بررسی عوامل موثر بر انعقاد الکتریکی در برداشت ریزجلبک از محیط کشت به منظور تولید محصولات خوراکی

علی زنوزی[۱]، محمد امین حجازی[۲]، برات قبادیان[۳] *

۱- دانشجوی دکتری گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس

۲- استادیار پژوهشکده بیوتکنولوژی کشاورزی شمال غرب و غرب کشور

۳- دانشیار گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس

(تاریخ دریافت: ۹۰/۵/۱۰ تاریخ پذیرش: ۹۱/۷/۲۲)

چکیده

یکی از مشکلات موجود در فرآیند تولید ریزجلبک به عنوان ماده اولیه برای تولید محصولات غذایی، عدم وجود روشی مناسب برای برداشت آن از محیط کشت است. در حال حاضر استفاده از سانتریفوژ تنها روش صنعتی برای برداشت ریزجلبک است که بازده آن در حدود ۹۲٪ بوده ولی هزینه زیادی را در فرآیند تولید به خود اختصاص می‌دهد. در این مقاله، روش جدیدی به نام انعقاد الکتریکی برای جداسازی ریزجلبک از محیط کشت ابداع شد و عوامل موثر در افزایش بازده این روش مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، ابتدا دستگاهی مناسب و مخصوص برداشت ریزجلبک طراحی و ساخته شد تا توانایی ایجاد شرایط مختلف را داشته باشد. سپس با استفاده از دستگاه مذکور، پارامترهایی از قبیل نوع روش همزنی، سرعت همزنی، میزان شدت جریان مستقیم، فاصله و مساحت الکترودها، مدت زمان اعمال جریان و توان مصرفی دستگاه در سطوح مختلف مورد اندازه‌گیری و مقایسه قرار گرفتند. نتایج تحقیق نشان داد که در این روش، همزنی مکانیکی با شدت ۱۰۰ دور در دقیقه و با استفاده از شدت جریان ۵ آمپر دارای بازده ۹۸ می‌باشد. همچنین برای الکترودها فاصله ۱ سانتی‌متر و سطح تماس ۶۴۰ سانتی‌متر مربع مناسب شناخته شد و در مدت زمان ۳۰ دقیقه اعمال جریان، بازده برداشت ۹۸ درصد بدست آمد. با استفاده از روش انعقاد الکتریکی، توان مصرفی برای برداشت ۱ کیلوگرم ریزجلبک به میزان ۱ کیلووات ساعت است که پنج برابر کمتر از روش مرسوم، یعنی سانتریفوژ است.

کلید واژگان: ریزجلبک، انعقاد الکتریکی، الکترود.

* مسئول مکاتبات: ghobadib@modares.ac.ir

۱- مقدمه

جلبک یک موجود زنده است که دی اکسیدکربن را از هوا خارج ساخته و اکسیژن، محصولات شیمیایی مفید و غذا تولید می‌کند [۱]. در سال‌های اخیر توسعه علوم داروسازی و حرکت بسوی کاربرد بیوتکنولوژی در صنایع شیمیایی منجر به استفاده وسیع از جلبک‌ها شده است [۲]. ریزجلبک‌ها گروهی از جلبک‌ها هستند که برخی از انواع آن برای تولید پروتئین‌ها، کاروتنوئیدها (آستاگزانتین[1]، بتاکاروتن[2])، گلیسرول، سوخت‌های زیستی، داروهای مختلف و همچنین ترکیبات شیمیایی با ارزش کشت می‌شوند [۳]. ریزجلبک‌ها بسته به گونه، انواع مختلف چربی‌ها، هیدروکربن‌ها و سایر ترکیبات روغن‌ها را تولید می‌نمایند [۴، ۵ و ۶]. تحقیقات نشان می‌دهد که بیوماس ریزجلبک منبع سرشار اسیدهای چرب ω_3 و ω_6 است [۷]. روغن اندوخته شده در همه ریزجلبک‌ها بطور عمده تری گلیسرید با زنجیره‌های C_{16} و C_{18} می‌باشد [۸]. میزان بالای پروتئین و همچنین قابل استفاده بودن صد در صد آن و نداشتن ضایعات، امروزه ریزجلبک‌ها را به عنوان منبع با ارزش پروتئین مطرح نموده است [۹]. بتاکاروتن موجود در برخی از گونه‌های ریزجلبک می‌تواند به عنوان یک افزودنی برای تقویت رنگ گوشت ماهی، زرده تخم‌مرغ طیور و بهبود سلامتی و باروری احشام سبزی‌خوار مورد استفاده قرار گیرد [۱۰]. بتاکاروتن طبیعی محلول در چربی است که نسبت به نوع مصنوعی، آن را تبدیل به عامل مؤثر ضد سرطان و بیماری‌های قلبی و کنترل کلسترول می‌کند [۱]. برای تامین فسفر ضروری قلب و در نهایت تضمین سلامتی با ویتامین A، قرص‌ها وکپسول‌های متفاوتی با استفاده از جلبک‌ها و به ویژه جنس دونالیلا ساخته شده‌اند که با نام‌های تجاری متفاوتی در بازار دارویی سراسر جهان موجود می‌باشند [۱۱].

بهبود بازده تولید، اصلاح ژنتیکی جهت تولید روغن یا مواد با ارزش و کاهش هزینه‌های تولید اهداف اصلی در صنعت تولید ریزجلبک به شمار می‌روند. اگرچه غالب تلاش در گذشته بهبود بازده تولید بوده است ولی امروزه کاهش هزینه‌های تولید یکی از مهمترین چالش‌های دانشمندان می‌باشد.

