"مقاله پژوهشی"

بررسی تاثیر روش لخته‌سازی با استفاده از کلرید آلومینیوم ($AlCl_3$) بر راندمان برداشت، ضریب تغلیظ و رنگدانه‌های ریزجلبک *Dunaliella salina*

زهرا امینی خوئی[1]*، اشکان اژدری[1]، الناز عرفانی فر[1]، قاسم رحیمی قره میرشاملو[1]

۱- مرکز تحقیقات شیلاتی آبهای دور چابهار، موسسه تحقیقات علوم شیلاتی کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، چابهار، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۲/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۶/۱۴

چکیده

برداشت سلول‌های ریزجلبک از محیط کشت رقیق اطراف آنها فرآیندی چالش برانگیز و پرهزینه است که در حدود ۲۰-۳۰ درصد از هزینه‌های کل تولید را به خود اختصاص می‌دهد. بنابراین، یافتن روش مناسب جهت برداشت سویه‌های کاندید تجاری واجد اهمیت است. در مطالعه حاضر تاثیر استفاده از مقادیر مختلف (۰/۱، ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷ و ۱ گرم در لیتر) کلرید آلومینیوم ($AlCl_3$) به عنوان لخته‌ساز بر راندمان برداشت و رنگدانه‌های ریزجلبک *Dunaliella salina* مورد بررسی قرارگرفت. در ابتدا، جدایه بومی ریزجلبک *D. salina* از کشندان پشت سدی لیپار چابهار در شرایط آزمایشگاهی پرورش یافت تا به حداکثر میزان تولید در فاز نمایی رشد رسید. سپس مقادیر مختلف از لخته‌ساز به محیط کشت افزوده شد. در پایان، میزان کارایی AlCl3 در فرآیند برداشت و همچنین تاثیر آن بر ترکیب رنگدانه های زی توده بررسی‌شد. امکان استفاده مجدد از محیط کشت لخته شده نیز مورد بررسی قرارگرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش مصرف کلرید آلومینیوم از ۰/۱ گرم تا ۱ گرم در لیتر راندمان لخته‌سازی به طور معنی‌داری افزایش یافت. این در حالی است که مصرف بیش از ۰/۷ گرم در لیتر از لخته‌ساز کلرید آلومینیوم سبب کاهش معنی‌دار در محتوی رنگدانه‌های کلروفیل، کارتنوئید و بتاکاروتن زی توده برداشتی شد ($p<۰/۰۵$). بنابراین برای حفظ کیفیت زی توده برداشت‌شده استفاده از ۰/۷ گرم در لیتر کلرید آلومینیوم با راندمان ۷۵ درصد برای برداشت ریز جلبک *D. salina* پیشنهاد می‌گردد.

کلمات کلیدی: ریزجلبک، *Dunaliella salina* ، لخته‌سازی، راندمان برداشت، بتاکاروتن

.

* عهده‌دار مکاتبات: zamini.41@gmail.com

[Downloaded from aqudev.lahijan.iau.ir on 2026-11-06]

[DOR: 20.1001.1.23223545.1402.17.3.1.4]

[DOI: 10.22034/17.3.1]

مقدمه

از دیدگاه تولید تجاری ریزجلبک *Dunaliella salina* به دلیل داشتن رنگدانه‌های کاروتنوئید و به طور ویژه بتاکاروتن مورد توجه بازارهای جهانی است. ارزش تجاری کاروتنوئیدها در سال ۲۰۱۹، در بازار جهانی در حدود ۱/۸ بیلیون دلار پیش‌بینی شده است (Widowati *et al*., 2017). از ویژگی‌های زیستی ممتاز این ریزجلبک تحمل زیاد شوری (تا ۳۰۰ قسمت در هزار) است که این خصوصیت باعث شده است کشت تک گونه‌ای و عاری از آلودگی آن در مقیاس انبوه امکان‌پذیر باشد (Morowvat and Ghasemi, 2016). تولید انبوه این ریزجلبک در مناطقی با آب و هوای گرم، با تابش نورخورشید بالا و آب بسیار شور با موفقیت بیشتری روبه‌رو است (Hejazi *et al*., 2004). این ریزجلبک به دلیل دارا بودن اسیدهای چرب غیر-اشباع، رنگدانه‌های ارزشمند و گلیسرول قابل استفاده در صنایع مختلف به ویژه صنایع دارویی و آرایشی و بهداشتی می باشد. اما یک چالش در مسیر تولید انبوه ریزجلبک‌ها به ویژه سویه های ریزسایز مصرف بالای انرژی و هزینه‌های زیاد مربوط به جمع آوری و برداشت زی توده کم از محیط کشت اطرافشان است (Buelna *et al*., 1990; Kwon *et al*., 2014). به طور کلی غلظت زی‌توده ریزجلبک‌ها بسیار کم و به طور متوسط در محدوده ۰/۱ تا ۳ گرم در لیتر است (شعبانزاد و همکاران، ۱۳۹۸). به همین خاطر جمع آوری خمیر غلیظ از سوسپانسیون رقیق آنها کاری بسیار دشوار با مصرف انرژی و هزینه بالا محسوب می‌شود (Grima *et al*., 2003). برای غلبه بر این چالش و افزایش راندمان برداشت زی‌توده، روش‌های مختلفی پیشنهاد و به کار گرفته شده است. این روش‌ها شامل استفاده از[2] سانتریفیوژ، فیلتراسیون[3]، ته نشینی[4]، معلق سازی[5] و انعقاد یا لخته سازی[6] می‌باشند (Show *et al*., 2013). از بین روش‌های مختلف برداشت، روش لخته سازی یا انعقاد عملیاتی رایج و نسبتاً کارآمد برای بازیابی زی‌توده به حساب می‌آید که امکان جمع آوری و برداشت خمیر نسبتاً غلیظ را فراهم می‌کند (Goswami *et al*., 2019). روش لخته سازی با استفاده از لخته‌سازهای شیمیایی مختلف مانند نمک فلزهای معدنی مانند آهن، آلومینیوم و منیزیم معمولاً در مقیاس‌های بالا و برای طیف گسترده‌ای از گونه‌های ریزجلبک مورد استفاده قرارگرفته است (Grima *et al*., 2003; Mixson *et al*., 2014). اثربخشی این نمک‌های چند ظرفیتی به قدرت پیوند یونی[7] و حلالیت آنها بستگی دارد و به طور کلی نمک های با قدرت پیوند یونی بیشتر و حلالیت کمتر انعقاد سریع‌تر ایجاد می‌کنند (Barros *et al*., 2015). کاتیون‌های سولفات آلومینیوم، کلرید آهن و سولفات آهن در pH مطلوب باعث کاهش بارهای منفی سطح سلول‌های ریزجلبک و تشکیل کمپلکس‌های پلی هیدروکسی شده که منجر به تجمع توده سلولی جامد و انعقاد سلول‌های ریزجلبک می‌شود (Chen *et al*., 2011; Vandamme *et al*., 2013). فرض بر این است که یک رابطه مستقیم خطی و استوکیومتری بین تعداد سلول‌های ریزجلبک و مقدار لخته‌ساز مورد نیاز بدون توجه به غلظت جلبک وجود دارد (گنجیان خناری و همکارن، ۱۳۹۱). بنابراین

