مقاله علمی–ترویجی:
معرفی اصول، اجزاء و روش‌های پرورش ریزجلبک در فوتوبیورآکتورها

محمد امینی چرمهینی[۱]، داود ضرغام[۲*]

*davoodzargham61@gmail.com

۱-استادیار گروه شیلات، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی خاتم الأنبیاء بهبهان، ایران
۲-موسسه تحقیقات علوم شیلاتی کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: مهر ۱۳۹۹
تاریخ پذیرش: آذر ۱۳۹۹

کلمات کلیدی: ریزجلبک، فوتوبیورآکتورها، تولید

مقدمه

در سال‌های اخیرپرورش ریزجلبک‌ها یکی از جذاب‌ترین و پررونق‌ترین فعالیت‌های آبزی‌پروری و غیر آبزی‌پروری بوده است. توجه و اهتمامی که اخیراً در خصوص بیوتکنولوژی ریزجلبک‌ها ایجاد شده است، به دلیل نگرانی در مورد کاهش گازهای گلخانه‌ای، تولید سوخت پایدار (به‌خصوص سوخت هواپیما) و عدم اطمینان از عرضه مواد نفتی معدنی پدید آمده است. بیوتکنولوژی ریزجلبک‌ها در حال حاضر، در بسیاری از کشورها به مقدار زیادی تأمین مالی و حمایت می‌شود. یکی از عوامل غیر آبزی‌پروری که باعث این موفقیت‌ها و پیشرفت‌های بزرگ در بیوتکنولوژی ریزجلبک‌ها شده است، امکان‌سنجی اقتصادی و مقیاس پذیری آن برای رقابت با سوخت‌های فسیلی است. این تحولات به سوی واحدهای تولیدی بسیار بزرگ ریزجلبک برای ضبط و استفاده از کربن (CCU[۱]) (پروژه‌هایی که از گاز کک صنعتی برای تولید سوخت‌های زیستی استفاده می‌کنند)، هدایت شده است. هرچند به‌نظر می‌رسد با تکیه بر روش‌های سنتی و قدیمی پرورش ریزجلبک رسیدن به این هدف دور از ذهن می‌باشد و باید نسل جدیدی از سیستم‌های تولید ریزجلبک‌ها ایجاد شود. ساخت و راه‌اندازی فوتوبیورآکتور[۲] برای تولید ریزجلبک در ابتدا بیشتر در مناطق با اقلیم سرد توسعه یافت. اما امروزه با توجه به نیاز بالا به محصولات ریزجلبکی، محصولات و کاربردهای متنوع ریزجلبک‌ها، محدودیت منابع و فضا، و همچنین تنوع اقلیمی کشور ما، حرکت در این زمینه می‌تواند یکی از گزینه‌های جذاب در آینده باشد. تاکنون استفاده از فن‌آوری فوتوبیورآکتورهای بسته، هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی بسیار زیادی داشته است. به همین دلیل سیستم‌های فوتوبیورآکتور بسته پیشرفته در حال حاضر به طور عمده برای تولید محصولات بسیار با ارزش جلبکی استفاده می‌شود. با این وجود، فوتوبیورآکتورهای بسته دارای مزایایی در مقایسه با استخرهای باز می‌باشند که شامل: شرایط کشت با قابلیت تداوم بیشتر (هیدرودینامیک قابل کنترل، دمای قابل کنترل فوتوبیورآکتور)، تولیدات (حجمی) بالاتر، انعطاف پذیری بیشتر نسبت به اثر عوامل محیطی، خطر کم آلودگی (زنده و غیرزنده)، تولید طیف وسیعی از میکروارگانیسم‌های

[1] Carbon capture and use

[2] Photobioreactor

[Downloaded from ornamentalaquatics.ir on 2025-07-01]
[DOR: 20.1001.1.24234575.1399.7.4.5.8]

فوتوتروفیک، کاهش تلفات ناشی از دی اکسید کربن جذب نشده، کاهش تبخیر آب، و فضای مورد نیاز کم برای تجهیزات می‌باشد(هاف و اسنل، ۱۳۷۸).

هدف این گزارش تجربی، ارائه تجربه ۳۰ ساله و بررسی چالش‌ها و نتایج توسعه فوتوبیورآکتور و برنامه‌های کاربردی صنعتی در شرکت IGV GmbH (IGV Biotech) آلمان است. با توجه به اینکه شرکت مذکور از شرکت‌های پیشرو در این زمینه می‌باشد، می‌تواند الگوی مناسبی برای طراحی و راه‌اندازی اولیه فوتوبیورآکتورها باشد. البته فوتوبیورآکتورهای IGV با قانون مالکیت اختراعات محافظت می‌شود. از این‌رو، جزئیات فنی طراحی آنها در اختیار عموم قرار نمی‌گیرد(Pulz *et al.*, 2013).

