



## امکان سنجی استفاده از میکروارگانیزم اسپیرولینا به منظور ساخت دیوارهای سبز شهری و کاهش آلودگی هوا

کوثر محسنی<sup>۱</sup>، نگین شهبازی<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی دکتری دامپزشکی، دانشکده دامپزشکی، دانشگاه تهران، تهران، ایران [kosarmohseni@ut.ac.ir](mailto:kosarmohseni@ut.ac.ir)

۲- دانشجوی دکتری دامپزشکی، دانشکده دامپزشکی، دانشگاه تهران، تهران، ایران [Negin1631@gmail.com](mailto:Negin1631@gmail.com)

### خلاصه

آلودگی هوا یکی از چالش‌های اساسی کلان‌شهرها است که پیامدهای گسترده‌ای بر سلامت و کیفیت زندگی شهروندان دارد. این پژوهش به بررسی امکان سنجی به کارگیری دیوار سبز جلبکی با استفاده از ریزجلبک اسپیرولینا به عنوان راهکاری نوین در بهبود کیفیت هوا می‌پردازد. اسپیرولینا با توان بالای فتوسنتز، قابلیت جذب دی‌اکسیدکربن و آلایندگی‌های هوا و تولید اکسیژن را داراست و علاوه بر آن، زیست‌توده‌ای با ارزش غذایی و اقتصادی تولید می‌کند. در این مطالعه شرایط بهینه رشد این ریزجلبک و سیستم‌های پرورش آن بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از دیوار سبز جلبکی می‌تواند میزان جذب آلایندگی‌ها و تولید اکسیژن را چندین برابر گیاهان معمولی افزایش دهد و در عین حال با چالش‌هایی روبه‌رو است. در نتیجه، بهره‌گیری از دیوارهای سبز جلبکی می‌تواند رویکردی پایدار و نوآورانه برای کاهش آلودگی هوا و ارتقای کیفیت محیط‌زیست شهری باشد.

**کلمات کلیدی:** آلودگی هوا، اسپیرولینا، ریز جلبک، دیوار سبز، فتوبیوراکتور، فتوسنتز

### ۱. مقدمه

آلودگی هوا در کلان‌شهرها عمدتاً ناشی از ترافیک سنگین، صنایع مختلف، مصرف سوخت‌های فسیلی و محدودیت در فضاهای سبز است که منجر به افزایش غلظت ذرات معلق ( $PM_{2.5}$  و  $PM_{10}$ )، دی‌اکسید نیتروژن ( $NO_2$ )، دی‌اکسید گوگرد ( $SO_2$ ) و ترکیبات آلی فرار می‌شود. این آلایندگی‌ها به شدت سلامت عمومی شهروندان را تحت تأثیر قرار داده و باعث افزایش بیماری‌های تنفسی، قلبی و سایر مشکلات بهداشتی شده‌اند. از این رو استفاده از راهکارهای نوین و پایدار برای بهبود کیفیت هوا ضروری به نظر می‌رسد.

میکروارگانیزم اسپیرولینا (*Spirulina*)، یک سیانوباکتری یا جلبک ساده تک سلولی است که در آب‌های

شیرین قلیایی به خوبی رشد کرده و با استفاده از فتوسنتز، مواد غذایی ساخته شده را در خود ذخیره می‌کند

[۱]. نام علمی این جلبک، آرتروسپیرا پلاتنسیس (*Arthrospira platensis*) می‌باشد و به دلیل شکل خاص

آن اسپیرولینا نامیده می‌شود. اسپیرولینا به معنی فتر کوچک می‌باشد [۱]. شکل ۱ اسپیرولینا و حالت فتری آن را نشان می‌دهد.



شکل ۱. اسپیرولینا و حالت فنی آن [۱۷]

در استفاده علمی اسپیرولینا عنوانی است که جهت توضیح دو گونه سیانوباکتری اسپیرولینا پلاتنسیس و اسپیرولینا ماکسیما (*Spirulina maxima*) استفاده می شود [۲]. طبق آزمایشات فیلوژنی و زیر واحد S16 اسید ریبونوکلیک ریبوزومی (rRNA) آنها را جزء پروکاریوت ها طبقه بندی می کنند [۳]. اسپیرولینا مستقل از وابستگی های فیلوژنتیکی یا موقعیت های جغرافیایی تنوع درون گونه ای بالایی دارد که نشان دهنده انعطاف پذیری فیزیولوژیکی و متابولیکی قابل توجه آن است. از این رو به عنوان گونه ای مناسب جهت کشت در ایران محسوب می شود [۴].

۶۰-۷۰ درصد ماده خشک اسپیرولینا پروتئین دارد و منبع غنی از ویتامین های گروه B، پیش ساز ویتامین A و مواد معدنی همچون منگنز و آهن است. این جلبک حاوی مقدار کمی اسید گاما لینولنیک (GLA) و ترکیبات شیمیایی گیاهی دیگری است که برای سلامتی مفید می باشد. اسپیرولینا در سراسر جهان کشت داده می شود و به عنوان مکمل در رژیم غذایی انسان، پودر یا تکه های ورقه ای و مکمل غذایی در آبی پروری و صنایع مرغداری بکار می رود [۵].

۵۰ درصد وزن ریز جلبک ها از کربن تشکیل شده است. برای تهیه یک کیلوگرم ماده خشک اسپیرولینا معادل ۱.۸ کیلوگرم دی اکسید کربن جذب می شود. در نتیجه می توان از یک سیستم زیستی کوچک برای جذب حجم زیادی از دی اکسید کربن هوا استفاده کرد. این در حالی است که گیاهان خشکی زی تنها قادر به تثبیت ۳ تا ۶ درصد از دی اکسید کربن منتشر شده در جو هستند [۶].

