

**برداشت ریز جلبک *Nannochloropsis oculata* به روش لخته‌سازی الکتروشیمیایی****توسط الکترودهای آهن، آلومینیوم و گرافیت**مریم روزی‌طلب<sup>۱</sup>، میگل تکلوا<sup>۱</sup>، سیدپژمان حسینی شکرابی<sup>۲</sup>، مهدی شمسایی مهرجان<sup>۱\*</sup><sup>۱</sup> گروه شیلات، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.<sup>۲</sup> مرکز تحقیقات ملی آبیان آب‌های شور، مؤسسه تحقیقات علوم شیلاتی کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، بافق، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۱۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۳/۹

**چکیده**

برداشت ریزجلبک یک فرایند دو مرحله‌ای است که شامل جداسازی فاز مایع رویی از زی‌توده یا فاز جامد است که بعد از تولید انبوه آغاز می‌شود. هدف از این تحقیق جمع‌آوری ریزجلبک *Nannochloropsis oculata* به روش لخته‌سازی الکتروشیمیایی توسط الکترودهای مختلف آهن، آلومینیوم و گرافیت و اثر آن‌ها بر بازده برداشت، تعداد سلول‌های ریزجلبک بعد از برداشت و نرخ لخته شدن ریزجلبک بود، که طی مدت ۲۰ دقیقه ارزیابی شد. بیشترین مقدار بازده برداشت به طور همزمان در تیمار شاهد (استفاده از سانتریفیوژ) و الکتروده آلومینیوم اندازه‌گیری شد ( $P < 0.05$ ). نتایج این مطالعه نشان داد که برداشت الکتروشیمیایی ریز جلبک *N. oculata* توسط الکترودهای فلزی (آهن و آلومینیوم) و غیرفلزی (گرافیت) سبب تغییرات معنی‌داری در تعداد سلول‌ها بعد از برداشت، مقدار خاکستر و غلظت لخته‌سازی جلبک داشت و تیمار الکتروده آلومینیوم بالاترین بازده برداشت جلبک را نشان داد ( $1/48 \pm 96/47$  درصد) و کمترین بازده در الکتروده گرافیت ( $1/33 \pm 74/92$  درصد) مشاهده شد ( $P < 0.05$ ). همچنین نرخ لخته شدن ریز جلبک نانوکلوپسیس/اوکولاتا در تیمار آلومینیوم سریع‌تر اتفاق افتاد ( $P < 0.05$ ). بنابراین با توجه به نتایج به دست آمده در این تحقیق، انعقاد الکتروکی (Electrocoagulation) با الکتروده آلومینیوم روشی موثر برای لخته‌سازی و برداشت سلول‌های میکرو جلیبک نانوکلوپسیس/اوکولاتا بوده، از این رو می‌تواند به عنوان یک روش مناسب و جایگزینی سودآور در بازیابی زی‌توده و تولید میکرو جلیبک نانوکلوپسیس تغلیظ شده برای استفاده در صنایع مختلف از جمله بیودیزل پیشنهاد نمود.

**واژه‌های کلیدی:** *Nannochloropsis oculata*، برداشت جلبک، الکتروشیمی، انعقاد الکتروکی**مقدمه**

مانند رنگدانه‌ها (مانند آستاگزانتین) و اسیدهای چرب غیراشباع چندگانه در آبی‌پروری به خوبی مورد توجه قرار گرفته است، بهره‌برداری تجاری از آن‌ها نیاز به تراکم سلولی بالایی دارد، اما اندازه کوچک سلول‌ها و سرعت پایین جداسازی زی‌توده از محیط کشت از جمله دشواری‌های موجود در این صنعت هستند (Rocha و همکاران، ۲۰۰۳). جنس نانوکلوپسیس (*Nannochloropsis*)، یک جنس دریایی از رده

ریزجلبک‌ها میکروارگانیسم‌های اتوتروفی هستند که رشد سریعی داشته و امروزه از آنها به عنوان منبع اولیه تولید غذا، دارو، محصولات آرایشی و بهداشتی و سوخت زیستی استفاده می‌گردد (Hamid و همکاران، ۲۰۱۴؛ Roselet و همکاران، ۲۰۱۹). جلبک نانوکلوپسیس (*Nannochloropsis*)، به دلیل ارزش غذایی و توانایی تولید ترکیبات شیمیایی ارزشمند

