

تأثیر میدان مغناطیسی ایستا بر رشد ریزجلبک‌های گونه‌های *Nannochloropsis* و *Spirulina* در یک فتوبیوراکتور ستون حبابی و بررسی مدل‌های رشد

ندا نعمانی^۱، حسین دلاوری امرئی^{۲*}، مهدی یزدانی^۲

^۱گروه بیوتکنولوژی و محیط زیست، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

^۲گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بجنورد، بجنورد، ایران.

*نویسنده مسئول h.delavari@ub.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۸/۲۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۶/۲۱

چکیده

میدان‌های مغناطیسی با سیستم‌های زیستی تعامل دارند و بر متابولیسم میکروارگانیسم‌ها مانند ریزجلبک‌ها تأثیر می‌گذارند. در واقع می‌توانند سرعت فتوسنتز و ترکیب درصد ماکرومولکول‌ها را درون سلول تغییر دهند. این میدان‌ها می‌توانند به سه‌صورت مهارکننده، تحریک‌کننده و بی اثر، رشد میکروارگانیسم‌ها را تحت تأثیر قرار دهند. بدین منظور، در پژوهش حاضر به بررسی میزان رشد و زیست‌توده ریزجلبک‌های *Nannochloropsis oculata* و *Spirulina platensis* تحت میدان مغناطیسی ایستا ۲/۵ میلی‌تسلا (mT) در فتوبیوراکتورهای ستون حبابی پرداخته شده است. تمام شرایط از جمله محیط کشت، میزان نوردهی، دما، pH و میزان تلقیح برای یک دوره ۱۴ روزه برای همه فتوبیوراکتورها یکسان در نظر گرفته شد. نتایج به‌دست آمده نشان داد که میدان مغناطیسی ایستا با شدت ۲/۵ میلی‌تسلا محرک رشد بوده و موجب افزایش بهره‌وری زیست‌توده ریزجلبک‌های مورد مطالعه به میزان ۳۴٪ و ۱۰٪ شده است. همچنین مدل رشد گامپرتز در شرایطی که ریزجلبک‌ها تحت تأثیر میدان بوده‌اند انطباق بیشتری با داده‌های تجربی نشان داده است.

واژگان کلیدی: میدان مغناطیسی، ریزجلبک، فتوبیوراکتور ستون حبابی، مدل رشد.

مقدمه

علاوه بر این، منبع مولکول‌های زیستی موجود در صنایع آرایشی، بهداشتی و دارویی هستند (Mularczyk et al., 2020) و در صنایع آبی‌پروری و طیور بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرند (Chisti, 2007). طی سال‌های اخیر با توجه به اهمیت محصولات تولید شده از ریزجلبک، این میکروارگانیسم‌ها مورد توجه بسیاری از محققان دانشگاهی و صنعتی قرار گرفته است. ریزجلبک‌های *Nannochloropsis* و *Spirulina* از جمله مهمترین گونه‌ها هستند که منبع عالی پروتئین‌ها، کربوهیدرات‌ها و ویتامین‌ها هستند که به‌دلیل ارزش غذایی بالا در رژیم غذایی انسان جایگاه ویژه‌ای پیدا کرده‌اند (Qaisar et al., 2016, Liu et al., 2017). ریزجلبک *Nannochloropsis* به‌عنوان منبع رنگدانه‌های ارزشمند کلروفیل، زاگزانتین، کانتاگزانتین و

ریزجلبک‌ها گروه متنوعی از گونه‌های تک سلولی فتوسنتز کننده با ساختار میکروسکوپی هستند که با استفاده از منبع کربن، نور خورشید را به انرژی شیمیایی تبدیل می‌کنند (Rammuni et al., 2018; Santos et al., 2017). تا به حال، بیش از ۳۵۰۰۰ گونه از ریزجلبک‌ها که در آب‌های شیرین و دریایی رشد می‌کنند، شناخته شده است. توزیع ریزجلبک‌ها در اکوسیستم‌های مختلف منجر به تولید ترکیبات شیمیایی متنوعی می‌شود که آن‌ها را برای فرآوری زیستی، مورد توجه قرار می‌دهد (Rammuni et al., 2018). این میکروارگانیسم‌ها برای تولید زیست‌توده چندمنظوره، امیدوارکننده تلقی می‌شوند؛ زیرا می‌توانند به سرعت رشد کنند، مقدار زیادی لپید (Chisti, 2007)، کربوهیدرات و پروتئین تولید کنند.