در طراحی شهری مدرن ، افزایش فضای سبز و بهبود کیفیت محیط زیست شهری از اولویت های اصلی برنامه ریزان و معماران است . دیوارهای سبز به عنوان یکی از فناوری های نوین محیط زیستی ، امکان بهره گیری بهینه از فضاهای محدود شهری را فراهم می کنند . این ساختارها نه تنها به افزایش زیبایی بصری و تنوع زیستی کمک می کنند ، بلکه نقش مهمی در بهبود کیفیت هوا ، کاهش دمای محیط و کنترل نویز شهری دارند .

در شهرهایی مانند تهران که با کمبود فضای سبز و فشار بالای آلودگی هوا مواجه هستند ، دیوارهای سبز می توانند به عنوان راهکاری نوآورانه برای احیای محیط زیست شهری به کار روند. این دیوارها با استفاده از گیاهان یا میکروارگانیسم های فتوسنتزی مثل اسپیرولینا ، فرآیند جذب دی اکسید کربن و تولید اکسیژن را بهبود می بخشند و به کاهش اثرات جزیره حرارتی شهری کمک می کنند.

## ۲. اهداف پروژه

۲.۱ تولید اکسیژن از طریق فتوسنتز: اسپیرولینا، به عنوان یک سیانوباکتری فتوسنتزی، قادر است با جذب دی اکسید کربن موجود در هوا، از طریق فرایند فتوسنتز، اکسیژن تولید کند. این قابلیت، نقش مهمی در بهبود کیفیت هوا به ویژه در محیط های شهری با تراکم بالای آلاینده ها ایفا می کند. [7]

۲.۲ تلفیق زیست فناوری با معماری شهری: یکی از نوآوری های اصلی این پروژه، ادغام زیست فناوری پیشرفته با



طراحی‌های معماری پایدار است. [8]

۲.۳ بهبود کیفیت هوا با استفاده از میکروآرگانیزم‌ها: اسپیرولینا علاوه بر تولید اکسیژن، می‌تواند به طور مستقیم یا غیرمستقیم در کاهش غلظت آلاینده‌های هوا، مانند دی‌اکسید نیتروژن ( $\text{NO}_2$ )، ذرات معلق ( $\text{PM}_{2.5}$ )، و ترکیبات آلی فرار نقش داشته باشد. [9]

۲.۴ ارائه راهکاری پایدار و نوآورانه در کاهش آلاینده‌ها: با توجه به چالش‌های مالی، فضایی و زیست‌محیطی در شهر تهران، استفاده از دیوارهای سبز مجهز به اسپیرولینا به عنوان یک راهکار کم‌هزینه، قابل توسعه و دوستدار محیط زیست مطرح است. [10]

### ۳. پیشینه تحقیق

ایده تولید ریز جلبک در مقیاس فنی ابتدا به ذهن دانشمندان آلمانی رسید [۱۱]. در ایالات متحده، تحقیقات در مورد کشت انبوه ریز جلبک‌ها به عنوان توسعه جانبی مطالعات بنیادی در مورد فتوسنتز آغاز شد [۱۲]. در یک مطالعه ۱۶۶ مقاله در مورد وضعیت و آینده پژوهش و توسعه دیوارهای سبز (گیاهی) بررسی شد. میزان مقالات منتشر شده در این خصوص از ۲۵٪ در سال ۲۰۱۱ به بیش از ۶۰٪ در سال ۲۰۱۷ رسیده بود که دیوار سبز را به عنوان یکی از موضوعات در حال رشد و توسعه نشان می‌دهد [۱۳].

در پژوهشی که در سال ۲۰۲۲ انجام شد امکان‌سنجی کشت اسپیرولینا تحت یک سیستم نیمه پیوسته بهینه بررسی گردید. در این کار، یک  $\text{PBR } 4 \times 3$  متر مکعبی که با نور مصنوعی تغذیه می‌شد با اسپیرولینا کشت داده شد تا بهترین شرایط عملیاتی از نظر زمان ماند جامد (SRT) تعریف شود. این رویکرد جدید که مدل‌سازی و مدیریت شرایط عملیاتی را ترکیب می‌کرد، امکان دستیابی به بهره‌وری زیست‌توده ۰.۸ گرم در لیتر در روز را فراهم کرد که بیش از ۳ برابر بیشتر از میزان به‌دست‌آمده در سیستم‌های رایج است که با رویه‌های استاندارد (۰.۲۴ گرم در لیتر در روز) کار می‌کند. در نهایت، با بهینه‌سازی محیط کشت از نظر نسبت کربنات/بی‌کربنات، میزان بهره‌برداری  $\text{CO}_2$  بالاتری حاصل شد [۱۴].

برای یافتن شرایط بهینه رشد اسپیرولینا در مقیاس بالا استفاده از مدل‌های ریاضی ضروری به نظر می‌رسد. شبیه‌سازی فرآیندهای واقعی در قالب معادلات ریاضی، امکان تولید پیش‌بینی‌های کشت مجازی را فراهم می‌کند که بر اساس شرایط عملیاتی انتخاب شده، قابل تنظیم هستند. علاوه بر این، توسعه مدل‌های ریاضی نقش مهمی در مسیر طراحی کلی فرآیندهای زیستی دارد، زیرا گامی اساسی برای افزایش مقیاس عملیات است. برای ساخت موفقیت‌آمیز PBR در ابعاد بزرگ، انتخاب موازنه‌های مواد مستقل فرآیند اهمیت شایانی دارد. همچنین باید تعریف صحیحی از سینتیک زیست‌توده داشته باشیم. در واقع، باید بین دقت و سادگی موازنه‌ای ایجاد شود که معمولاً با انتخاب مهم‌ترین عوامل مؤثر بر چنین پدیده‌ای حاصل می‌شود [۱۵].