کنترل سیستم‌های بسته برای تولید ریزجلبک

پرورش ریزجلبک‌ها با اهداف گوناگونی انجام می‌شود که از جمله می‌توان به آبزی پروری، تولید رنگدانه‌های طبیعی مثل آستازانتین و سایر کاروتنوئیدها، تولید روغن‌هایی نظیر PUFA، غذا و افزودنی‌های خوراکی، مواد آرایشی و دارویی، جذب دی اکسیدکربن و تولید سوخت مایع، تولید ذخیره قابل اطمینان برای تلقیح سیستم‌های تولید با مقیاس انبوه مثل فوتوبیورآکتورها اشاره نمود. در همه موارد مذکور سعی شده است که شرایط ذیل فراهم شود:

- تأمین نور مؤثر برای کارایی فتوسنتزی بهینه (PE[1])
- تراکم سلول بالا در محیط کشت / رشد بالا
- کشت طیف گسترده‌ای از گونه‌های ریزجلبکی
- فرایند کنترل خودکار پارامترهای تولید و کیفیت زیست توده قابل تداوم
- سرمایه گذاری و شرایط اجرا مقرون به صرفه
- جمع و جور بودن سیستم و مقیاس پذیری ساده
- تبادل کارآمد گازهای اکسیژن/دی اکسید کربن
- کاهش تلفات آب، و تمیز کردن آسان

مجموعه این شرایط که به عنوان اهداف اجرایی در کشت ریزجلبک برای پرورش‌دهنگان مطرح بوده است، باعث تکامل سیستم‌های پرورشی و در نهایت ابداع فوتوبیورآکتورها شده است. نمونه‌ای از سیستم کنترل فرایند یکپارچه (PCS[2]) با پروب های حسگر خاص که در سیستم های فوتوبیورآکتور IGV استفاده می‌شود در جدول ۱ ارائه شده است. در این سیستم کنترلی سعی شده است تا حد امکان شرایط مذکور به بهترین شکل فراهم شود.

سیستم های فوتوبیورآکتور مورد بهره‌برداری با استفاده از IGV

شرکت IGV Biotech تاکنون چندین نوع سیستم فوتوبیورآکتور با مشخصات متفاوت توسعه داده است:

۱) سیستم‌های غربالگری رآکتوری با سیلندر شیشه‌ای دوگانه، براساس انتقال با هوا[3]، روشنایی نور مصنوعی
۲) فوتوبیورآکتور لوله‌ای- شیشه‌ای با قطر ۶۰-۲۰ میلی‌متر
۳) فوتوبیورآکتور صفحه‌ای پلاستیکی با ضخامت ۱۲ میلی‌متر
۴) بیورآکتورهای صفحه خیلی نازک با ضخامت ۲-۰/۵ میلی متر (در حال توسعه)
۵) بیورآکتورهای تراکم بالا با ۵۰ گرم در لیتر سلول توده زنده در محیط کشت (در حال توسعه)
۶) فوتوبیورآکتور های استریل ۱۰۰-۲ لیتر حجم محیط کشت

جدول ۱: فرآیندهای پایش یا کنترل شده در فوتوبیورآکتورهای IGV

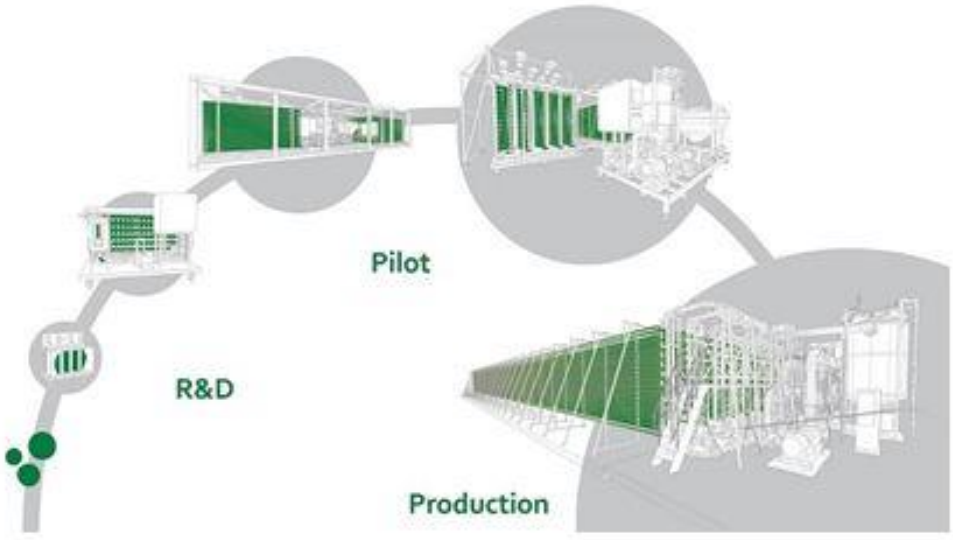
پارامتر	پایش	کنترل
اکسیژن (محلول و گازی)	+	
دی اکسید کربن (محلول و گازی)	+	
مقدار pH/CO_2	+	+
کدورت	+	
تراکم نور (طول موج‌های مختلف)	+	
درجه حرارت	+	+
فشار	+	+
میزان/ سرعت جریان	+	+
ردوکس پتانسیل	+	
هدایت الکتریکی	+	
سطح مایع در لوله‌ها	+	+
شدت نور	+	+
سیستم اخطار دی اکسیدکربن	+	
شیر تخلیه گاز (بالای منبع سیستم)		+

[1] Photosynthetic efficiency

[2] Process control system
[3] Airlift

[Downloaded from ornamentalaquatics.ir on 2025-07-01]
[DOR: 20.1001.1.24234575.1399.7.4.5.8]

