

Research Article



DOI: 10.22034/ijche.2023.383521.1283



This journal is an open access journal licensed under an Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International license (CC BY-NC-ND 4.0).

The Effect of Rhodamine 6G Solution as a Light Spectral Converter on the Growth of Microalgae *Chlorella* Sp.

H. Delavari Amrei^{1*}, Z. Khoobkar², Sh. Shafiei Amrei³

1- Associate Professor of Chemical Engineering, University of Bojnord

2- Ph. D. Student of Chemical Engineering, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran

3- Assistant Professor of Chemical Engineering, University of Bojnord

Email: h.delavari@ub.ac.ir

Abstract

Spectral conversion of light and production of more useful photons for the photosynthesis process increases the growth of photosynthetic microorganisms including microalgae. Many researches have been done in this field, but due to the geometry of the cultivation system, the location of the light source, the failure to return photons into the system, etc., an accurate assessment of the effect of the spectral conversion on the growth of microalgae has not been provided. In this research, the effect of spectral conversion on the growth rate of microalgae Chlorella sp. has been evaluated using a more accurate method than other studies. For this purpose, a white LED lamp was placed inside a double-walled transparent tube as a light source, and the space between the walls was filled with Rhodamine 6G solution as a spectral converter. The whole above system was placed in the middle of a culture flask, in order to distribute the light homogeneously. In addition, the outer surface of the culture flask was covered with aluminum foil in order to minimize the photons leaving the flask and returning them inside. The results showed that in this method, the biomass productivity of Chlorella sp. microalgae increased up to 220%. The amount of this increase in more light intensity has been significantly less. In addition, the amount of light photons used in biomass production also increased up to 4 times.

Received: 28 January 2023

Accepted: 20 May 2023

Page Number: 99-108

Keywords:

Microalgae,
Spectral Conversion,
Accurate Assessment,
Growth

Please Cite this Article Using:

Delavari Amrei, H., Khoobkar, Z., & Shafiei Amrei, Sh. (2024). The Effect of Rhodamine 6G Solution as a Light Spectral Converter on the Growth of Microalgae *Chlorella* Sp. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 23(133), 99-108, [In Persian].



تأثیر محلول رودامین 6G به عنوان تبدیل کننده طیفی نور بر رشد ریز جلبک کلرلا

حسین دلاوری امرئی^{۱*}، زهرا خوبکار^۲، شیوا شفیعی امرئی^۳

۱- دانشیار مهندسی شیمی، دانشگاه بجنورد

۲- دانشجوی دکتری مهندسی شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

۳- استادیار مهندسی شیمی، دانشگاه بجنورد

پیام نگار: h.delavari@ub.ac.ir

چکیده

تبدیل طیفی نور و تولید فوتون‌های مفیدتر برای فرایند فتوسنتز باعث افزایش رشد ریزاندام‌های فتوسنتزکننده از جمله ریزجلبک‌ها می‌شود. تحقیقات بسیاری در این زمینه انجام شده‌است؛ اما به علت هندسه سامانه کشت، محل قرارگیری منبع نور، بازگرداندن فوتون‌ها به داخل سامانه و غیره، ارزیابی دقیقی از تأثیر روش تبدیل طیفی بر رشد ریزجلبک‌ها ارائه نشده‌است. در این پژوهش، با به کارگیری روشی دقیق‌تر نسبت به دیگر پژوهش‌ها، تأثیر تبدیل طیفی نور بر میزان رشد ریزجلبک کلرلا ارزیابی شده‌است. بدین منظور یک لامپ LED سفید به عنوان منبع نور در داخل لوله شفاف دوجداره‌ای قرار داده شد و فضای بین جداره‌ها با محلول رودامین 6G، به عنوان تبدیل کننده طیفی، پر شد. کل سامانه بالا در وسط یک فلاسک کشت، به منظور توزیع همگن نور، تعبیه شد. به علاوه سطح خارجی فلاسک کشت به منظور توزیع همگن نور، فلاسک و بازگرداندن آن‌ها به داخل آن، با فویل آلومینیومی پوشش داده شد. نتایج نشان داد که در این روش بهره‌وری زیست‌توده ریزجلبک کلرلا تا ۲۲۰٪ افزایش پیدا کرد. میزان این افزایش در شدت نورهای بیشتر تا حد قابل توجهی کمتر بوده‌است. به علاوه میزان استفاده از فوتون‌های نور در تولید زیست‌توده نیز تا ۴ برابر افزایش پیدا کرد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۳۰

شماره صفحات: ۹۸ تا ۱۰۷

کلیدواژه‌ها:

ریزجلبک،
 تبدیل طیفی،
 ارزیابی دقیق،
 رشد

* بجنورد، دانشگاه بجنورد، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی شیمی

استناد به مقاله:

دلاوری امرئی، حسین، خوبکار، زهرا، و شفیعی امرئی، شیوا. (۱۴۰۳). تأثیر محلول رودامین 6G به عنوان تبدیل کننده طیفی نور بر رشد ریزجلبک کلرلا، نشریه مهندسی شیمی ایران، ۲۳(۱۳۳)، ۹۸-۱۰۷.