متابولیسم ریز جلبک‌ها تا حد زیادی به دما حساس است و یک مدل مؤثر که وابستگی دمایی رشد و تنفس را کمی می‌کند، مدل دمای کاردینال (Cardinal) با تغییر جهت (CTMI) است که توسط روسو و همکارانش پیشنهاد شده است. این مدل شامل سه پارامتر (دمای کاردینال: دمای بیشینه:  $T_{max}$ ، دمای بهینه:  $T_{opt}$ ، دمای کمینه:  $T_{min}$ ) است که محدوده کاری بهینه را برای هر سویه ریز جلبک تعریف می‌کند [۱۶، ۱۸].

وقتی سامانه موقعیت یابی جهانی (GPS) با مدل‌های بیولوژیکی یا بیولوژیکی و فیزیکی-شیمیایی ادغام شود، می‌توان درک جامعی از تأسیسات تولید زیست‌توده جلبک به دست آورد. با GPS کالیبره شده و مدل‌های رشد بیولوژیکی، می‌توان ارزیابی یکپارچه‌ای را با شرایط مختلف آب و هوایی و بیولوژیکی تطبیق داد و امکان بهبود تحلیل فنی-اقتصادی (TEA) و



در نتیجه امکان سنجی و مقیاس پذیری کشت ریز جلبک را فراهم کرد [۱۷].

#### ۴. مواد و روش ها

##### ۴.۱ شرایط مناسب کشت

دمای بهینه رشد این جلبک بین ۲۵-۳۵ درجه سانتی گراد است و کاهش رشد در دمای زیر ۲۰ درجه سانتی گراد مشاهده می شود. همچنین در دمای زیر ۱۵°C توقف رشد مشاهده می گردد. دمای بالای ۳۸°C باعث افزایش تولید لیپیدها می شود اما در این حالت ممکن است به سلول ها آسیب برسد [۱۷].

شدت نور مناسب برای رشد این جلبک ۳۰۰-۵۰۰ میکرومول فوتون بر مترمربع بر ثانیه (معادل ۱۵۰-۲۰۰ میکرومول بر مترمربع بر ثانیه برای نور (LED) می باشد. طیف نور قرمز (طول موج ۶۳۰-۶۸۰ نانومتر) بیشترین بازدهی فتوسنتز را در این گونه دارد. چرخه های ۱۲ ساعت روشنایی/۱۲ ساعت تاریکی (Light/Dark Cycle) دوره نوری مناسب برای تقویت فتوسنتز می باشد [۱۹].

محدوده pH ۸.۵-۱۱ برای این جلبک قابل تحمل است اما در pH ۹.۵-۱۰.۵ بهینه رشد را دارد. ثابت شده است PH ۹.۵-۹.۸ به طور قابل توجهی از آلودگی های میکروبی جلوگیری می کند [۲۰].

شوری ۱۰-۲۰ گرم/لیتر نمک (ترجیحاً کربنات سدیم) بهترین شرایط را برای رشد این گونه فراهم می کند. همچنین استفاده از سدیم هیدروکسید (NaOH) یا پتاسیم هیدروکسید (KOH) برای تنظیم pH توصیه می شود [۱۷]. محیط زاروک (Zarrouk) شامل ترکیبات نیترات سدیم، سولفات پتاسیم، بی کربنات سدیم، فسفات و ریز مغذی ها می باشد که از رایج ترین محیط های کشت این جلبک می باشد [۱۹].

به منظور کاهش هزینه تولید می توان از اوره به جای نیترات پتاسیم (کود تجاری) به عنوان منبع نیتروژن استفاده کرد. همچنین برای کاهش هزینه کشت مداوم اسپیرولینا، معمولاً از محیط کشت جلبک دوباره استفاده می شود [۲۲]. جایگزینی محیط کشت سنتی زاروک با پساب تصفیه شده شهری تا ۳۵٪ هزینه تولید را کاهش می دهد. پژوهش ها نشان داده اند اسپیرولینا قادر به حذف ۹۱٪ COD و ۸۰-۹۵٪ نیترات فسفات از پساب است [۲۳].

در مطالعه ای که توسط مرتضوی و همکاران (۱۳۹۸) انجام شد، آب خلیج فارس به عنوان گزینه ای مناسب برای کشت جلبک اسپیرولینا معرفی شد [۲۴]. با توجه به نتایج این پژوهش می توان نتیجه گرفت که با غنی سازی آب خلیج فارس (شوری ۴۵ g/L) می توان از سواحل دریا برای پرورش جلبک اسپیرولینا پلاتنسیس استفاده کرد. این یافته می تواند آب دریا را به عنوان منبعی نامحدود برای کشت اسپیرولینا با توجه به کمبود آب شرب کشور معرفی کند. علاوه بر فتوسنتز، اسپیرولینا ترکیباتی مانند فیکوسیانین را تولید می کند که به عنوان داروی ضد سرطان، آنتی اکسیدان (با فعالیت ۷۱.۴۲٪ در غلظت ۳۰ ppm)، داروی ضد ویروسی، رنگ های طبیعی و نشانگر فلورسنت مورد استفاده قرار می گیرد [۲۵، ۲۶].

در مروری که توسط یوستنس و همکارانش انجام شد، بر استفاده از مواد مغذی زائد مورد استفاده برای کشت ریز جلبک ها، به ویژه مواد مغذی که در حال حاضر کمتر مورد استفاده قرار می گیرند یا هدر می روند، مانند کربن دی اکسید و آمونیاک، تمرکز شد. نویسندگان، برای تعیین کمیت و بهبود استفاده از دی اکسید کربن و آمونیاک در کشت ریز جلبک ها و کاهش تبخیر کلی و از دست دادن این مواد مغذی ارزشمند تلاش کردند. آن ها نتیجه گرفتند که این مواد مغذی فرار می توانند به طور مؤثر برای کشت ریز جلبک ها مورد استفاده قرار گیرند. پیش از این فرض بر این بود که ریز جلبک ها به غلظت های بالای CO<sub>2</sub> حساس هستند. با این حال، اکنون گزارش شده است که برخی از ریز جلبک ها حتی در غلظت های بسیار بالای CO<sub>2</sub>





به سرعت رشد می کنند [۲۸].