\* نویسنده مسئول مکاتبات: m.shamsaie@srbiau.ac.ir

مختلفی استفاده شده‌اند (Anthony و همکاران، ۲۰۱۳). اما غلظت زیاد منعقدکننده‌ها (فلوکولنت‌ها) در زمان برداشت ریزجلبک‌ها ممکن است بر کیفیت محتوای آن‌ها تأثیر منفی بگذارد (Misra و همکاران، ۲۰۱۴). تکنیک الکتروشیمیایی جمع‌آوری جلبک یا EFC<sup>۱</sup> است که بر اساس تولید یونهای فلزی از الکترودهای فلزی اکسیدکننده جهت منعقدکردن جلبک‌ها طراحی شده است (Perreault و همکاران، ۲۰۱۰؛ Kim و همکاران، ۲۰۱۲). در تکنیک ECF می‌توان از جریان الکتریکی از طریق نصب دو الکتروده فعال (به عنوان مثال الکتروده آلومینیوم) در محیط کشت جلبک استفاده کرد (Gao و همکاران، ۲۰۱۰). الکترودهی که به عنوان قطب آند عمل می‌کند دچار اکسیداسیون می‌شود و یونهای فلزی تولید می‌کند که در شکل‌گیری توده‌های جلبکی نقش دارند (Golzary و همکاران، ۲۰۱۵). پدیده انعقاد سلول‌های ریزجلبک از طریق ختنی‌سازی بارالکتریکی آن‌ها، می‌تواند برای برداشت زیست توده (بیومس) مورد استفاده قرار می‌گیرد (Safi و همکاران، ۲۰۱۴). با توجه به فواید و تولید آسان ریزجلبک‌ها و امکانات موجود جهت کاهش هزینه تولید، بررسی روش‌های مختلف جمع‌آوری ریزجلبک‌ها بسیار ضروری به نظر می‌رسد، تا بتوان با معرفی روش مناسب گامی برای کاهش هزینه تولید و فواید حاصل از آن در صنایع دیگر برداشته شود. بنابراین هدف از پژوهش حاضر برداشت جلبک نانوکولرپسیس از محیط کشت، توسط الکترودهای مختلف (آهن، آلومینیوم و گرافیت) و اثرات آن بر بازده برداشت، تعداد سلول‌های ریزجلبک، نرخ لخته شدن ریزجلبک *Nannochloropsis oculata* و مقدار برخی اجزاء غذایی جلبک (بر حسب درصد در ماده خشک) بود.

*Eustigmatophyceae* می‌باشد که تاکنون ۶ گونه از آنها شناسایی شده است. یکی از گونه‌های شاخص در بین آنها *N. oculata* بوده که اندازه‌ای در حدود ۲-۳ میکرومتر و ارزش غذایی بالایی را دارد (Kagan و همکاران، ۲۰۱۴). اخیراً نیز مطالعات متعددی در مورد تولید سوخت زیستی از این ریزجلبک‌ها بیان شده است (Hu و همکاران، ۲۰۱۳؛ Sabzi و همکاران، ۲۰۱۸). پرورش انبوه نانوکولرپسیس در انواع مختلفی از مخازن، کیسه‌های پلی‌اتیلن یا استوانه‌های فایبرگلاس ۵۰ تا ۵۰۰ لیتری که معمولاً داخل سالن نگهداری می‌شوند ممکن است (Richmond، ۲۰۰۳). گونه‌های متعلق به جنس *Nannochloropsis* به دلیل کوچکی بیش از حد، با روش‌های معمول فیلتراسیون قابل جداسازی از محیط کشت نبوده و به همین خاطر برداشت آنها برای اهداف صنعتی بسیار گران است (Schenk و Chua، ۲۰۱۷). اما لخته‌سازی بیوماس جلبکی با استفاده از مواد شیمیایی و جمع‌آوری آنها به شکل رسوب بسیار اقتصادی و مؤثر است (Schenk و همکاران، ۲۰۰۸) که در این میان به کارگیری نمک‌های فلزی (سولفات آلومینیوم، کلرید آهن و سولفات آهن) به طور کلی در فرآیند لخته شدن بیوماس جلبکی ترجیح داده شده‌اند (Zeng و همکاران، ۲۰۰۸).

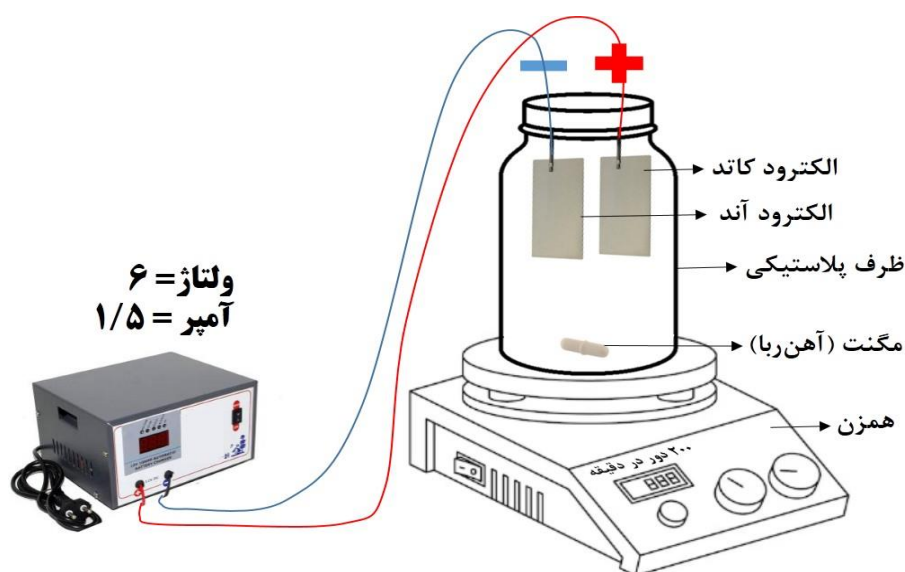
فرآیند انعقاد الکتریکی اولین بار در سال ۱۸۸۹ جهت تصفیه فاضلاب همراه با اختلاط با آب دریا و فرآیند الکترولیز در تصفیه خانه فاضلاب لندن انجام شد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که دیواره سلولی ریزجلبک دارای بار الکتریکی منفی است که علت آن وجود پلی‌ساکاریدهای اسیدی (پکتین) در ترکیب دیواره سلولی ریزجلبک‌ها می‌باشد (Crist و همکاران، ۱۹۹۴). ختنی‌سازی این بار منفی می‌تواند سبب تجمع و توده‌ای شدن سلول‌ها گردد. البته برای لخته‌سازی ریزجلبک‌ها، مواد منعقدکننده شیمیایی و طبیعی