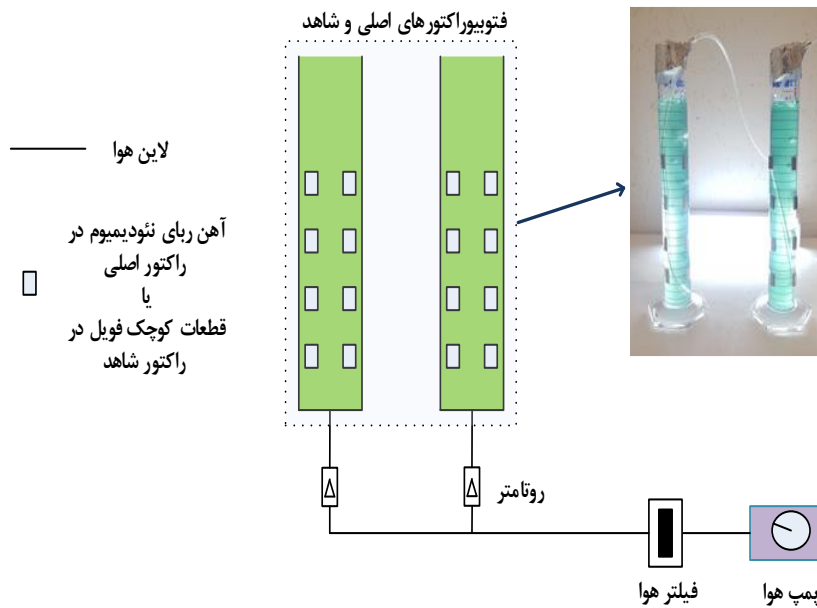
رنگدانه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج نشان داده است که زمان در معرض قرار گرفتن گونه‌های ریزجلبک و شدت میدان ایجاد شده پاسخ‌های متعددی را نشان داده است. به‌طور کلی، تمام واکنش‌های متابولیکی بر اساس تفاوت بارهای الکتریکی و یون‌های سیستم است (Teng, 2005). تمام نیروهای مغناطیسی باعث تغییر متابولیسم در سلول‌های زیستی و حرکت الکترون‌ها و یون‌ها، فعالیت رادیکال‌های آزاد، پروتئین و آنزیم‌ها، نفوذ بیوفیلیم‌ها و رشد سلولی می‌شوند (Santos, 2017).

در پژوهش انجام شده توسط Shao و همکاران (۲۰۱۸) و Huo و همکاران (۲۰۲۰)، میدان مغناطیسی به‌عنوان یک محرک فیزیکی بالقوه برای افزایش رشد سلولی و سنتز ترکیبات زیستی از ریزجلبک‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. استفاده از میدان مغناطیسی دارای مزایایی مانند ارزان قیمت بودن، به‌کارگیری ساده، غیر سمی بودن و عدم تولید آلاینده ثانویه است. Small و همکاران (۲۰۱۲)، ریزجلبک کلرلا را در مقیاس آزمایشگاهی در معرض میدان مغناطیسی با شدت ۱۰ میلی‌تسلا قرار دادند. در مقایسه با نمونه شاهد، میزان رشد دو برابر شد و محتوای کربوهیدرات، پروتئین، کلروفیل a و کلروفیل b افزایش یافت. همچنین قرار گرفتن در معرض این میدان، باعث افزایش سطح کلروپلاست و تیلاکوئید شد (Small et al., 2012). Li و همکاران (۲۰۰۷) ریزجلبک *Spirulina platensis* را در فتوبیوراکتورهای ستون حبابی در معرض میدان‌های مغناطیسی الکتریکی (EMF) از ۰ تا ۰/۵۵ تسلا قرار دادند، نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که شدت ۰/۲۵ تسلا مناسب بوده و حداکثر وزن خشک سلول را ۲۲٪ نسبت به شاهد افزایش می‌دهد. علاوه بر این ترکیب تغذیه‌ای ریزجلبک مورد مطالعه در اسیدآمین‌ها هیستیدین و عناصر کمیاب مانند Ca، Co، Ni، Fe، Mn، Mg، Cu، Sr و V بهبود یافت (Li et al., 2007). همچنین Deamici و همکاران (۲۰۱۸)، ریزجلبک *Spirulina* را در فضای باز در معرض میدان

آستاگزانترین (Liu et al., 2017) و ریزجلبک *Spirulina* هم به‌عنوان منبع رنگدانه‌های ارزشمند کلروفیل، فیکوسیانیین و کارتنوئیدها کاملاً شناخته شده هستند (Andrade et al., 2019). اگرچه تولید تجاری زیست‌توده ریزجلبکی، به‌عنوان غذای سالم و افزودنی‌های با ارزش افزوده سودآور است، اما باید به‌دنبال روشی کارآمد بود تا بتوان سرعت رشد آن‌ها را برای تولید صنعتی افزایش داد.

اخیراً از میدان‌های مغناطیسی (Magnetic Fields=MF) در فرآیند رشد گونه‌های مختلف میکروارگانیسم‌ها استفاده شده است. تحقیقات متعدد، تفاوت در رفتار سلولی را هنگامی که سلول‌ها تحت تأثیر میدان مغناطیسی قرار می‌گیرند، نشان داده است. که اثر آن‌ها ممکن است منفی یا مثبت در فرآیندهای تسریع رشد و تغییرات متابولیسم باشد (Santos et al., 2017). بر اساس یافته‌های Yang و همکاران (۲۰۱۱)، این تغییرات به شدت، فرکانس و زمان عملکرد بستگی دارد. پیوند بالقوه بین میدان مغناطیسی و تأثیر ایجاد شده بر موجودات زنده به‌این دلیل است که باعث ایجاد استرس اکسیداتیو می‌شود، یعنی MF می‌تواند سطوح انرژی و جهت چرخش الکترون‌ها را تغییر دهد بنابراین فعالیت، غلظت و عمر رادیکال‌های آزاد را افزایش می‌دهد (Moon and Chung, 2000; Santos et al., 2017).

میدان مغناطیسی می‌تواند توسط آهن‌ربا یا جریان الکتریکی تولید شود، آهن‌ربا از مواد رسانای مختلفی مانند نئودیمیوم و فریت تشکیل شده و میدان از حرکت بارهای الکتریکی ناشی می‌شود. از نظر شدت، میدان مغناطیسی به چهار دسته ضعیف (کوچک‌تر از ۱ میلی‌تسلا)، متوسط (۱ میلی‌تسلا تا ۱ تسلا)، قوی (۱ تا ۵ تسلا) و فوق قوی (بزرگتر از ۵ تسلا) طبقه‌بندی می‌شود (Dini and Abbro, 2005). تأثیر میدان مغناطیسی بر متابولیسم ریزجلبک‌ها از دهه گذشته با بهینه‌سازی فرآیندهای بیوتکنولوژی مانند تولید پروتئین، تولید زیست‌توده‌ها و غلظت



شکل ۱- سیستم مورد استفاده جهت بررسی تأثیر میدان مغناطیسی بر رشد ریزجلبک.