در میان تمام ارگانیسم های فتوتروفیک، سیانوباکتری ها و ریز جلبک ها از این نظر خاص هستند که سریع رشد می کنند، ۱۰ تا ۵۰ برابر کارآمدتر از گیاهان فتوسنتز انجام می دهند و به انرژی و نیروی کار کمتری نسبت به کشت محصولات کشاورزی برای رشد نیاز دارند. از این رو به عنوان منبعی جایگزین برای پوشش گیاهی شهری در تولید اکسیژن و جذب آلاینده ها به شمار می آیند [۲۹].

سرعت رشد و تقسیم بالا ( به گونه ای که در محیط کشت مناسب میزان زیست توده (biomass) ظرف مدت کمتر از ۲۴ ساعت دوبرابر می شود ) این جلبک را به عنوان یکی از بهترین تولیدکنندگان زیست توده تبدیل کرده است . میزان تولید زیست توده اسپیرولینا به قدری است که سالانه بیش از ۱۰۰۰۰ تن پودر خشک تولید می کند که بیش از ۷۰ درصد از عرضه جهانی را تشکیل می دهد [۳۰].

#### ۴.۲ . سیستم های کشت جلبک اسپیرولینا

۴.۲.۱ استخرهای رو باز: در این روش باید طراحی استخر به دقت انجام گیرد و استخرها باید توسط تور ضد حشره پوشیده شوند تا جلبک ها را از آلاینده های خارجی مانند گرد و غبار، حشرات و فضولات پرندگان محافظت کند . عمق آب باید ۱۵-۲۵ سانتی متر باشد تا نفوذ نور خورشید به خوبی صورت گیرد. کف استخر باید با مواد باکیفیت ساخته شود تا از رشد باکتری های نامطلوب جلوگیری کرده و تمیز کردن را آسان کند . یکی از معایب اصلی کشت اسپیرولینا در استخرهای روباز بزرگ، آلودگی ناشی از گونه های باکتری یا سایر ارگانیسم های خارجی است که می تواند منجر به مرگ ناگهانی و گسترده سلول های ریزجلبک شود [۳۱].

جریان درون استخر باید به طور یکنواخت توزیع شود تا رشد اسپیرولینا به طور یکنواخت صورت گیرد. گردش آب با سرعت 20-30 cm/s جهت جلوگیری از رسوب مناسب است. مزیت این روش هزینه پایین راه اندازی و استفاده از نور خورشید برای رشد جلبک ها است. در استخرهای روباز، تعامل بین هوا و کشت مایع برای ورود CO<sub>2</sub> و آزادسازی اکسیژن محلول اضافی مفید است، اما این امر احتمال آلودگی از هوا را افزایش می دهد [32].

۴.۲.۲ فتوبیوراکتورهای بسته (Photobioreactors - PBRs) : در این روش جلبک در مخازن شفاف لوله ای یا صفحه ای (از جنس شیشه/پلی کربنات) پرورش می یابد . نور (مصنوعی/طبیعی)، دما، pH و تزریق CO<sub>2</sub> به صورت خودکار کنترل می شود . انرژی مورد نیاز برای تولید هر کیلو جلبک خشک بدون خاکستر ۱۴۳ کیلووات ساعت است [۳۳].

محیط ایزوله شده، از آلودگی جلوگیری کرده و جلبک را مناسب تولید گرید انسانی و دارویی می کند. بر اساس مطالعات، تراکم زیست توده تا ۴۰٪ بیشتر از استخرهای باز نیز می تواند برسد . در این روش بخش کمی از آب تبخیر می شود و هدر رفت آب نسبت به دیگر روش ها به حداقل می رسد که این مورد اثرات مثبت زیست محیطی دارد [34].

در این روش طراحی فتوبیوراکتور و تعیین پارامترهای مورد نظر، که شامل انتقال گاز، اختلاط محیط کشت و نیازهای نوری می شود، اهمیت دارند. سیستم کشت بسته می تواند به صورت افقی یا عمودی باشد. سازه های ایستاده برای استفاده بهینه از فضای عمودی مناسب اند. از این رو به عنوان گزینه ای مناسب نصب در دیوارهای سبز به شمار می آیند.

#### ۴.۳ . ساختار و عملکرد دیوار سبز با اسپیرولینا



با وجود تحقیقاتی متعددی که تا به امروز انجام شده، چیزی به عنوان سیستمی که قادر به دستیابی به حداکثر بهره‌وری با حداقل هزینه‌های عملیاتی باشد، صرف نظر از سیستم بیولوژیکی و شیمیایی مورد نظر، تعریف نشده است. در واقع، انتخاب مناسب‌ترین سیستم وابسته به موقعیت است، زیرا هم گونه جلبک موجود و هم هدف نهایی مورد نظر در این امر نقش خواهند داشت.

