز و سپس الکترودها به مدت ۱۵ دقیقه درون محلول اسید کلریدریک رقیق (۱۵ درصد وزنی) قرار گرفتند و بعد برس زنی با آب مقطر شستشو و در دستگاه آون خشک شدند.

۱۰۰ درصد تصفیه می‌شود (۷). ماتوئوس و همکاران<sup>۱</sup> گزارش کردند که در برداشت ریزجلبک دریایی *Nannochloropsis sp* روش انعقاد الکتریکی با چگالی جریان ۸/۳ mA cm<sup>-2</sup> به مدت ۱۰ دقیقه بازده جداسازی بالای ۹۷ درصد دارد (۱۱).

هدف اصلی از این تحقیق بررسی کارایی و یافتن پارامترهای بهینه فرآیند انعقاد الکتریکی در برداشت و جداسازی ریزجلبک دونالیلا سالینا است، این ریزجلبک یک گونه بومی و شور پسند با یک محیط کشت متفاوت از آب شیرین از لحاظ شوری و هدایت الکتریکی می‌باشد.

### مواد و روش‌ها

در این تحقیق از ریزجلبک دونالیلا سالینا گونه بومی دریاچه ارومیه که یک گونه شور پسند است، استفاده گردید. سویه ریزجلبک از کلکسیون ریزجلبک پژوهشکده بیوتکنولوژی تبریز تهیه گردید. از محیط کشت اصلاح شده جانسون برای کشت استفاده شد. کلیه مواد شیمیایی مورد استفاده در این تحقیق از شرکت مرک<sup>۲</sup> خریداری شد. از یک دستگاه ژرمیناتور<sup>۳</sup> (ساخت شرکت گروک مدل GC400، ایران) مجهز به سیستم کنترل نور، دما، رطوبت و تهویه به عنوان اتاق کشت استفاده شد. برای رسم نمودار رشد، شمارش تعدد سلول‌ها بوسیله هموسیتمتر<sup>۴</sup> (لام نئوبار<sup>۵</sup>) و دانسیته نوری بوسیله دستگاه اسپکتروفوتومتر (JENWAY, 6305) در طول موج ۶۸۰ nm و ۵۵۰ بطور روزانه اندازه‌گیری شد.

آزمایش‌ها در داخل یک راکتور ناپیوسته به حجم موثر ۲۵۰ میلی‌متر از جنس شیشه پیرکس صورت گرفت. دو عدد الکترودها به ابعاد ۵ × ۵ سانتی‌متر و به

1-Matos et al

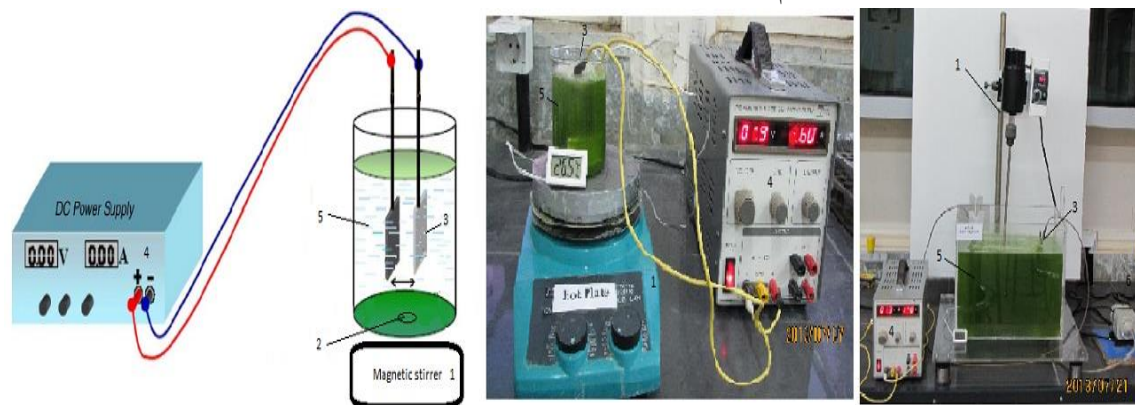
2-Merck

3-Germinator

4-Hemacytometer

5-Neubauer

محمدقاسم نژاد ملکی و همکاران: بهینه سازی فرآیند برداشت و جدا سازی...



شکل (۱) ساختار شماتیک و تصویر آزمایشگاهی و اصلی پایلوت تحقیقاتی راکتور الکتروشیمیایی شامل: ۱- هم زن مغناطیسی ۲- میله مغناطیس ۳- الکترودهای آند و کاتد ۴- منبع تغذیه جریان برق ۵- محیط کشت  
**Figure (1) Schematic diagram and picture of experimental set-up and main pilot. 1) Magnetic stirrer, 2) Magnetic rod, 3) Anode and cathode electrodes, 4) DC Power supply, 5) Microalgae culture.**

همچنین شرایط عملیاتی بهینه، با استفاده از تکنیک بهینه-سازی عددی برای دستیابی به حداکثر بازده جدا سازی تعیین گردید.

### نتایج و بحث

به منظور به دست آوردن مدل‌های تجربی برای پیش بینی پاسخ، رابطه‌های خطی، برهم‌کنشی، چند جمله‌ای درجه دوم و درجه سوم بر داده‌های بدست آمده از آزمایش‌ها برازش شدند. سپس این مدل‌ها مورد آنالیز آماری قرار گرفته تا مدل مناسب گزینش گردد. جدول ۱ خلاصه نتایج آنالیز آماری مدل‌ها، جهت انتخاب مدل مناسب در مطالعه اثر متغیرهای کنترلی (شدت جریان، فاصله الکترودها، زمان، سرعت هم‌زنی، جنس الکترود) روی بازده جداسازی ریزجلبک در روش انعقاد الکتریکی را نشان می‌دهد. از نظر آماری مدلی مناسب است که آزمون عدم برازش<sup>۱</sup> آن معنی‌دار نباشد و دارای بالاترین مقدار ضرایب تعیین<sup>۲</sup>، تعدیل شده<sup>۳</sup> و پیشگویی<sup>۴</sup> باشد. نتایج نشان داد که آزمون عدم برازش مدل چند جمله‌ای درجه دوم معنی‌دار نیست و به دلیل داشتن ضرایب تعیین، تعدیل شده و پیشگویی به ترتیب بالای ۹۸، ۹۶ و ۹۰٪ توان بیشتری در

آزمایش‌ها بر اساس روش سطح پاسخ با طراحی D-بهینه چند عاملی با عامل‌های ترکیبی کمی و کیفی با پنج متغیر کنترلی (مستقل) شامل: جنس الکترود در دو سطح آلومینیوم و آهن، شدت جریان در محدوده ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ میلی‌آمپر، زمان انجام فرایند ۵ تا ۲۰ دقیقه، فاصله الکترودها ۱ تا ۳ سانتی‌متر، سرعت هم‌زنی بین ۱۰ تا ۴۰۰ دور در دقیقه، بر روی بازده جداسازی به عنوان متغیر واکنشی (وابسته) با استفاده از نرم افزار Design-Expert و با ۴۱ آزمایش طراحی شد.