ایران تهیه شد و در محیط کشت رودیک با pH تقریبی ۸ کشت داده شد (Delavari Amrei *et al.*, 2014).

ساخت فتوبیوراكتور و کشت ریزجلبک: به منظور بررسی تأثیر میدان مغناطیسی بر رشد ریزجلبک‌ها، یک فتوبیوراكتور ۲۵۰ میلی‌لیتری ستون حبابی ساخته و اطراف آن‌ها با آهن‌رباهای نئودیمیوم پوشش داده شد (استوانه سمت راست در شکل ۱). بدین‌منظور، تعداد ۱۶ عدد آهن‌ربای نئودیمیوم به فاصله‌های مشخص و یکسان روی جداره خارجی فتوبیوراكتور، که در واقع یک استوانه به قطر ۳/۷۵ سانتی‌متر و ارتفاع فعال کشت ۲۵ سانتی‌متر بود، نصب شد. همچنین یک فتوبیوراكتور دیگر به‌عنوان سیستم شاهد (فاقد میدان مغناطیسی) استفاده شد. به‌منظور یکسان نمودن بدنه این راکتور با راکتور اصلی از لحاظ شدت نور ورودی به آن، برخی نقاط بدنه این راکتور با استفاده از قطعات کوچک فویل پوشانده شده است (استوانه سمت چپ در شکل ۱). شدت میدان ایجاد شده در داخل راکتور برابر با ۲/۵ میلی‌تسلا بوده است. هر فتوبیوراكتور با ۲۲۰ میلی‌لیتر محیط کشت و ۳۰ میلی‌لیتر ریزجلبک به‌عنوان مایه تلقیح پر شد. برای هر چهار فتوبیوراكتور از هوادهی یکسان و

مغناطیسی با شدت ۲۵ میلی‌تسلا قرار دادند و گزارش کردند که غلظت زیست‌توده و محتوای کلروفیل *a* افزایش یافته است، این مطالعه یکی از اولین مطالعاتی بود که کاربرد میدان مغناطیسی را در فضای باز بررسی کرده بود. علی‌رغم مطالعاتی که در مورد تأثیر قابل توجه میدان مغناطیسی روی رشد و متابولیسم ریزجلبک‌ها وجود دارد؛ با این حال، پژوهش‌های محدودی در مورد تأثیر نیروی مغناطیسی بر رشد ریزجلبک‌های مختلف انجام شده و مطالعات بیشتری مورد نیاز است. بنابراین، مطالعه حاضر با هدف ارزیابی تأثیر میدان مغناطیسی ایستا با شدت متوسط، که توسط آهن‌رباهای نئودیمیوم ایجاد شده است، روی رشد و تولید زیست‌توده ریزجلبک‌های *Spirulina* و *Nannochloropsis* انجام شده است. همچنین میزان تطبیق داده‌های به‌دست آمده با مدل‌های رشد لاجستیک و گامپرتز مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

میکروارگانسیم: ریزجلبک‌های *Nannochloropsis* *oculata* و *platensis Spirulina* مورد استفاده در این پژوهش از سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی

$$X = \frac{k}{1 + \left(\frac{k - X_0}{X_0} \right) \times \exp(-r \times t)}$$

که در رابطه، X غلظت زیست‌توده در زمان t ، X_0 غلظت اولیه زیست‌توده، K حداکثر غلظت زیست‌توده‌ای است که اکوسیستم از آن پشتیبانی می‌کند و r نرخ رشد جلبک است. مدل دیگر مورد استفاده مدل رشد گامپرتز بوده است. بسیاری از توابع رشد از مدل کلاسیک توسعه یافته توسط گامپرتز استخراج شده‌اند که به صورت زیر بیان می‌شود (Xu and Boeing, 2014, Khoobkar and Delavari Amrei, 2021):

$$X = A + C * \exp^{-\exp(-B(t-M))}$$

در این رابطه A مجانب $\ln \frac{X_t}{X_0}$ که t به طور نامحدود کاهش می‌یابد، C مجانب $\ln \frac{X_t}{X_0}$ زمانی که t به صورت نامحدود افزایش می‌یابد، B نرخ رشد نسبی در زمان t و M هم‌زمانی است که در آن سرعت رشد مطلق در حداکثر خود است. X_t غلظت سلول در زمان t و X_0 هم غلظت اولیه سلول است (Mansouri, 2017).

تجزیه و تحلیل سینتیکی رشد ریزجلبک‌ها: برای حل مدل‌های رشد با استفاده از MATLAB R2018b از روش رگرسیون غیرخطی استفاده شد، الگوریتم تجزیه و تحلیل جنبشی رشد ریزجلبک‌ها به شرح زیر است:

(۱) مقادیر $\ln \left(\frac{X_t}{X_0} \right)$ بر اساس داده‌های تجربی بدست آمد.

(۲) داده‌ها در برنامه بارگذاری شدند.

(۳) سپس مدل رشد مربوطه را در قسمت ستون غیرخطی برنامه وارد می‌کنیم.

(۴) تمام متغیرهای وابسته، مستقل و مدل پس از قراردادن مدل مربوطه و بررسی در برنامه نمایش داده می‌شوند.