نکته مهم در اینجا است که برداشت ریزجلبک از محیط کشت با بازده بالا و هزینه پایین یک مشکل اساسی در صنعت تولید ریزجلبک به شمار می‌رود. بازده پایین برداشت باعث از دست رفتن محصول تولیدی می‌گردد. با توجه به اینکه غلظت ریزجلبک در محیط کشت و بخصوص در برکه‌های مارپیچی بسیار پایین می‌باشد (۱- ۰/۵ گرم بر لیتر)، بازده بالای برداشت بسیار هزینه‌بر است. اغلب این هزینه در حدود ۳۰ – ۲۰ درصد کل هزینه تولید ریزجلبک را تشکیل می‌دهد. بنابراین، افزایش بازده برداشت و کاهش هزینه آن یک نکته کلیدی و یک گلوگاه در صنعت تولید ریزجلبک به شمار می‌رود [۱۲].

در حال حاضر تنها روش صنعتی که برای جداسازی ریزجلبک از محیط کشت بکار می‌رود استفاده از دستگاه سانتریفوژ می‌باشد. با وجود اینکه بازده جداسازی با استفاده از سانتریفوژها ۹۰ درصد است ولی به علت هزینه بالا استفاده از این روش برای جداسازی ریزجلبک به هیچ وجه توجیه‌پذیر نیست. این روش طولانی، پیچیده و گران است و باعث متلاشی شدن سلول‌ها می‌شود که در این صورت بسیاری از مواد فعال بیولوژیکی و شیمیایی از بین رفته و یا آسیب می‌بینند. هزینه برق مصرفی، مواد مصرفی، نگهداری و سرویس سانتریفوژ ممکن است تا ٪۲۵ کل هزینه تولید برسد [۱۳]. میزان توان مصرفی اندازه‌گیری شده با استفاده از سانتریفوژ برای تولید ۱ کیلوگرم ماده خشک برابر با ۴/۷۶ kWh/kg است [۱۴]. فرآیند جداسازی با استفاده از سانتریفوژ پیچیده بوده و هزینه سرمایه‌گذاری اولیه بسیار بالایی را نیاز دارد. در این روش، محصول اندکی بدست می‌آید و عملیات جداسازی نیز بسیار پر سر و صدا می‌باشد. علاوه بر معایب ذکر شده، این روش برای ریزجلبک‌های بسیار ریز (کوچکتر از ۵ میکرون) مناسب نیست زیرا شدت دور زیادی برای سانتریفوژ کردن مورد نیاز خواهد بود (بیش از ۱۰,۰۰۰ rpm). از سوی دیگر، با توجه به اینکه غلظت ریزجلبک در محیط کشت کم است (۱- ۰/۵ gr/lit)، لذا حجم بسیار زیادی از محیط کشت باید از داخل دستگاه سانتریفوژ عبور داده شود در نتیجه، استفاده از سانتریفوژ برای جداسازی ریزجلبک از محیط کشت و به‌خصوص در مقیاس انبوه برای تولید خوراک انسان و دام به هیچ وجه توجیه‌پذیر نیست.

روش دیگری که در سال‌های اخیر تحقیقات زیادی بر روی آن انجام شده است، استفاده از مواد شیمیایی منعقد کننده می‌باشد.

1. Astaxantin
2. Beta-carotene

روش جداسازی با استفاده از مواد منعقد کننده بسیار راحت‌تر و کم هزینه‌تر از روش سانتریفوژ می‌باشد و می‌تواند ریزجلبک را از حجم انبوه محیط کشت با سرعت زیاد جداسازی نماید [۱۵]. در این روش، با خنثی‌سازی بار منفی موجود در سطح سلول‌های ریزجلبک توسط کاتیون حاصل از نمک اضافه شده به محیط کشت مانند $Al_2(SO_4)_3$ ، سلول‌های ریزجلبک به هم چسبیده و ته‌نشین می‌شوند. بازده برداشت در این روش، بستگی به غلظت ماده منعقد کننده، pH محیط کشت، OD اولیه و مقاومت یونی محیط کشت دارد. در تحقیقی اثر دوازده نمک بر برداشت *Chlorella minutissima* مورد بررسی قرار گرفته است. این نمک‌ها عبارتند از $Al_2(SO_4)_3$، $AlCl_3$، $Fe_2(SO_4)_3$، $FeCl_3$، $ZnSO_4$، $ZnCl_2$، $CaSO_4$، $CaCl_2$، $MgCl_2$، $MgSO_4$، $(NH_4)_2SO_4$ و NH_4Cl [۱۶]. نتیجه این تحقیق نشان داد که نمک‌های آلومینیوم موثرتر بوده ولی باعث ۱۰ تا ۲۵ درصد آسیب به سلول‌ها می‌شود. نمک‌های آهن باعث تغییر رنگ سلول‌ها شده و نمک‌های روی باعث چسبیدن سلول‌ها به دیواره می‌گردند. با توجه به اینکه چگالی بار کاتیون‌های آلومینیوم بیشتر از روی می‌باشد لذا، با عملکرد بهتری بین سلول‌ها پل می‌زنند و آن‌ها را خنثی می‌نمایند. از سوی دیگر با توجه به اینکه وزن مولکولی آلومینیوم کمتر از نمک آهن می‌باشد انحلال آن بهتر بوده و عمل انعقاد با بازده بالاتری صورت می‌پذیرد. با استفاده از نمک‌های آلومینیوم حداکثر بازده ۹۰٪ گزارش شده است [۱۶].

علی‌رغم اینکه روش انعقاد شیمیایی نسبت به روش سانتریفوژ هزینه کمتری را دارا می‌باشد ولی در این روش یک ماده شیمیایی منعقد کننده به محیط اضافه می‌شود که کاربرد این مواد باعث می‌گردد ریزجلبک کشت شده برای مصارف خوراکی و دارویی قابل استفاده نباشد زیرا حذف دوباره این ماده از ریزجلبک امکان‌پذیر نبوده و یا حذف آن باعث افزایش هزینه می‌شود.