ریزجلبک‌ها به‌عنوان گونه‌ای از ریزاندام‌های فتوسنتزکننده کاربرد زیادی در صنایع غذایی، دارویی و آرایشی و بهداشتی پیدا کرده‌اند [۱]. هم‌چنین از آن‌ها به‌منظور تصفیهٔ برخی پساب‌ها و حذف آلاینده‌های اتمسفری نیز استفاده شده‌است [۲ و ۳]. مشخصه‌های زیادی بر رشد ریزجلبک‌ها تأثیر می‌گذارند که نور مهم‌ترین آن‌هاست [۴-۷].

شدت و طول موج نور تأثیر زیادی بر رشد و محتوای درون‌سلولی ریزجلبک‌ها دارند. در بسیاری از موارد افزایش شدت نور باعث افزایش رشد ریزجلبک‌ها شده‌است، اما باید این افزایش تا حدی باشد که باعث اشباع نوری در ریزجلبک‌ها نشود [۸ و ۹]. نه‌تنها شدت نور خروجی از منبع نور مورد استفاده برای رشد ریزجلبک‌ها باید به اندازهٔ کافی باشد بلکه نور باید در داخل محیط کشت به‌صورت همگن توزیع شود [۱۰ و ۱۱]؛ زیرا در بسیاری از موارد، شدت نور در سطح کشت مورد نظر بیشترین مقدار است و این مقدار با دیگر نقاط (داخل سامانه) تفاوت زیادی دارد. طول موج‌های نور نیز تأثیر قابل توجهی بر رشد ریزجلبک‌ها دارد. اگرچه طول موج‌های حاصل از پرتوهای خورشید بالاتر از ۲۹۵ nm است، تنها طول موج‌های بین ۴۰۰ تا ۷۰۰ nm به‌عنوان تابش فعال فتوسنتزی (PAR) به‌حساب می‌آیند [۱۲]. البته باید توجه کرد که تمام طول موج‌های موجود در بازه مذکور برای فرایند فتوسنتز مفید نیست. برخی از گروه‌های جلبکی مانند جلبک‌های سبز می‌تواند طول موج‌هایی در محدودهٔ نور بنفش، آبی، قرمز و نارنجی را جذب کند، درحالی‌که دیگر گونه‌ها مانند سیانوباکتری‌ها^۱ (ریزجلبک‌های سبز-آبی)، رودوفیت‌ها^۲ (جلبک‌های قرمز)، گلاکوسیتوفیت‌ها^۳ و کریپتوفیت‌ها^۴ از نور سبز و زرد نیز به‌علت حضور فیکوبیلی پروتئین‌ها بهره می‌برند [۱۳-۱۵].

تحقیقات زیادی در مورد تأثیر منابع نوری مختلف بر روی رشد ریزجلبک‌ها وجود دارد. در برخی از این تحقیقات محققان تلاش کرده‌اند تا با استفاده از ترفند اصلاح طیفی نور، توزیع تعداد فوتون‌های ورودی به فتوبیوراکتورها را طوری تغییر دهند که فوتون‌های مفید بیشتری برای فتوسنتز، وارد فتوبیوراکتورها و باعث رشد بیشتر ریزجلبک‌ها شود [۱۶، ۱۷، ۱۸]. به‌عنوان مثال تبدیل

فوتون‌های نور سبز که به‌ندرت در فرایند فتوسنتز به‌کار می‌روند، به فوتون‌های نارنجی و یا قرمز، یا تبدیل فوتون‌های UV-A به فوتون‌های نور آبی [۲۱-۱۹].

با توجه به تمام گزارش‌های علمی که تاکنون در مورد روش تبدیل طیفی نور و تأثیر آن بر رشد ریزجلبک‌ها ارائه شده، می‌توان گفت که تنها برخی از فوتون‌های نور، تبدیل شده و یا تبدیل نشده، به‌وسیلهٔ ریزجلبک‌ها برای فرایند فتوسنتز جذب شده‌اند [۲۸-۱۶]؛ زیرا برخی از فوتون‌ها هیچ‌گاه به سطح فتوبیوراکتور^۵ نمی‌رسند، برخی از فوتون‌های رسیده به سطح راکتور بازتاب می‌شوند، برخی از آن‌ها پس از ورود به راکتور به‌وسیلهٔ ریزجلبک‌ها جذب نمی‌شوند و از سمت دیگر راکتور خارج می‌شوند و برخی دیگر پس از تبدیل شدن به فوتونی با طول موجی مفید برای فتوسنتز از راکتور خارج شده، یا جذب آن نمی‌شوند. جذب‌نشدن این فوتون‌ها می‌تواند به علت شکل هندسی منبع نور، جهت و زاویهٔ تابش نور نسبت به سطح راکتور، هندسهٔ فتوبیوراکتور، جنس بدنهٔ فتوبیوراکتور که در بازتاب نور تأثیر دارد و نبودن آینه به‌علت بازتاب نور عبور کرده از راکتور باشد؛ بنابراین بنا به دلایلی که ذکر شد می‌توان گفت هرچند تاکنون در گزارش‌های بسیاری تأثیر مثبت تبدیل طیفی بر روی رشد انواع ریزجلبک‌ها ارائه شده، اثر دقیق آن بر روی رشد ریزجلبک‌ها گزارش نشده‌است.