به طور کلی، فوتوبیورآکتورها می‌توانند بر اساس مقیاس و کاربرد به پنج دسته: غربالگری، آزمایشگاهی، پایلوت (تولید در مقیاس گلخانه‌ها)، تولید تجاری و راکتورهای مخزنی تقسیم شوند. بنابراین، با توجه به نیاز هر مجموعه می‌تواند مقیاس مورد نظر خود را انتخاب کند. یکی از مزیت‌های فوتوبیورآکتورها همین قابلیت مقیاس پذیری می‌باشد (شکل ۱). گرایش بازار اخیراً به سوی حجم‌های بیشتر در واحد های انفرادی فوتوبیورآکتورهای لوله‌ای- شیشه‌ای است که برای اهداف تلقیح در نظر گرفته شده است. استفاده از فوتوبیورآکتورهای نوع صفحه‌ای پلاستیکی متوقف شده است، زیرا این نوع فوتوبیورآکتور ها مقیاس پذیری پایین (حدود ۶۰۰۰ لیتر بزرگترین اندازه ممکن یک واحد تولیدی است) و پایداری پایین تر مواد پلاستیکی در مقایسه با شیشه از تولید خارج شده است. به عنوان یک مسیر امیدوار کننده برای توسعه سیستم های فوتوبیورآکتورهای کم هزینه و باکیفیت بالا، امروزه عمدتاً بر کاهش ضخامت لایه برای بهبود فراهم نمودن انرژی نور کار می‌شود.



شکل ۱: مقیاس‌های مختلف از بیورآکتورهای IGV

شرح فنی فوتوبیورآکتورهای IGV

مفهوم

ایده بنیادی برای تحقق فوتوبیورآکتورهای چندگانه شیشه‌ای، یک لایه نازک سلول‌های فتوسنتزکننده است. انتخاب طراحی لوله‌ای برای بخش فتوسنتزکننده فوتوبیورآکتورها اجازه می‌دهد تا با آرایش فضایی عمودی، صرفه جویی در فضای مورد استفاده در نظر گرفته شود. فوتوبیورآکتورهای با تولید بالا، نیاز کم به فضا و مقیاس های مختلف نتیجه این مفهوم است.

فوتوبیورآکتورها از طراحی پایه نشان داده شده در شکل ۲ پیروی کرده است و به شرح ذیل می‌باشند:

ماژول لوله‌ای

ماژول لوله‌ای بخش فتوسنتزی فوتوبیورآکتور است. لوله‌های شیشه‌ای به صورت افقی مرتب شده و به صورت عمودی روی یک پایه فولادی مناسب قرار گرفته‌اند. لوله‌های شیشه‌ای منفرد از طریق زانوهای شیشه‌ای ویژه به یکدیگر متصل می‌شوند تا یک حلقه پیوسته درون ماژول‌ها شکل بگیرد. برای مقیاس‌های مختلف، تعدادی ماژول برای ایجاد حجم فتوسنتز مورد نیاز مشتری به همدیگر متصل می‌گردند. قفسه ماژول به دستگاه‌های کمکی متمرکز متصل می شود.

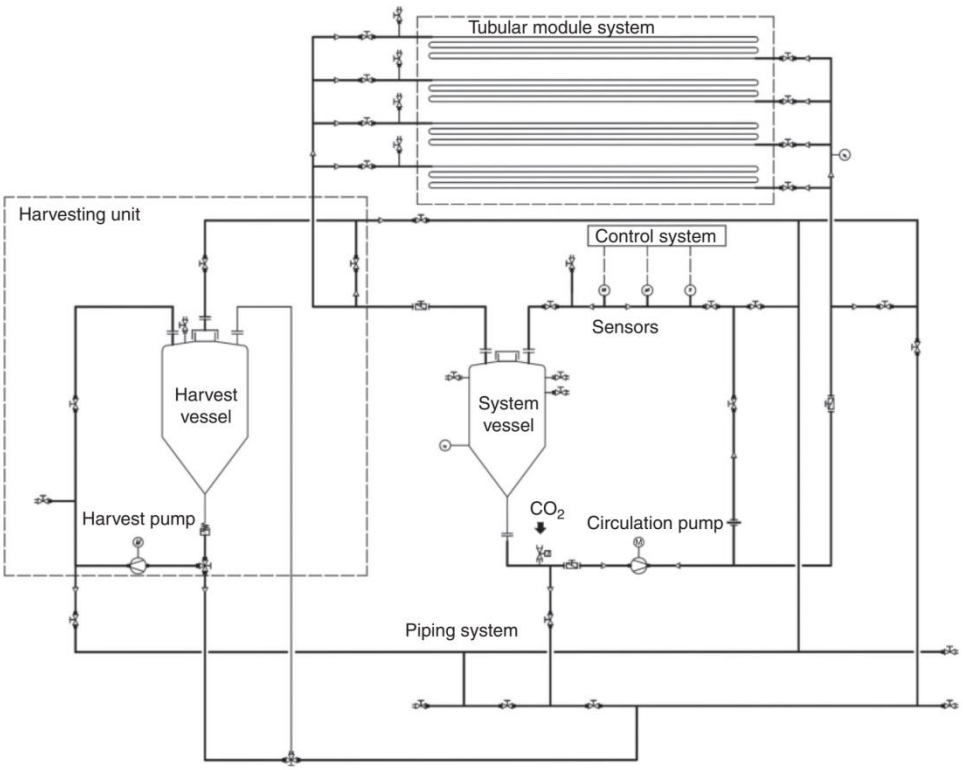
[Downloaded from ornamentalaquatics.ir on 2025-07-01]
[DOR: 20.1001.1.24234575.1399.7.4.5.8]

لوله‌های سیستم

لوله‌های سیستم دستگاه مرکزی برای تخلیه اکسیژن فتوسنتز است. همچنین، منبع اولیه برای پمپ‌ها را فراهم و توزیع منظم محیط کشت جلبک را در کل تشکیلات تضمین می‌کند.