جستجوی منابع نشان داد که روش انعقاد الکتریکی، یکی از روش‌های مورد استفاده در جداسازی ذرات جامد از آب پسماند [۱۷] و بخصوص جداسازی رنگ از آب می‌باشد [۱۸]. این روش تا به حال برای جداسازی ریزجلبک از محیط کشت مورد بررسی قرار نگرفته است. با درنظر گرفتن مشکلات ذکر شده و وجود گلوگاه در بخش برداشت ریزجلبک، در این کار پژوهشی روش انعقاد الکتریکی برای برداشت ریزجلبک از محیط کشت مورد استفاده قرار گرفت و پارامترهای موثر در افزایش بازده روش مذکور شناسایی شدند. در نهایت روش بهینه برای جداسازی ریزجلبک از محیط کشت که دارای بالاترین بازده می‌باشد معرفی گردید. استفاده از این روش در ایران و جهان جدید بوده و توسعه آن باعث کاهش هزینه‌های تولید مواد غذایی و سوختی از ریزجلبک خواهد شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- ریزجلبک

در این تحقیق میکروجلبک شوری پسند دونالیلا[3] به عنوان گونه شاهد جهت انجام آزمون‌های آزمایشگاهی انتخاب گردید زیرا برای کشت دونالیلا نیاز به آب شیرین نبوده و تولید آن با توجیه پذیری اقتصادی همراه است. علاوه بر آن، استفاده از ریزجلبک دونالیلا در صنایع بهداشتی، دارویی و غذایی از نظر اقتصادی اهمیت زیادی دارد. این ریزجلبک در فتوبیوراکتور ۲۵۰ لیتری موجود در پژوهشکده بیوتکنولوژی کشاورزی شمال غرب و غرب کشور کشت گردید (شکل۱). از NaCl, $CaCl_2$, Na_2SO_4, K_2SO_4, $MgCl_2.6H_2O$ برای آماده سازی محیط کشت استفاده گردید. همچنین محلول متشکل از $CoCl_2.6H_2O$, $MnCl_2.4H_2O$, $NaMoO_4.2H_2O$, $ZnSO_4.7H_2O$ و Na_2EOTA, $FeCl_2.6H_2O$, $CuSO_4.7H_2O$ به عنوان تامین کننده مواد ریزمغذی جهت کشت ریزجلبک مورد استفاده قرار گرفت. هنگام برداشت چگالی نوری محلول در طول موج ۶۸۰ نانومتر که به اختصار با OD_{680} نشان داده می‌شود برابر با ۰/۶۱۲ و هدایت الکتریکی محلول، برابر ۶۰/۲ میلی زیمنس بر سانتی‌متر بود. جهت اندازه‌گیری OD_{680} از دستگاه اسپکتروفتومتر Genesys 5 و برای اندازه‌گیری هدایت الکتریکی از EC متر مدل Cond 315i ساخت شرکت WTW استفاده گردید. محلول ریزجلبک پس از خروج از فتو بیوراکتور حداکثر بمدت سه روز در داخل یخچال و در دمای ۵ درجه سانتی‌گراد نگهداری گردید تا ریزجلبک‌ها هنگام برداشت بطور کامل زنده و فعال باشند.

3. *Dunaliella*

شکل۱ فتوبیوراکتور ۲۵۰ لیتری موجود در پژوهشکده بیوتکنولوژی کشاورزی شمال غرب و غرب کشور.

۲-۲- محاسبه بازده برداشت

بازده برداشت ریزجلبک با استفاده از رابطه (۱) برای هر یک از نمونه‌ها محاسبه گردید.

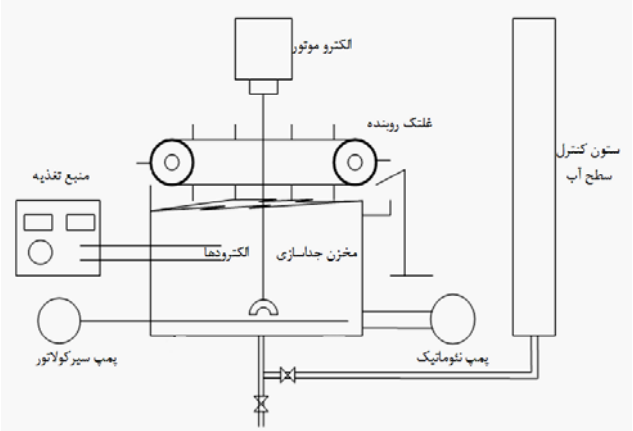
$$\text{HE}\,\% = \frac{OD_0 - OD}{OD_0} \times 100 \qquad (۱)$$

در رابطه (۱)، عبارت HE بیانگر بازده برداشت، OD_0 چگالی نوری محلول مرجع ریزجلبک و OD چگالی نوری نمونه پس از انجام آزمایش جداسازی می‌باشد.

۲-۳- روش انعقاد الکتریکی

با توجه به اینکه بار موجود در سطح سلول‌های ریزجلبک آنیونی است، لذا برای انعقاد سلول‌ها کافی است که بار منفی بر روی سطح سلول‌ها خنثی شود. به این ترتیب، نیروی دافعه بین سلول‌ها از بین رفته و سلول‌ها به هم می‌چسبند و بدین صورت جداسازی آن‌ها از محیط کشت به آسانی انجام می‌پذیرد. در این کار تحقیقی روشی ابداع گردید که با استفاده از جریان الکتریسیته و بدون اضافه‌کردن ماده شیمیایی، بار منفی روی سطح سلول‌ها خنثی شود. در این روش ابتدا الکترودهای فولادی با فاصله مشخص در داخل محلول ریزجلبک قرار داده شدند. سپس جریان مستقیم به الکترودها اعمال شد. اختلاف ولتاژ بوجود آمده باعث گردید که کاتیون‌ها از سطح الکترودها آزاد شده و وارد محلول ریزجلبک گردند. برای افزایش بازده برداشت، از الکترودهای آلومینیومی استفاده گردید تا کاتیون‌های آزاد شده سه ظرفیتی بوده و بار آنیونی تعداد بیشتری از سلول‌ها را خنثی نمایند.