در پژوهش حاضر، به‌منظور ارزیابی اثر دقیق تبدیل طیفی نور به‌وسیلهٔ یک محلول فلورسانس بر رشد ریزجلبک‌ها، یک منبع نور در داخل یک لولهٔ دوجدارهٔ شفاف قرار داده و کل این سامانه در مرکز یک فلاسک کشت، به‌منظور توزیع همگن نور، جاگذاری شد. فضای خالی لولهٔ دوجداره به‌وسیلهٔ محلول رودامین 6G^۶، به‌عنوان تبدیل‌کنندهٔ طیف پر شد. هم‌چنین فلاسک کشت به‌صورت کامل به‌وسیلهٔ فویل آلومینیومی پوشانده شد تا از خروج فوتون‌های جذب‌نشده با ریزجلبک‌ها جلوگیری شود؛ بنابراین می‌توان ادعا کرد که اکثر فوتون‌های خروجی از منبع نور برای تبدیل طیفی و یا رشد ریزجلبک‌ها استفاده شدند. هم‌چنین مدل‌های رشد گامپرتز^۷ و لاجستیک^۸ در نمونه‌های مختلف بررسی شد.

5. Photobioreactor
6. Rhodamine 6G
7. Gompertz
8. Logistic

1. Cyanobacteria
2. Rhodophytes
3. Glaucocytophytes
4. Cryptophytes

۲. مواد و روش‌ها

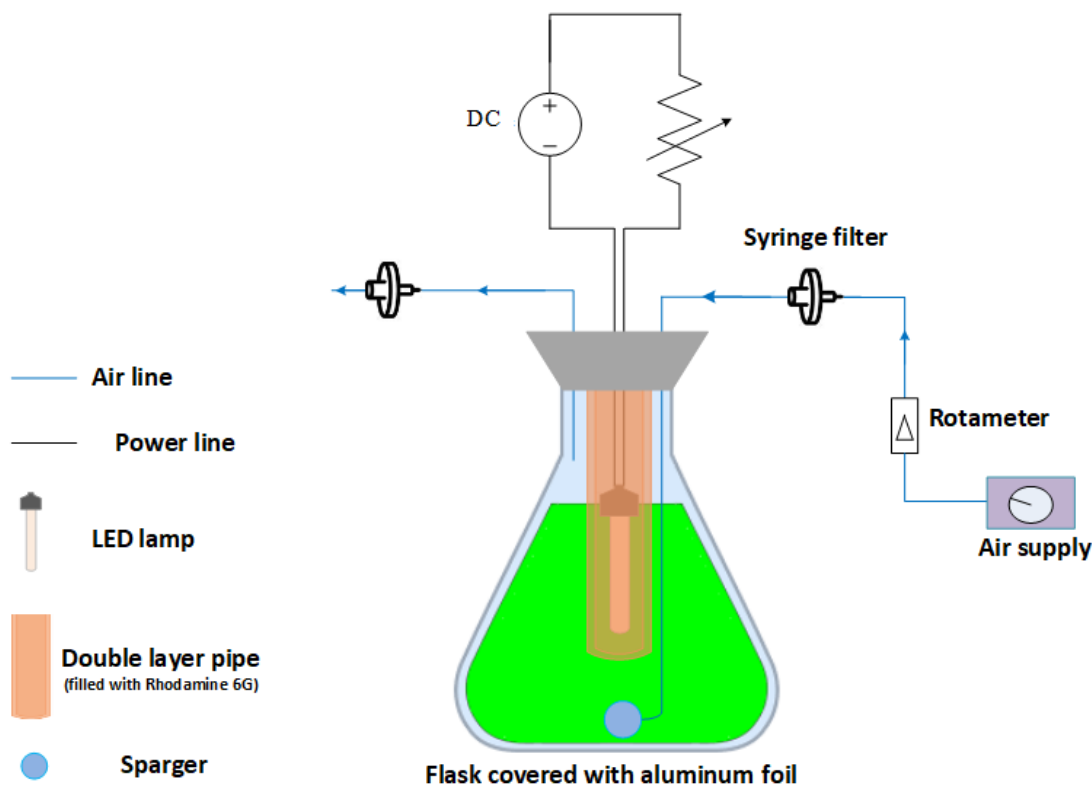
۱-۲ ریزجلبک و محیط کشت

در این پژوهش گونه‌ای از ریزجلبک کلرلا^۱ (PTCC 6010) از سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران تهیه و کشت اولیه آن در محیط کشت رودیک^۲ انجام شد [۱۳]. تمام مواد شیمیایی مورد استفاده در محیط کشت از شرکت آلمانی مرک با خلوص ۹۸-۹۹/۵٪ خریداری شد. محیط کشت به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۱۲۱ درجه سلسیوس استریل شد.

۲-۲ سامانه کشت آزمایشگاهی

چهار ارلن مایر (با حجم ۱ لیتر و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر) به منظور کشت نمونه‌های مختلف به عنوان فتوبیوراکتورها استفاده شد. همان‌طور که در شکل (۱) پیداست؛ یک لوله دوجداره در مرکز هر

یک از ارلن‌ها قرار داده شد. فاصله خالی بین جداره‌ها برابر ۰/۵ سانتی‌متر بود که برای نمونه اصلی به وسیله محلول رودامین 6G با غلظت 0.25 g L^{-1} پر شد. برای نمونه شاهد، این فضا با آب مقطر پر شد. همچنین یک لامپ LED سفید به عنوان منبع نور در وسط لوله قرار داده و سطح خارجی ارلن مایر با فویل آلومینیومی پوشانده شد. هر یک از ارلن‌ها حاوی ۹۰۰ میلی‌لیتر محیط کشت بود که با ۲ میلی‌لیتر از محلول ریزجلبک تلقیح شد. هوادهی به هر یک از ارلن‌ها تبا پمپ هوا انجام شد و آزمایش‌ها در دمای 27 ± 2 درجه سلسیوس انجام گرفت. شرایط مربوط به هر یک از نمونه‌ها در جدول (۱) بیان شده است. به منظور اندازه‌گیری شدت نور از یک کوانتامتِر (QUA SKP215 SKYE Instruments Ltd, UK) استفاده شد.