[2] Centrifugation
[3] Filtration
[4] Settlement
[5] Flotation
[6] Coagulation or Flocculation
[7] Electronegativity

[Downloaded from aqudev.lahijan.iau.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.23223545.1402.17.3.1.4]
[DOI: 10.22034/17.3.1]

هزینه به ازای هر تن جلبک تابعی از هزینه لخته ساز است. استفاده از این روش در عین حال چالش هایی نیز دارد که از جمله آن احتمال بر جای ماندن نمک‌های فلزی در زی توده تولید شده است (Henderson *et al.*, 2010).

با توجه به چالش جدی فرآیند برداشت ریزجلبک *D. salina* که مسئله مهمی در مسیر گسترش تولید انبوه این ریزجلبک است، لذا در این مطالعه روش استفاده از نمک کلرید آلومینیوم به عنوان لخته ساز بر راندمان برداشت و ترکیب رنگدانه های کلروفیل، کارتنوئید کل و بتاکاروتن ریزجلبک *D. salina* مورد بررسی قرارگرفت. همچنین امکان استفاده مجدد از محیط کشت لخته شده برای کشت‌های مجدد ریزجلبک نیز مورد بررسی قرارگرفت.

مواد و روش‌ها

کشت سویه بومی ریز جلبک *D. salina*

در این تحقیق سویه بومی ریزجلبک *D. salina* که در مطالعات پیشین (امینی خوئی و همکاران، ۱۴۰۱) از کشندان پشت سدی لیپار (چابهار) جداسازی، خالص سازی و شناسایی مولکولی شده و با کد (Accession number: MZ831861.1) در سایت NCBI ثبت شده است مورد استفاده قرارگرفت. نگهداری و کشت و پرورش سویه مورد آزمایش در آزمایشگاه جلبک شناسی مرکز تحقیقات شیلاتی آب های دور چابهار صورت گرفت. محیط کشت جونسون[8] اصلاح شده با کمی تغییرات برای کشت ریزجلبک *D. salina* استفاده شد. مواد شیمیایی محیط کشت شامل ماکروالمنت‌ها مانند KNO_3، KH_2PO_4، $NaHCO_3$ و $FeC1_3.6H_2O$ و میکروالمنت‌ها نظیر $ZnCl_2$، $MnCI2_2.4H_2O$، $CuC_{12}.2H_2O$، $CoCl_2.6H_20$ و$NH_46Mo_7O_24{\cdot}4H_2O$ از شرکت (SIGMA Ltd) تهیه و مورد استفاده قرارگرفت. pH محیط کشت در حدود ۷/۵ تنظیم شد (Ben-Amotz, 1982). محیط کشت ساخته‌شده در دستگاه اتوکلاو ضدعفونی و در یخچال (۴ درجه سانتی‌گراد) نگهداری شد. کشت ریزجلبک به روش دسته ای یا دوره‌ای (Batch culture) انجام شد. شرایط محیطی اتاق کشت در شدت نور ۳۳۰ میکرومول بر متر مربع بر ثانیه و دمای ۲ ± ۲۹ درجه سانتی‌گراد و شوری ۹۰ گرم در لیتر تنظیم شد (اربابی و همکاران، ۱۳۹۹).