برای بهینه‌سازی روش انعقاد الکتریکی، دستگاهی طراحی و ساخته شد که در آن همه پارامترها متغیر و قابل کنترل می‌باشد. پارامترهای مهم در روش انعقاد الکتریکی عبارتند از: نوع روش همزنی، سرعت همزنی، میزان شدت جریان مستقیم، فاصله و مساحت الکترودها و مدت زمان اعمال جریان. شکل ۲ شماتیک دستگاه جداسازی ریزجلبک از محیط کشت را نشان می‌دهد.



شکل ۲ شماتیک دستگاه برداشت ریزجلبک.

در این دستگاه از سه روش همزنی جهت اختلاط کاتیون‌ها با سلول‌های ریزجلبک استفاده شد. از یک پمپ سیرکولاتور برای همزنی هیدرولیکی و از یک پمپ نئوماتیک برای همزنی حبابی استفاده گردید. جهت کنترل شدت اختلاط، نوع پمپ‌ها به گونه‌ای انتخاب شده که دبی هر یک متغیر و قابل تنظیم باشد. بازده برداشت در دبی‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ لیتر در دقیقه برای پمپ سیرکولاتور و دبی‌های ۱، ۲ و ۳ لیتر در دقیقه برای پمپ نئوماتیک مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. از یک الکتروموتور نیز برای همزنی مکانیکی استفاده شد. دور الکتروموتور از طریق اینورتر قابل تنظیم می‌باشد. بازده برداشت در دورهای ۱۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ دور در دقیقه اندازه‌گیری شد. در نهایت بازده برداشت ریزجلبک با استفاده از هریک از روش‌های همزنی مورد مقایسه قرار گرفت. در همه آزمایش‌ها شدت جریان اعمالی به مدت ۳۰ دقیقه و به میزان ۵ آمپر بود. ماتریس آزمایش‌ها در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول ۱ ماتریس آزمایش‌ها.

ردیف	پارامتر	سطوح		
		۱	۲	۳
۱	دبی پمپ نئوماتیک (lit/min)	۱	۲	۳
۲	دبی پمپ سیرکولاتور (lit/min)	۵	۱۰	۱۵
۳	دور الکتروموتور (rpm)	۱۰۰	۳۰۰	۵۰۰
۴	نوع همزنی	حبابی	هیدرولیکی	نئوماتیکی
۵	شدت جریان (A)	۱	۳	۵
۶	فاصله الکترودها (cm)	۱	۳	۵
۷	مساحت الکترودها (cm^2)	۱۶۰	۳۲۰	۶۴۰
۸	مدت زمان (min)	۱۰	۲۰	۳۰

از یک منبع تغذیه جریان مستقیم (DC) با مدل PS-305D ساخت شرکت Dazheng در کشور چین برای اعمال جریان الکتریسیته استفاده شد. میزان شدت جریان خروجی این منبع تغذیه به صورت دیجیتال قابل تنظیم است. بازده برداشت ریزجلبک در شدت جریان‌های ۱، ۳ و ۵ آمپر اندازه‌گیری شده و مورد مقایسه قرار گرفت.

سه فاصله ۱، ۳ و ۵ سانتی‌متر و سه سطح تماس ۱۶۰، ۳۲۰ و ۶۴۰ سانتی متر مربع برای تعیین تاثیر فاصله الکترودها و سطح تماس الکترودها بر بازده برداشت مورد بررسی قرار گرفت. برای معین نمودن مدت زمان بهینه در عمل انعقاد الکتریکی، عملکرد دستگاه در سه سطح زمانی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه مورد بررسی قرار گرفت.

مختلف اندازه‌گیری شد تا با روش سانتریفوژ مورد مقایسه قرار گیرد.

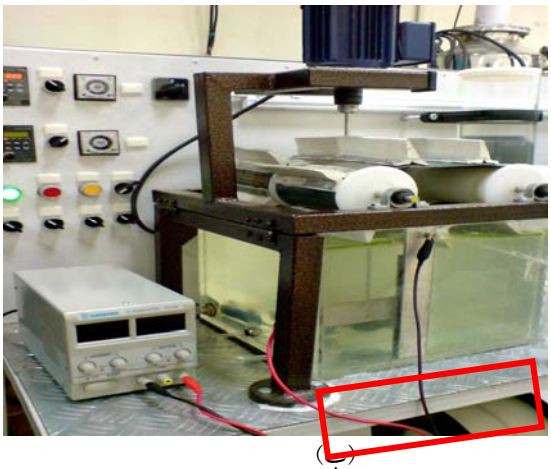
۲-۳- طرح آماری

آزمایش در قالب طرح کاملا تصادفی انجام گرفت و داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS تجزیه و تحلیل شدند. مقایسه میانگین‌ها با آزمون دانکن با سطح احتمال خطای ۵٪ انجام گرفت. رسم نمودارها با استفاده از نرم‌افزار Excel صورت گرفت. برای افزایش بازده جداسازی از یک غلتک روبنده در سطح مخزن و یک ستون کنترل سطح آب استفاده گردید تا بطور پیوسته ریزجلبک‌های منعقد شده در سطح آب را به ناودانی جانبی هدایت نموده و از محیط کشت جدا نماید (شکل۲). در پایان، توان مصرفی روش انعقاد الکتریکی در شدت جریان‌های

۳- نتایج و بحث

شکل ۳ دستگاه ساخته شده برای برداشت ریزجلبک را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که پس از کاربرد دستگاه سلول‌های ریزجلبک منعقد گشته و در سطح مخزن جمع شده‌اند. همچنین شفافیت محلول افزایش یافته است بطوری که محور همزن به سادگی قابل مشاهده است.