شکل ۱. طرحواره سامانه آزمایشگاهی.

Figure 1. Schematic of experimental setup.

1. *Chlorella* sp.

2. Rudic's Culture Medium

جدول ۱. شرایط مربوط به نمونه‌های مختلف.

Table 1. Conditions of different samples.

Sample	Light intensity $\frac{\mu\text{mol photon}}{m^2s}$	Filling solution
Control 100	100	Distilled water
Main 100	100	Rhodamine 6G
Control 300	300	Distilled water
Main 300	300	Rhodamine 6G

۳-۲ مشخصه‌های رشد

برای به دست آوردن چگالی نوری^۱ (OD) میزان جذب نور برای هر یک از نمونه‌های ریزجلیک در ۵۶۰ نانومتر با استفاده از یک دستگاه طیفسنج نوری (Philler scientific, SU6100) اندازه‌گیری شد. رابطه بین غلظت زیست‌توده (X , mg L^{-1}) یا وزن خشک و OD در ۵۶۰ نانومتر با استفاده از تخمین زیر به دست آمد [۱۷]:

$$X = 490 * OD_{560} \quad (1)$$

هم‌چنین سرعت رشد ویژه از رابطه زیر به دست آمد [۲۹]:

$$\mu = \frac{\ln \frac{X_t}{X_0}}{t} \quad (2)$$

که μ نشان‌دهنده سرعت رشد ویژه (day^{-1})، X_t و X_0 به ترتیب نشان‌دهنده غلظت زیست‌توده در زمان t و ابتدای آزمایش است. به علاوه بهره‌وری زیست‌توده^۲ (P , $\text{mg L}^{-1} \text{day}^{-1}$) با استفاده از رابطه زیر به دست آمد [۱۹]:

$$P = \frac{X_f - X_0}{t_f} \quad (3)$$

که در رابطه بالا X_f نشان‌دهنده غلظت زیست‌توده در پایان دوره کشت (t_f) است.

۴-۲ میزان تبدیل فوتون به زیست‌توده

بسته به انرژی هر فوتون میزان تأثیر آن بر رشد ریزجلیک‌ها متفاوت است، بنابراین نسبت زیر (R_{N0}) به منظور ارزیابی این میزان تبدیل تعریف شد:

$$R_{N0} = \frac{P}{N_0} \quad (4)$$

که در رابطه بالا P میزان بهره‌وری زیست‌توده و N_0 تعداد فوتون‌های خروجی از منبع نور ($\frac{\mu\text{mol photon}}{m^2s}$) است.

۵-۲ مدل‌های رشد

۱-۵-۲ مدل لاجستیک

مدل لاجستیک یکی از مدل‌هایی که در آن میزان غلظت زیست‌توده تابعی از غلظت سوبسترا نیست و در واقع می‌توان گفت غلظت زیست‌توده صرفاً تابعیتی از زمان دارد. به همین دلیل می‌توان با به دست آوردن ضرایب این مدل لاجستیک در زمان‌های مختلف غلظت زیست‌توده را پیش‌بینی کرد. در مدل لاجستیک نقطه عطف در میانه رشد شکل می‌گیرد [۳۰]. از این مدل می‌توان در منحنی‌های رشد که خیلی از حالت تقارن خارج نشده‌اند، استفاده کرد. طبق این معادله، غلظت زیست‌توده (X_t) در طول زمان از رابطه زیر پیروی می‌کند:

$$X_t = \frac{K}{1 + \frac{K - X_0}{X_0} e^{-rt}} \quad (5)$$

1. Optical Density
2. Productivity

که در رابطه بالا X_0 و t به ترتیب غلظت زیست توده در زمان t و سرعت رشد تحت شرایط ایده آل است. هم چنین k غلظت زیست توده در حالتی که دیگر ثابت شده باشد مانند غلظت در فاز ایستایی است.

۲-۵-۲ مدل گامپرتز

در مدل گامپرتز نیز غلظت زیست توده صرفاً تابعی از زمان است. در مدل گامپرتز نقطه عطف منحنی هنگامی حاصل می شود که رشد به ۳۵ تا ۴۰ درصد میزان نهایی خود رسیده باشد. تفاوت بین این مدل و مدل لاجستیک در وجود تقارن حول نقطه انحنای در مدل لاجستیک و عدم وجود تقارن در مدل گامپرتز است [۳۱]. این معادله به شکل زیر است:

$$X_t = X_0 e^{\ln\left(\frac{X_t}{X_0}\right)(1-e^{-bt})} \quad (6)$$

که در رابطه بالا X_f غلظت نهایی زیست توده و b سرعت اولیه رشد است.