پمپ گردش

جریان محیط کشت در ماژول‌های لوله‌ای توسط پمپ گردش می‌شود. این دستگاه با یک مبدل فرکانس در PCS کنترل می شود که به سازگاری فرآیند با محدودیت تنش تلاطمی مختلف برای جلبک های مختلف کمک می‌کند. علاوه بر این پمپ، گاز دی اکسیدکربن را به صورت حباب‌های با اندازه مناسب انحلال در محیط کشت پراکنده میکند. دی اکسیدکربن براساس pH تنظیم می شود، اما می‌تواند به صورت جریان دائمی حجمی نیز تأمین شود. دی اکسیدکربن به وسیله یک دریچه اتوماتیک و یک کنترل کننده جریان برای تنظیم ظرفیت به محیط کشت منتقل می‌شود.



شکل ۲: طرح پایه فوتوبیورآکتورهای IGV

سیستم لوله کشی

سیستم لوله کشی تمام تجهیزات فنی را به ماژول لوله‌ای متصل می‌کند و عملیات ساده ای را برای کشت و برداشت فراهم می‌کند. طراحی لوله کشی اجازه می‌دهد سرعت جریان همگن در تمام ماژول های لوله‌ای برقرار شود، و همچنین فضاهای مرده تا حد امکان به حداقل برسد. تمام لوله‌ها را می‌توان از طریق گرانش با استفاده از نازل برداشت مرکزی تخلیه کرد.

سیستم کنترل فرآیند (PCS) و نمایش

PCS ترکیبی از یک ماژول ثبت اطلاعات مرکزی و یک دستگاه کنترل است که به طور خودکار با استفاده از تکنیک‌های اضافی، تمام پارامترهای رشد موفق جلبک را کنترل می‌کند. تجربه IGV منجر به انتخاب مجموعه خوبی از سنسورهای خاص شده است که مناسب برای کشت جلبک و اندازه‌گیری‌های آنلاین است. تمام دستگاه‌های کنترل PCS (مبدل فرکانس و کنترل کننده pH) در یک سوئیچ کابینتی

[Downloaded from ornamentalaquatics.ir on 2025-07-01]

[DOR: 20.1001.1.24234575.1399.7.4.5.8]

فولادی ضد زنگ (IP 54) نصب می‌شوند که به طور کلی، روی قاب فولادی همانند ماژول لوله‌ای قرار می‌گیرد. خلاصه‌ای از تمام داده‌های روند مربوطه در یک صفحه نمایش ۵/۷ اینچی با یک رابط کاربری گرافیکی خاص نمایش داده می‌شود. پنل کنترل یکپارچه اجازه می‌دهد که همه پارامترهای فرایند به صورت مستقیم تغییر داده شوند و امکان گرفتن خروجی از داده‌ها نیز فراهم می‌باشد.

سیستم برداشت

دستگاه مرکزی این سیستم یک پمپ برداشت است که از طریق پمپ تخلیه به فوتوبیوراکتور متصل می‌شود. این پمپ‌ها مقدار محیط کشت برداشت شده حاوی جلبک را به دستگاه‌های جداسازی و خشک‌کن منتقل می‌کنند تا فرآیندهای پایین دست و فرآوری را تغذیه کنند.

نورپردازی

تمام مقیاس‌های فوتوبیوراکتور از مقیاس آزمایشگاهی تا ۱۰۰ لیتر به طور استاندارد با نور مصنوعی لامپ‌های فلورسنت یا لامپ‌های سدیم فشار بالا مجهز می‌شوند. در صورت نیاز، سایر فوتوبیوراکتورهای با مقیاس‌های بزرگتر را می‌توان با نورپردازی با مشخصات مذکور و نیز با LED عرضه کرد. فوتوبیوراکتورهای با مقیاس صنعتی عمدتاً از نور خورشید استفاده می‌کنند.

پروتکل اصلی تولید یک کشت ریزجلبکی

IGV برای تمام فوتوبیوراکتورهای لوله‌ای- شیشه‌ای، اصول یکسانی برای پروتکل تولید توصیه می‌نماید. البته هر کاربر فوتوبیوراکتور باید بهترین دانش فیزیولوژی و زیست شناسی ارگانیسمی که قصد تولید آن را دارد، بدست آورد. این پروتوکل برای انجام کشت‌های آزمایشگاهی در فوتوبیوراکتورهای کوچک نیز صادق است و اجازه می‌دهد شرایط تنش، برای مثال، تراکم سلولی و سرعت جریان بالا در این مقیاس شبیه‌سازی شود. بر اساس این اطلاعات، حداقل و حداکثر نقاط تنظیم پارامترهای کنترل شده مانند pH، دما، سرعت جریان و شدت نور در PCS ثبت می‌شوند. پارامترهای کنترل شده و نظارت شده (جدول ۱)، به طور مداوم بر صفحه نمایش PCS نمایش و ثبت می‌شوند.