صفات مورد اندازه‌گیری شامل هدایت الکتریکی قبل و بعد انعقاد، pH قبل و بعد انعقاد، ولتاژ اولیه و ثانویه بر حسب ولت، توان بر حسب وات، دما بر حسب سانتی‌گراد، جرم الکترودها قبل و بعد انعقاد بر حسب میلی‌گرم، بودند. در پایان زمان فرآیند انعقاد الکتریکی، به مدت ۳۰ دقیق به نمونه‌ها فرصت ته نشینی داده شد و سپس شمارش تعداد سلول‌ها بوسیله لام‌توبار و دانسیته نوری بوسیله دستگاه اسپکتروفتومتر انجام شد و بازده جداسازی ریزجلبک طبق رابطه (۴) محاسبه گردید (۷).

$$\eta_a = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100 \quad (4)$$

در این رابطه:  $\eta_a$  بازده جداسازی بر حسب درصد،  $C_0$  چگالی سلولی ریزجلبک بر حسب سلول در لیتر در محیط کشت اولیه،  $C_t$  چگالی سلولی ریزجلبک بر حسب سلول در لیتر پس از انعقاد الکتریکی است.

1- Lack of Fitness  
 2- R-Squared  
 3- Adj R- Squared  
 4- Pred R- Squared

که در اینجا  $X_1$ ،  $X_2$ ،  $X_3$ ،  $X_4$  و  $X_5$  به ترتیب مقادیر کد شده شدت جریان، فاصله الکترودها، مدت زمان واکنش، سرعت دورانی هم‌زن و جنس الکترودها می‌باشد.

### اثر جنس الکترودها روی بازده جداسازی

جنس الکترودها یک عامل بسیار مهم در فرایند انعقاد الکتریکی است. بطوری که می‌توان گفت قلب سیستم انعقاد الکتریکی جنس الکترودها می‌باشد. آلومینیوم و آهن هر دو بطور وسیعی توسط محققین زیادی به عنوان الکترودها در سایر صنایع کاربردی مانند تصفیه آب و فاضلاب و مدیریت پساب‌ها و حذف آلاینده‌ها قرار گرفته‌اند (۱، ۱۷). اما با این حال اطلاعات بسیار کمی درباره مقایسه جنس الکترودها در جداسازی ریز جلبک وجود دارد. در این مطالعه تحت شرایط مساوی مقایسه بین الکترودهای آلومینیوم و آهن صورت گرفت. جدول ۲ خلاصه تجزیه واریانس مدل سطح پاسخ درجه دوم کاسته، نشان داد اثر خطی جنس الکترودها روی بازده جداسازی بسیار معنی‌دار است. با بکارگیری روش آماری سطح پاسخ، تابع بازده جداسازی با استفاده از داده‌های تجربی آزمایشگاهی، برای الکترودهای آلومینیوم و آهن به ترتیب طبق روابط (۶ و ۷) پیش‌بینی گردید.

برازش دادها را دارا است. بنابر این برای پیشگویی رفتار پاسخ مدل درجه دوم مناسب تشخیص داده شد.

جدول ۲ خلاصه نتایج تجزیه واریانس مدل سطح پاسخ درجه دوم کاسته برای بازده جداسازی را نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود پس از حذف عبارتهای کم اهمیت، مدل برازش شده برای بازده جداسازی بسیار معنی‌دار ( $p < 0.01$ ) است، در حالیکه آزمون عدم برازش غیر معنی‌دار ( $p > 0.05$ ) شده و ضریب تعیین، تعدیل شده و پیشگویی به ترتیب به ۹۷، ۹۶ و ۹۴ اصلاح گردیده است. به عبارت دیگر ۹۷٪ درصد تغییرات بازده جداسازی توسط مدل اصلاح شده توضیح داده شده است. در این مطالعه بازده جداسازی با استفاده از رابطه ۴ به صورت تجربی برآورد گردید، سپس با بکارگیری روش آماری سطح پاسخ، تابع بازده جداسازی با استفاده از داده‌های تجربی آزمایشگاهی، طبق رابطه (۵) پیش‌بینی گردید.

(۵)

$$y = 74.3 + 11.61x_1 - 3.71x_2 + 9.98x_3 + 2.24x_4 - 8.18x_5 - 6.50x_1x_2 + 2.65x_1x_3 - 1.99x_2x_3 - 3.93x_2^2 - 3.49x_4^2$$

جدول (۱) آزمون عدم برازش و خلاصه آنالیزهای آماری مدل برای انتخاب مدل مناسب در مطالعه اثر متغیرهای کنترلی

روی بازده جداسازی ریز جلبک در روش انعقاد الکتریکی

Table (1) Lack of fit tests and model summary statistics for selection of an appropriate model in studying the effect of independent variables on recovery efficiency

منابع	درجه آزادی	میانگین مربعات	ارزش F	ارزش P	ضریب تعیین	ضریب تعیین تعدیل شده	ضریب تعیین پیشگویی
(Source)	(df)	(Mean Square)	(F-Value)	(Prob > F)	(R <sup>2</sup> )	(Adjusted-R <sup>2</sup> )	(Predicted-R <sup>2</sup> )
خطی (Linear)	26	74.806	9.618	0.0007	0.859	0.838	0.801
2FI	16	27.810	3.575	0.0289	0.964	0.942	0.907
درجه ۲ (Quadratic)	12	15.617	2.007	0.1506*	0.982	0.965	0.906
درجه ۳ (Cubic)	0				0.995	0.978	+
خطای خالص (Pure Error)	9	7.777					

\*Suggested

جداسازی این سوسپانسیون ژلاتینی هیدروکسی فلزی تولید شده می تواند از طریق مکانیسم های کمپلکس سازی سطحی و جذب الکترواستاتیک، ریزجلبک ها را به دام انداخته و سبب جدا سازی آنها شوند. بنابر این بازده جداسازی به مقدار آلومینیوم و آهن تولیدی در محلول بستگی دارد که میزان آن در شرایط همسان برای الکترودهای مختلف متفاوت است. نتایج این تحقیق در خصوص اثر جنس الکترودها روی بازده جداسازی مشابه نتایج فایادو همکاران<sup>۱</sup> (۶) و ونگ و همکاران<sup>۲</sup> (۲۲) می باشد. همچنین گزارش های مشابهی توسط کانیزارس و همکاران<sup>۳</sup> (۳) و زونگو و همکاران<sup>۴</sup> در دیگر صنایع کاربردی منتشر شده است که با نتایج این تحقیق همسو می باشد.