۲-۵-۳ ارزیابی مدل ها

به منظور ارزیابی کیفیت مقادیر برآورده شده و مدل های رگرسیون استفاده شده از ضریب تبیین (R^2) و انحراف مربع میانگین ریشه (RMSE) استفاده شد که تعریف هر یک از آن ها در زیر آمده است:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{iobs} - Y_{icalc})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_{iobs} - \bar{Y})^2} \quad (7)$$

$$\bar{Y} = \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n Y_{iobs}) \quad (8)$$

$$RMSE = \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n (Y_{iobs} - Y_{icalc})^2)^2 \quad (9)$$

که در رابطه های بالا n به تعداد مشاهده، obs به داده های مشاهده شده و $calc$ به داده های محاسبه شده اشاره می کند. تمام محاسبات فوق بالاستفاده از نرم افزار MATLAB R2018b و استفاده از روش رگرسیون غیر خطی انجام شد.

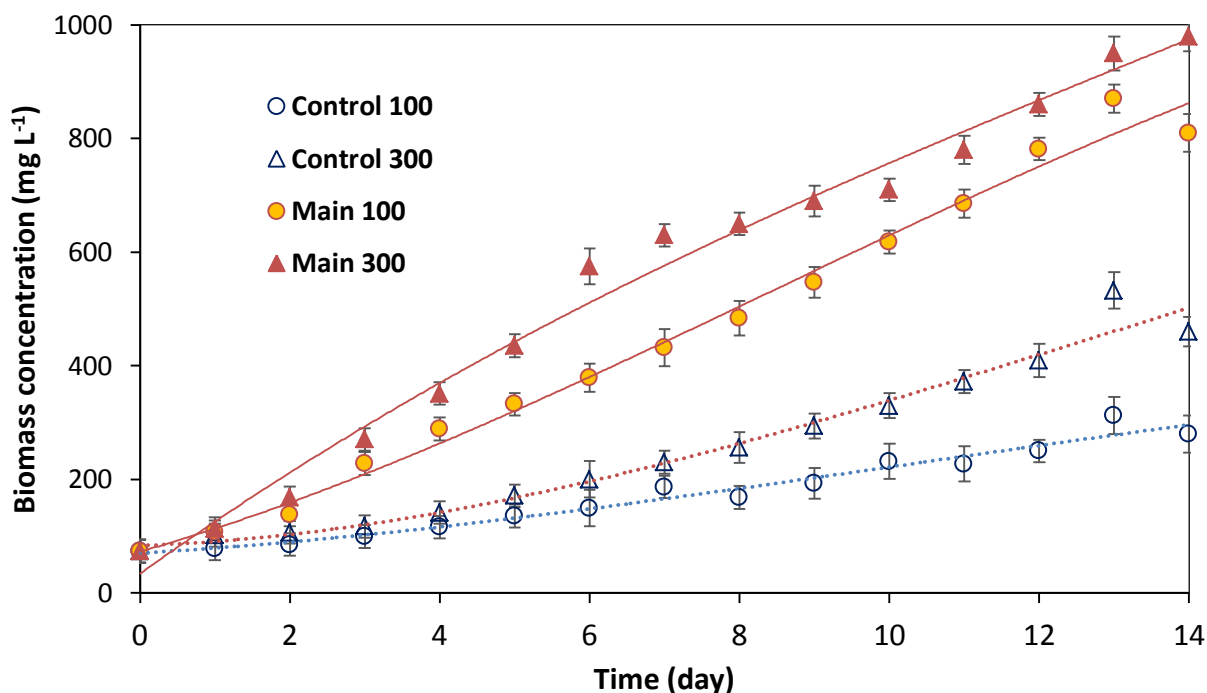
۳. نتایج و بحث

غلظت زیست توده برحسب زمان برای نمونه های مختلف در شکل (۲) ارائه شده است. باتوجه به این شکل و مقایسه نمونه های شاهد با اصلی، می توان گفت که استفاده از رودامین 6G باعث افزایش رشد ریز جلبک کلرلا شده است. محلول رودامین 6G می تواند فوتون های دارای طول موج ۴۷۰-۵۵۰ nm (انتهای طیف آبی و اکثر طیف سبز) را جذب و پس از تهییج شدن فوتون های در محدوده ۶۱۰-۶۳۵ nm (طیف نارنجی) را منتشر کند [۱۲ و ۴]. در واقع این رنگدانه، طول موج هایی که کمتر برای فتوسنتز مفید هستند؛ مانند سبز را جذب و طول موج های مفیدتر مانند نارنجی را منتشر می کند [۳۲ و ۱۰]. به همین دلیل استفاده از این رنگدانه به علت تبدیل و اصلاح طیف نور ورودی به داخل محیط کشت باعث افزایش رشد ریز جلبک شده است. هم چنین با بررسی نتایج مربوط به مشخصه های رشد در جدول (۲) می توان گفت در حالتی که تعداد فوتون های خروجی از منبع نور برابر $100 \frac{\mu mol \text{ photon}}{m^2 s}$ بوده، بهره وری زیست توده (P) ۲۲۰٪ افزایش پیدا کرده است. میزان این افزایش تابش تحت $300 \frac{\mu mol \text{ photon}}{m^2 s}$ برابر ۹۸٪ بوده است. در پژوهش خوبکار و دلاوری امرئی (۲۰۲۰) استفاده از محلول رودامین 6G در جداره جلویی یک فتوبیوراکتور دوجداره صفحه تخت، باعث افزایش ۶۰ درصدی در میزان بهره وری زیست توده شده است [۴]. هم چنین در کار پروکوپ و همکاران (۱۹۸۴) از محلول رودامین 6G در یک راکتور دوجداره ستون جبابی، استفاده شد که تأثیر مثبتی بر افزایش میزان رشد ریز جلبک کلرلا نداشته است [۳۲]. اما در پژوهش حاضر باتوجه به قرارگیری منبع نور در مرکز راکتور کشت و توزیع همگن نور و قرار دادن یک فویل در جداره خارجی به منظور بازتاب نور به داخل راکتور، در واقع ایجاد و بازگرداندن هر چه بیشتر فوتون های نارنجی به داخل راکتور، افزایش تا ۲۲۰ درصدی در میزان بهره وری زیست توده مشاهده شده است. به بیان دیگر نتایج حاصل از این تحقیق به وضوح نشان می دهد که دقت اندازه گیری، تأثیر روش تبدیل طیفی در افزایش میزان رشد نسبت به دیگر پژوهش ها افزایش یافته است.