اولین مرحله برای شروع کشت، پرکردن فوتوبیوراکتور با آب با کیفیت مشخص و پر کردن مواد مغذی یا به طور مستقیم به مخزن سیستم یا آماده شدن در یک محلول ذخیره در یک مخزن جداگانه می‌باشد. PCS پارامترها را کنترل و به طور خودکار مقدار pH را با میزان دوز و بازده دی اکسید کربن تنظیم می‌کند. در صورت نیاز، تنها غلظت اکسیژن باید به صورت دستی تنظیم شود. سیستم‌های خنک کننده یا گرمایش مانند سیستم‌های خنک‌کننده تبخیر، سایبان نور خورشید یا تجهیزات گرمایش می‌توانند با حسگر دمای PCS تنظیم شوند. روشنایی مصنوعی به طور خودکار از مقادیر تنظیم شده پیروی می‌کند. برای تلقیح فوتوبیوراکتور، غلظت اولیه ۰/۲ گرم ماده خشک در لیتر توصیه می شود. با توجه به مقدار قابل دسترس از تلقیح، یا کل حجم فوتوبیوراکتور تلقیح می‌شود یا حداقل یک ماژول لوله‌ای- شیشه‌ای که به‌نوبه خود به عنوان تلقیح برای تمام فوتوبیوراکتور عمل می‌کند. از طریق بررسی چشمی تراکم، رشد می‌تواند مشاهده شود. همچنین می‌توان از طریق کالیبراسیون، مقیاسی برای تبدیل بررسی چشمی (OD) و مقدار ماده خشک ایجاد نموده و از این طریق شرایط کشت را نظارت نمود.

به محض اینکه مقادیر OD به ابتدای فاز سکون (فلات) رسید، زمان برداشت مشخص می‌شود. زمان برداشت بستگی به گونه و شرایط رشد دارد، اما معمولاً در محدوده ۸-۳ گرم ماده خشک در لیتر است که می‌تواند پس از ۱۰-۸ روز بدست آید. برای برداشت، دو گزینه: هر بار برداشت محصول با بازگشت محلول کشت همراه با افزودن مواد مغذی یا بدون این و دور ریختن محلول پس از جداسازی ریزجلبک، می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. در مورد اول، جداساز به طور معمول به طور مستقیم از محیط کشت جلبک تغذیه می‌شود. محلول رویی باقیمانده با UV تیمار می‌شود و به فوتوبیوراکتور بازگردانده می‌شود. در مورد دوم، هر یک از بخش‌ها یا کل محیط کشت به‌وسیله پمپ برداشت و به پالایشگاه پمپ می‌شوند و محیط کشت بدون بازیافت جدا می‌شود. مقدار روزانه برداشت شده از کشت بستگی به گونه‌ها و شرایط رشد دارد، اما معمولاً حدود ۳۰-۲۰ درصد کل حجم فوتوبیوراکتور

[Downloaded from ornamentalaquatics.ir on 2025-07-01]

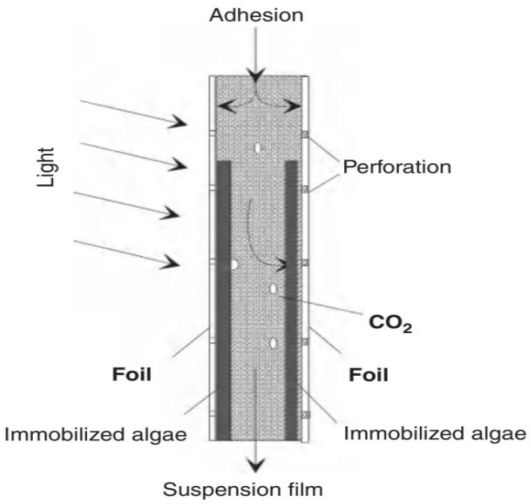
[DOR: 20.1001.1.24234575.1399.7.4.5.8]

است. فرآیند برداشت روزانه کشت ریزجلبکی در بازه زمانی ۱۲-۳ ماه مشاهده می‌شود. پس از برداشت محصول از فوتوبیورآکتور، آن را با آب تمیز نموده و با مواد سفیدکننده مانند آب اکسیژنه تیمار می‌کنند که چند روز طول می کشد.