### اثر شدت جریان و مدت زمان انعقاد بر بازده جداسازی

با توجه به اینکه طبق قانون فارادای شدت جریان و زمان عملیات در فرآیند انعقاد تاثیر مشابهی دارند لذا در این تحقیق سعی شد که نتایج این دو عامل با هم بررسی و بحث شود. جدول ۲ خلاصه تجزیه واریانس مدل سطح پاسخ درجه دوم کاسته نشان داد که اثر خطی دو متغیر کنترلی شدت جریان و طول مدت انعقاد روی بازده جداسازی در سطح ( $p < 0.01$ ) معنی دار است، همچنین ضریب این دو متغیر در رابط ۵ نشان داد که با افزایش شدت جریان و مدت زمان انعقاد بازده جداسازی بهبود پیدا کرده است.

همچنین جدول ۲ خلاصه تجزیه واریانس مدل سطح پاسخ درجه دوم کاسته نشان داد که اثر هم کنشی بین شدت جریان و طول مدت انعقاد روی بازده جداسازی وجود دارد و در سطح ( $p < 0.01$ ) معنی دار است، به عبارتی اثر ساده شدت جریان در زمان های مختلف

(۶)

$$Y_{Al} = 8.409 + 0.056X_1 + 15.339X_2 + 3.471X_3 + 0.046X_4 - 0.00248X_1X_3 - 0.266X_2X_3 - 3.932X_2^2 - 8.72E05X_4^2$$

(۷)

$$Y_{Iron} = -17.78 + 0.072X_1 + 15.339X_2 + 3.471X_3 + 0.046X_4 - 0.00248X_1X_3 - 0.266X_2X_3 - 3.932X_2^2 - 8.72E05X_4^2$$

که در اینجا  $X_1$ ،  $X_2$ ،  $X_3$  و  $X_4$  به ترتیب مقادیر حقیقی شدت جریان، فاصله الکترودها، مدت زمان واکنش، سرعت دورانی همزن می باشد.

شکل (۲) اثر جنس الکترودها در شدت جریان های مختلف را روی بازده جداسازی ریزجلبک نشان می دهند. در مقایسه اختلاف بین راندمان جداسازی دو نوع الکترودها آهن و آلومینیوم تحت شرایط همسان شکل (۲) - الف) به ترتیب (۸۶٪ در مقابل ۹۷٪) در شدت جریان ۱۰۰۰ میلی آمپر و یا (۷۰٪ در مقابل ۹۱٪) در شدت جریان ۳۰۰ میلی آمپر قرار گرفته است و تحت شرایط کاری همسان شکل (۲) - ب) (۷۵٪ در مقابل ۸۶٪) در شدت جریان ۱۰۰۰ میلی آمپر و یا (۳۳٪ در مقابل ۵۵٪) در شدت جریان ۳۰۰ میلی آمپر قرار گرفته است. دلیل این امر می تواند به خاطر تفاوت ساختار جنس آلومینیوم و آهن باشد و احتمالاً به علت بازده جریان خیلی بالای الکترودهای آلومینیومی نسبت به آهنی باشد. همچنین ممکن است تحت pH آزمایش ۷/۵، مقدار هیدروکسید آلومینیوم خیلی بیشتر از هیدروکسید آهن دو ظرفیتی یا سه ظرفیتی باشد، که امکان دارد دلیل دیگری بر جداسازی بهتر ریزجلبک با استفاده از الکترودهای آلومینیومی باشد (۱۶). در مورد جداسازی ریزجلبک باید به این مسئله توجه داشت که عامل اصلی جداسازی ریزجلبک از محیط کشت، یون های هیدروکسید تولیدی در طی احیاء آب در کاتد در واکنش با یون های آلومینیوم یا آهن تولیدی در آنند می باشد که تولید سوسپانسیون ژلاتینی هیدروکسی آلومینیوم  $Al(OH)_3$  یا هیدروکسی آهن  $Fe(OH)_{2,3}$  می کنند. در جریان

1 -Fayad et al

2 -Wong et al

3 -Canizares et al

4 -Zongo et al



اثر هم‌کنشی بین متغیر کنترلی شدت جریان و مدت زمان انعقاد روی بازده جدا سازی، در شرایطی که جنس الکترود آلومینیوم، شدت فاصله الکترودها ۱ سانتی‌متر و دور هم‌زن در ۲۰۰ دور در دقیقه ثابت نگهداشته شده اند، را نشان می‌دهد.

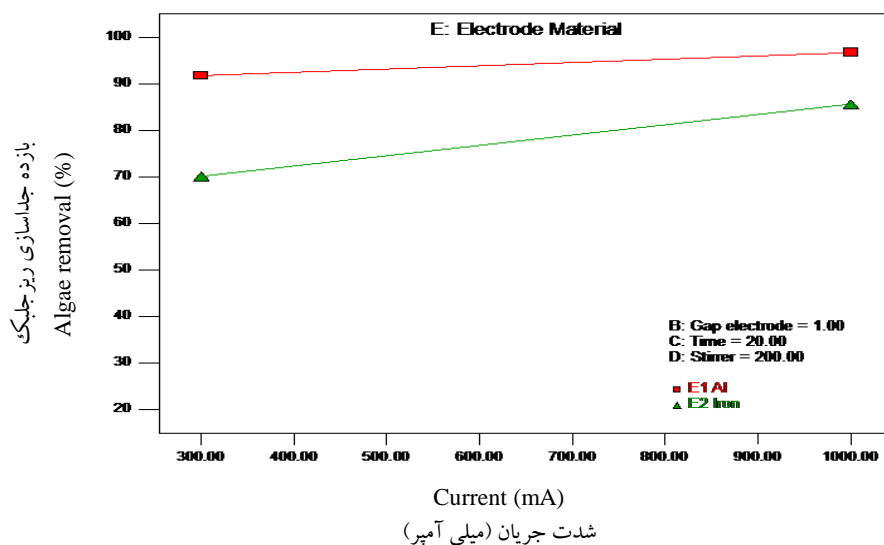
واکنش یکی نیست بنابراین بین شدت جریان و طول مدت انعقاد ممکن است اثر هم‌کنشی وجود داشته باشد. ضریب اثر هم‌کنشی بین شدت جریان و طول مدت انعقاد در رابطه (۵) نشان داد، که اثر برهم‌کنشی بین این دو عامل اثر منفی روی بازده جداسازی دارد. شکل (۳)