هم چنین بررسی نسبت R_{N0} ، مشخصه ای که برای تخمین تبدیل فوتون به زیست توده است، نشان داد هر چقدر شدت تابش بیشتر شده، میزان استفاده از فوتون ها برای تولید زیست توده نیز افزایش

شده است. در این مرحله، برخی از مشخصه‌های مدل لاجستیک شامل K و X_0 از نتایج تجربی به دست آمده است تا سرعت رشد r در این مدل با دقت بیشتری به دست آید. هم‌چنین در مورد مدل گامپرتز نیز X_0 و X_f به همین ترتیب به دست آمدند تا سرعت رشد b با دقت بیشتری به دست آید. به‌طور کلی نتایج حاصل شده در جدول (۳) و (۴) نشان می‌دهد که مدل‌های رشد تحت تابش نور بالاتر، $300 \frac{\mu\text{mol photon}}{\text{m}^2\text{s}}$ ، انطباق بیشتری با داده‌های تجربی نشان داده‌اند ($R^2 > 0.96$). هم‌چنین نمونه‌های اصلی تحت تابش $300 \frac{\mu\text{mol photon}}{\text{m}^2\text{s}}$ و $100 \frac{\mu\text{mol photon}}{\text{m}^2\text{s}}$ با مدل‌های لاجستیک و گامپرتز نشان داده‌اند.

یافته است. هم‌چنین برای نمونه‌های اصلی، نمونه‌هایی که در آن‌ها نور ورودی به محیط کشت به وسیله محلول رودامین تبدیل شده است، مقدار مشخصه R_{N0} از نمونه‌های شاهد مربوط، بیشتر بوده است. این نتیجه نشان می‌دهد که استفاده از رودامین 6G میزان استفاده از فوتون‌ها را برای تولید زیست توده افزایش داده است. البته این میزان هنگامی که شدت نور افزایش یافت، کاهش پیدا کرد و از ۰/۵۷ به ۰/۲۱ رسید. به هر حال، میزان استفاده از فوتون‌ها در تولید زیست توده نسبت به نمونه شاهد تا ۴ برابر افزایش یافته است. نتایج مربوط به بررسی مدل‌های رشد لاجستیک و گامپرتز، شامل مشخصه‌های مدل و مشخصه‌های رگرسیون در جدول (۳) ارائه



شکل ۲. غلظت زیست توده برحسب زمان برای نمونه‌های مختلف.

Figure 2. Biomass concentration by time for different samples.

جدول ۲. مشخصه‌های رشد و R_{N0} مربوط به نمونه‌های مختلف.

Table 2. Growth parameters and R_{N0} of different samples.

Sample	P (mg.l ⁻¹ .day ⁻¹)	μ_{max} (day ⁻¹)	R_{N0}
Control 100	17.1	0.13	0.11
Main 100	55.5	0.38	0.57
Control 300	32.8	0.32	0.18
Main 300	64.8	0.44	0.21

جدول ۳. مشخصه‌های مدل لاجستیک با $X_0=73.5$ و داده‌های رگرسیون.

Table 3. Logistic model parameters with $X_0=73.5$ and regression data.

sample	K	r	RMSE	R ²
Control 100	312	0.21	19.25	0.93
Main 100	532	0.24	33.13	0.95
Control 300	875	0.35	39.6	0.98
Main 300	970	0.41	53.39	0.97

جدول ۴. مشخصه‌های مدل گامپرتز با $X_0=73.5$ و داده‌های رگرسیون.