به طور کلی سیستم‌های کشت بسته به سه دسته راکتورهای لوله‌ای، راکتورهای صفحه‌ای تخت و راکتورهای تخمیری تقسیم می‌شوند. راکتورهای لوله‌ای نیز به صورت عمودی، افقی، مارپیچی و آلفا شکل دیده می‌شوند. دیوار سبز مبتنی بر میکروارگانیسم اسپیرولینا، یک سیستم زیستی پیشرفته و نوآورانه است که با هدف بهبود کیفیت هوای شهری، کاهش آلاینده‌ها و افزایش تولید اکسیژن طراحی شده است. این سیستم تلفیقی از زیست‌فناوری و معماری پایدار است که با استفاده از ظرفیت‌های بیولوژیکی اسپیرولینا، عملکرد بهینه‌ای در تصفیه هوا و ارتقای شرایط زیست‌محیطی فراهم می‌آورد.

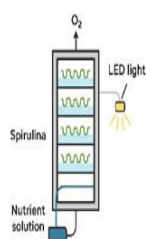
ساختار دیوار سبز شامل یک قاب عمودی با مجموعه‌ای از محفظه‌های ماژولار و شفاف است که داخل آن‌ها کشت میکروارگانیسم اسپیرولینا صورت می‌گیرد. این محفظه‌ها از مواد با خاصیت نفوذ نور (مانند پلیمرهای مقاوم در برابر اشعه ماوراء بنفش) ساخته شده‌اند تا نور کافی برای انجام فرآیند فتوسنتز تأمین شود، در عین حال باید مقاومت کافی در برابر شرایط محیطی مانند تغییرات دما، رطوبت و آلودگی داشته باشند.

سیستم گردش محیط کشت (محلول مغذی) با استفاده از پمپ‌های کوچکی تعبیه شده در داخل دیوار، به طور مداوم محیط کشت را در محفظه‌ها به جریان درمی‌آورد تا تأمین مواد مغذی، دی‌اکسید کربن و حذف متابولیت‌های زائد به صورت بهینه انجام شود. این گردش مایع باعث یکنواختی شرایط رشد اسپیرولینا و جلوگیری از تجمع و مرگ سلولی می‌شود.

علاوه بر این، سیستم‌های کنترلی هوشمند شامل سنسورهای دما، رطوبت، شدت نور و غلظت گازها به صورت آنلاین شرایط محیطی را مانیتور کرده و تنظیمات لازم را انجام می‌دهند تا شرایط بهینه رشد و فتوسنتز اسپیرولینا حفظ شود.

#### 4.4 نحوه قرارگیری محفظه‌های اسپیرولینا

قرارگیری محفظه‌ها باید به گونه‌ای باشد که از سایه‌افتادگی و کاهش نور جلوگیری شود، همچنین جریان هوا با سرعت مناسب به محفظه‌ها برخورد کند تا فرآیند فتوسنتز با بازدهی بالا انجام شود. در مناطق با نور کم، استفاده از سیستم نورپردازی LED با طول موج مناسب می‌تواند جایگزین یا مکمل نور طبیعی باشد. شکل (۲) نحوه قرارگیری محفظه‌های حاوی جلبک را نشان می‌دهد.



شکل ۲. نحوه قرارگیری محفظه‌های حاوی جلبک



#### ۴.۵ تأمین شرایط مناسب برای رشد و فتوسنتز

برای عملکرد بهینه اسپیرولینا در دیوار سبز، فراهم کردن شرایط زیستی مطلوب ضروری است:

نور: شدت و کیفیت نور باید متناسب با نیاز اسپیرولینا باشد. اسپیرولینا بیشترین فتوسنتز را در طول موجهای آبی و قرمز طیف نور مرئی انجام می‌دهد. شدت نور طبیعی یا استفاده از LED های خاص فتوسنتزی بین ۱۰۰۰ تا ۳۰۰۰ لوکس، برای رشد مطلوب کافی است.

دمای محیط: دمای بهینه برای رشد اسپیرولینا در بازه ۳۰ تا ۳۵ درجه سانتی‌گراد قرار دارد. دماهای کمتر یا بیشتر می‌تواند باعث کاهش سرعت رشد و کاهش فعالیت فتوسنتزی شود.

محیط کشت: محلول غذایی شامل نیتروژن، فسفر، پتاسیم، آهن و عناصر ریزمغذی است که باید به طور منظم تعویض یا تجدید شود. همچنین pH محیط کشت باید بین ۹ تا ۱۰ حفظ شود که برای اسپیرولینا ایده‌آل است.

تهویه و گازرسانی: جریان هوا به محفظه‌ها برای تأمین دی‌اکسید کربن ضروری است. همچنین باید اکسیژن تولید شده از فتوسنتز به سرعت از محیط خارج شود تا از مسمومیت سلولی جلوگیری شود. سیستم تهویه مکانیکی و طبیعی در طراحی لحاظ می‌شود.

کنترل پارامترها: استفاده از سنسورهای پیشرفته برای اندازه‌گیری پارامترهای محیطی (نور، دما، pH، غلظت گازها) و سیستم‌های هوشمند تنظیم‌کننده، به حفظ شرایط پایدار کمک می‌کند.

#### ۴.۶ مزایا و معایب

میزان تولید اکسیژن توسط اسپیرولینا عددی بین ۵ تا ۸ گرم/متر مربع/ساعت است در حالی که این عدد در دیوار گیاهی بین ۱ تا ۲ است. مزیت دیگری که دیوار جلبکی نسبت به دیوار گیاهی دارد و آن را به گزینه مناسبی برای استفاده در مقیاس بزرگ تبدیل می‌کند، بازده بیشتر آن طی مدت زمان کمتر است. این دیوار طی مدت زمان ۲-۳ سال به بازدهی می‌رسد. علاوه بر این، کاربرد زیست توده در صنایع مختلف از جمله مزایای این دیوار می‌باشد. قابلیت استفاده از پساب شهری برای رشد و کاهش آلودگی آن نیز یک حسن بزرگ به شمار می‌رود.