<sup>1</sup> Electro-Couglution-Flotation

### مواد و روش کار

برای انجام آزمایش‌ها از راکتوری استوانه‌ای شکل از جنس پلاستیک شفاف با حجم کل ۱۰ لیتر که ۸ لیتر آن استفاده شد. جهت لخته‌سازی میکروجلبک‌های کشت داده شده از دو الکتروود (هریک به ابعاد  $10 \times 4$  سانتی‌متر) استفاده شد که به منبع جریان برق مستقیم متصل شدند. فاصله انتهای الکتروودها از بستر بطری پلاستیکی، ۸ سانتی‌متر و فاصله بین الکتروودها از یکدیگر یک سانتی‌متر بود. منبع جریان الکتروسیته

مستقیم (DC)، یک آداپتور ۶ ولت با شدت جریان ۴ آمپر بود (Misra و همکاران، ۲۰۱۵). جریان الکتروسیته به مدت ۲۰ دقیقه در هر تیمار برقرار گردید. برای ایجاد اختلاط در محیط مایع درون راکتور ها حین انجام فرآیند الکترولیز شیمیایی، از یک همزن مغناطیسی با سرعت ۲۰۰ دور در دقیقه استفاده شد. در همه تیمارها سرعت همزن مغناطیسی و سایر شرایط ثابت در نظر گرفته شد (شکل ۱).



شکل ۱- شماتیک روش برداشت الکتروسیکی ریزجلبک نانوکلوپسیس توسط الکتروودهای مختلف.

تیمارهای آزمایش را الکتروودهای تخریب شونده (آهن و آلومینیوم) و غیر تخریب‌شونده (گرافیت) با ابعاد  $10 \times 1 \times 1$  سانتی‌متر تشکیل می‌داد. در هر تیمار نوع هردو الکتروود (آند و کاتد) از یک جنس بود. همچنین یک تیمار شاهد جهت جداسازی ریزجلبک‌ها به روش سانتریفیوژ با ۵۰۰۰ دور در دقیقه در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد. ریزجلبک‌های پرورشی پس از ۱۴ روز توسط الکتروودهای مختلف به روش الکتروشیمیایی از محیط کشت جدا شدند (Sabzi و همکاران، ۲۰۱۸).

شمارش سلول‌های جلبک: برای شمارش سلولی از لام هموسیتمتر استفاده شد. در همین راستا با بزرگنمایی شیئی ۴۰ برابر تعداد سلول‌ها در مربع‌های مشخص شمارش و با استفاده از فرمول زیر (Moheimani و همکاران، ۲۰۱۳):

$$\text{ضرب رقت} \times 10^4 \times \text{میانگین تعداد سلول‌های نمایش داده شده} = x$$

نرخ لخته شدن ریزجلبک: تراکم نوری (OD) زیست توده اولیه ریزجلبک قبل از برداشت با استفاده از روش اسپکتروفتومتری در طول موج ۶۸۰ نانومتر

خوردگی الکترودها است توسط معادله زیر محاسبه شد:

$$AC (\%) = [(A_{EC} / DW_{EC}) - (A_i / DW_i)] \times 100$$

در معاله فوق،  $A_{EC}$  و  $DW_{EC}$  به ترتیب وزن خاکستر و وزن خشک بیوماس جلبکی بعد از الکترولیز هستند.  $A_i$  و  $DW_i$  به ترتیب وزن خاکستر و وزن خشک بیوماس جلبکی گروه شاهد (برداشت شده توسط روش سانتیفریوژ) هستند. جهت محاسبه بازده برداشت (RE)، میزان تراکم نوری نمونه‌ها که در روز ۱۴ پرورش توسط دستگاه اسپکتوفتومتر با طیف سنجی UV-VIS در طول موج ۶۸۰ نانومتر اندازه گیری شده بود و در ادامه توسط فرمول زیر بازده برداشت ریزجلبک (برحسب درصد) تعیین شد (Vandamme و همکاران، ۲۰۱۱):

$$R (\%) = [(OD_i - OD_f) / OD_i] \times 100$$

در فرمول فوق  $OD_i$ : تراکم نوری زیست توده اولیه ریزجلبک قبل از برداشت و  $OD_f$ : تراکم نوری زیست توده جلبک بعد از برداشت می باشد.

### تجزیه و تحلیل آماری

تمام آزمایشات در سه تکرار انجام و نتایج بصورت میانگین  $\pm$  انحراف معیار گزارش شد. پس از بررسی نرمال بودن داده ها با استفاده از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف، آنالیز واریانس یکطرفه ANOVA) داده ها انجام گرفت. جهت مقایسه میانگین تیمارهای مختلف نیز از آزمون Tukey در نرم افزار SPSS ورژن ۲۲ و در سطح آماری ۹۵ درصد استفاده گردید.