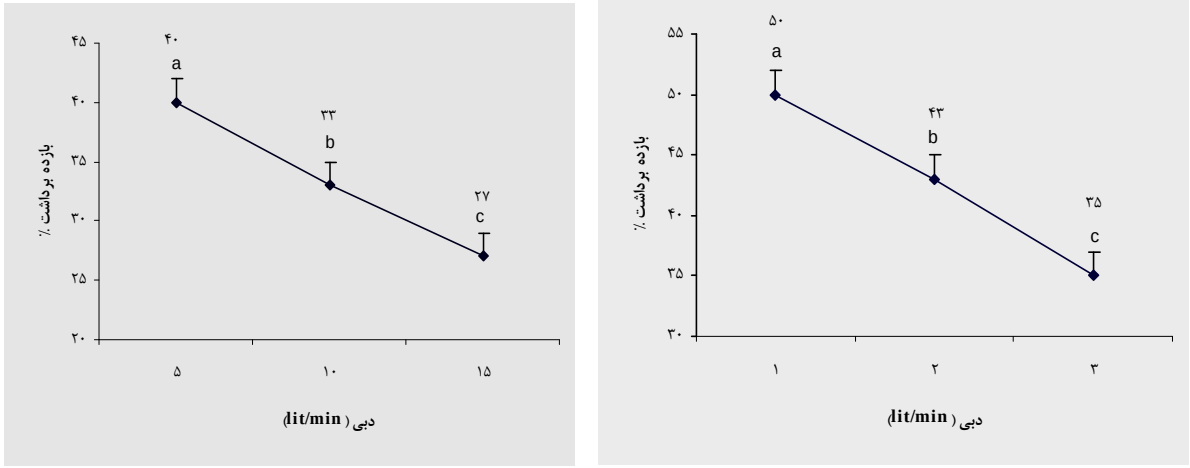
(الف)



(ب)

شکل ۳ عملکرد دستگاه برداشت (الف) قبل از اعمال ولتاژ و (ب) بعد از اعمال ولتاژ.

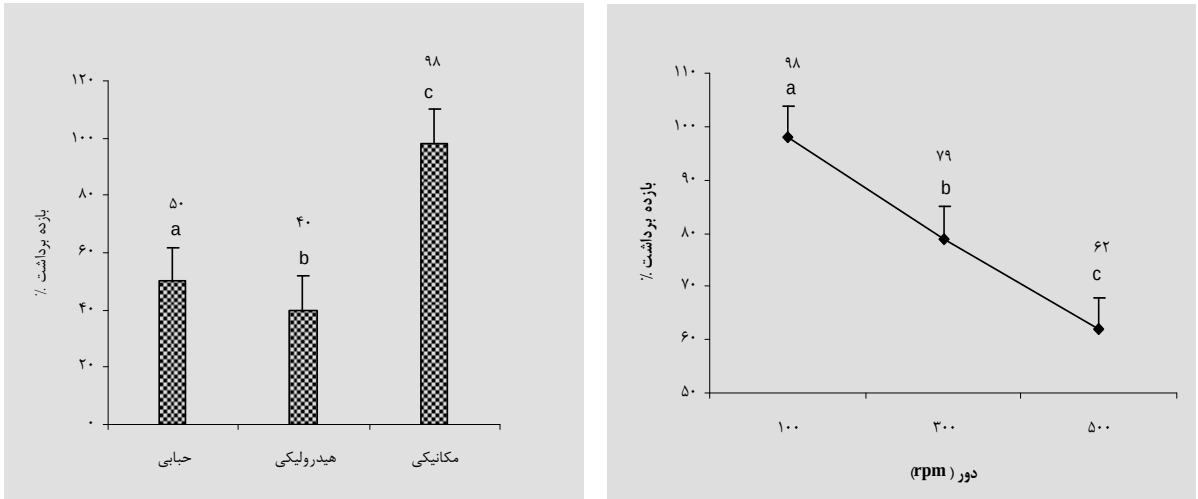
رابطه بین دبی و سرعت همزنی با بازده برداشت در شکل‌های (۴ و ۵) نشان داده شده است. مشاهده شد که با افزایش دبی پمپ‌ها و دور الکتروموتور، بازده برداشت به‌شدت و با اختلاف معنی‌داری ($P < ۰/۰۵$) افت نمود. بنابراین، هرچه شدت همزنی کمتر باشد عمل انعقاد با بازده بالاتری انجام گرفته و در نتیجه بازده جداسازی افزایش می‌یابد.



(الف) (ب)

شکل ۴ (الف) تاثیر دبی پمپ نئوماتیک و (ب) تاثیر دبی پمپ سیرکولاتور بر بازده برداشت ریزجلبک در سطح احتمال $P<۰/۰۵$.

تاثیر نوع همزنی بر بازده برداشت ریزجلبک در شکل (۵) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که همزنی مکانیکی با ۹۸ درصد دارای بالاترین بازده بوده و همزنی حبابی و هیدرولیکی به ترتیب بازده‌های ۵۰ و ۴۰ درصد را دارا می‌باشند. اختلاف بین بازده انواع همزنی در سطح احتمال ($P < ۰/۰۵$) معنی‌دار بود. در روش همزنی هیدرولیکی در حین عبور محلول از داخل پمپ، برخورد سلول‌ها به پره‌های پمپ باعث گسسته شدن سلول‌ها از یکدیگر شده و عکس عمل انعقاد صورت گرفت و به این ترتیب بازده برداشت کاهش یافت. در روش همزنی حبابی، با حرکت حباب‌های هوا به طرف سطح محلول سلول‌های منعقد شده نیز به طرف سطح محلول حرکت نمودند ولی با متلاشی شدن حباب‌های هوا در سطح محلول ریزجلبک‌های منعقد شده نیز از هم گسسته شدند و بنابراین بازده برداشت کاهش یافت. در همزنی مکانیکی به دلیل ایجاد حرکت گردابی، سلول‌های منعقد شده به آرامی به سطح محلول منتقل شده و در آن‌جا بر روی هم انباشته گشتند. به این ترتیب، به سادگی سلول‌های منعقد شده از سطح محلول جداسازی گردید.