هزینه بالای احداث و نگهداری دیوار سبز جلبکی یکی از عمده ترین معایب آن به شمار می‌رود. در مقایسه با دیوار گیاهی، هزینه نصب و نگهداری آن ۲-۷ برابر است. در عین حال این سیستم نیازمند پایش پیوسته برای تنظیم دما، pH، مواد مغذی و گردش آب می‌باشد. دیوار جلبکی برای رشد بهینه نیازمند گردش پیوسته آب می‌باشد که خود فرایندی هزینه بر است. به طور متوسط مصرف انرژی دیوار جلبکی بین ۴-۶ برابر دیوار گیاهی است.

مشکل دیگر این جلبک کاهش رشد آن در دمای زیر ۲۰ درجه سانتی‌گراد است. برای رفع این مشکل دو راهکار وجود دارد: گیاهان ناز (*Sedum*) پاسخ بسیار مطلوبی نسبت به سطوح تنش خشکی در فصول سرد و گرم سال نشان می‌دهند (وحدتی مشهدیان و همکاران ۱۳۹۵) و برای حفظ دمای مناسب فتوبیوراکتورها گزینه مناسبی به نظر می‌رسند. به بیان دیگر یک دیوار سبز تلفیقی گزینه خوبی برای به حداقل رساندن هزینه ها بنظر می‌رسد اما خود با چالش هایی مواجه است. چالش هایی همچون نیاز متفاوت جلبک و گیاه به نور، آب و pH.

راهکار دیگر استفاده از مبدل های حرارتی غوطه ور (immersed heat exchange) برای تامین گرما در فصول سرد سال است.

طبق بررسی های اولیه هزینه راه اندازی (شامل PBR، پمپها و سیستم کنترل) هر متر مربع دیوار سبز جلبکی در ایران ۲۰۰-۳۰۰ دلار است. هر مترمربع فتوبیوراکتور در سال حدود ۶ کیلوگرم زیست توده تولید می کند که حداقل ۱۲۰ دلار



ارزش دارد (۲۰ دلار به ازای هر کیلوگرم در سال ۲۰۲۵). همچنین میزان صرفه جویی در انرژی با راه اندازی این دیوار ۴۰ دلار در سال برآورد شده است. در نتیجه پس از گذشت حدود ۲ سال این پروژه به سودآوری می رسد. علاوه بر این در صورت خالص سازی موادی مانند فیکوسیانیل (قیمت جهانی: ۵۰۰-۳۰۰۰ دلار/کیلوگرم) می توان به سود بیشتری نیز دست یافت [35].

## ۴.۷ نمونه های اجرای موفق در جهان

### ۴.۷.۱ پروژه BIQ House هامبورگ، آلمان

BIQ (Bio-Intelligent Quotient) به معنای هوش بهر زیستی، نخستین ساختمان سبز در جهان است که چرخه انرژی آن (اعم از برقی و گرمایی) مبتنی بر عملکرد بیوراکتورهای جلبکی طراحی و اجرا شده است. BIQ ساختمان هوشمندی است که ساخت آن از سال ۲۰۱۱ میلادی با بودجه ای بالغ بر پنج میلیون یورو آغاز و در سال ۲۰۱۳ مورد بهره برداری قرار گرفت.

این ساختمان با هندسه ای مکعبی و با کاربری مسکونی در چهار طبقه (۱۵ آپارتمان) به علاوه پنت هاوس و در دو نمای متفاوت و زیربنایی بالغ بر ۱۶۰۰ متر مربع ساخته شده است. این ساختمان در شمال اروپا و در هامبورگ در یک منطقه سردسیر واقع شده است.

در طراحی این ساختمان برای وجوه آفتابگیر بجای نماهای متداول از صفحات کشت ریز جلبک استفاده شده است. این نمای جلبکی از ۱۲۹ صفحه که به فتوبیوراکتور یا PBRs موسوم است تشکیل شده است. هر فتوبیوراکتور ۲۷۰ سانتی متر طول، ۷۰ سانتی متر عرض و ۸ سانتی متر ضخامت دارد که مساحتی بالغ بر ۲۴۳ متر مربع از نمای ساختمان را پوشش داده است.

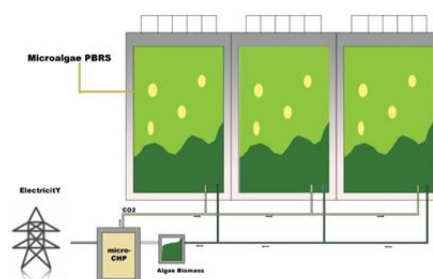
تابش نور خورشید و جریان یکنواخت درون فتوبیوراکتورها مانع اجتماع یا لختگی جلبکی می شود. هر فتوبیوراکتور دارای یک لوله تغذیه کننده گاز دی اکسید کربن در جهت تأمین چرخه کربن در فرآیند فتوسنتز می باشد. همچنین هر فتوبیوراکتور دارای یک مدار تغذیه کننده است که عناصر مغذی جاندار را تأمین می کند. برداشت زیست توده جلبکی بصورت خودکار و با پمپاژ محتوای فتوبیوراکتورها انجام می شود. زیست توده برداشت شده طی فرآیند تخمیر بی هوازی و در دیگ های استحصال یا همان نیروگاه بیوگاز به گاز متان تبدیل می شود. گاز متان می تواند جهت تأمین انرژی حرارتی و یا تأمین نیرو محرکه ژنراتورهای الکتریکی مورد استفاده قرار گیرد. در نهایت انرژی الکتریکی و حرارتی تولید شده نیازهای ساختمان را تأمین می کند. فتوبیوراکتورها علاوه بر جایگزینی نمای ساختمان، کاربردهای دیگری دارند. از جمله مصرف سالیانه ۶ میلیون تن دی اکسید کربن، تولید اکسیژن و تهویه محیط داخلی ساختمان از طریق لوله های هوایی، جذب انرژی خورشیدی توسط محتوای بیوراکتورها با بهره وری ۳۸ درصد، عایقی مناسب در برابر آلودگی های صوتی، عایق گرما و سرما، کنترل نور و روشنایی و ایجاد سایه برای ساختمان. شکل (۳) نمای ساختمان BIQ را نشان می دهد.