### نتایج

تعداد سلول‌های ریز جلبک: تعداد سلول‌های ریز جلبک *Nannochloropsis oculata* قبل ( $10^6 \times$ ) سلول در میلی لیتر) و بعد ( $10^9 \times$ ) سلول در میلی لیتر) از برداشت به روش الکترو شیمیایی توسط الکترودهای

اندازه گیری شد. سپس بعد از گذشت ۱۴ روز و برقراری جریان الکتریسیته به مدت ۲۰ دقیقه در هر تیمار میزان OD زی توده جلبک بعد از برداشت برای الکترودهای مختلف (آهن، آلومینیوم و گرافیت) نیز توسط دستگاه اسپکتوفتومتر در طول موج ۶۸۰ نانومتر اندازه گیری محاسبه شد، آزمایش‌ها در سه تکرار انجام شد. قرائت‌های OD روی یک نمودار رسم شد تا بین الکترودهای مختلف و تاثیر آن‌ها بر عملکرد رشد جلبک *Nannochloropsis sp* مقایسه صورت گیرد. OD محلول از نمونه های ۱ میلی لیتری از هر تکرار گرفته شدند. این نمونه‌ها از عمق ۳ سانتی متری زیر سطح محلول گرفته شد و پس از آن نمودارهای OD ترسیم شدند و بازده لخته سازی هر الکترودهای یک نمودار، ترسیم شدند (Kamaroddin و Rahaman، ۲۰۲۲).

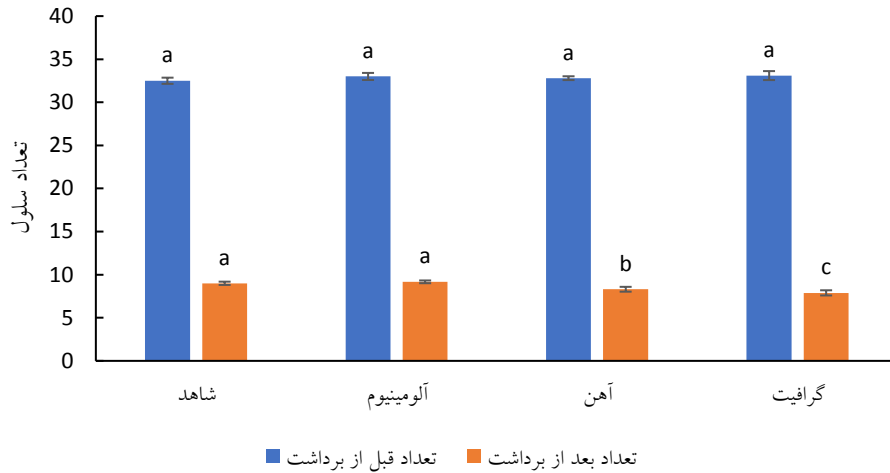
در پایان زمان الکترولیز، برای تعیین غلظت لخته سازی (CF)، ۳ میلی لیتر از فاز لخته شده جلبک توسط کاغذ صافی با قطر ۱/۲ میکرومتر با ۶ میلی لیتر آمونیوم فرمات (نیم مولار) جهت حذف نمک‌های محیط شستشو شد (Lee و Zhu، ۱۹۹۷). سپس نمونه ها به مدت یک شب در دمای ۱۰۵ درجه سانتی گراد خشک شدند تا وزن خشک بدست آید. سپس بیوماس خشک شده به همراه فیلتر در دمای ۴۹۰ درجه سانتی گراد به مدت ۳ ساعت در کوره سوزانده شدند تا وزن خاکستر بدست آید. در نهایت، CF از معادله زیر محاسبه شد:

$$CF = CC/IC$$

در معاله فوق، غلظت بیوماس خشک شده (گرم/لیتر) بعد از الکترولیز برابر CC و غلظت بیوماس خشک شده (گرم/لیتر) در گروه شاهد (برداشت شده توسط روش سانتیفریوژ) برابر IC است. نرخ خاکستر (AC) که نشان دهنده میزان نمک‌های فلزی ناشی از

سلول‌ها پس از برداشت، در تیمار شاهد و آلومینیوم بیشترین و در تیمار گرافیت کمترین بود ( $P < 0.05$ ).