آماده سازی غلظت های مختلف ماده لخته ساز کلرید آلومینیوم

نمونه‌های ریزجلبک در استوانه مدرج شیشه ای (یک لیتری) با غلظت کاملا مشابه و همگن (۰/۹ گرم در لیتر، یا $۰/۸ \times ۱۰^{۶}$ سلول در میلی لیتر) توزیع شدند. به منظور اندازه گیری راندمان برداشت میزان غلظت اولیه ریزجلبک های معلق در استوانه مدرج شیشه ای با سنجش جذب نوری[9] آنها در طول موج ۶۸۰ نانومتر خوانده شد. سپس غلظت های مختلف کلرید آلومینیوم (۰/۱، ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷ و ۱ گرم در لیتر ، A1, A2, A3, A4, A5) به محیط کشت ریزجلبک‌ها افزوده شد. سپس محیط کشت کاملا مخلوط و اجازه داده شد در دمای اتاق به صورت ثابت باقی بمانند. برای تعیین راندمان برداشت، پس از گذشت هفت ساعت از زمان انعقاد و ته‌نشینی نمونه‌برداری از قسمت فوقانی مزورهای شیشه‌ای انجام شده و میزان جذب نوری آنها

[8] Johnson

[9] Optical Density

[Downloaded from aqudev.lahijan.iau.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.23223545.1402.17.3.1.4]
[DOI: 10.22034/17.3.1]

در طول موج ۶۸۰ نانومتر مجددا قرائت شد (Teixeira *et al.*, 2012).

به منظور تعیین ضریب تغلیظ نسبت جلبک ترسیب شده با غلظت اولیه در حالت شناور اندازه گیری شد (Wu *et al.*, 2012). میزان راندمان برداشت و ضریب تغلیظ ریزجلبک مطابق رابطه‌های ۱ و ۲ در ذیل محاسبه شدند.

$$R = [(OD_i - OD_t)/ OD_i] \times 100 \quad (۱)$$

R: درصد راندمان برداشت ریز جلبک. OD_i : قبل از تغییرpH. ODt: بعد از تغییرpH

$$CF = ODiVi - ODtVt /ODiVf \quad (۲)$$

CF: ضریب تغلیظ: OD_i : جذب نوری ریزجلبک قبل از افزودن کلرید آلومینیوم; ODt: جذب نوری ریزجلبک بعد از افزودن کلرید آلومینیوم

که در آن ODi و Vi (میلی لیتر) جذب نوری اولیه در ۶۸۰ نانومتر و حجم جلبک شناور (قبل از افزودن لخته ساز)، ODt: جذب نوری نمونه بعد از افزودن لخته ساز است. Vt و Vf به ترتیب حجم فاز آبی و حجم فاز محیط کشت جلبک ته نشین شده هستند (Pérez *et al.*, 2017).

امکان سنجی استفاده مجدد از محیط کشت لخته شده

پس از برداشت سلول‌های ریزجلبک از محیط کشت مایع، امکان یازیابی و استفاده مجدد از آب، محیط کشت و سلول‌های باقی مانده از آنها در کشت‌های تازه بررسی شد. بدین منظوز فاز بالایی محیط کشت که و و بی‌رنگ شفاف بود مجددا برای کشت های تازه مورد استفاد. بنابراین محیط کشت برای استفاده مجدد در محیط رشد تازه مورد استفاده قرار گرفت.

-سنجش محتوی رنگدانه‌های کلروفیل a و b، کارتنوئید کل و بتاکاروتن

به منظور استخراج و سنجش محتوی رنگدانه‌های کلروفیل a و b، کارتنوئید کل و بتاکاروتن ریزجلبک مورد آزمایش *Dunaliella salina*، در ابتدا ۵ میلی لیتر از سوسپانسیون جلبک در بالاترین فاز نمایی رشد (روزهشتم تا چهاردهم در تیمارهای مختلف)، برداشت شده و به مدت ۱۰ دقیقه با دور ۵۰۰۰ سانتریفیوژ گردید. مایع روی آن خارج و دور ریخته شد و به رسوب موجود در ته فالکون ۵ میلی‌لیتر استون ۸۰٪ اضافه و به خوبی مخلوط و همگن شد و به مدت یک شبانه روز در دمای ۴ درجه یخچال در تاریکی نگهداری شد. سپس به مدت ۱۰ دقیقه با دور ۵۰۰۰ سانتریفیوژ گردید (Mota *et al.*, 2015). محتویات کلروفیل a، کلروفیل b و کارتنوئید کل در مایع رویی با اندازه گیری میزان جذب در طول موج ۴۴۰، ۶۴۶ و ۶۶۳ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر (Evolution™ 300 UV-Vis) تعیین گردید. غلظت‌ها با استفاده از معادلات زیر محاسبه شد (Lichtenthaler and Buschmann, 2001).

$$\text{Chlorophyll a } (\mu g/\ mL) = (11.24\ A\ 660) - (2.04\ A\ 645)$$

$$\text{Chlorophyll b } (\mu g/\ mL) = (20.13A\ 645) - (4.19\ A\ 660)$$

$$\text{Carotenoids } (\mu g/\ mL) = 1000 \times (A\ 470 - 1.90\ Chl\ a - 63.14\ Chl\ b) / 214$$

استخراج و سنجش بتا کاروتن به روش زیر اندازه گیری شد (Zhu *et al.*, 2018). یک میلی لیتر از کشت سلولی در فاز نمایی برداشت شد به مدت ۵ دقیقه در دور ۵۰۰۰ g سانتریفوژ شد. محلول رویی آن دور ریخته شده و ۳ میلی لیتر دودکان و ۹ میلی لیتر متانول به آن افزوده شده و مجددا به مدت ۵ دقیقه در دور

[Downloaded from aqudev.lahijan.iau.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.23223545.1402.17.3.1.4]
[DOI: 10.22034/17.3.1]

۵۰۰۰ g سانتریفوژ شد. محلول بالایی که حاوی بتاکاروتن است در دو طول موج ۴۵۳ و ۶۶۵ نانومتر با اسپکتروفتومتر قرائت و با معادله ذیل محاسبه شد.

$$\beta\text{-carotene } (\mu g/\ mL) = (A453 - A665/3.91) \times 3.657 \times 3\times X$$

۳ میلی لیتر دودکان اضافه شده برای استخراج، و X ضریب رقت برای اندازه گیری جذب در اسپکتروفتومتر است (Zhu *et al*., 2018).