شکل ۳. نمایی از ساختمان BIQ

حرارت جذب شده در فتوبیوراکتورها از طریق سیستم گردش آب مورد استفاده قرار می گیرد. سیستم مدیریت مرکزی BMS که به سیستم ROCKWELL SPS موسوم است تمام فرآیندهای مورد نیاز فتوبیوراکتورها اعم از کنترل تراکم سلولی و حرارت را در محیط کشت کنترل می نماید. شکل (۴) ساختاری شماتیک از چرخه انرژی در ساختمان BIQ را نشان می دهد.

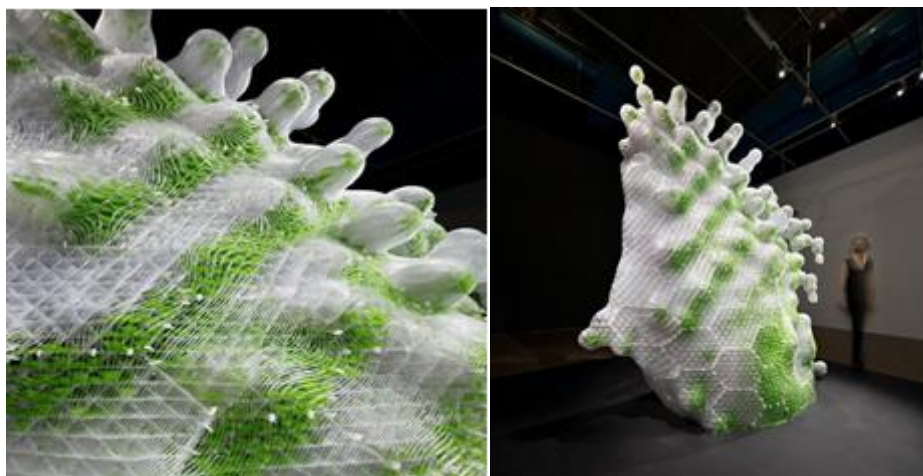


شکل ۴. ساختار شماتیک چرخه انرژی در BIQ

#### 4.7.3 پروژه H.O.R.T.U.S. XL Astaxanthin در پاریس، فرانسه

از این پروژه در سال ۲۰۱۹ در کارخانه زندگی، مرکز پمپیدو، در پاریس رونمایی شد. کار طراحی این پروژه بر عهده استودیوی اکولوژیک (ecologic Studio) بود. اعضای اصلی این پروژه کلودیا پاسکوئرو (Claudia Pasquero) و مارکو پولتو (Marco Poletto) بودند. آزمایشگاه منظر مصنوعی (IOUD)، دانشگاه اینسبروک عهده دار سیستم های چاپ سه بعدی و توسعه تولید این سازه بود.

در هورتوس (Hortus) یک الگوریتم دیجیتال، رشد یک زیرلایه با الهام از مورفولوژی مرجان را شبیه سازی می کند. این زیرلایه به صورت فیزیکی توسط دستگاه های چاپ سه بعدی در لایه های ۴۰۰ میکرونی، که توسط واحدهای مثلثی ۴۶ میلی متری پشتیبانی می شوند و به بلوک های شش ضلعی ۱۸.۵ سانتی متری تقسیم می شوند، رسوب داده می شود. سیانوباکتری های فتوسنتز کننده روی یک محیط بیوژل به سلول های مثلثی منفرد یا بیوپیکسل تلقیح می شوند و واحدهای بیولوژیکی سیستم را تشکیل می دهند. متابولیسم آنها، که توسط فتوسنتز تأمین می شود، اکسیژن و زیست توده تولید می کند. مقدار چگالی هر بیوپیکسل به صورت دیجیتالی محاسبه می شود تا ارگانیسم های فتوسنتز کننده به طور بهینه در امتداد سطوح ایزو-سطح تابش ورودی افزایش یافته، مرتب شوند. شکل (۵) نمایی از این سازه را نشان می دهد.



شکل ۵. نمایی از سازه هورتوس (HORTUS)

#### 4.7.3 پروژه LIQUID3 بلگراد، صربستان

LIQUID3 یک بیوراکتور شهری است که از قدرت ریزجلبک ها برای حذف دی اکسید کربن ( $CO_2$ ) و تولید اکسیژن ( $O_2$ ) استفاده می کند. این یک جایگزین برای پوشش گیاهی محیط های شهری است که فضای محدود و آلودگی شدید را تهویه می کند. یک تانک LIQUID3 جایگزین یک درخت بالغ یا ۲۰۰ متر مربع چمن می شود و در زمستان هم کار می کند.

به گزارش یورونیوز، بلگراد به دلیل دو نیروگاه بزرگ زغال سنگ در نزدیکی آن، چهارمین شهر آلوده صربستان است. بر اساس اعلام اتحادیه سازمان غیردولتی اروپایی سلامت و محیط زیست (HEAL) این دو نیروگاه جزو ۱۰ نیروگاه برتر اروپا هستند. بر اساس گزارش جهانی کیفیت هوای IQAir، صربستان در سال ۲۰۱۹ به عنوان پنجمین کشور آلوده اروپا با میانگین  $PM_{2.5}$  در آلودگی هوا قرار گرفت.