چشم اندازهای نوآورانه

ضخامت لایه/ منبع نور

انرژی مورد نیاز برای تبدیل فوتوسنتزی دی اکسید کربن به مواد آلی با فوتون‌ها ایجاد می‌شود که طبق شرایط طبیعی از خورشید تأمین می‌شود. مشکل اصلی پیش رو در طراحی فوتوبیورآکتور این است که چگونه جریان فوتون‌ها به بیشترین میزان برقرار شود (چگونه هر سلول جلبک مجاز به دسترسی به تعداد مطلوب فوتون ها در هر زمانی باشد) که این مسئله در یک سیستم کاملاً نوردهی شده قابل حصول می‌باشد. هرچه سطح ورود نور بیشتر و حجم کشت جلبکی کمتر (نسبت سطح به حجم)، تأمین نور و عرضه فوتون‌ها بیشتر خواهد بود. بنابراین، دو اصل فوتوبیورآکتورها (کاهش ضخامت لایه و استفاده از فرمت عمودی در پیکربندی‌های بسته‌بندی فشرده)، بر اساس این یافته‌ها استوار است. ضخامت لایه (در مقایسه با قطر لوله) در فوتوبیورآکتور شیشه‌ای حدود ۵۱-۲۰ میلی‌متر متفاوت است. طبق تجربه نگارندگان، به‌نظر می‌رسد کاهش بیشتر ضخامت لایه امکان‌پذیر است و پنجره‌ای برای تراکم سلول‌ها و بهره‌وری بالاتر باز می‌شود. برای اطمینان از عرضه یکنواخت و مطلوب فوتون‌ها، یک پیکربندی لایه فوق نازک اختراع شد که در آن کشت ریزجلبک‌ها در اثر جاذبه از یک لایه عمودی نازک ۲-۰/۵ میلی‌متری بین دو فویل پلاستیکی عبور می‌کند. سیستم لایه فوق نازک[1] (نمونه اولیه UTL، شکل ۳). از نیروهای چسبندگی متقابل بین مواد مرطوب، و آبدوست مانند فویل، پلاستیک یا شیشه برای گسترش کشت جلبک به لایه نازک استفاده می‌کند، جایی که ارگانیسم‌ها (ریزجلبک‌ها) رشد می‌کنند. با توجه به خواص مواد انتخابی و تنظیمات لایه‌های فوق نازک در فضای سیستم فوتوبیورآکتور، راه‌حل‌های مختلف دیگری برای فوتوبیورآکتور برای تشکیل لایه‌های زیستی ایستا (بی حرکت) و پویا (جریان‌دار)، در دسترس هستند. مورد بعدی برای بهبود سیستم استفاده از مواد متخلخل و قابل نفوذ نسبت به نور و گاز از قبیل بافت‌های نساجی یا تنزیب می‌باشد. این مواد درون محیط کشت اجازه می‌دهد تا تأمین نور دائمی و در عین حال کنترل مطلوب گازها (اکسیژن، دی اکسیدکربن) فراهم باشد. به طور کلی، تنظیمات UTL، با توزیع نازک یکنواخت ریزجلبک‌ها در فضای فعال فتوسنتزی فوتوبیورآکتور، اجازه می‌دهد که تراکم‌های بالاتر کشت و تولیدات ایجاد شود.



شکل ۳: اصول سیستم لایه فوق نازک

اخیراً IGV بر اساس تکنولوژی UTL برای تولید تراکم سلولی بالا در لایه‌های زیستی پویا یک سیستم جدید ابداع نموده است که معمولاً به نام فوتوبیورآکتور " Rainbrand" یا " Mesh ultrathin-layer (MUTL)" نامیده می‌شود. ایده اصلی این رویکرد این است که یک بیوفیلم پویا به شکل قطرات و لایه‌هایی با استفاده از یک توری یا شبکه تولید می شود و کشت جلبک با تراکم سلولی بالا به صورت قطرات کوچک مه- قطره مانند در فضای فوتوبیورآکتور توزیع می‌شوند در حالی‌که در تکنولوژی فعلی فوتوبیورآکتور، معمولاً مقادیر بیوماس ۵-۳ گرم ماده خشک در لیتر قابل دستیابی است. سیستم‌های MUTL اجازه می‌دهد که غلظت بیوماس ۴۰-۲۰ گرم ماده خشک در لیتر باشد. بهینه‌سازی سیستم MUTL در پیکربندی و مواد مورد استفاده، بسیار ضروری به‌نظر می‌رسد. اما نتایج اخیر به‌دست آمده امیدوار کننده است:

[1] Ultrathin-layer system

[Downloaded from ornamentalaquatics.ir on 2025-07-01]
[DOR: 20.1001.1.24234575.1399.7.4.5.8]

- حجم کامل مواد معلق به صورت قطره در فضای فتوسنتز ۵ لیتر در متر مکعب
- تولید زیست توده (بر اساس شواهد) ۸۰ گرم ماده خشک در متر مربع در روز

یکی دیگر از مزایای سیستم جدید کاهش قابل پیش بینی هزینه‌های سرمایه‌گذاری است در حالی‌که برای مثال، بخش فتوسنتزی فوتوبیورآکتور لوله‌ای- شیشه‌ای مدل 85000 G(شیشه، اتصالات و پشتیبانی) نیاز به سرمایه‌گذاری حدود ۲۲۰ یورو در هر متر مربع نیاز دارد، رقم حدود ۱۰-۲۰ یورو برای هر متر مربع برای فوتوبیورآکتور MUTL برآورد شده است که قابل توجه و رقابتی به‌نظر می‌رسد.