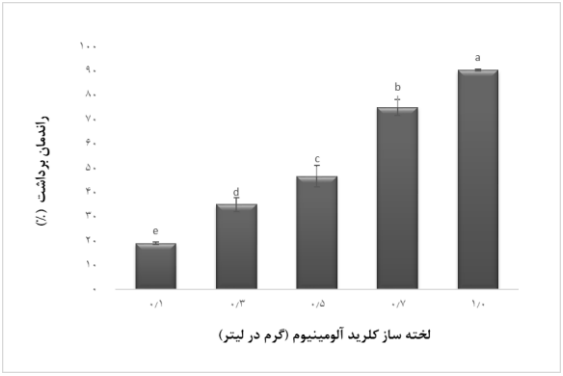
تحلیل آماری

تجزیه و تحلیل داده ها با استفاده از نرم افزار SPSS ویرایش ۱۶ و ترسیم نمودارها در نرم افزار اکسل ویرایش ۲۰۱۰ انجام شد. برای مقایسه بین تیمارها از آزمون واریانس یک طرفه (ANOVA) و جهت مقایسه میانگین ها از آزمون دانکن استفاده شد. تفاوت معنی دار داده های به دست آمده در سطح احتمال ۵ درصد بررسی گردید.

نتایج

تاثیر سطوح مختلف لخته ساز کلرید آلومینیوم بر راندمان برداشت

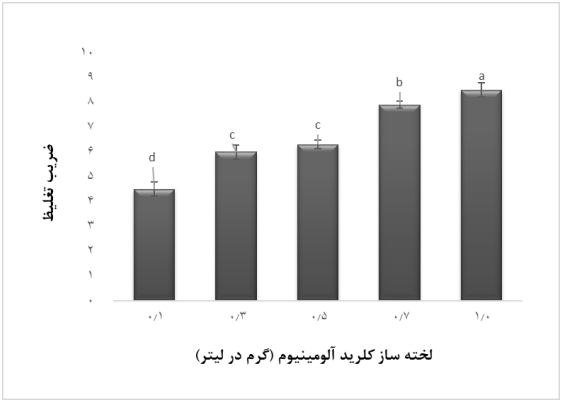
راندمان برداشت زی‌توده یا همان لخته‌سازی ریزجلبک *D. salina* در تیمارهای مختلف کلرید آلومینیوم در شکل ۱ نشان داده شده است. آنالیز داده های این تحقیق نشان داد که ماده کلرید آلومینیوم تاثیر معنی داری بر فرآیند برداشت از طریق لخته شدن زی-توده داشته است. با افزودن میزان کلرید آلومینیوم به سوسپانسیون ریزجلبک *D. salina* از ۰/۱ تا ۱ گرم بر لیتر میزان انعقاد و لخته‌سازی افزایش معنی‌داری داشته است (p<۰/۰۵). راندمان برداشت به صورت صعودی از ٪ ۱۹ در تیمار A1 تا ۳۵، ۴۶، ۷۵ و ٪۹۰ به ترتیب در تیمار A2, A3, A4 و A5 افزایش یافت.



شکل ۱: درصد راندمان برداشت در سطوح مختلف لخته‌کننده

تاثیر سطوح مختلف لخته‌ساز کلرید آلومینیوم بر ضریب تغلیظ

یکی دیگر از شاخص‌های سنجش میزان اثر بخشی مواد لخته ساز برای برداشت، ضریب تغلیظ است که با تقسیم مقدار ریزجلبک تغلیظ‌شده پس از افزودن لخته ساز به غلظت اولیه آن در مرحله شناوری به دست آمد. در شکل ۲، ضریب تغلیظ ریزجلبک در تیمارهای مختلف کلرید آلومینیوم با یکدیگر مقایسه شده است. آنالیز داده ها نشان داد که ضریب تغلیظ در تیمارهای A1 تا A5 از ۴/۵ تا ۶، ۶/۳، ۷/۹ و ۸/۵ متغیر بوده و تفاوت معنی‌داری در تیمارهای مختلف مشاهده شد (p<۰/۰۵).