جدول (۲) خلاصه تجزیه واریانس مدل سطح پاسخ درجه دوم کاسته برای راندمان جداسازی

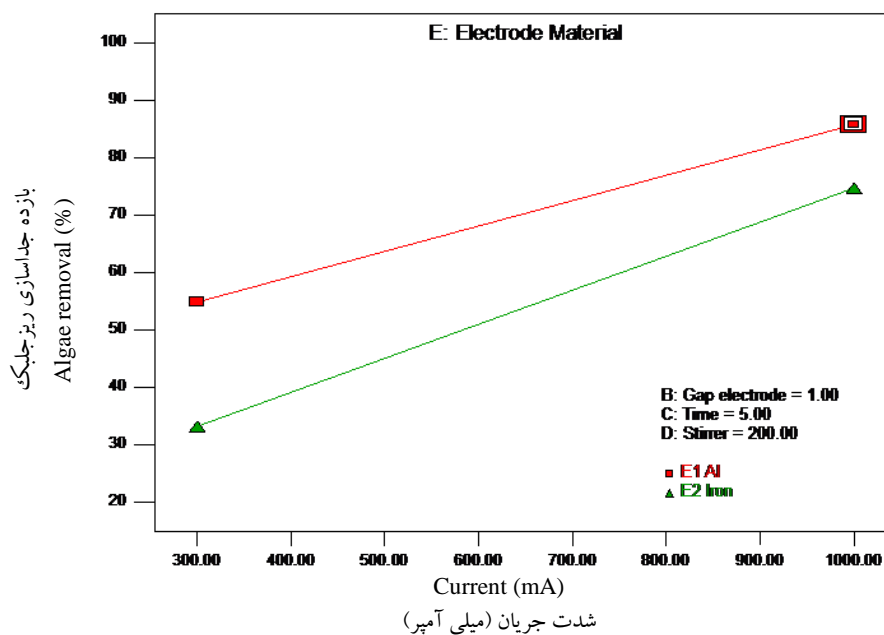
Table (2) ANOVA of the fitting model for microalgae recovery efficiency

منابع	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	(F-Value)	(p-value Prob > F)
(Source)	(Sum of Squares)	(df)	(Mean Square)		
مدل (Model)	13875.51	10	1387.55	101.04	< 0.0001
شدت جریان ( $x_1$ -Current)	4238.5	1	4238.5	308.66	< 0.0001
فاصله الکترودها ( $x_2$ -Gap electrode)	408.14	1	408.14	29.72	< 0.0001
زمان ( $X_3$ -Time)	2926.59	1	2926.59	213.12	< 0.0001
سرعت هم‌زنی ( $X_4$ -Stirrer)	159.38	1	159.38	11.61	0.0019
جنس الکترود ( $X_5$ -Electrode Material)	2627.33	1	2627.33	191.33	< 0.0001
$x_1 x_3$	1041.06	1	1041.06	75.81	< 0.0001
$x_1 x_5$	219.31	1	219.31	15.97	0.0004
$x_2 x_3$	100.06	1	100.06	7.29	0.0113
$x_2^2$	87.19	1	87.19	6.35	0.0173
$x_4^2$	51.22	1	51.22	3.73	0.0629
باقیمانده (Residual)	411.96	30	13.73		
عدم برازش (Lack of Fit)	341.96	21	16.28	2.09	0.1266
خطای خالص (Pure Error)	70	9	7.78		
مجموع کل (Total)	14287.48	40			
ضریب تغییرات (C.V. %)	5.45				

محمدقاسم نژاد ملکی و همکاران: بهینه سازی فرآیند برداشت و جدا سازی...

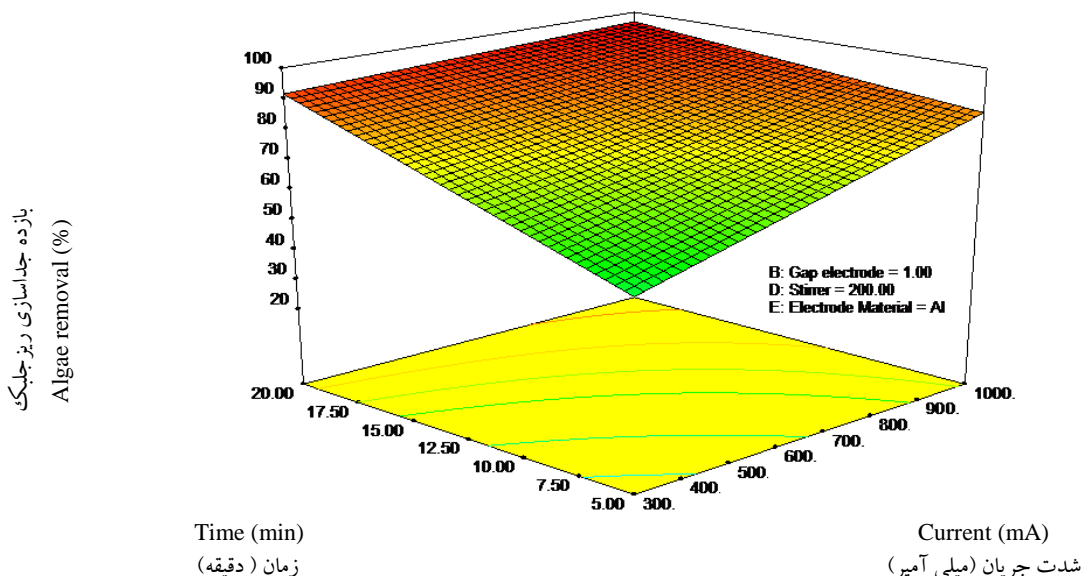


الف: در شرایطی که طول مدت واکنش ۲۰ دقیقه، فاصله الکترودها ۱ سانتی متر، سرعت همزن ۲۰۰ دور در دقیقه ثابت نگه داشته شده بود  
 A: Reaction time is 20 min, the electrode gap 1cm, and stirrer speed was kept constant 200 rpm.