سطوح غلظت اکسیژن/ دی اکسیدکربن

دو گاز اصلی مرتبط با موجودات فتوسنتزکننده شامل اکسیژن و دی اکسید کربن می‌باشد. در کنار انرژی نور، عوامل مهار اکسیژن و دی اکسید کربن در کشت متراکم طراحی شده برای تولید بالا، به‌نظر می رسد چالشی برای نوآوری در این زمینه باشد. تا حد زیادی مشخص شده است که هر دو عامل در گیاهان عالی‌تر در حد مطلوب نیستند. در متابولیسم اتوتروفی نوری هر دو گاز می‌توانند به عنوان ماده مصرفی یا به عنوان محصول عمل کنند. ریبولوز-۱، ۵- بیسفسفات کربوکسیلاز/ اکسیژناز (RubisCO، EC 4.1.1.39) آنزیم کلیدی موجودات زنده فوتواتوتروفی است. علاوه بر فعالیت کربوکسیلاسیون، همچنین باعث تثبیت اکسیژن می شود که منجر به تشکیل ۳،۲- اندیولِ ریبولوز-۱، ۵- بیسفسفات می شود که این موجب تنفس نوری می‌شود. برای کشت انبوه ریزجلبک‌ها، محتوای اکسیژن در محیط به طور گسترده مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. زیرا یکی از عوامل بحث برانگیز برای فتوسنتز و رشد حتی با وجود غلظت های بالا دی اکسید کربن، می‌باشد. در سیستم‌های فوتوبیورآکتور بسته، تجمع سریع فتوسنتزی اکسیژن را می‌توان تا حداکثر سطوح اشباع ۵۰۰٪ مشاهده نمود. با این حال، غلظت های بالای دی اکسید کربن (۱۰-۱ میلی مول دی اکسید کربن محلول)، می‌تواند به‌راحتی در این سیستم‌ها تنظیم شود. این مقدار غلظت دی اکسیدکربن حدود ۱۰۰ برابر بیشتر از غلظت دی‌اکسیدکربن در آب در تعادل با هواست. در مقایسه با گیاهان عالی‌تر، غلظت بسیار متغیر گاز بر ریزجلبک‌ها و سیستم های آنزیمی آنها تأثیر می‌گذارد. با وجود طراحی بسته فوتوبیورآکتور، تلفات جانبی دی اکسیدکربن از طریق جریان گاز خروجی از فوتوبیورآکتور به محیط را می‌توان برای مثال، با باز کردن لوله‌ها یا شیرهای سیستم، مشاهده نمود. بر اساس تجزیه و تحلیل یک فوتوبیورآکتور ۳۵۰۰۰ لیتری، نشان داده شده است که با کاهش شدت تخلیه گاز از طریق مخزن سیستم، غلظت جزئی دی اکسیدکربن در محیط کشت ۸/۶- ۲/۳ میلی مول افزایش یافته است. در مقابل، انتشار شدید اکسیژن انباشته شده (و در اصل ناخواسته)، همیشه با افزایش تلفات دی اکسید کربن همراه است که می‌تواند یک عامل اقتصادی مهم باشد، اما به‌وضوح رشد آن را کاهش نمی‌دهد.

غلظت دی اکسید کربن در سیستم های فوتوبیورآکتور بسته می‌تواند حدود ۱۰-۱ میلی‌مول حفظ شود. در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد و فشار جو، غلظت اشباع اکسیژن خالص (۱۰۰ درصد) در آب تقریباً ۱/۳۸ میلی مول است. مقایسه مقادیر Km برای اکسیژن و دی اکسیدکربن RubisCO (نمونه‌ای از *Chlamydomonas reinhardtii*) نشان می‌دهد که آنزیم کلیدی بیوشیمیایی که در آن اکسیژن با دی اکسید کربن رقابت می کند، در مواجه با دی اکسید کربن (Km دی اکسید کربن ۳۱ میلی مول) نسبت به اکسیژن (Km اکسیژن ۵۲۷ میلی مول) دارای پیوستگی بیش از ۱۸ برابری می‌باشد. با توجه به ترجیح آنزیمی برای دی اکسیدکربن و غلظت بالای دی اکسیدکربن در فوتوبیورآکتورهای مهر و موم شده، تأثیر تنفس اکسیژنی بر فتوسنتز ریزجلبک‌ها ممکن است به اندازه‌ای که گمان می‌شود، بحرانی نباشد. نتایج برخی از انتشارات قدیمی و همچنین مطالعات انجام شده در IGV این فرضیه‌ها را تأیید می‌کند. بنابراین، روابط اکسیژن خروجی از سیستم های فوتوبیورآکتور باید مورد بحث و تحقیق قرار گیرد و تمایز بین تنفس نوری و بازدارندگی نوری مشخص شود. علاوه بر این، به عنوان یک نتیجه عملی کوتاه مدت، IGV به جای کنترل pH معمول، یک سیستم براساس مقدار دی اکسیدکربن آزمایش و آن را به یک سنسور فشار دی اکسیدکربن مجهز نمود. این به نظر منطقی‌تر می‌رسد به علت این واقعیت که pH محیط کشت نه تنها با جذب دی

[Downloaded from ornamentalaquatics.ir on 2025-07-01]

[DOR: 20.1001.1.24234575.1399.7.4.5.8]

اکسیدکربن برای مصرف در فتوسنتز نوری تنظیم می‌شود بلکه به انتقال پروتون‌ها و جذب آنها از طریق نیترات (2 H+:1 NO3-)، فسفات (-4 H+:1 PO43) و سولفات (3 H+:1 SO42-) تولیدی از طرف جلبک‌ها و باکتری‌های همراه آنها و نیز تراوش از طریق واسطه‌ها (اسیدهای آلی) بستگی دارد. به همین دلیل، تنظیم pH می‌تواند با پایش از طریق حسگرها و تزریق خودکار اسیدهای غیر آلی (نیتریک، سولفوریک) انجام شود.

تخریب سلولی به دلیل تشکیل رادیکال‌های اکسیژن در شدت نور زیاد که به عنوان بازدارندگی نوری شناخته می‌شود نیز به عنوان یک مشکل جدی برای رشد و حیات ریزجلبک‌ها می باشد. به عنوان یک رویکرد ساده برای کاهش این اثرات منفی، رقیق کننده/ انتشار دهنده نور در سیستم های UTL توصیف شده است به طوری‌که شدت نور موجود به سطوح تقریباً ۲۰۰ میکرو مول تراکم شار فوتون بر متر مربع در ثانیه کاهش یابد. این طرح می‌تواند از تحریک بیش از حد کامپلکس‌های آنتنی جلوگیری کند. این کامپلکس‌ها گرایش مولکول‌های کلروفیل را برای تغییر به حالت سه گانه [القاءکننده تشکیل اکسیژن مجزا واکنش پذیر (Reactive singlet oxygen=ROS)]، افزایش می‌دهند(de Morais and Vieira Costa, 2007).