شکل ۲: ضریب تغلیظ در سطوح مختلف لخته‌کننده

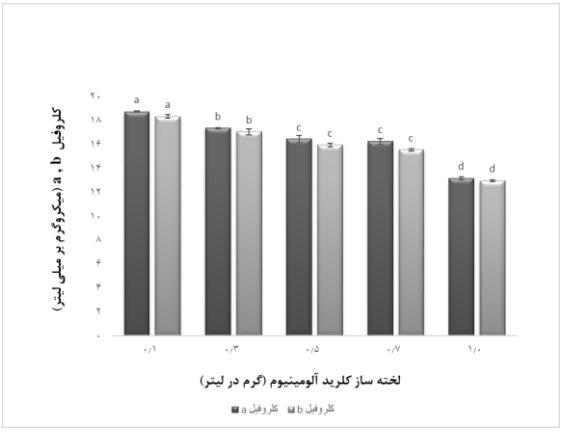
[Downloaded from aqudev.lahijan.iau.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.23223545.1402.17.3.1.4]
[DOI: 10.22034/17.3.1]

استفاده مجدد از محیط کشت و سلول‌های لخته شده برای تلقیح جدید

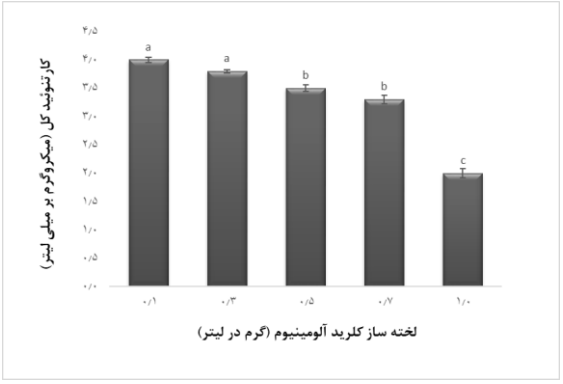
امکان استفاده مجدد از محیط کشت و سلول‌های لخته شده برای تلقیح جدید مورد بررسی قرارگرفت. نتایج نشان داد که پس از تنظیم pH به حالت اولیه، استفاده مجدد از محیط کشت در تمام تیمارهای مورد آزمایش A1 تا A5 برای کشت جدید امکان‌پذیر است و میزان رشد ریزجلبک *D. salina* در محیط بازیافت شده تفاوت معنی‌داری با محیط کشت تازه نشان نداد ($p>۰/۰۵$). همچنین از سلول‌های ریزجلبک که ترسیب شده و در فاز پایینی وارد شدند برای استفاده مجدد و تلقیح به محیط کشت تازه استفاده شد که مشاهدات میکروسکوپی نشان داد این سلول‌ها تا حدود زیادی فعالیت زیستی خود را از دست داده و قابلیت استفاده مجدد برای تلقیح به محیط کشت جدید را از دست دادند.

محتوی کلروفیل، کاروتنوئید کل و بتاکاروتن زی‌توده لخته‌شده ریزجلبک *D. salina*

در مرحله نهایی آزمایشات، تاثیر استفاده از لخته ساز شیمیایی کلرید آلومینیوم بر محتوی کلروفیل، کاروتنوئید و بتاکاروتن ریزجلبک برداشت شده *D. salina* مورد سنجش قرارگرفت (شکل‌های ۳ تا ۵). آنالیز داده‌ها نشان داد که با افزایش مقدار کلرید آلومینیوم از ۰/۱ گرم در لیتر در تیمار A1 تا ۱ گرم در لیتر در تیمار A5 محتوی کلروفیل a از ۱۸/۸ تا ۱۳/۲ میکروگرم بر میلی لیتر کاهش یافت. کلروفیل b نیز روند مشابه داشته و افزایش کلرید آلومینیوم در مقادیر بالای ۰/۷گرم در لیتر باعث کاهش معنی دار تا ۱۳ میکروگرم در میلی‌لیتر شد. میزان کارتنوئید کل زی-توده لخته شده نیز تحت تاثیر ماده لخته کننده تغییرکرد به طوری‌که میزان آن در تیمار A1 تا A5 به ترتیب از ۴، ۳/۸، ۳/۵، ۳. تا ۲ میکروگرم در میلی‌لیتر کاهش یافت. نتایج آنالیز و اندازه‌گیری بتاکاروتن زی‌توده لخته شده نیز نشان داد که کلرید آلومینیوم تأثیر معنی-داری بر میزان و کیفیت رنگدانه بتاکاروتن داشته است ($p<۰/۰۵$). بالاترین میزان رنگدانه بتاکاروتن در تیمار A1 به میزان ۰/۳۲ میکروگرم بر میلی لیتر و کمترین آن در غلظت بالای کلریدآلومینیوم در تیمار A5 به میزان ۰/۰۹میکروگرم بر میلی لیتر به دست آمد ($p<۰/۰۵$).

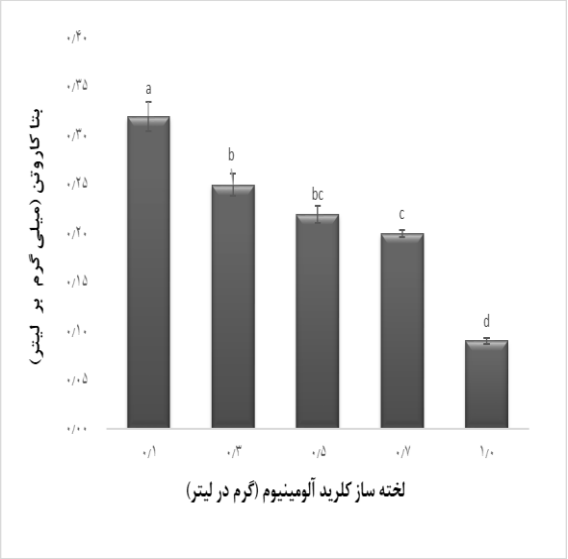


شکل ۳: محتوی کلروفیل a, b در سطوح مختلف لخته‌کننده



شکل ۴: محتوی کارتنوئید کل در سطوح مختلف لخته‌کننده

[Downloaded from aqudev.lahijan.iau.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.23223545.1402.17.3.1.4]
[DOI: 10.22034/17.3.1]