ب: در شرایطی که طول مدت واکنش ۵ دقیقه، فاصله الکترودها ۱ سانتی متر، سرعت همزن ۲۰۰ دور در دقیقه ثابت نگه داشته شده بود  
 B: Reaction time is 5 min, the electrode gap 1cm, and stirrer speed was kept constant 200 rpm.

شکل (۲) اثر جنس الکترود و شدت جریان روی بازده جداسازی ریز جلبک از محیط کشت در روش انعقاد الکتریکی  
 Figure (2) Effect of electrode materials and current intensity on the recovery efficiency of microalgae.



شکل (۳) اثر متغیرهای کنترلی شدت جریان و مدت زمان انعقاد روی بازده جداسازی ریز جلبک به روش انعقاد الکتریکی

در شرایطی که جنس الکترود آلومینیوم، فاصله الکترود یک سانتیمتر و دور هم‌زن ۲۰۰ دور در دقیقه ثابت نگهداشته شده بود

**Figure (3) Response surface plot and corresponding contour plot of current intensity effect and the ECF time on recovery efficiency**

Electrode material is aluminum, the electrode gap is 1 cm, and the speed of stirring is 200 rpm.

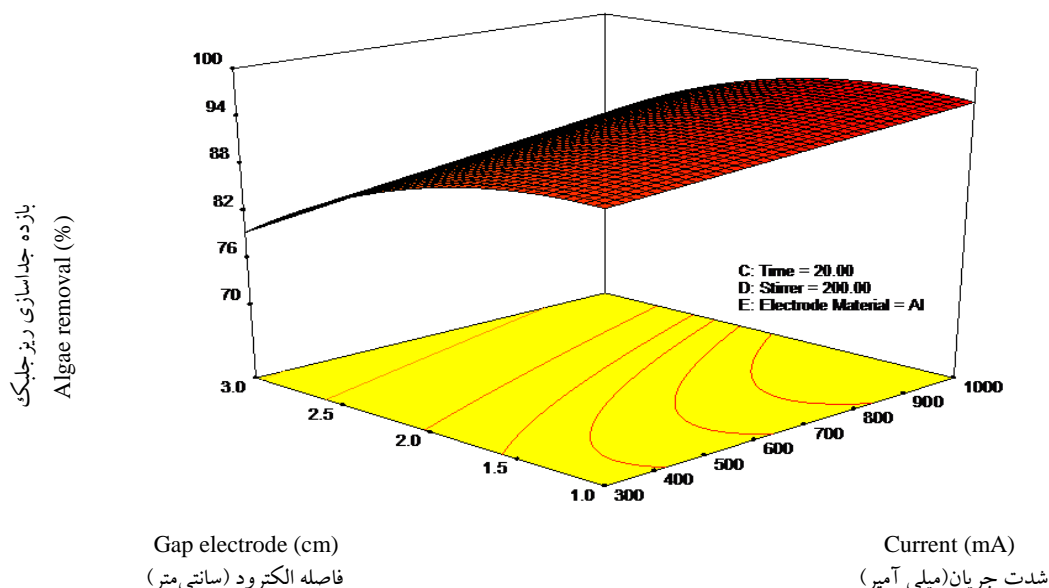
همکاران (۶) و ونگ و همکاران (۲۲) و واندومی و همکاران<sup>۱</sup> (۲۱) در این خصوص منتشر شده است که ضمن همسو بودن با این نتایج، ارتباط مستقیم افزایش بازده جداسازی با افزایش زمان و شدت جریان را نشان می‌دهند، طوری که در دقایق اولیه بازده برداشت با سرعت زیاد و با گذشت زمان، بازده برداشت یکنواخت-تر می‌گردد.

#### اثر فاصله الکترود بر بازده جداسازی

نتایج تجزیه واریانس مدل سطح پاسخ درجه دوم کاسته جدول ۲ و ضرایب متغیرهای کنترلی در رابطه (۷) نشان داد که اثر خطی و درجه دوم فاصله الکترود روی بازده جداسازی بسیار معنی‌دار ( $p < 0.01$ ) است، از ضرایب متغیرهای کنترلی در رابطه (۵) چنین استنباط می‌شود که فاصله الکترودها اثر خطی مثبت و درجه دوم منفی روی بازده جداسازی دارد. همانگونه که از شکل (۴) ملاحظه می‌شود با افزایش فاصله الکترودها، بازده جداسازی کاهش یافته است. نتایج تحقیقات قبلی روی

با توجه به معنی داری اثرات خطی، درجه دوم و برهم‌کنش شدت جریان و مدت زمان انعقاد وجود انحناء در نمودار تراز و رویه پاسخ، مورد انتظار بود. این موضوع را می‌توان به قانون فارادی نسبت داد، مطابق این قانون افزایش شدت جریان و یا زمان الکترولیز باعث افزایش یون‌های خورده شده از سطح الکترود آند قربانی می‌شود در نتیجه غلظت هیدروکسیدهای آلومینیوم و آهن تولید شده در محیط کشت بعنوان یک سل‌الکتروشیمیایی، افزایش می‌یابد با افزایش غلظت یون‌های آلومینیوم در فرآیند، مساحت سطح لخته‌سازی و تعداد محل‌های فعال لخته‌سازی افزایش می‌یابد و ذرات جلبک یونی باردار، تحت تاثیر برهم‌کنش ناشی از یون‌های تولید شده از انحلال الکترود آند خنثی می‌گردند و با جذب شدن توسط یکدیگر یعنی عمل انعقاد، از محلول جدا می‌شوند (۱۸). همچنین گاز هیدروژنی که در اطراف الکترود کاتد آزاد می‌شود برخی لخته‌های موجود در محلول را در سطح آن شناور ساخته و جدا می‌کند. گزارش‌های مشابهی توسط فایاد و

محمدقاسم نژاد ملکی و همکاران: بهینه سازی فرآیند برداشت و جدا سازی...