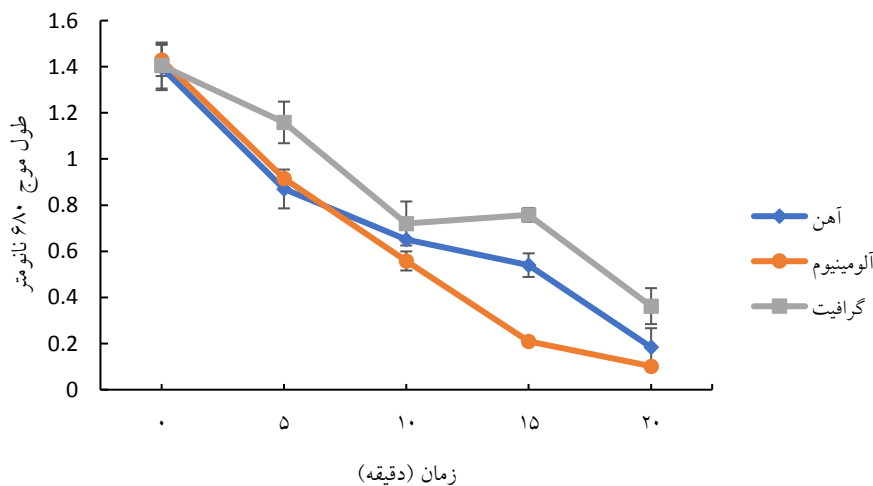
مختلف برای مدت ۲۰ دقیقه و نمونه شاهد (برداشت بیوماس جلبک توسط سانتریفیوژ) از محیط کشت در شکل ۲ نمایش داده شده است. بر اساس نتایج تعداد



شکل ۲- شمارش تعداد سلول‌های ریز جلبک *Nannochloropsis oculata* قبل ( $10^6 \times$  سلول در میلی‌لیتر) و بعد ( $10^9 \times$  سلول در میلی‌لیتر) از برداشت به روش الکتروشیمیایی توسط الکترودهای مختلف برای مدت ۲۰ دقیقه. در نمونه شاهد بیوماس جلبک توسط سانتریفیوژ از محیط کشت برداشت شد.

۲۰ دقیقه در شکل ۳ نشان داده شده است. نتایج حاکی از این است که نرخ لخته شدن ریز جلبک در تیمار آلومینیوم سریع‌تر و گرافیت کندتر اتفاق افتاد ( $P < 0.05$ ).

نرخ لخته شدن ریز جلبک: نرخ لخته شدن ریز جلبک *Nannochloropsis oculata* به روش اسپکتوفتومتری (۶۸۰ نانومتر) توسط الکترودهای مختلف برای مدت



شکل ۳- نرخ لخته شدن ریز جلبک *Nannochloropsis oculata* به روش اسپکتوفتومتری (۶۸۰ نانومتر) توسط الکترودهای مختلف برای مدت ۲۰ دقیقه.

آلومینیوم و گرافیت مشاهده شد ( $P < 0.05$ ). بازده تیمار کنترل (استفاده از سانتریفیوژ) نیز مانند تیمار واجد الکتروود آلومینیوم بود. نرخ خاکستر و غلظت لخته‌سازی نیز در تیمار آلومینیوم بیشتر و در تیمار گرافیت کمترین بود ( $P < 0.05$ ).

بازده برداشت و مقدار برخی اجزاء غذایی ریزجلبک: باتوجه به جدول (۱)، بازده برداشت جلبک در میان الکتروودهای مختلف، متفاوت بود و بیشترین ( $1 \pm 33^c$ ) و کمترین ( $96/47 \pm 1/48^a$ ) درصد) و کمترین ( $1 \pm 33^c$ ) و کمترین ( $96/47 \pm 1/48^a$ ) درصد) بازده به ترتیب در الکتروودهای

جدول ۱- مقدار برخی اجزاء غذایی جلبک *Nannochloropsis oculata* (بر حسب درصد در ماده خشک) در تیمارهای مختلف.

پارامتر	مخفف	الکتروودهای مختلف در روش برداشت الکتریکی		
		شاهد*	آهن	گرافیت
بازده برداشت (درصد)	RE	$97/61 \pm 1/50^a$	$96/47 \pm 1/48^a$	$87/31 \pm 1/29^b$
نرخ خاکستر (درصد)	AC	-	$27/37 \pm 0/53^a$	$11/24 \pm 0/16^c$
غلظت لخته‌سازی	CF	-	$6/43 \pm 0/38^a$	$1/43 \pm 0/18^c$

\* در نمونه شاهد بیوماس میکروجلبکی توسط سانتریفیوژ از محیط کشت برداشت شد.

\*\* حروف مختلف در هر ردیف نشان دهنده اختلاف معنی دار می‌باشد ( $n=3, p<0.05$ ).

### بحث و نتیجه‌گیری

کننده میزان کارایی و صرفه اقتصادی روش برداشت می‌باشد (Vandamme و همکاران، ۲۰۱۱). اگرچه تکنیک‌های فیلتراسیون و سانتریفیوژ کردن از لحاظ کارایی برداشت ریزجلبک‌ها از محیط کشت نسبت به روش الکترو شیمیایی عملکرد بهتری دارند اما مصرف انرژی در آنها بسیار بالاتر است (Baierle و همکاران، ۲۰۱۵). فرآیند برداشت ریزجلبک‌ها به روش الکتروشیمیایی تحت تأثیر پارامترهای مختلفی همچون گونه و اندازه جلبک، تراکم زی‌توده، شدت جریان، ولتاژ، نوع الکتروود و مدت زمان قرار دارد (Misra و همکاران، ۲۰۱۴). نتایج مطالعه حاضر نشان داد شاخص برداشت ریزجلبک نانوکلوپسیس توسط الکتروودهای فلزی نسبت به گرافیت (به عنوان یک الکتروود غیرتخریبی) بیشتر است. این موضوع توسط Vandamme و همکاران (۲۰۱۱) در باره برداشت ریزجلبک کلرلا و لگاریس با استفاده از الکتروودهای فلزی حدود ۹۲ درصد گزارش شده است. همچنین راندمان جدا سازی بیش از ۹۰ درصد برای جدا سازی ریزجلبک نانوکلوپسیس توسط الکتروودهای فلزی ذکر شده است (Kim و همکاران، ۲۰۱۲). نتایج نشان داد