نوردهی توسط لامپ LED سفید با شدت $110 \left(\frac{\mu\text{mol-photon}}{\text{m}^2 \text{ s}} \right)$ استفاده شد. برای هر گونه از ریزجلبک‌های مورد مطالعه این آزمایش دوبار تکرار شد.

روش‌های اندازه‌گیری رشد ریزجلبک: به منظور اندازه‌گیری میزان رشد هر یک از نمونه‌ها در طول دوره رشد، چگالی نوری ریزجلبک‌های مورد مطالعه به ترتیب در طول موج‌های ۵۶۰ و ۶۸۰ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر (UV-Vis Array Spectrophotometer مدل Photonix) اندازه‌گیری شد (Ar2017 *et al.*, 2014; Andrade *et al.*, 2019, Deamici *et al.*, 2018). وزن خشک سلولی نیز اندازه‌گیری و رابطه مناسبی بین وزن خشک و طول موج‌های مربوط به هر یک از ریزجلبک‌ها به دست آمد (Delavari Amrei, 2014). به منظور به دست آوردن سرعت رشد ویژه از رابطه زیر استفاده شد:

$$\mu = \frac{\ln \left(\frac{X_t}{X_0} \right)}{t}$$

که X_0 و X_t به ترتیب غلظت زیست‌توده در زمان t در ابتدای آزمایش می‌باشند. همچنین t زمان آزمایش بر حسب روز می‌باشد. بهره‌وری تولید زیست توده (P , $\text{mg L}^{-1} \text{ day}^{-1}$) با استفاده از رابطه زیر به دست آمد:

$$P = \frac{X_f - X_0}{t}$$

که X_0 و X_f به ترتیب وزن خشک زیست‌توده در پایان دوره رشد و در ابتدای آزمایش می‌باشند.

مدل‌های سینتیکی رشد: در این پژوهش دو مدل ریاضی لجستیک و گامپرتز استفاده شد. در هر دو مدل بکار رفته میزان رشد تابعی از غلظت سوبسترا نمی‌باشد. برازش با استفاده از MATLAB R2018b از طریق الگوریتم Trust-Region انجام شد. شکل کلی مدل تابع لجستیک استفاده شده به صورت زیر می‌باشد (Xu and Boeing, 2014, Khoobkar and Delavari Amrei, 2021):

روی رشد ریز جلبک‌های *Nannochloropsis* و *Spirulina platensis* در فتوبیوراکتورهای مخصوص مورد بررسی قرار گرفت و منحنی‌های رشد برای هر دو گونه در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. بر اساس نتایج، استفاده از امواج مغناطیسی توسط آهن‌ربای نئودیمیوم اطراف فتوبیوراکتور باعث افزایش رشد ریز جلبک‌های مورد مطالعه شده است. در واقع میدان مغناطیسی در فعال سازی یون‌ها و قطبش دو قطبی‌ها در سلول تأثیر زیادی دارند (Moon and Chung, 2000). مواد داخل محیط کشت به صورت یون در داخل آب حل می‌شوند و میدان مغناطیسی فعالیت یون‌ها را بیشتر می‌کند و جهت چرخش الکترون‌ها را نیز تغییر می‌دهد در نتیجه باعث می‌شود ریز جلبک بیشتر از مواد داخل محیط کشت استفاده کند و در نهایت رشد افزایش پیدا کند. همچنین میدان مغناطیسی می‌تواند بر متابولیسم میکروارگانیسم‌ها تأثیر بگذارد و در نتیجه رشد ریز جلبک‌ها را تحریک کرده و باعث افزایش مقدار زیست‌توده شود. به هر حال هنوز اطلاعات کامل و دقیقی در مورد چگونگی تأثیر میدان مغناطیسی روی رشد ریز جلبک‌ها وجود ندارد. اما به صورت کلی تمام واکنش‌های متابولیکی بر اساس تفاوت بار الکتریکی و یون‌های سیستم می‌باشد که تأثیر میدان مغناطیسی بر این دو مورد مشهود است (Santos et al., 2017).

در جدول ۱، دو پارامتر مربوط به رشد ریز جلبک‌های مورد نظر در فتوبیوراکتورهای مورد آزمایش ارائه شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، امواج الکترومغناطیسی ایجاد شده توسط آهن‌ربا سبب شده که میزان حداکثر سرعت رشد ویژه و بهره‌وری زیست‌توده برای هر دو گونه ریز جلبک افزایش پیدا کند. میزان بهره‌وری تولید زیست‌توده برای گونه‌های *Nannochloropsis oculata* و *Spirulina platensis* در فتوبیوراکتور اصلی نسبت به شاهد به ترتیب حدود ۳۴٪ و ۱۰٪ افزایش داشته است. همچنین حداکثر نرخ رشد ویژه در حضور امواج

(۵) مقادیر پارامترهای مورد نیاز برآورد می‌شود. (۶) از چندین شاخص آماری برای ارزیابی کیفیت مقادیر برآورده شده و مدل‌های رگرسیون استفاده شد مانند ضریب تبیین (R^2)، واریانس (SSE) و انحراف مربع میانگین ریشه (RMSE).

R^2 : ضریب تبیین همیشه به عنوان شاخصی برای نمایش دقیق مدل در برازش داده‌های تجربی استفاده می‌شود. ضریب تبیین نزدیک به یک، به معنی دقت مدل است. ضریب تبیین را می‌توان بر اساس معادله‌های زیر محاسبه کرد.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_{iobs} - y_{icalc})^2}{\sum_{i=1}^n (y_{iobs} - \bar{y})^2}$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n y_{iobs})$$

که در رابطه‌های بالا، n به تعداد مشاهده، obs به داده‌های مشاهده شده و calc به داده‌های محاسبه شده اشاره می‌کند (Lam et al., 2017). SSE و RMSE: مشابه ضریب تعیین است، این دو شاخص اغلب برای مقایسه دقت مدل‌های مختلف که داده‌های تجربی را نشان می‌دهند، استفاده می‌شود. یک مدل با واریانس کوچکتر و RMSE نشان می‌دهد که داده‌ها دقیق‌تر از یک مدل با مقادیر بزرگتر این شاخص‌ها هستند. معادلات زیر محاسبه SSE و RMSE را توصیف می‌کند (Decostere et al., 2015; Lam et al., 2017).