شکل (۴) اثر فاصله الکترودها و شدت جریان روی بازده جداسازی ریز جلبک به روش انعقاد الکتریکی

(در شرایطی که جنس الکترود آلومینیوم، طول مدت انعقاد ۲۰ دقیقه و دور هم‌زن ۲۰۰ دور در دقیقه ثابت شده بود)

**Figure (4) Response surface plot and corresponding contour plot of Gap electrode effect and the current intensity on recovery efficiency**

(Electrode material was aluminum, time of ECF was 20 minutes, and stirrer was kept constant 200 rpm)

آهن) با یون‌ها هیدروکسیل به وقوع به پیوند و لخته-های کمتری تشکیل شود از طرف دیگر برخورد ریز جلبک‌ها با پلیمرهای هیدروکسید کاهش یابد، در نتیجه جذب الکترواستاتیک کاهش و بازده جدا سازی کم می‌شود (۱۵). نتایج این تحقیق مشابه نتایج پانندی همکاران<sup>۱</sup> (۱۴) می‌باشد.

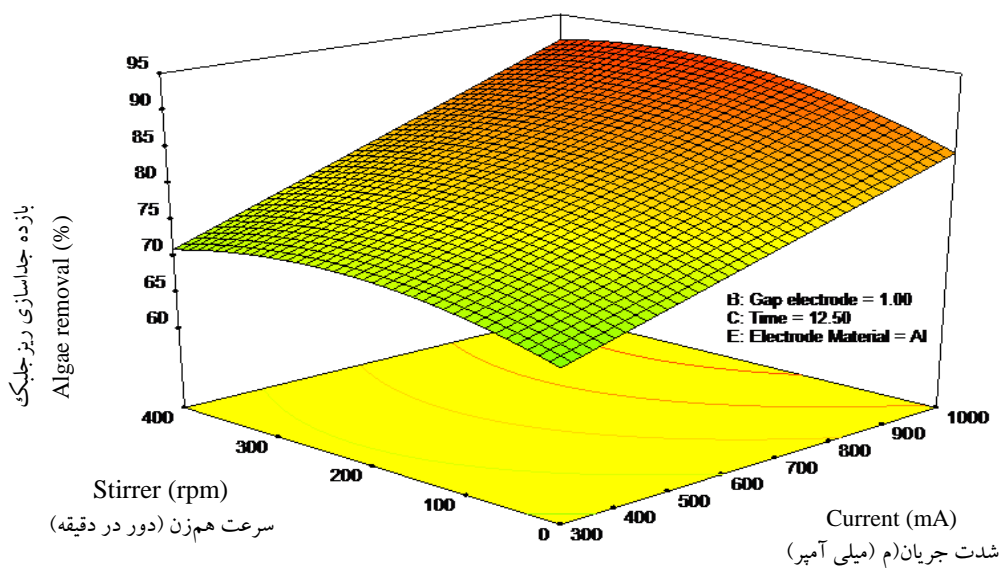
#### اثر سرعت هم‌زن بر بازده جدا سازی

جدول ۲ خلاصه تجزیه واریانس مدل سطح پاسخ درجه دوم کاسته نشان داد که اثر خطی و درجه دوم متغیر کنترلی سرعت هم‌زنی روی بازده جداسازی معنی‌دار است، از ضرایب متغیرهای کنترلی در رابطه (۵) چنین استنباط می‌شود که سرعت هم‌زن اثر خطی مثبت و درجه دوم منفی روی بازده جداسازی دارد. با توجه به معنی داری اثرات خطی و درجه دوم این متغیر، وجود انحنا در نمودار رویه و تراز مورد انتظار بود.

انعقاد الکتریکی برای سایر کاربردها نیز نشان می‌دهد که در طی فرآیند الکتروشیمیایی و در زمان یکسان، وقتی که فاصله الکترودها افزایش می‌یابد بازده انعقاد کاهش می‌یابد (۱۰). این مسئله ممکن است به دلیل جابه جایی‌های بسیار ناچیز یون‌های تشکیل شده در حین فرآیند الکترولیز باشد (۱۳). از نتایج چنین استنباط می‌شود که با افزایش فاصله بین الکترودها مقاومت الکتریکی بین الکترودها افزایش می‌یابد در نتیجه رسانایی محلول کم می‌شود و میزان جریان مصرفی کاهش می‌یابد که این کاهش جریان سبب عدم تولید یون‌های (آلومینیوم یا آهن) و هیدروکسیل به مقدار کافی برای تشکیل لخته و انعقاد ریز جلبک است. بطوری که در این تحقیق مشاهده شد در یک شدت جریان ثابت با افزایش فاصله بین الکترودها، موجب افزایش ولتاژ می‌شود که این مسئله به معنی مصرف بیشتر جریان الکتریکی و در نتیجه مصرف بیشتر انرژی الکتریکی نیز خواهد بود. علاوه بر آن با افزایش فاصله بین الکترودها انتظار می‌رود که از یک طرف برخورد کمتری بین یون‌های تولیدی (آلومینیوم یا

۲۰۰ به ۴۰۰ دور در دقیقه، منحنی بازده جداسازی با یک شیب ملایم از ۵۵ به ۵۲ درصد کاهش یافته است. این نتایج با گزارش تحقیقات (۳، ۱۲، ۲۱) همسو است. بطور کلی از نتایج چنین استنباط شد که در مرحله لخته سازی، مواد منعقد شده از طریق اختلاط آرام به یکدیگر نزدیک شده و ذرات بزرگتری را به وجود می‌آورند که به سهولت قابل شناور شدن یا ته نشینی می‌باشند، بنابراین برای ایجاد اختلاط آرام وجود هم‌زن در مکانیسم با سرعت دورانی ۲۰۰ دور در دقیقه باعث بهبود بازده جداسازی می‌شود ولی با افزایش سرعت دورانی هم‌زن از ۲۰۰ به ۴۰۰ دور در دقیقه به دلیل بالا بودن دور هم‌زن، ماده منعقد کننده توانایی ایجاد لخته های ریز جلبک را نداشته و یا حتی لخته های احتمالی ایجاد شده در این سرعت هم‌زن، شکسته شده و دوباره سوسپانسیون تشکیل دادند و یا ته نشین شدند.