لخته سازی یا فلوکولا سیون فرآیندی است که در آن ذرات پراکنده، به هم چسبیده و تشکیل ذرات بزرگتر جهت ته‌نشینی می‌دهند. در فرآیند الکتروولیز محیط کشت جلبک‌ها، اندازه ذره بزرگتر منجر به ته نشینی سریع تر و یا واکنش بهتر با حباب‌های شناور می‌شود. روش الکتروولیتی یکی از روش‌ها برای جدا سازی جلبک‌ها بدون نیاز به اضافه کردن هرگونه مواد شیمیایی است. در این روش، میدان مغناطیسی با باردار کردن جلبک باعث جداسازی آن از محلول می‌شود. الکتروولیز آب با تولید هیدروژن، باعث چسبیدن فلوکولهای ریزجلبک شده و آنها را به سطح می‌آورد (Bakhtiari و همکاران، ۲۰۲۱). مکانیزم انعقاد الکتریکی شامل سه مرحله متوالی می‌باشد، مرحله اول تولید انعقادکننده‌ها با اکسیداسیون الکتروولیتی الکتروود مصرفی، مرحله دوم ناپایداری ذرات سو سپان سیونی و شکستن امولسیون و مرحله آخر تجمع فاز ناپایدار به شکل لخته‌ها است (Gao و همکاران، ۲۰۱۰). بازده برداشت ریزجلبک‌ها از محیط کشت یک شاخص مهم و کاربردی بوده که بازگو

بوده باشد. بطور مشابه Misra و همکاران (۲۰۱۴) نشان دادند که در شدت جریان ۱/۵ آمپر، حداقل بازده برداشت برای گونه‌های *Chlorella sorokiniana* (۷۹ درصد) و *Scenedesmus obliquus* (۵۷ درصد) بود که در تیمار الکتروگرافیت رخ داده و نسبت به تیمارهای واجد الکترو فلزی کمتر بوده است. نتایج این مطالعه نشان داد که به کارگیری الکترودهای فلزی و غیرفلزی برای برداشت الکتروشیمیایی جلبک پرورشی نانوکلرپسیس/اوکولاتا تغییرات معنی‌داری را در بازده برداشت ریزجلبک‌ها در میان الکترودهای مختلف، سبب می‌گردد به نحوی که بیشترین مقدار بازده (بالای ۹۶ درصد) و کمترین (کمتر از ۷۵ درصد) به ترتیب در الکترودهای آلومینیوم و گرافیت پس از مدت ۲۰ دقیقه مشاهده شد. بازده تیمار کنترل (استفاده از ساتتریفیوژ) نیز مانند تیمار واجد الکترو آلومینیوم بود. همچنین نرخ لخته شدن ریزجلبک در تیمار آلومینیوم سریع‌تر اتفاق افتاد. با توجه به نتایج به دست آمده در این تحقیق، انعقاد الکتریکی با الکترودهای میکروجلبک نانوکلرپسیس/اوکولاتا بوده، از این رو می‌توان به‌عنوان یک روش مناسب و جایگزینی سودآور در بازیابی زی‌توده و تولید میکروجلبک نانوکلرپسیس تغلیظ شده برای استفاده در صنایع مختلف پیشنهاد نمود. همچنین از آن جایی که بازیابی زی‌توده میکروجلبک مرحله‌ای مهم در تولید میکروجلبک است و هزینه قابل توجهی را شامل می‌شود؛ این روش می‌تواند با هزینه بسیار پایین‌تر قابل اجرا باشد.

که بازده الکترو آلومینیوم نسبت به الکترو آهن در برداشت جلبک بیشتر بود. بطور مشابه Baierle و همکاران (۲۰۱۵) بازده برداشت ۹۵/۴ درصدی توسط الکترو آلومینیوم را در مقایسه با الکترو آهن (۶۴/۷ درصد) برای جلبک *Desmodesmus subspicatus* گزارش کردند. بطور کلی، به سه دلیل عمده الکترو آلومینیوم نسبت به آهن و گرافیت بازده برداشت بیشتری را در ریزجلبک‌ها سبب می‌گردد: (۱) میل بیشتر آلومینیوم به شرکت در واکنش الکترولیز و تولید یون‌های کاتیونی ( $Al^{3+}$ ) بیشتر نسبت به سایر فلزات که با اتصال به سلول ریزجلبک، نرخ لخته‌سازی را افزایش می‌دهند (Wong و همکاران، ۲۰۱۷). (۲) رسانایی الکتریکی بیشتر آلومینیوم نسبت به آهن (Zongo و همکاران، ۲۰۰۹؛ Canizares و همکاران، ۲۰۰۵). (۳) کثندگی بیشتر هیدروکسید آلومینیوم تولید شده از یون‌های دو و سه ظرفیتی آهن که نتیجه آن تسریع مرگ سلول‌ها و ته نشینی آنها است (Duan و Gregory، ۲۰۰۳؛ Gao و همکاران، ۲۰۱۰). در واقع زمانی که آلومینیوم به عنوان آند استفاده می‌شود، یون‌های کاتیونی آلومینیوم در واکنش با هیدروکسید تولید شده از مولکول آب (در سمت کاتد) تولید هیدروکسید آلومینیوم نموده که این ماده شیمیایی با سطح بار ریزجلبک و ترکیبات آب سبب لخته شدن توده جلبکی می‌شود (Mouedhen و همکاران، ۲۰۰۸). در تحقیق حاضر، بازده برداشت الکترو گرافیت برای جلبک نانوکلرپسیس به طور معنی‌داری کمتر از الکترودهای فلزی بود که شاید علت آن عدم وجود هیدروکسید فلزی در تیمار واجد الکترو گرافیت