شکل ۵: محتوی بتاکاروتن در سطوح مختلف لخته کننده

بحث

پس از طی دوره رشد ریزجلبک‌ها و رسیدن به حداکثر زی‌توده نوبت به مرحله برداشت و تغلیظ زی-توده آن برای خمیر غلیظ آغاز می‌گردد. این مرحله با چالش جدی در مصرف انرژی زیاد و هزینه‌های بالا همراه است و یکی از دلایل عدم توسعه سایت‌های تولید تجاری ریزجلبک‌ها هزینه بر بودن فرآیند برداشت آنها می باشد. بنابراین یافتن دانش و روشی که حداکثر بهره وری را در این فرآیند ایجاد کند؛ بسیار ضروری است. بنابراین تحقیق حاضر به بررسی میزان کارآیی و راندمان روش لخته‌سازی شیمیایی برای جمع‌آوری و برداشت زی‌توده ریزجلبک *D. Salina* از سوسپانسیون محیط رشد رقیق آن پرداخت. در گام اول تأثیر غلظت‌های مختلف از ۰/۱ تا ۱ گرم بر لیتر از نمک فلزی کلرید آلومینیوم برای آب‌زدایی و برداشت زی‌توده این ریزجلبک مورد بررسی قرارگرفت. نتایج آزمایش نشان داد که با افزودن نمک فلزی کلرید آلومینیوم به محیط کشت، زی‌توده ریزجلبک *D. salina* شروع به انعقاد کرده و لخته‌های جلبک شکل گرفتند. با افزودن غلظت نمک آلومینیوم این روند نیز سرعت بیشتری گرفت به طوری که راندمان برداشت از ٪۱۹ در تیمار ۰/۱گرم در لیتر تا ٪۷۵ و در نهایت ٪۹۰ در تیمار ۰/۷ و ۱ گرم در لیتر افزایش یافت. ضریب تغلیظ نیز در تیمار A1 ۴/۵، در A4، با مصرف ۰/۷ گرم در لیتر نمک آلومینیوم ۷/۹ و در تیمار A5 به میزان ۸/۵ به دست آمد. لخته‌سازی خود به خودی و ترسیب در شرایط معمولی و تا قبل از اضافه کردن لخته ساز در ریزجلبک *D. salina* مورد آزمایش مشاهده نشد. این نتایج نشان می‌دهد که لخته سازکلرید آلومینیوم با غلظت بالاتر از ۰/۷گرم در لیتر کارآیی نسبتاً مناسبی برای آب زدایی و تغلیظ زی‌توده ریزجلبک *D. salina* داشته است. مزیت اصلی فرآیند جداسازی با استفاده از کاتیون‌های فلزی، راندمان بالا و هزینه ها عملیاتی کم، همراه با پردازش ساده و سریع است. ایده استفاده از کاتیون‌های فلزی برای جداسازی جلبک‌ها به تجربه استفاده از آنها برای جداسازی و ترسیب در تصفیه فاضلاب‌ها باز می‌گردد. لخته سازی شیمیایی جلبک‌ها به دلیل خنثی سازی بار و ایجاد پل الکترواستاتیکی بین سلول‌های معلق و عامل لخته‌ساز اتفاق می‌افتد، که منجر به تشکیل لخته و رسوب‌گذاری می‌شود (Gerde *et al.*, 2014). استفاده از نمک‌های کاتیونی به عنوان لخته سازهای شیمیایی برای برداشت ریزجلبک‌های مختلف توسط سایر محققین نیز تأیید شده است (Sanyano *et al.*, 2013). برای مثال نتایج مطالعه Known و همکاران، ۲۰۱۴ نشان داد که استفاده از ۱/۲ گرم در لیتر نمک سولفات آلومینیوم و ۰/۷ گرم در لیتر نمک سولفات آهن راندمان برداشت را در ریزجلبک *Tetraselmis* sp به ترتیب تا ۸۵ و ۹۶ درصد افزایش

[Downloaded from aqudev.lahijan.iau.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.23223545.1402.17.3.1.4]
[DOI: 10.22034/17.3.1]

داده است. Sanyano و همکاران، ۲۰۱۳ نیز دریافتند که لخته سازی بهینه در زی‌توده ریزجلبک *Chlorella* sp. با استفاده از ۱۴۳ میلی گرم در لیتر کلرید آهن در pH برابر ۸/۱ قابل دستیابی است. Gerde و همکاران، ۲۰۱۴ استفاده از ۱۸۰ میلی گرم در لیتر از نمک $Al_2(SO_4)_3$ برای ریزجلبک *Scenedesmus* sp. را مناسب تشخیص دادند. Papazi و همکاران در سال ۲۰۱۰، از نمک‌های آلومینیوم و آهن برای لخته کردن زی‌توده ریزجلبک *Chlorella* sp. استفاده کردند و نتایج آنها نشان داد که نمک آلومینیوم نسبت به آهن عملکرد بهتری داشته است. به طور کلی مقایسه تأثیر آلوم با نمک‌های آهن نشان داده است که از نظر مقدار بهینه مصرف، کیفیت خمیر تغلیظ شده و همچنین کیفیت آب بازیافت شده تیمارهای آلوم وضعیت مناسب‌تری نسبت به نمک‌های آهن داشته است. Vandamme و همکاران، ۲۰۱۵ نشان دادند که نمک منیزیم می‌تواند به طور مؤثر به عنوان یک لخته‌کننده برای برداشت ریزجلبک *Chlorella* sp.استفاده گردد. این محققین دریافتند که لخته‌سازی ریزجلبک‌ها به خصوص به pH کشت حساس است. افزایش pH ممکن است بر بار سلول‌های ریزجلبک تاثیرگذار بوده و منجر به افزایش روند هیدرولیز کاتیون‌های فلزی در سوسپانسیون ریزجلبک گردد.