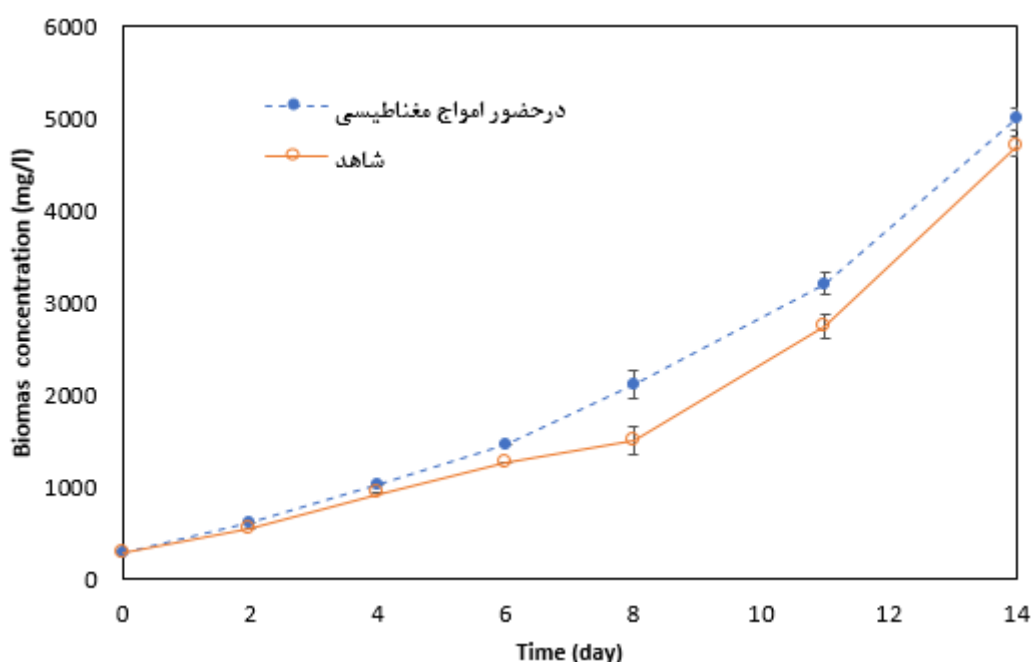
$$SSE = \sum_i (y_i - y)^2$$

$$RMSE = \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n (y_{iobs} - y_{icalc})^2)^2$$

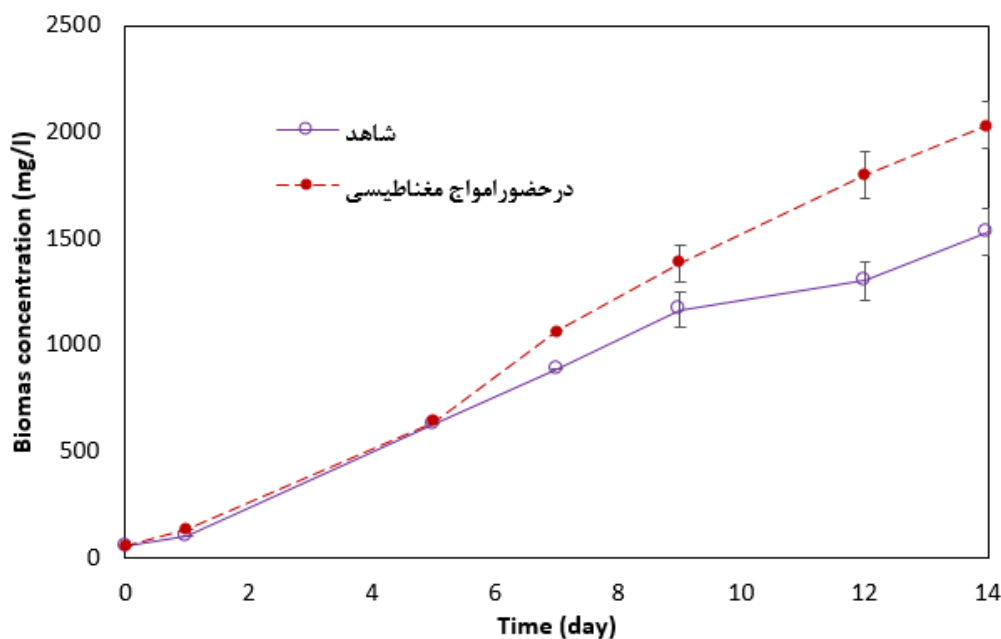
که n به تعداد مشاهده، obs به داده‌های مشاهده شده و calc به داده‌های محاسبه شده اشاره می‌کند (Lam et al., 2017).

نتایج و بحث

اثر میدان مغناطیسی ایستا با شدت ۲/۵ میلی‌تسلا



شکل ۲- منحنی رشد ریزجلبک *Spirulina platensis* بر حسب زمان.



شکل ۳- منحنی رشد ریزجلبک *Nannochloropsis oculata* بر حسب زمان.