Table 4. Gompertz model parameters with $X_0=73.5$ and regression data.

sample	X _f	b	RMSE	R ²
Control 100	312	0.14	23.58	0.9
Main 100	532	0.15	44.89	0.9
Control 300	875	0.20	51.97	0.96
Main 300	970	0.24	41.10	0.98

۴. نتیجه‌گیری

تبدیل طیفی نور تأثیر قابل‌توجهی بر رشد ریزاندام‌های فتوسنتزکننده از جمله ریزجلبک‌ها دارد. نتایج نشان داد با به‌کارگیری روش تجربی ارائه‌شده در این پژوهش می‌توان ارزیابی دقیق‌تری از تأثیر تبدیل طیفی بر رشد ریزجلبک‌ها به‌دست آورد. رنگدانه فلورسانس رودامین 6G استفاده‌شده در این پژوهش باعث شد تا میزان بهره‌وری زیست‌توده تا ۲۲۰٪ و میزان استفاده از نور لامپ LED سفید برای تولید زیست‌توده تا ۴ برابر افزایش یابد. درواقع با صرف انرژی الکتریکی کمتری می‌توان میزان زیست‌توده یکسانی، نسبت به حالتی که از تبدیل‌کننده طیفی استفاده نشده، تولید کرد. استفاده از مواد تبدیل‌کننده طیفی دیگر که دارای بازده کوانتومی^۱ بیشتری هستند و یا موادی که طیف جذب و نشر متفاوت‌تری با رنگدانه رودامین 6G دارند، می‌تواند باعث افزایش رشد بیشتری برای ریزجلبک‌ها شود. هم‌چنین با به‌کاربردن یک استوانه به‌جای ارلن به‌عنوان راکتور کشت، می‌توان نتایج دقیق‌تری به‌دست آورد؛ چراکه قطر استوانه در طول آن ثابت، اما قطر ارلن متغیر است.

۵. تشکر و قدردانی

از یاری و راهنمایی‌های مسئولان و کارشناسان آزمایشگاه مرکزی دانشگاه بجنورد که باعث انجام هرچه بهتر این پژوهش در محل «آزمایشگاه محیط زیست و انرژی» شدند، تشکر و قدردانی می‌کنیم.

مراجع

- [1] Borowitzka, M., (2018). "Commercial-Scale Production of Microalgae for Bioproducts." *Blue biotechnology: production and use of marine molecules*, 1: 33-65. DOI:10.1002/9783527801718.ch2
- [2] Khoobkar, Z., Delavari Amrei, H., Heydarinasab A., & Mohammad Mirzaei, M. A. (2022). Biofixation of CO₂ and biomass production from model natural gas using microalgae: An attractive concept for natural gas sweetening. *Journal of CO₂ Utilization*, 64: 102153. DOI:10.1016/j.jcou.2022.102153
- [3] Gonzalez-Camejo, J., Barat, R., Paches, M., Murgui, M., Seco, A., & Ferrer, J. (2018). Wastewater nutrient removal in a mixed microalgae-bacteria culture: effect of light and temperature on the microalgae-bacteria competition. *Environmental technology*, 39: 503-515. DOI:10.1080/09593330.2017.1305001