همانطور که از شکل (۵) مشاهده می‌شود در سری آزمون های با الکترود آلومینیوم، که در آن شدت جریان ۱۰۰۰ میلی آمپر، فاصله الکترودها ۱ سانتی متر و طول مدت انعقاد در ۲۰ دقیقه ثابت نگاه داشته شده بود، با افزایش سرعت دورانی هم‌زن از ۰ به ۲۰۰ دور در دقیقه، منحنی بازده جدا سازی با یک شیب تند از ۹۱ به ۹۷ درصد افزایش پیدا کرده است ولی با افزایش سرعت از ۲۰۰ به ۴۰۰ دور در دقیقه، منحنی بازده جداسازی با یک شیب ملایم از ۹۷ به ۹۴ درصد کاهش پیدا کرده است. همچنین در سری آزمون های با الکترود آلومینیوم، که در آن شدت جریان ۳۰۰ میلی آمپر و طول مدت انعقاد در ۵ دقیقه ثابت نگهداشته شده بود، با افزایش سرعت دورانی هم‌زن از ۰ به ۲۰۰ دور در دقیقه، منحنی بازده جدا سازی با یک شیب تند از ۴۹ به ۵۵ درصد افزایش پیدا کرده است ولی با افزایش سرعت از



نمودار رویه پاسخ

Response surface plot

شکل (۵) اثر دو عامل سرعت هم‌زن و شدت جریان روی بازده جدا سازی ریز جلبک به روش انعقاد الکتریکی (در شرایطی که جنس الکترود آلومینیوم، فاصله الکترودها ۱ سانتی متر و طول مدت انعقاد در ۱۲/۵ دقیقه ثابت نگهداشته شده بود)  
**Figure (5) Response surface plot and corresponding contour plot of stirrer speed and the current intensity on recovery efficiency**  
 (Electrode material is aluminum, Gap electrode is 1 cm and time of ECF was kept constant 12.5 minutes)

جدول (۳) مقادیر بهینه سازی شده ده اولویت اول، با توجه به حداکثر سازی بازده جداسازی  
Table (3) Optimized values of the ten-top priority according to maximize recovery efficiency

run	شدت جریان (Current) mA	فاصله الکترودها (Gap Electrode) cm	زمان انعقاد (Time) min	سرعت هم زن (Stirrer) rpm	جنس الکترود (Electrode Material)	بازده جدا سازی (Algae Recovery)	درجه مطلوبیت (Desirability)
1	999	1.39	20	222	Al	98.068	0.976*
2	1000	1.32	19	228	Al	97.998	0.975
3	1000	1.4	20	211	Al	97.963	0.974
4	1000	1.25	19	229	Al	97.868	0.973
5	987.65	1.4	20	228	Al	97.865	0.973
6	999.99	1.21	20	229	Al	97.787	0.972
7	982.06	1.39	20	229	Al	97.743	0.971
8	1000	1.17	20	228	Al	97.675	0.971
9	1000	1.34	20	186	Al	97.539	0.969
10	999.82	1.19	20	205	Al	97.473	0.968

\* selected

### نتیجه گیری

در این مطالعه تاثیر پنج متغیر کنترلی (مستقل) شامل شدت جریان، فاصله الکترودها، مدت زمان انعقاد، دور هم زن و جنس الکترودها بر روی متغیر واکنشی (وابسته) بازده جدا سازی ریز جلبک دونالیلا سالینا از محیط کشت مورد بررسی قرار گرفت. مطالعه ما نشان داد که روش انعقاد الکتریکی یک روش کارا در برداشت و جداسازی ریز جلبک از محیط کشت برای مصارف صنعتی است. مدل‌های درجه دوم برای بیان هر یک از متغیرهای واکنشی به صورت تابعی از متغیرهای کنترلی ارائه گردید. خروجی‌های دو مدل به خوبی با نتایج آزمایشگاهی مطابقت نمودند ( $R^2 > 0.98$ ). نتایج نشان داد که اثر خطی متغیرهای کنترلی مورد مطالعه روی بازده جدا سازی بسیار معنی دار است. بطوریکه با افزایش متغیرهای شدت جریان الکتریکی و مدت زمان انعقاد، و یا کاهش فاصله الکترودها، بازده جداسازی به طور معنی داری افزایش یافته است. همچنین با افزایش دور هم زن از ۰ تا ۲۰۰ دور در دقیقه میزان بازده جدا سازی افزایش یافت و از ۲۰۰ تا ۴۰۰ دور میزان بازده جدا سازی کاهش یافته

### بهینه سازی

روابطی که در بخش‌های قبلی مطرح شد، تنها برای پیش بینی بازده جداسازی در شرایط مختلف آزمایش بود ولی این روابط ریاضی اطلاعاتی در مورد مقدار بهینه هر یک از متغیرهای مستقل ارائه نمی‌نمایند. در این مطالعه شرایط عملیاتی بهینه، با استفاده از تکنیک بهینه سازی عددی جستجو شد. بدین منظور، در ابتدا نیاز است سناریوهای مختلف برای بهینه سازی مدل مشخص گردد. در این تحقیق بهینه سازی متغیرهای کنترلی مورد مطالعه با هدف حداکثر سازی بازده جدا سازی ریز جلبک دونالیلا به روش انعقاد الکتریکی در چرخه تولید بیودیزل، صورت گرفته است. جدول ۳ نتایج ده اولویت اول حداکثر سازی بازده جداسازی را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با اعمال شدت جریان ۹۹۹ میلی‌آمپر، فاصله الکترودها ۱/۳۹ سانتی‌متر، طول مدت انعقاد ۲۰ دقیقه، سرعت هم‌زن ۲۲۲ دور در دقیقه، حداکثر بازده جداسازی با ۹۸٪ حاصل گردیده و به عنوان اولویت اول انتخاب شده است.

سطح تجاری لازم است. همچنین اگر هدف بهینه سازی بازده جداسازی با در نظر گرفتن فاکتورهای اقتصادی، انرژی و عوامل زیست محیطی است مطالعه بخش دوم این مقاله در این زمینه از همین گروه پژوهشی توصیه می گردد.

### سپاس گذاری

این تحقیق بخشی از نتایج طرح پژوهشی تحت عنوان " مطالعه اثر جریان های متناوب برنامه ریزی شده در بازیافت ریزجلبک به روش انعقاد الکتریکی در تولید سوخت های زیستی " در دانشگاه آزاد اسلامی واحد شوشتر انجام شد و کلیه اعتبار مالی توسط معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه آزاد واحد شوشتر تامین شده است.