میزان تأثیر میدان مغناطیسی ایستا در فاز لگاریتمی باعث رشد بیشتر ریزجلبک اسپیرولینا شده است. در حالی که بر سرعت رشد و وزن خشک در فاز ایستایی تأثیر منفی داشته است. برای ریزجلبک کلرلا که مدت زمان کمتری تحت تأثیر میدان مغناطیسی بوده است (به مدت یک ساعت در روز)، باعث افزایش بازده کوانتومی در فتوسیستم PSII شده است

مغناطیسی نسبت به شاهد برای هر دو گونه مورد مطالعه به ترتیب به میزان ۱۳٪ و ۵٪ افزایش نشان داد. در تحقیقات دیگری نیز این افزایش رشد تحت میدان مغناطیسی برای ریزجلبک‌های مختلف گزارش شده است که بسته به شدت میدان و نوع ریزجلبک، مدت زمان اعمال میدان بکار رفته متفاوت بوده است. Li و همکاران (۲۰۰۷)، گزارش کرده اند

جدول ۱- پارامترهای رشد ریز جلبک‌های گونه‌های *Spirulina platensis* و *Nannochloropsis oculata*.

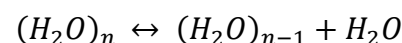
μ_{\max} (day^{-1})	P ($mg.l^{-1}.day^{-1}$)	فتوبیوراكتور	ریز جلبک
۰/۲۶	۱۴۱/۴	فتوبیوراكتور اصلی	<i>Nannochloropsis oculata</i>
۰/۲۳	۱۰۵/۸	فتوبیوراكتور شاهد	
۰/۲۱	۳۳۷/۲	فتوبیوراكتور اصلی	<i>Spirulina platensis</i>
۰/۲	۳۰۸/۶	فتوبیوراكتور شاهد	

جدول ۲- ضریب تبیین و ضرایب معادلات لجستیک و گامپرتز برای رشد ریز جلبک *Nannochloropsis oculata*.

مدل گامپرتز	مدل لجستیک	نمونه
A= ۱۰۶/۴	K= ۱۹۸۴	تحت امواج مغناطیسی
B= ۰/۳۰۵۷	R= ۰/۵۲۳۴	
C= ۲۰۰۰	X ₀ = ۵۲	
M= ۶/۰۳۳	R ² = ۰/۹۸۹۶	
R ² = ۰/۹۹۵۶	RMSE= ۸۷/۰۳	
RMSE= ۷۳/۳۷	SSE= ۳/۸۷۸ × ۱۰ ^۴	
SSE= ۱/۶۱۵ × ۱۰ ^۴		
A= ۴۰۰	K= ۱۲۱۲	شاهد
B= ۰/۳۲۹	R= ۰/۶۱۷۹	
C= ۱۱۱۰	X ₀ = ۵۲	
M= ۶/۴۸۶	R ² = ۰/۹۸۴۶	
R ² = ۰/۸۶۶۸	RMSE= ۷۶/۳	
RMSE= ۲۹۰/۱	SSE= ۲/۹۱۱ × ۱۰ ^۴	
SSE= ۲/۵۲۵ × ۱۰ ^۵		

$(H_2O)_{n-1} \leftrightarrow (H_2O)_{n-2} + H_2O$
 با توجه به اینکه پیوند هیدروژنی $O-H \dots O$ ، مشابه یک دو قطبی، توسط میدان مغناطیسی کنترل می‌شود، استرس ناشی از میدان مغناطیسی می‌تواند باعث تولید مولکول‌های آب غیر متصل (تنها) بیشتری شود. وجود تعداد بیشتری از مولکول‌های آب تنها باعث خواهد شد تا یون‌های غیرآلی به میزان بیشتری در آب حل شود. علاوه بر این،

(Bauer et al., 2017). تأثیر مهم دیگر میدان مغناطیسی روی پیوند هیدروژنی مولکول‌های آب محیط کشت ریز جلبک است. در واقع بسیاری از مولکول‌های آب توسط پیوند هیدروژنی به یکدیگر متصل هستند و تعادلی بین مولکول‌های آب متصل شده و غیرمتصل (مولکول‌های آب تنها) به صورت زیر وجود دارد:



جدول ۳- ضریب تبیین و ضرایب معادلات لجستیک و گامپرتز برای رشد ریز جلبک *Spirulina platensis*

مدل گامپرتز	مدل لجستیک	نمونه
A= ۲۰۷/۲	K= ۷۲۲۳	تحت امواج مغناطیسی
B= ۰/۰۹۶	R= ۰/۲۸۳۶	
C= ۱۵۰۰۰	X ₀ = ۲۷۹	
M= ۱۵/۵۸	R ² = ۰/۹۸۹۸	
R ² = ۰/۹۹۱۶	RMSE= ۱۸۴	
RMSE= ۱۵۱/۸	SSE= ۱/۶۹۳ × ۱۰ ^۵	
SSE= ۶/۹۱۳ × ۱۰ ^۴		
A= ۴۴۶/۷	K= ۴۹۴۸	شاهد
B= ۰/۱۱۲۵	R= ۰/۲۷۲۶	
C= ۱۵۰۰۰	X ₀ = ۲۷۹	
M= ۱۶/۲۵	R ² = ۰/۹۸۷۶	
R ² = ۰/۹۸۷۲	RMSE= ۱۸۷/۶	
RMSE= ۲۴۶/۱	SSE= ۱/۷۵۹ × ۱۰ ^۵	
SSE= ۱/۸۱۷ × ۱۰ ^۵		