در بخش دوم این تحقیق پس از برداشت زی‌توده ترکیبات رنگدانه‌های زی‌توده برداشت‌شده شامل کلروفیل a , b، کارتنوئید کل و بتاکاروتن در غلظت های ۰/۱ تا ۱ گرم در لیتر کلرید آلومینیوم مقایسه شد. نتایج آنالیز داده‌ها نشان داد که مصرف لخته ساز رنگدانه‌های زی‌توده را تحت تأثیر قرار داده است، به طوری که با افزایش مصرف غلظت کلرید آلومینیوم میزان کلروفیل، کارتنوئید کل و بتاکاروتن زی‌توده کاهش یافته است. بر اساس اطلاعات و مرور منابع پیشین تاکنون مطالعه اختصاصی در مورد تأثیر لخته ساز بر رنگدانه های زی‌توده ریزجلبک‌های مورد آزمایش گزارش نشده است. به نظر می‌رسد با توجه به حساسیت بسیار زیاد رنگدانه های ریزجلبک‌ها و ساختار شیمیایی آنها که معمولا به صورت ایزومرهای ناپایدار سیس در کارتنوئیدها علت احتمالی می تواند مربوط به واکنش شیمیایی اکسایشی فلز آلومینیوم با ایزومرهای حساس و ناپایدار در زی‌توده تولید شده باشد. اما نکته قابل توجه آن است که هر روش برداشت اختصاصات فنی و اقتصادی ویژه خود را دارد و معمولا بر اساس محصول هدف روش برداشت انتخاب می‌گردد. بر اساس تتایج این تحقیق در مواردی که تولید رنگدانه‌های ریزجلبک ها مورد نظر است بایستی در مصرف لخته ساز ها دقت بیشتری صورت گیرد. البته ملاحظات اقتصادی تولید نیز بایستی به صورت هم‌زمان مورد توجه قرار گیرد. در مجموع به طور همزمان بایستی هم راندمان برداشت و ضریب تغلیظ نسبتا مناسب را در نظرگرفت و از طرفی کیفیت رنگدانه ها با توجه به هدف تولید نیز بایستی در حد قابل قبول حفظ گردد.

بنابراین، براساس داده‌های راندمان برداشت و محتوی رنگدانه های تولید شده این تحقیق به نظر می رسد مصرف ۰/۷گرم در لیتر لخته‌کننده، حداکثر مجاز میزان مصرف کلرید آلومینیوم می باشد زیرا هم راندمان برداشت نسبتا بالایی داشته و در عین حال محتوی رنگدانه های ارزشمند زی توده ریزجلبک *D. salina* تا حدودی قابل قبولی حفظ شده است.

[Downloaded from aqudev.lahijan.iau.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.23223545.1402.17.3.1.4]
[DOI: 10.22034/17.3.1]

سپاسگزاری

در اینجا بر خود لازم می‌دانیم که از زحمات تمام کسانی که ما را در انجام این تحقیق یاری نمودند سپاسگزاری نماییم.

منابع

۱. امینی خوئی، ز.، نادری سامانی، م.، طاهرپناه، س.، رحیمی قره میرشاملو، ق.، ۱۴۰۱. جداسازی، خالص سازی و شناسایی ریختی و مولکولی دو گونه ریزجلبک نمکدوست از کشندان پشت سدی لیپار (سواحل دریای عمان، چابهار). دو فصلنامه علوم آبزی پروری، (۱۰)، ۴۵-۵۵.

۲. اربابی، س.، اکبری، پ. و امینی خوئی، ز.، ۱۳۹۹. بررسی تأثیر روش لخته سازی بر راندمان برداشت زی‌توده و محتوی اسیدهای چرب ریزجلبک *Dunaliella salina*، جداسازی شده از تالاب لیپار، چابهار. مجله علمی شیلات ایران، (۶)، ۱۲۰-۱۰۹.

۳. شعبانزاد، ز.، ایمانپور نمین، ج.، رمضانپور، ز.، ۱۳۹۸. استخراج و بررسی فعالیت ضدباکتری عصاره های اتری و هگزانی ریزجلبک *Chlorella vulgaris* در شرایط آزمایشگاهی بر باکتریهای *Aeromonas hydrophila* و *Micrococcus luteus*. نشریه توسعه آبزی پروری، ۱۳ (۳) ۶۵-۵۵.

۴. گنجیان خناری، ع.، شکوری، م.، قاسم نژاد، م.، گنجیان خناری، ف.، فارابی، و.، ۱۳۹۱. بررسی تاثیر بی کربنات سدیم بر رشد میکروجلبک کلرلا (*Chlorella* sp.) در محیط کشت TMRL . نشریه توسعه آبزی پروری، ۶ (۲)، ۶۵-۵۷.