مقیاس و اقتصاد

به عنوان سیستم های تولیدی، حوضچه دراز و فوتوبیورآکتورهای لوله‌ای- شیشه‌ای، پیش از این نشان داده‌اند که از جنبه امکان‌سنجی اقتصادی تولید صنعتی برای عرضهزیست توده ریزجلبکی برای اهداف کنونی و سنتی، قابل اتکاء می‌باشند. اما امکان‌سنجی هر دو سیستم برای نیازهای تولیدی کم هزینه در مقیاس بزرگ، به عنوان نمونه برای جذب دی اکسیدکربن و تولید سوخت باید بررسی شود. طبق مدل های اقتصادی IGV بررسی شده بر سیستم‌های بزرگ با اندازه ۱۰۰ هکتار واحد، قطعاً فوتوبیورآکتورهای لوله‌ای- شیشه‌ای به علت هزینه‌های بالای سرمایه‌گذاری در این مقیاس قابل اجرا نیستند. سیستم MUTL تصویری امیدوار کننده از امکان سنجی فوتوبیورآکتورهای بسته نشان می‌دهد. دو عاملی که باعث به وجود آمدن امیدواری در مورد آنها می‌شود شامل: غلظت قابل دسترس زیست توده و هزینه‌های سرمایه‌گذاری نسبت به سایر سیستم‌ها می‌باشد (جدول۲). علاوه بر این، فوتوبیورآکتورهای MUTL می‌توانند با هزینه‌های پایین زمین، هزینه‌های برداشت پایین و هزینه‌های شخصی پایین‌تر نسبت به سایر سیستم‌ها مزایای اقتصادی ایجاد کنند.

جدول ۲: مقایسه سیستم‌های پرورش ریزجلبک

ویژگی	استخر باز	لوله‌ای- شیشه‌ای (مدل 85000 G)	MUTL
ضخامت لایه	دسی متر	سانتی متر	میلی متر تا میکرومتر
تراکم برداشت (گرم ماده خشک در روز)	۲	۳	۴۰
تولید (گرم در متر مربع در روز)	۱۰-۲۰	۳۵-۴۵	تا ۸۰
کنترل فرآیند	پایش	کنترل	کنترل
خطر آلودگی	بالا	پایین	پایین
مساحت مورد نیاز	زیاد	کم	کمترین
مقیاس پذیری به واحد ۱۰۰ هکتاری	بله	خیر	بله
سرمایه گذاری، قسمت فوتوسنتزی (یورو/متر مربع)	کم	حدود ۲۲۰	۱۰-۲۰
هزینه راه‌اندازی	کم	متوسط	متوسط
هزینه برداشت	زیاد	کم	کمترین
کاربردها	توده زنده	تولیدات باارزش بالا، تلقیح	تولید سوخت، جذب CO_2

[Downloaded from ornamentalaquatics.ir on 2025-07-01]

[DOR: 20.1001.1.24234575.1399.7.4.5.8]

در حالی‌که روشن است که تلاش‌های زیادی برای توسعه این ایده در مقیاس صنعتی ضروری است، IGV به‌شدت در این زمینه کار می‌کند. با توجه به پتانسیل توسعه وسیع استفاده نشده در سال‌های گذشته، پیشرفت‌های فنی در زمینه ورود نور به کشت‌های ریزجلبکی، تعیین کننده موفقیت بیوتکنولوژی تولید ریزجلبکی خواهد بود. به طور ویژه، زمینه‌های زیست محیطی، انرژی و برنامه‌های کاربردی کم هزینه مشابه، به پیشرفت های بیشتری نیاز دارند. از این‌رو، استفاده از خروجی‌های باقی‌مانده از صنعت و کشاورزی مانند فاضلاب‌ها و آبهای غنی از مواد مغذی، موضوع اصلی دوم توسعه فرایند فوتوبیورآکتور خواهد بود.

منابع

هـاف، ف. اچ.، و اسـنل، ت. دابلیـو. ۱۳۸۷. دسـتورالعمل تکثیر و پرورش پلانکتون‌ها (تکثیر و پرورش غذای زنده)، ترجمه آذری تاکامی، ق. و امینـی، م. انتشـارات دانشـگاه تهران، ۳۳۷ ص. (چاپ دوم: ۱۳۹۴)

de Morais, M.G. and Vieira Costa, J.A., 2007. Biofixation of carbon dioxide by *Spirulina* sp. and *Scenedesmus obliquus* cultivated in a three-stage serial tubular photobioreactor. Journal of Biotechnology, 129: 439–445.

Pulz, O. Broneske, J. and Waldeck P., 2013. IGV GmbH Experience Report, industrial production of microalgae under controlled conditions: Innovative prospects. In "Richmond, A. and Hu, Q. (Editors) *Handbook of microalgal culture: Applied phycology and biotechnology*. Second edition. John Wiley & Sons, Ltd. pp. 445-460.

[Downloaded from ornamentalaquatics.ir on 2025-07-01]

[DOR: 20.1001.1.24234575.1399.7.4.5.8]