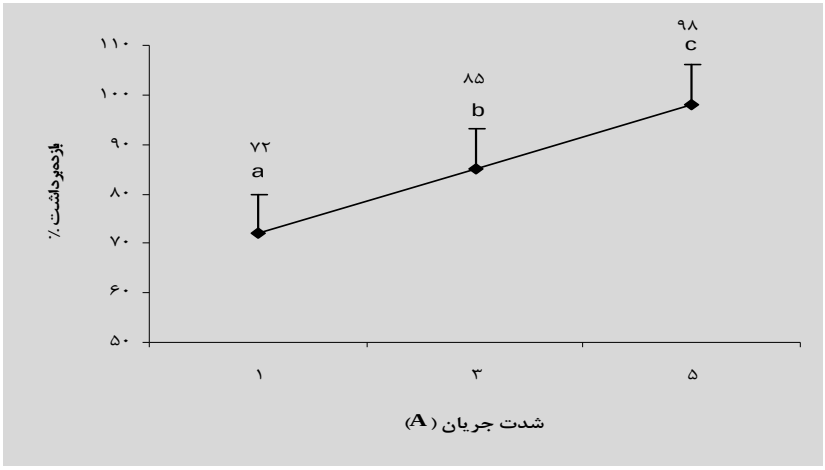


(الف) (ب)

شکل ۵ (الف) تاثیر دور الکتروموتور بر بازده برداشت و (ب) مقایسه بازده برداشت سه روش همزنی در سطح احتمال $P < ۰/۰۵$.

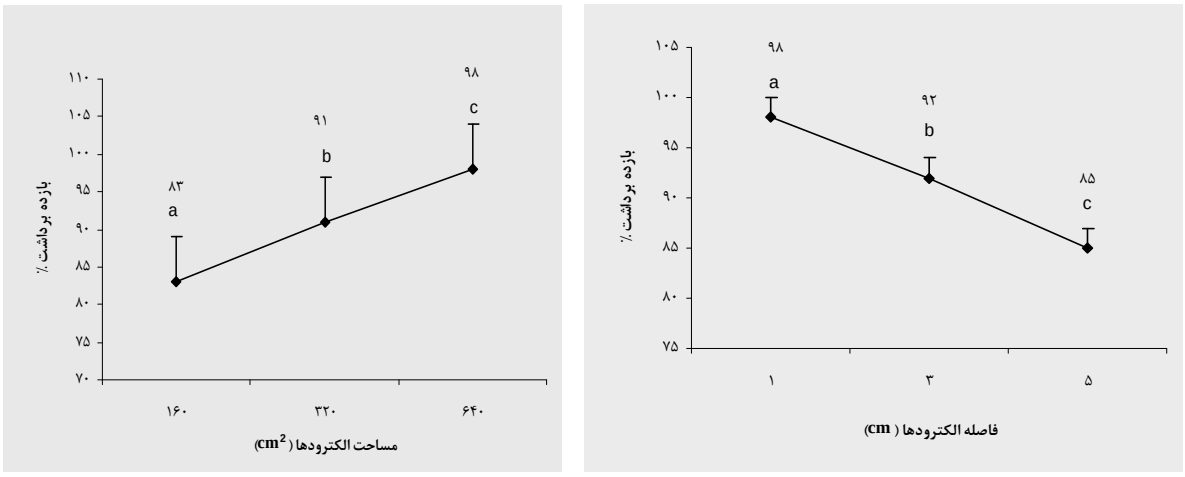
یعنی هر چه اختلاف ولتاژ بوجود آمده بین الکترودها زیادتر بود کاتیون‌های بیشتری وارد محیط کشت شده و عمل انعقاد با بازده بیشتری صورت گرفت.

رابطه بین شدت جریان مستقیم و بازده برداشت در شکل (۶) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش میزان شدت جریان بازده برداشت نیز بطور معنی‌داری افزایش یافت.



شکل ۶ تاثیر شدت جریان بر بازده برداشت ریزجلبک در سطح احتمال ۰/۰۵ > P.

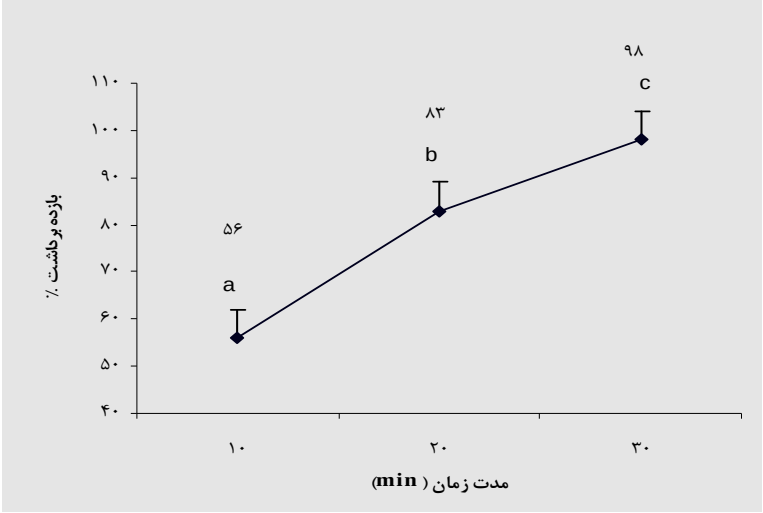
تاثیر فاصله الکترودها و سطح تماس الکترودها بر بازده برداشت در شکل (۷) نشان داده شده است. مشاهده گردید که با افزایش فاصله الکترودها بازده برداشت بطور معنی‌دار (۰/۰۵ > P) کاهش یافت. یعنی هر چه الکترودها نزدیک‌تر به یکدیگر باشند عمل انعقاد با بازده بالاتری انجام می‌پذیرد. از سوی دیگر با افزایش سطح تماس الکترودها میزان بازده برداشت بطور معنی‌دار افزایش یافت. به این ترتیب برای افزایش بازده برداشت می‌توان الکترودها را در فاصله‌های نزدیک به هم و به تعداد زیاد در داخل محلول قرار داد.