5. Barros, A.I.; Gonçalves, A.L.; Simões,M.; Pires, J. C. M., 2015. Harvesting techniques applied to microalgae: A review. Renewable and sustainable energy reviews, 41, 1489–1500.
6. Ben Amotz, A., Katz, A., and Avron, M., 1982. Accumulation of beta -carotene in halotolerant algae: purification and characterization of beta -carotene-rich globules from *Dunaliella bardawil* (chlorophyceae). Journal of applied phycology, 18 (4): 529-537.
7. Buelna, G., Bhattarai, K. K., De La Noue, J & Taiganides, E.P., 1990. Evaluation of various flocculants for the recovery of algal biomass growth on pig-waste. Biological wastes, 31, 211–222.
8. Chen, C. Y., Yeh, K.L., Aisyah, R., Lee, D.J. and Chang, J.S., 2011. Cultivation, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: a critical review. Bioresource technology, 102(1), 71-81.
9. Gerde, J. A., Yao, L., Lio, J., Wen, Z. and Wang, T., 2014. Microalgae flocculation: impact of flocculant type, algae species and cell concentration. Algal research, 3: 30-35.
10. Goswami, G., Kumar, R., Sinha, A., Maiti, S.K., Dutta, B.C., Singh, H. & Das, D., 2019. A low-cost and scalable process for harvesting microalgae using commercial-grade flocculant. RSC Advances, 9(67), 39011-39024.
11. Grima, E.M., Belarbi, E.H., Fernández, F.A., Medina, A.R. & Chisti, Y., 2003. Recovery of microalgal biomass and metabolites: process options and economics. Biotechnology advances, 20(7-8), 491-515.
12. Hejazi, M., Kleinegris, D. & Wijffels, R. 2004. Mechanism of extraction of β-carotene from microalga *Dunaliellea salina* in two-phase bioreactors. Biotechnology and bioengineering, 88, 593-600.
13. Henderson, R.K., Parsons, S.A. and Jefferson, B., 2010. The impact of differing cell and algogenic organic matter (AOM) characteristics on the coagulation and flotation of algae. Water research, 44(12), 3617-3624.

[Downloaded from aqudev.lahijan.iau.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.23223545.1402.17.3.1.4]
[DOI: 10.22034/17.3.1]

14. Kwon, H., Lu, M., Lee, E.Y. and Lee, J., 2014. Harvesting of microalgae using flocculation combined with dissolved air flotation. Biotechnology and bioprocess engineering, 19(1), 143-149.
15. Lichtenthaler, H.K. and Buschmann, C., 2001. Chlorophylls and carotenoids: Measurement and characterization by UV-VIS spectroscopy. Current protocols in food analytical chemistry, 1(1), F4-3.
16. Mixson, S. M., Stikeleather, L. F., Simmons, O. D., Wilson, C. W. & Burkholder, J. M., 2014. pH-induced flocculation, indirect electrocoagulation, and hollow fiber filtration techniques for harvesting the saltwater microalga *Dunaliella*. Journal of applied phycology, 26, 1701-1709.
17. Morowvat, M. H. and Ghasemi, Y., 2016. Culture medium optimization for enhanced β-carotene and biomass production by Dunaliella salina in mixotrophic culture. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 7, 217-223.
18. Mota, R., Pereira, S. B., Meazzini, M., Fernandes, R., Santos, A., Evans, C. A., De Philippis, R., Wright, P.C., Tamagnini, P., 2015. Effects of heavy metals on Cyanothece sp. CCY 0110 growth, extracellular polymeric substances (EPS) production, ultrastructure and protein profiles. Journal of proteomics, 120,75–94.
19. Pérez, L., Salgueiro, J. L., Maceiras, R., Cancela, Á. & Sánchez, Á., 2017. An effective method for harvesting of marine microalgae: pH induced flocculation. Biomass and Bioenergy, 97, 2-26.
20. Sanyano, N., Chetpattananondh, P. and Chongkhong, S., 2013. Coagulation–flocculation of marine *Chlorella* sp. for biodiesel production. Bioresource technology, 147, 471-476.
21. Show, K.-Y., Lee, D.-J. & Chang, J.-S., 2013. Algal biomass dehydration. Bioresource technology, 14 (2): 557-577.
22. Teixeira, C. M. L. L., Kirsten, F. V. & Teixeira, P. C. N., 2012. Evaluation of Moringa oleifera seed flour as a flocculating agent for potential biodiesel producer microalgae. Journal of applied Phycology, 24, 557-563.
23. Vandamme, D., Beuckels, A., Markou, G., Foubert, I. and Muylaert, K., 2015. Reversible flocculation of microalgae using magnesium hydroxide. BioEnergy Research, 8(2), 716-725.
24. Vandamme, D., Foubert, I., Muylaert, K., 2013. Flocculation as a lowcost method for harvesting microalgae for bulk biomass production. Trends Biotechnol, 31, 233–239.
25. Widowati, I., Zainuri, M., Kusumaningrum, H. P., Susilowati, R., Hardivillier, Y., Leignel, V., Bourgougnon, N. and Mouget, J.-L., 2017. Antioxidant activity of three microalgae Dunaliella salina, *Tetraselmis chuii* and *Isochrysis galbana* clone Tahiti. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, IOP Publishing, 012067.
26. Wu, Z., Zhu, Y., Huang, W., Zhang, C., LI, T., Zhang, Y. & Li, A., 2012. Evaluation of flocculation induced by pH increase for harvesting microalgae and reuse of flocculated medium. Bioresource technology, 110, 496-502.

[Downloaded from aqudev.lahijan.iau.ir on 2026-11-06]
[DOR: 20.1001.1.23223545.1402.17.3.1.4]
[DOI: 10.22034/17.3.1]