تجزیه و تحلیل آماری ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، برای هر دو گونه در حضور و نبود امواج مغناطیسی همه مدل‌ها تناسب خوبی ارائه کرده‌اند ($R^2 \geq 0/98$) البته مدل گامپرتز برای رشد نمونه شاهد ریز جلبک *Nannochloropsis oculata* نتایج بهتری را نشان نداده است ($R^2 = 0/8668$). مدل رشد گامپرتز در شرایطی که ریز جلبک‌ها تحت تأثیر میدان مغناطیسی بوده‌اند انطباق بیشتری با داده‌های تجربی نشان داده است ($R^2 \geq 0/99$). با این حال در نبود میدان مغناطیسی مدل رشد لجستیک انطباق بیشتری با داده‌های تجربی داشته است ($R^2 \geq 0/98$). همچنین با مقایسه

شکستن پیوند هیدروژنی توسط میدان مغناطیسی باعث می‌شود تا مولکول‌های OH^- بیشتری تولید شود که باعث می‌شود تا انتقال الکترون و در نتیجه اکسیداسیون و دی‌اکسیداسیون داخل سلولی افزایش یابد. بنابراین سرعت رشد ریز جلبک افزایش پیدا می‌کند (Pilla et al., 1997; Li et al., 2007). همچنین القای میدان مغناطیسی در شدت‌های بالا برخی از خواص محیط کشت مانند کشش سطحی، چگالی و میرایی نور و میران اکسیژن محلول تأثیر گذار باشد (Rusanowska, 2017). در جدول ۲ و ۳ پارامترهای معادله لجستیک و گامپرتز و ضریب تبیین ارزیابی شده با استفاده از

قابل قبول، برای هر گونه ریزجلبک، شدت و نوع میدان، زمان قرار گرفتن در معرض میدان، طول دوره کشت و دستگاه‌های مورد استفاده برای اعمال این میدان باید ارزیابی شود. در پروژه حاضر نیز میدان مغناطیسی ایستا بکار گرفته شده باعث افزایش رشد ریزجلبک‌های *نانوکروپسیس* و *اسپیروولینا* شده است. همچنین مدل رشد گامپرتز نتایج خوبی جهت پیش‌بینی رشد ریزجلبک‌ها تحت میدان مغناطیسی نشان داده است. از آنجا که با بکارگیری میدان مغناطیسی هیچ ماده شیمیایی اضافه نمی‌شود بنابراین تکنولوژی استفاده از میدان مغناطیسی یک تکنولوژی بی‌ضرر و دوستدار محیط زیست است.

تشکر و قدردانی

از کمک‌ها و راهنمایی‌های مسئولان و کارشناسان آزمایشگاه مرکزی دانشگاه بجنورد که باعث پیشرفت هر چه بهتر این پژوهش در محل "آزمایشگاه محیط زیست و انرژی" شدند، تشکر و قدردانی می‌نمائیم.

2016. Validation of a microalgal growth model accounting with inorganic carbon and nutrient kinetics for wastewater treatment. *Chemical Engineering Journal* 285, 189-197.
- Delavari Amrei H., Nasernejad B., Ranjbar R., Rastegar S. 2014. An integrated wavelength-shifting strategy for enhancement of microalgal growth rate in PMMA- and polycarbonate-based photobioreactors. *European Journal of Phycology* 49(3), 324-331.
- Dini L., Abbro L. 2004. Bioeffects of moderate-intensity static magnetic fields on cell cultures. *Micron* 36(3), 195-217.
- Huo S., Chen X., Zhu F., Zhang W., Chen D., Jin N., Cobb K., Cheng Y., Wang L., Ruan R. 2020. Magnetic field intervention on growth of the filamentous microalgae *Tribonema* sp. in starch wastewater for algal biomass production and nutrients removal: Influence of ambient temperature and operational strategy. *Bioresource Technology* 303, 122884.
- Khoobkar Z., Delavari Amrei H. 2021. Effect of photo, hetero and mixotrophic conditions

پارامتر K در مدل لجستیک، که در واقع حد نهایی غلظت زیست‌توده را در هر یک از کشت‌ها پیش‌بینی می‌کند، می‌توان گفت حد نهایی غلظت زیست‌توده تحت میدان مغناطیسی برای ریزجلبک *Spirulina* و *Nannochloropsis oculata platensis* به ترتیب ۶۳٪ و ۴۶٪ افزایش یافته است. این نتایج نشان می‌دهد اگر آزمایشات انجام شده در این پژوهش تا زمان فاز ایستایی ادامه پیدا می‌کرد به احتمال بسیار زیاد میزان افزایش رشد بیشتری برای نمونه‌های تحت میدان مغناطیسی (که ۱۳٪ و ۵٪ گزارش شده است) به دست می‌آمد.

نتیجه‌گیری کلی

مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از میدان مغناطیسی در کشت ریزجلبک‌ها به‌طور قابل توجهی بر رشد این میکروارگانیسم‌ها و همچنین تولید ترکیبات زیستی تأثیر دارد. با این حال، اثرات این کاربرد ممکن است باعث تحریک یا مهار رشد و تولید ترکیبات زیستی شود. به‌منظور به‌دست آوردن نتایج

منابع

- Andrade B.B., Cardoso L.G., Assis D.J., Costa J.A.V., Druzian J.I., Lima S.T.C. 2019. Production and characterization of *Spirulina* sp. LEB 18 cultured in reused Zarrouk's medium in a raceway-type bioreactor. *Bioresource Technology* 284, 340-348.
- Bauer L.M., Costa J.A.V., Rosa A.P.C., Santos L.O. 2017. Growth stimulation and synthesis of lipids, pigments and antioxidants with magnetic fields in *Chlorella kessleri* cultivations. *Bioresource Technology* 244, 1425-1432.
- Chisti Y. 2007. Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances* 25(3), 294-306.
- Deamici K.M., Santos L.O., Costa J.A.V. 2018. Magnetic field action on outdoor and indoor cultures of *Spirulina*: Evaluation of growth, medium consumption and protein profile. *Bioresource Technology* 249, 168-174.
- Decostere B., Craene J.D., Van Hoey S., Vervaeren H., Nopens I., Van Hulle S.W.H.