(الف) (ب)

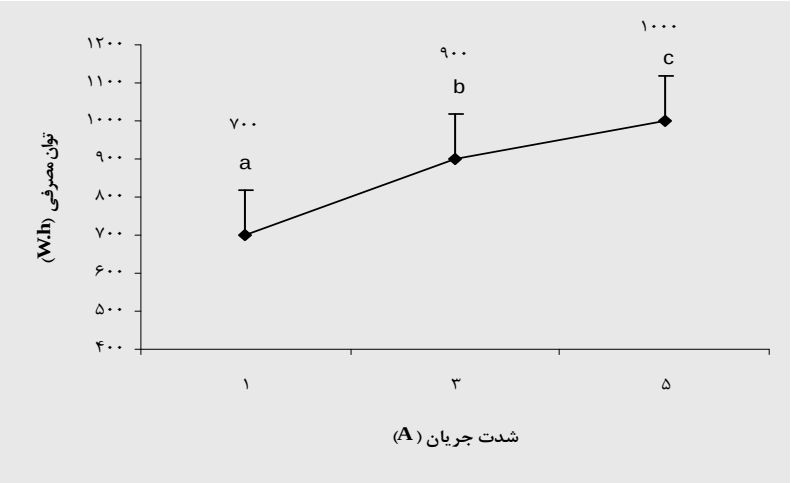
شکل ۷ تاثیر فاصله الکترودها (الف) و مساحت الکترودها (ب) بر میزان بازده برداشت در سطح احتمال ۰/۰۵ > P.

یکی دیگر از پارامترهای مهم موثر در بازده برداشت روش انعقاد الکتریکی عبارت از مدت زمان اعمال جریان الکتریسیته به الکترودها می‌باشد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که با گذشت زمان بازده برداشت به‌صورت معنی‌دار افزایش می‌یابد بطوری‌که پس از سپری شدن ۳۰ دقیقه بازده برداشت به ۹۸ درصد رسید (شکل ۸). مدت زمان بدست آمده برای شدت جریان ۵ آمپر و سطح تماس cm^2 ۶۴۰ می‌باشد. بدیهی است که با افزایش شدت جریان و سطح تماس الکترودها مدت زمان مورد نیاز برای رسیدن به بازده ۹۸ درصد به مراتب کاهش پیدا خواهد کرد.



شکل ۸ تاثیر مدت زمان بر بازده برداشت در سطح احتمال ۰/۰۵ > P.

میزان توان مصرفی روش انعقاد الکتریکی برای برداشت ۱ کیلوگرم ماده خشک در شدت جریان‌های مختلف نشان در شکل (۹) داده شده است. مشاهده شد که با افزایش شدت جریان میزان توان مصرفی بطور معنی‌دار افزایش یافت. حداکثر توان مصرفی در شدت جریان ۵ آمپر برابر با ۱۰۰۰ وات ساعت برای برداشت ۱ کیلوگرم ماده خشک بدست آمد.



شکل ۹ تاثیر شدت جریان بر توان مصرفی در سطح احتمال ۰/۰۵ > P.

در روش انعقاد شیمیایی با استفاده از نمک‌های آلومینیوم حداکثر بازده ۹۰٪ گزارش شده است [۱۶]. بازده برداشت با استفاده از سانتریفیوژها نیز در حدود ۹۰ درصد می‌باشد [۱۶]. درصورتی که بازده برداشت با استفاده از جریان الکتریسیته در مدت کوتاهی تا ۹۸ درصد نیز قابل افزایش است. میزان توان مصرفی اندازه‌گیری شده با استفاده از سانتریفوژ برای تولید ۱ کیلوگرم ماده خشک برابر با kWh/kg ۴/۷۶ است [۱۴] ولی این مقدار در روش انعقاد الکتریکی برابر با kWh/kg ۱ می‌باشد. بنابراین با استفاده از روش انعقاد الکتریکی توان مصرفی به میزان پنج برابر کمتر از روش سانتریفوژ است.

علاوه بر مزایای ذکر شده برای روش انعقاد الکتریکی، پس از استفاده از این روش محیط کشت بدون تغییر باقی مانده و قابل استفاده مجدد است در صورتی‌که در روش سانتریفیوژ، املاح موجود در محیط کشت به همراه ریزجلبک از محیط کشت جدا می‌شوند و به این ترتیب نیاز به آماده سازی مجدد محیط کشت می‌باشد که این امر باعث افزایش هزینه تولید ریزجلبک می‌گردد.

۴- نتیجه‌گیری

۱- در این مقاله روش جدیدی به نام انعقاد الکتریکی برای جداسازی ریزجلبک از محیط کشت معرفی شده و عوامل موثر در افزایش بازده این روش مورد بررسی قرار گرفت همچنین دستگاهی مناسب و مخصوص برداشت ریزجلبک طراحی و ساخته شد تا توانایی ایجاد شرایط مختلف را داشته باشد.

۲- در سرعت همزنی پایین (۱۰۰ دور در دقیقه)، بازده برداشت بالاتری (۹۸٪) بدست آمد. روش همزنی مکانیکی عملکرد بهتری نسبت به دو روش همزنی هیدرولیکی و همزنی پنوماتیکی دارا بود.

۳- هرچه شدت جریان اعمالی به الکترودها بالاتر بود (۵ A)، بازده برداشت نیز بیشتر بوده (۹۸٪) و مدت زمان کمتری برای برداشت مورد نیاز بود. همچنین هرچه فاصله الکترودها کمتر باشد بازده برداشت افزایش پیدا خواهد نمود. با افزایش سطح تماس الکترودها عملکرد بهتری در جداسازی ریزجلبک مشاهده گردید.