است. نتایج نشان داد که الکترودهای آلومینیوم در جداسازی ریزجلبک از محیط کشت نسبت به الکترودهای آهنی کاراتر است. در این مطالعه شرایط عملیاتی بهینه فرایند جداسازی از منظر سناریوی حداکثر سازی کارایی فرآیند جستجو گردید، بر این اساس برای دستیابی به بازده جدا سازی ۹۸٪ با اعمال شدت جریان ۹۹۹ میلی آمپر، فاصله الکترودها ۱/۳۹ سانتی متر، طول مدت انعقاد ۲۰ دقیقه، سرعت همزن ۲۲۲ دور در دقیقه، حاصل گردید. نتایج آزمایش در مراحل مختلف مطالعه نشان داد که می توان بازده برداشت و جداسازی ریزجلبک در فرایند انعقاد الکتریکی را بهبود بخشید. با این حال، از آنجایی که فرایند انعقاد الکتریکی در مقیاس بزرگ پیچیده است، لذا یک مطالعه پایلوت در مقیاس بزرگتر برای تعیین مقدار بهینه عوامل موثر در

### References

1. Arslan-Alaton, I., Kabdaşlı, I., Hanbaba, D. and Kuybu, E. 2008. Electrocoagulation of a real reactive dyebath effluent using aluminum and stainless steel electrodes. *Journal of Hazardous Materials*, 150(1): 166-173.
2. Bensadok, K., Benammar, S., Lapique, F. and Nezzal, G. 2008. Electrocoagulation of cutting oil emulsions using aluminium plate electrodes. *Journal of Hazardous Materials*, 152(1): 423-430.
3. Canizares, P., Carmona, M., Lobato, J., Martinez, F. and Rodrigo, M. 2005. Electrodissolution of aluminum electrodes in electrocoagulation processes. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 44(12): 4178-4185.
4. Duan, J. and Gregory, J. 2003. Coagulation by hydrolysing metal salts. *Advances in Colloid and Interface Science*, 100: 475-502.
5. Escobar, C., Soto-Salazar, C. and Toral, M.I. 2006. Optimization of the electrocoagulation process for the removal of copper, lead and cadmium in natural waters and simulated wastewater. *Journal of Environmental Management*, 81(4): 384-391.
6. Fayad, N., Yehya, T., Audonnet, F., and Vial, C. 2017. Harvesting of microalgae *Chlorella vulgaris* using electro-coagulation-flocculation in the batch mode. *Algal Research*, 25, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2017.03.015>
7. Gao, S., Yang, J., Tian, J., Ma, F., Tu, G. and Du, M. 2010. Electro-coagulation-flotation process for algae removal. *Journal of Hazardous Materials*, 177(1-3): 336-343.
8. Grima, E.M., Belarbi, E.-H., Fernández, F.A., Medina, A.R. and Chisti, Y. 2003. Recovery of microalgal biomass and metabolites: Process options and economics. *Biotechnology Advances*, 20(7-8): 491-515.
9. Kim, J., Ryu, B.-G., Kim, B.-K., Han, J.-I. and Yang, J.-W. 2012. Continuous microalgae recovery using electrolysis with polarity exchange. *Bioresource Technology*, 111: 268-275.

10. Kim, T.-H., Park, C., Shin, E.-B. and Kim, S. 2002. Decolorization of disperse and reactive dyes by continuous electrocoagulation process. *Desalination*, 150(2): 165-175.
11. Matos, C.T., Santos, M., Nobre, B.P. and Gouveia, L. 2013. *Nannochloropsis* sp. biomass recovery by Electro-Coagulation for biodiesel and pigment production. *Bioresource Technology* 134, 219-226.
12. Mollah, M.Y.A., Schennach, R., Parga, J.R. and Cocke, D.L. 2001. Electrocoagulation (EC)-science and applications. *Journal of Hazardous Materials*, 84(1): 29-41.
13. Nanseu-Njiki, C.P., Tchamango, S.R., Ngom, P.C., Darchen, A. and Ngameni, E. 2009. Mercury (II) removal from water by electrocoagulation using aluminium and iron electrodes. *Journal of Hazardous Materials*, 168(2-3): 1430-1436.
14. Pandey, A., Shah, R., Yadav, P., Verma, R. and Srivastava, S. 2020. Harvesting of freshwater microalgae *Scenedesmus* sp. by electro-coagulation-flocculation for biofuel production: effects on spent medium recycling and lipid extraction. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(3): 3497-3507.
15. Song, S., He, Z., Qiu, J., Xu, L. and Chen, J. 2007. Ozone assisted electrocoagulation for decolorization of CI Reactive Black 5 in aqueous solution: An investigation of the effect of operational parameters. *Separation and Purification Technology*, 55(2): 238-245.
16. Spolaore, P., Joannis-Cassan, C., Duran, E. and Isambert, A. 2006. Commercial applications of microalgae. *Journal of Bioscience And Bioengineering*, 101(2): 87-96.
17. Zaied, M. and Bellakhal, N. 2009. Electrocoagulation treatment of black liquor from paper industry. *Journal of Hazardous Materials*, 163(2-3): 995-1000.
18. Zhu, B., Clifford, D.A. and Chellam, S. 2005. Comparison of electrocoagulation and chemical coagulation pretreatment for enhanced virus removal using microfiltration membranes. *Water Research*, 39(13): 3098-3108.
19. Zongo, I., Maiga, A.H., Wéthé, J., Valentin, G., Leclerc, J.-P., Paternotte, G. and Lapique, F. 2009. Electrocoagulation for the treatment of textile wastewaters with Al or Fe electrodes: Compared variations of COD levels, turbidity and absorbance. *Journal of Hazardous Materials*, 169(1-3): 70-76.
20. Valdivia, P. 2011. An optimal harvesting and dewatering system mechanism for microalgae. *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, 7(2): 211-215.
21. Vandamme, D., Pontes, S.C.V., Goiris, K., Foubert, I., Pinoy, L.J.J. and Muylaert, K. 2011. Evaluation of electro-coagulation-flocculation for harvesting marine and freshwater microalgae. *Biotechnology and Bioengineering*, 108(10): 2320-2329.
22. Wong, Y., Ho, Y., Leung, H., Ho, K., Yau, Y. and Yung, K. 2017. Enhancement of *Chlorella vulgaris* harvesting via the electro-coagulation-flotation (ECF) method. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(10): 9102-9110.