1. Quantum Yield

- [4] Khoobkar, Z., & Delavari Amrei, H. (2020). Effect of fluorescent dye positioning and concentration on the growth parameters and lipid content of *Chlorella* sp. in a flat panel photobioreactor. *Biotechnology Letters*, 42: 1397-1405. DOI:10.1007/s10529-020-02862-9
- [5] Khoobkar, Z., & Delavari Amrei, H. (2021). Effect of photo, hetero and mixotrophic conditions on the growth and composition of *Anabaena variabilis* :an Energy Nexus approach. *Energy Nexus*, 2: 100010. DOI:10.1016/j.nexus.2021.100010
- [6] Singh, S. P., & Singh, P. (2015). Effect of temperature and light on the growth of algae species: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50: 431-444. DOI:10.1016/j.rser.2015.05.024
- [7] Arshadi, M., Yaghmaei, S., & Zamir, S. M. (2017). Microalgae and factors affecting their cultivation. *Journal of Iranian Chemical Engineering*, 16: 56-65. In Persian. DOR:20.1001.1.17355400.1396.16.92.5.4
- [8] Jensen, S., & Knutsen, G. (1993). Influence of light and temperature on photoinhibition of photosynthesis in *Spirulina platensis*. *Journal of Applied Phycology*, 5: 495-504. DOI:10.1007/BF02182508
- [9] Lehmuskero, A., Skogen Chauton, M., & Bostrom, T. (2018). Light and photosynthetic microalgae: A review of cellular- and molecular-scale optical processes. *Progress in Oceanography*, 168: 43-56. DOI:10.1016/j.pocean.2018.09.002
- [10] Khoobkar, Z., Pajoum Shariati, F., Safekordi, A., & Delavari Amrei, H. (2019). Performance assessment of a novel pyramid photobioreactor for cultivation of microalgae using external and internal light sources. *Food technology and biotechnology*, 57: 68-76. DOI:10.17113/ftb.57.01.19.5702
- [11] Moosavi Zenooz, A., Zokaee Ashtiani, F., Ranjbar, R., & Javadi, N. (2016). *Synechococcus* sp. (PTCC 6021) cultivation under different light irradiances- Modeling of growth rate-light response. *Preparative Biochemistry & Biotechnology*, 46: 567-574. DOI:10.1080/10826068.2015.1084931
- [12] Kohen, E., Santus, R., Hirschberg, J.G., (1195). "Photobiology", Academic Press, New York.
- [13] Delavari Amrei, H., & Ranjbar, R. (2018). Influence of fluorescent coating at rear and front side of a flat panel photobioreactor on algal growth. *Journal of Applied Phycology*, 30: 901-907. DOI:10.1007/s10811-017-1303-3
- [14] Leone, G., De la Cruz Valbuena, G., Cicco, S.R., Vona, D., Altamura, E., Ragni, R., Molotokaite, E., Cecchin, M., Cazzaniga, S., Ballottari, M., D'Andrea, C., Lanzani, G., & Maria Farinola, G. (2021). *Incorporating a molecular antenna in diatom microalgae cells enhances photosynthesis*. *Scientific Reports*, 11: 5209. DOI:10.1038/s41598-021-84690-z
- [15] Ritchie, R. (2010). Modelling photosynthetic photon flux density and maximum potential gross photosynthesis. *Photosynthetica*, 48: 596-609. DOI:10.1007/s11099-010-0077-5
- [16] Mohsenpour, S. F., & Willoughby, N. (2013). Luminescent photobioreactor design for improved algal growth and photosynthetic pigment production through spectral conversion of light. *Bioresource technology*, 142: 147-153. DOI:10.1016/j.biortech.2013.05.024
- [17] Wondraczek, L., Batentschuk, M., Schmidt, M. A., Borchardt, R., Scheiner, S., Seemann, B., Schweizer, P. & Brabec, C. J. (2013). Solar spectral conversion for improving the photosynthetic activity in algae reactors. *Nature communications*, 4: 1-6. DOI:10.1038/ncomms3047
- [18] Shen, L., & Yin, X. (2022). Solar spectral management for natural photosynthesis: from photonics designs to potential applications. *Nano Convergence*, 9: 36. DOI:10.1186/s40580-022-00327-5
- [19] Delavari Amrei, H., Nasernejad, B., Ranjbar, R., & Rastegar, S. (2014). Spectral shifting of UV-A wavelengths to blue light for enhancing growth rate of cyanobacteria. *Journal of Applied Phycology*, 26: 1493-1500. DOI:10.1007/s10811-013-0187-0
- [20] Mirzaie, M. A. M., Lak, Z. J., & Meybodi, F. H. (2018). A New Shifting Strategy in Flashing Light Based on the Cell Growth Curve to Enhance β -carotene Biosynthesis in *Dunaliella salina*. *Current Microbiology*, 78: 2733-2740. DOI:10.1007/s00284-021-02542-5
- [21] Yang, L., Su, Q., Si, B., Zhang, Y., Zhang, Y., Yang, H., & Zhou, X. (2022). Enhancing bioenergy production with carbon capture of microalgae by ultraviolet spectrum conversion via graphene oxide quantum dots. *Chemical Engineering Journal*, 429: 132-230. DOI:10.1016/j.cej.2021.132230
- [22] Delavari Amrei, H., Ranjbar, R., Rastegar, S., Nasernejad, B., & Nejadbrahim, A. (2015). Using fluorescent material for enhancing microalgae growth rate in photobioreactors. *Journal of applied phycology*, 27: 67-74. DOI:10.1007/s10811-014-0305-7
- [23] Delavari Amrei, H., & Khoobkar, Z. (2021). Using Phycocyanin as Spectral Converter on the Growth Parameters and Lipid Content of the Green Microalga *Chlorella* sp. in a Double Layer Flat Panel Photobioreactor. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 193: 940-951. DOI:10.1007/s12010-020-03479-4
- [24] 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: 324-331. DOI:10.1080/09670262.2014.919030
- [25] Mohsenpour, S. F., Richards, B., & Willoughby, N. (2012). Spectral conversion of light for enhanced microalgae growth rates and photosynthetic pigment production. *Bioresource technology*, 125: 75-81. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.08.072>
- [26] Raeisossadati, M., Moheimani, N. R., & Parlevliet, D. (2020). Red luminescent solar concentrators to enhance *Scenedesmus* sp. biomass productivity. *Algal Research*, 45: 101771. DOI:10.1016/j.algal.2019.101771
- [27] Seo, Y. H., Cho, C., Lee, J. Y., & Han, J. I. (2014). Enhancement of growth and lipid production from microalgae using fluorescent paint under the solar radiation. *Bioresource Technology*, 173: 193-197. DOI:10.1016/j.biortech.2014.09.012
- [28] Seo, Y. H., Lee, Y., Jeon, D. Y., & Han, J. I. (2015). Enhancing the light utilization efficiency of microalgae using organic dyes. *Bioresource Technology*, 181: 355-359. DOI:10.1016/j.biortech.2015.01.031
- [29] Mohseni, F., & Moosavi Zenooz, A. (2018). Modeling *Synechococcus* sp. Growth under Different Light Regimes. *Journal of Iranian Chemical Engineering*, 18: 78-90. DOR:20.1001.1.17355400.1398.18.105.6.5
- [30] Peleg, M., & Shetty, K. (1997). Modeling microbial populations with the original and modified versions of the continuous and discrete logistic equations. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 37: 471-490. DOI:10.1080/10408399709527785
- [31] Winsor, C. P. (1932). The Gompertz Curve as a Growth Curve. *Proceedings of the national academy of sciences*, 18: 1-8. DOI:10.1080/1040839970952778510.1073/pnas.18.1.1
- [32] Prokop, A., Quinn, M. F., Fekri, M., Murad, M., & Ahmed, S. A. (1984). Spectral shifting by dyes to enhance algae growth. *Biotechnololy and Bioengineering*, 26: 1313-1322. DOI:10.1002/bit.260261108