۴- مقایسه بازده برداشت روش انعقاد الکتریکی با روش‌های انعقاد شیمیایی و سانتریفوژ نشان داد که بازده روش انعقاد الکتریکی که ۹۸ درصد است به مراتب بالاتر از روش‌های سانتریفوژ و شیمیایی که ۹۲ درصد هستند، می‌باشد. به این ترتیب با استفاده از روش انعقاد الکتریکی در برداشت انبوه ریزجلبک علاوه بر بازده برداشت بالا می‌توان از مزایای عدم آسیب به محیط کشت و هزینه پایین نیز بهره جست.

۵- تشکر و قدردانی

حمایت مالی کار تحقیقی حاضر توسط شرکت بهینه‌سازی مصرف سوخت تحت نظر شرکت ملی نفت ایران انجام شده است که بدینوسیله تشکر و قدردانی می‌شود.

۶- منابع

[1] Josserand, H. (2008). Crop Prospects and Food Situation, No. 2, April 2008. Global Information and Early Warning Service – Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy. <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/010/ai465e/ai465e00.pdf>.

[2] Deshpande, A. (2005). Optimization of Growth of Dunaliella Salina for Carotenoid production. Thesis of M.S. faculty of the school of engineering. University of Southern California.

[3] Spolaore P, Joannis-Cassan C, Duran E, Isambert A. (2006). Commercial applications of microalgae. J Biosci Bioeng 2006;101:87–96.

[4] Banerjee, A., Sharma, R., Chisti, Y., Banerjee, UC. (2005). Botryococcus braunii: a renewable source of hydrocarbons and other chemicals. Crit Rev Biotechnol. 22:245–79.

[5] Metzger P, Largeau C. (2005). Botryococcus braunii: a rich source for hydrocarbons and related ether lipids. Appl Microbiol Biotechnol 2005;66:486–96.

[6] Guschina IA, Harwood JL. (2006). Lipids and lipid metabolism in eukaryotic algae. Prog Lipid Res 2006;45:160–86.

[7] Guil-Guerrero JL, Navarro-Juarez R, Lopez-Martinez JC, Campra-Madrid P, Rebolloso-Fuentes MM. (2004). Functional properties of the biomass of three microalgal species. J Food Eng 2004;65:511–7.

[8] Papanikolaou S, Chevalot I, Komaitis M, Marc I, Aggelis G. (2002). Single cell oil production by Yarrowia lipolytica growing on an industrial derivative of animal fat in batch cultures. Appl Microbiol Biotechnol 2002;58:308–12.

[9] Curtain, C.C.,Snook, H. (1983). Method for Harvesting Algae. US Patent No. 511135.

[10] Browitzka, M.A., Browitzka, L.J. (1988). Dunaliella. Microalgal Biotechnology. Cambridge University Press, PP. 27 – 58.

[11] Riahi, H. (2008). Phycology. Alzahra University Publication. P: 256.

[12] Uduman, N., Qi, Y., Danquah, M.K. (2010). Dewatering of Microalgal Cultures: A Major bottle- Neck to Algae Based Fuels.Journal of renewable and sustainable energy2. 012701-15

[13] Knuckey R, Brown M, Robert R, Frampton D. (2006) Production of microalgal concentrates by flocculation and their assessment as aquaculture feeds. Aquacul Engin 35:300–313.

[14] Anonymous (2011b). http://www.algae.wur.nl/UK/projects/Harvesting+of+microalgae

[15] Harith, T.H., Yuosoff, F.M., Mohemed, M.S., Mohemed Din M.S., Ariff, A.B. (2009). Effect of Different Flocculants on the Flocculation Performance of Microalgae,

Chaetoceros Calcitrans, Cells. African Journal of Biotechnology Vol. 8 (21), pp. 5971-5978.
[16] Papazi, A. Makridis, P. Divanach, P. (2010) Harvesting Chlorella minutissima using cell coagulants. 22: 349-355.
[17] Faiqun Ni'am, M, Othman, F, Sohaili, J, Fauzia, Z. (2006). Combined Magnetic Field and Electrocoagulation Process for Suspended Solid Removal from Waste Water. 1st international congress on natural resource engineering and technology. 24-25 July. Putrajaya, Malaysia.
[18] Phalakornkule, C, Polgumhang, S, Tongdaung, W. (2009). Performance of an Electrocoagulation Process in Treating Direct Dye: Batch and Continious Upflow Process.

Investigation of effective Parameters on Electroflocculation in microalgae harvesting from broth for food product purposes

Zenouzi, A. [1], Hejazi, M. A. [2], Ghobadian, B. [3*]

1. Ph.D student - Department of Mechanics of Agricultural Machinery. Agricultural Faculty, Tarbiat Modares University(TMU), Tehran, Iran.
2. Assistant professor, Agricultural Biotechnology Research Center of North west and West of Iran.
3. Associate professor, Department of Mechanics of Agricultural Machinery. Agricultural Faculty, Tarbiat Modares University (TMU), Tehran, Iran.

(Received: 90/5/10 Accepted: 91/7/22)

One of the problems existing in microalgae production process for the food products is the lack of suitable method for harvesting the microalgae from broth. Nowadays, centrifugation is the only industrial method for microalgae harvesting and its harvesting efficiency is approximately 92%, but the cost of centrifugation is high. In this paper, a new method called electroflocculation was innovated for separation of microalgae from broth and effective parameters in increasing the efficiency of this method were investigated. For achieving this goal, first a special setup which was suitable for microalgae harvesting was designed and fabricated to simulate several harvesting parameters. Then using the designed setup, several parameters such as the mixing type, mixing intensity, current rate, distance and contact area of electrodes, time and power consumption were measured and compared. Results showed that in electroflocculation method the mechanical mixing with 100 rpm intensity and current rate of 5 A has the efficiency of 98%. One cm electrode gap and 640 cm^2 contact area were suitable and during 30 minutes the harvesting efficiency of 98% was achieved. The power consumption for harvesting of 1 kg microalgae was 1 kW.h for electroflocculation method which is five times less than typical centrifugation.

Keywords: Microalgae, Electroflocculation, Electrode.

* Corresponding Author Email_Address: ghobadib@modares.ac.ir