### منابع

- Anthony, R.J., Ellis, J.T., Sathish, A., Rahman, A., Miller, C.D., Sims, R.C., 2013. Effect of coagulant/flocculants on bioproducts from microalgae. *Bioresource technology* 149, 65-70.
- Baierle, F., John, D.K., Souza, M.P., Bjerk, T.R., Moraes, M.S., Hoeltz, M., Schneider, R.C., 2015. Biomass from microalgae separation by electroflotation with iron and aluminum spiral electrodes. *Chemical Engineering Journal* 267, 274-281.

- Bakhtiari, H., Ansari Tadi, R., Golzari, A.A., 2021. An overview of microalgae harvest from aquatic environments using biological methods. *Applied Biology* 11(41), 85-106.
- Canizares, P., Carmona, M., Lobato, J., Martinez, F., Rodrigo, M.A., 2005. Electrodissolution of aluminum electrodes in electrocoagulation processes. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 44(12), 4178-4185.
- Chua, E.T., Schenk, P.M., 2017. A Biorefinery for Nannochloropsis: Induction, harvesting, and extraction of EPA-rich oil and high-value protein. *Bioresource Technology* 244, 1416-1424.
- Crist, D.R., Crist, R.H., Martin, J.R., Watson, J.R., 1994. Ion exchange systems in proton metal reactions with algal cell walls. *FEMS Microbiology Reviews* 14(4), 309-313.
- Duan, J., Gregory, J., 2003. Coagulation by hydrolysing metal salts. *Advances in Colloid and Interface Science* 100, 475-502.
- Gao, S., Du, M., Tian, J., Yang, J., Yang, J., Ma, F., Nan, J., 2010. Effects of chloride ions on electrocoagulation-flotation process with aluminum electrodes for algae removal. *Journal of Hazardous Materials* 182(1-3), 827-834.
- Hu, Y., Wang, F., Wang, S.K., Liu, C.Z., Guo, C., 2013. Efficient harvesting of marine microalgae *Nannochloropsis maritima* using magnetic nanoparticles. *Bioresource Technology* 138, 387-390.
- Kagan, M.L., Sullivan Jr, D.W., Gad, S.C., Ballou, C.M., 2014. Safety assessment of EPA-rich polar lipid oil produced from the microalgae *Nannochloropsis oculata*. *International Journal of Toxicology* 33(6), 459-474.
- Kim, J., Ryu, B.G., Kim, K., Kim, B.K., Han, J.I., Yang, J.W., 2012. Continuous microalgae recovery using electrolysis: effect of different electrode pairs and timing of polarity exchange. *Bioresource Technology* 123, 164-170.
- Misra, R., Guldhe, A., Singh, P., Rawat, I., Bux, F., 2014. Electrochemical harvesting process for microalgae by using nonsacrificial carbon electrode: A sustainable approach for biodiesel production. *Chemical Engineering Journal* 255, 327-333.
- Misra, R., Guldhe, A., Singh, P., Rawat, I., Stenström, T.A., Bux, F., 2015. Evaluation of operating conditions for sustainable harvesting of microalgal biomass applying electrochemical method using non sacrificial electrodes. *Bioresource Technology* 176, 1-7.
- Moheimani, N.R., Borowitzka, M.A., Isdepsky, A., Sing, S., 2013. Standard methods for measuring growth of algae and their composition. *Algae for Biofuels and Energy* Springer. pp. 265-84.
- Mouedhen, G., Fekia, M., Weryb, M.D.P., Ayedia, H.F., 2008. Behavior of aluminum electrodes in electrocoagulation process. *Journal of Hazardous Materials* 150, 124-125
- Naghavi, B., Malone, R.F., 1986. Algae removal by fine sand/silt filtration. *Water Research* 20(3), 377-383.
- Neti, N.R., Misra, R., 2012. Efficient degradation of Reactive Blue 4 in carbon bed electrochemical reactor. *Chemical Engineering Journal* 184, 23-32.
- Packer, M., 2009. Algal capture of carbon dioxide; biomass generation as a tool for greenhouse gas mitigation with reference to New Zealand energy strategy and policy. *Energy Policy* 37, 3428-3437.
- Perreault, F., Dewez, D., Fortin, C., Juneau, P., Diallo, A., Popovic, R., 2010. Effect of aluminum on cellular division and photosynthetic electron transport in *Euglena gracilis* and *Chlamydomonas acidophila*. *Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal* 29(4), 887-892.
- Poelman, E., De Pauw, N., Jeurissen, B., 1997. Potential of electrolytic flocculation for recovery of microalgae. *Resources, Conservation and Recycling* 19(1), 1-10.
- Prochazkova, G., Safarik, I., Branyik, T., 2013. Harvesting microalgae with microwave synthesized magnetic Microparticles. *Bioresource Technology* 130, 472-477.
- Richmond, A., 2003 *Handbook of Microalgalculture: Biotechnology and applied Phycology*. Blackwell Publishing Oxford, 566PP.
- Rocha, J. M. S., Garcia, J.E.C., Henriques, M.H.F., 2003. Growth aspects of the marine microalga *Nannochloropsis gaditana*. *Departament of chemical & Biomolecular Engineering*, 20: 237-242
- Roselet, F., Vandamme, D., Muylaert, K., Abreu, P. C., 2019. Harvesting of Microalgae for Biomass Production. In *Microalgae Biotechnology for Development of Biofuel and Wastewater Treatment* (pp. 211-243). Springer, Singapore.
- Sabzi, S., Shamsaie Mehrigan, M., Rajabi Islami, H., Hosseini Shekarabi, S. P., 2018. Changes in biochemical composition and fatty acid accumulation of *Nannochloropsis oculata* in response to different iron concentrations. *Biofuels*, 1-7.
- Safi, C., Zebib, B., Merah, O., Pontalier, P.Y., Vaca-Garcia, C., 2014. Morphology, composition, production, processing and applications of *Chlorella vulgaris*: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 35, 265-278.