- microalgae spirulina platensis: biomass production culture medium. *Pakistan Journal of Marine Science* 25, 187-193.
- Rammuni M.N., Ariyadasa T.U., Nimarshana P.H.V., Attalage R.A. 2018. Comparative assessment on the extraction of carotenoids from microalgal sources: Astaxanthin from *H. pluvialis* and β -carotene from *D. salina*. *Food Chemistry* 277, 128-134.
- Rusanowska P., Zieliński M., Dębowski M. 2017. Impact of static magnetic field on efficiency of fine-bubble aeration of liquid. *Inżynieria Ekologiczna* 18(2), 130-135.
- Santos L.O., Deamici K.M., Menestrino B.C., Garda-Buffon J., Costa J.A.V. 2017. Magnetic treatment of microalgae for enhanced product formation. *World Journal of Microbiology and Biotechnology* 33, 169.
- Shao W., Ebaid R., Abomohra A.E.F., Shahan M. 2018. Enhancement of Spirulina biomass production and cadmium biosorption using combined static magnetic field. *Bioresource Technology* 265, 163-169.
- Small D.P., Hüner N.P.A., Wan W. 2012. Effect of static magnetic fields on the growth, photosynthesis and ultrastructure of *Chlorella kessleri* microalgae. *Bioelectromagnetics* 33(4), 298-308.
- Teng H.C. 2005. A Puzzle of the Effect of Magnetic Field on Biological Cells. *Life Science Journal* 2(1), 16-21.
- Xu Y., Boeing W.J. 2014. Modeling maximum lipid productivity of microalgae: Review and next step. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 32, 29-39.
- Yang G., Wang J., Mei Y., Luan Z. 2011. Effect of Magnetic Field on Protein and Oxygen-production of *Chlorella Vulgaris*. *Mathematical and Physical Fisheries Science* 9, 116-126.
- on the growth and composition of *Anabaena variabilis*: An Energy Nexus approach. *Energy Nexus* 2, 100010.
- Lam M., Yusoff M.I., Uemura Y., Lim J. W., Khoo C.G., Lee K.T., Ong H.C., 2017. Cultivation of *Chlorella vulgaris* using nutrients source from domestic wastewater for biodiesel production: Growth condition and kinetic studies. *Renewable Energy* 103, 197-207.
- Li Z.Y., Guo S.Y., Li L., Cai M.Y. 2007. Effects of electromagnetic field on the batch cultivation and nutritional composition of *Spirulina platensis* in an airlift photobioreactor. *Bioresource Technology* 98(3), 700-705.
- Liu J., Song Y., Qiu W. 2017. Oleaginous microalgae *Nannochloropsis* as a new model for biofuel production: Review & analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 72, 154-162.
- Mansouri M. 2017. Predictive modeling of biomass production by *Chlorella vulgaris* in a draft-tube airlift photobioreactor. *Advances in Environmental Technology* 2(3), 119-126.
- Moon J.D., Chung H.S. 2000. Acceleration of germination of tomato seed by applying AC electric and magnetic fields. *Journal of Electrostatics* 48(2), 103-114.
- Mularczyk M., Michalak I., Marycz K. 2020. Astaxanthin and other nutrients from *haematococcus pluvialis* - Multifunctional applications. *Marine Drugs* 18(9), 459.
- Pilla A.A., Muehsam D.J., Markor M.S. 1997. A dynamical systems larmor precession model for weak magnetic field bioeffects: ion binding and orientation of bound water molecules. *Bioelectrochemistry and Bioenergetics* 43(2), 239-249.
- Qaisar S., Panhwar A., Perwez Z., Complex L., Farms M. 2016. Assessment of suitable media for the culture of an edible

**The effects of static magnetic field on the growth of microalgae
Nannochloropsis and *Spirulina* in a bubble column photobioreactor and
investigation on the growth models**

Neda Nemani¹, Hossein Delavari Amrei^{*2}, Mahdi Yazdani²

¹Department of Biotechnology and Environment, Faculty of Chemical Engineering,
Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

²Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, University of Bojnord,
Bojnord, Iran.

*Corresponding author: h.delavari@ub.ac.ir

Received: 2022/9/12

Accepted: 2022/11/19

Abstract

Magnetic fields interact with biological systems and affect the metabolism of microorganisms such as microalgae. In fact, it can change the rate of photosynthesis and the composition of macromolecules inside the algal cell. These fields can affect the growth of microorganisms in three ways: inhibiting, stimulating, and null. For this purpose, in this study, the growth of the microalgae, *Nannochloropsis oculata* and *Spirulina platensis*, under a static magnetic field of 2.5 mT in a bubble column photobioreactors have been investigated. All conditions, including culture medium, light intensity, temperature, pH and inoculation rate for a period of 14 days were considered the same for all photobioreactors. The results showed that the static magnetic field with the intensity of 2.5 mT is a growth stimulant and has increased the biomass productivity of the studied microalgae by 34% and 10%, respectively. Also, Gompertz growth model has shown more compliance with experimental data in the conditions where microalgae have been affected by the field.

Keywords: Magnetic fields, Microalgae, Bubble column photobioreactor, Growth model.