- Schenk, P.M., Thomas-Hall, S.R., Stephens, E., Marx, U.C., Mussnug, J.H., Posten, C., 2008. Second generation biofuels: high-efficiency microalgae for biodiesel production. *Bioenergy Research* 1(1), 20-43
- Vandamme, D., Pontes, S. C.V., Goiris, K., Foubert, I., Pinoy, L.J.J., Muylaert, K., 2011. Evaluation of electro-coagulation-flocculation for harvesting marine and freshwater microalgae. *Biotechnology and Bioengineering* 108(10), 2320-2329.
- Wong, Y.K., Ho, Y.H., Leung, H.M., Ho, K.C., Yau, Y.H., Yung, K. K. L., 2017. Enhancement of *Chlorella vulgaris* harvesting via the electro-coagulation-flotation (ECF) method. *Environmental Science and Pollution Research* 24(10), 9102-9110.
- Zeng, D., Wu, J., Kennedy, J.F., 2008. Application of a chitosanflocculant to water treatment. *Journal of Applied Phycology* 71, 135-139.
- Zhu, C.J., Lee, Y.K., 1997. Determination of biomass dry weight of marine microalgae. *Journal of Applied Phycology* 9, 189-194.
- Zongo, I., Maiga, A.H., Wethe, J., Valentin, G., Leclerc, J.P., Paternotte, G., Lopicque, 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.

## **Harvesting *Nannochloropsis oculata* microalgae by electrocoagulation method using iron, aluminum and graphite electrodes**

**Rouzitalab, M.<sup>1</sup>, Taklu, M.<sup>1</sup>, Hosseini Shekarabi, S.P.<sup>2</sup>, Shamsaei Mehrgan, M.<sup>1,\*</sup>**

<sup>1</sup> Department of Fisheries, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

<sup>2</sup> National Research Center of Saltwater Aquatic Animals, Iranian Fisheries Science Research Institute (IFSRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

---

### **Abstract**

Microalgae harvesting is a two-step process that included the separation of supernatant liquid phase from biomass or solid phase that starts after mass production. The purpose of this research is to collect *Nannochloropsis oculata* microalgae by electrocoagulation method with different electrodes (iron, aluminum and graphite), and their effect on harvesting efficiency, the number of microalgae cells after harvesting and the coagulation rate of microalgae, which was evaluated during 20 minutes. The highest harvesting efficiency was measured in the control and aluminum electrode treatments ( $P < 0.05$ ). The results of this study showed that the electrochemical harvesting of microalgae *N. oculata* by metallic (iron and aluminum) and non-metallic (graphite) electrodes caused significant changes in the number of cells after harvesting, the amount of ash and the concentration of algae. Aluminum electrode treatment showed the highest algae harvesting efficiency ( $96.47 \pm 0.48\%$ ) and the lowest harvesting efficiency was observed in graphite electrode ( $74.92 \pm 1.33\%$ ) ( $P < 0.05$ ). Also, the coagulation rate of microalgae *Nannochloropsis oculata* was faster in aluminum treatment ( $P < 0.05$ ). According to the results obtained in this research, electrocoagulation with aluminum electrode is an effective method for coagulation and harvesting of *N. oculata* microalgae cells. Therefore, it can be used as a suitable method and a profitable alternative in the recovery of biomass and the production of concentrated *N. oculata* microalgae for various industries such as biodiesel.

**Keywords:** *Nannochloropsis oculata*, Algae harvesting, Electrochemistry, Electrocoagulation<sup>1</sup>

---

\* Corresponding author: [m.shamsaie@srbiau.ac.ir](mailto:m.shamsaie@srbiau.ac.ir)