این سازه در بلگراد به یک ابزار نوآورانه در مبارزه با هوای کثیف تبدیل شده است و به اصطلاح "درخت مایع" نامیده می شود. هر تانک حاوی ششصد لیتر آب است و از ریزجلبک ها برای جذب دی اکسید کربن و تولید اکسیژن خالص از طریق فتوسنتز استفاده می کند. دکتر ایوان اسپاسویویچ، یکی از طراحان این پروژه از موسسه تحقیقات چند رشته ای در دانشگاه بلگراد، در این باره گفته است: "ریزجلبک جایگزین دو درخت ۱۰ ساله یا ۲۰۰ متر مربع چمن می شود." شکل (۶) نمایی از این سازه را نشان می دهد که در دمای پایین و عدم حضور نور خورشید نیز می تواند به فتوسنتز ادامه دهد.



شکل ۶. نمایی از سازه LIQUID3

## 5. نتایج و بحث

این پژوهش به منظور ارائه راهکاری نوین و پایدار، به امکان‌سنجی استفاده از دیوارهای سبز جلبکی با بهره‌گیری از ریز جلبک اسپیرولینا پرداخت.

یافته‌های این مطالعه به وضوح نشان می‌دهد که اسپیرولینا، با توجه به ویژگی‌های بیولوژیک منحصر به فرد خود از جمله نرخ فتوسنتز بسیار بالا، توانایی جذب قابل توجه دی‌اکسید کربن و آلاینده‌هایی نظیر ذرات معلق ( $PM_{2.5}$ ) و ( $PM_{10}$ ) و دی‌اکسید نیتروژن ( $NO_2$ ) و همچنین قابلیت رشد در محیط‌های کشت کم‌هزینه مانند پساب‌های شهری، گزینه‌ای ایده‌آل برای ادغام در ساختارهای عمودی شهری است. بر اساس نتایج، یک سیستم دیوار سبز جلبکی می‌تواند تا ۵ تا ۱۰ برابر بیشتر از پوشش‌های گیاهی مرسوم، اکسیژن تولید کرده و به میزان قابل توجهی در کاهش غلظت آلاینده‌های هوا مؤثر باشد.

اگرچه چالش‌هایی همچون هزینه اولیه نسبتاً بالای راه‌اندازی و نگهداری سیستم‌های فتوبیوراکتور بسته، نیاز به پایش مستمر پارامترهای محیطی (دما، pH، نور و حساسیت به کاهش دما زیر ۲۰ درجه سانتی‌گراد) از موانع پیش‌روی این فناوری هستند، اما تحلیل‌های اقتصادی حاکی از آن است که با در نظر گرفتن فروش زیست‌توده با ارزش (برای مصارف غذایی، دارویی و صنعتی)، صرفه‌جویی در انرژی ساختمان‌ها، و کاهش هزینه‌های بهداشتی ناشی از آلودگی هوا، این سیستم می‌تواند در یک بازه زمانی حدود ۲ تا ۳ سال به توجیه اقتصادی و سودآوری برسد. [۱۳، ۱۴، ۱۷]

تجربیات موفق بین‌المللی، از جمله پروژه «BIQ House» در آلمان و «LIQUID3» در صربستان، اثربخشی و قابلیت اجرای این فناوری در مقیاس شهری را به اثبات رسانده‌اند و افق نویی پیش‌روی ما به منظور کاهش آلودگی هوا می‌گشایند.





## ۶. مراجع

- [1] Shetty, K., Paliyath, G., Pometto, A., & Levin, R. E. (2008). Food biotechnology (2nd ed.). CRC Press.
- [2] Colla, M., & Reinehr, C. H. O. (2007). Production of biomass and nutraceutical compounds by *Spirulina platensis* under different temperature and nitrogen regimes. *Bioresource Technology*, 98(7), 1489-1493.
- [3] Sanchez, M., Bernal-Castillo, J., Rozo, C., & Rodriguez, I. (2002). *Spirulina*: An edible microorganism. A review. *Universitas Scientiarum*, 7(2), 89-97.
- [4] Roussel, T., Halary, S., Duval, C., Piquet, B., Cadoret, J. P., Vernès, L., et al. (2023). Monospecific renaming within the cyanobacterial genus *Limnospira* (*spirulina*) and consequences for food authorization. *Journal of Applied Microbiology*, 134(8), 1x4d159.
- [5] Belay, A. (2002). The potential application of *Spirulina* as a nutritional and therapeutic supplement in health management. *The Journal of the American Nutraceutical Association*, 5(2), 26-50.
- [6] Lian He, R., & Yinjie Tang, J. (2012). Experimental analysis and model-based optimization of microalgae growth in photobioreactors using flue gas. *Biomass and Bioenergy*, 41, 131-138.
- [7] Singh, S., Dwivedi, V., Sanyal, D., & Dasgupta, S. (۲۰۲۰) (n.d.). Therapeutic and nutritional potential of spirulina in combating COVID-19 infection. *Reliance Industries Ltd.*
- [8] Lupatini AL, Colla LM, Canan C, Colla E. Potential application of microalga *Spirulina platensis* as a protein source. *J Sci Food Agric*. 2017 Feb;97(3):724-732. doi: 10.1002/jsfa.7987. Epub 2016 Sep 12. PMID: 27507218.
- [9] Marjanović, B., Benković, M., Jurina, T., Sokač Cvetnić, T., Valinger, D., Gajdoš Kljusurić, J., & Jurinjak Tušek, A. (2024). Application of advanced data analysis techniques in modeling the quality of marinated pork loin. *Processes*, 12(9), 257. <https://doi.org/10.3390/pr12090257>
- [10] Vahdat Mashhadiana, N., Tehranifar, A., & Kazemi, F. (2011). Evaluation of cold and drought resistance of some plants for use in extensive green roofs in the climatic conditions of Mashhad. *Environmental Sciences*, 9(2), 1–14
- [11] Soeder, C. J. (1986). A historical outline of applied algology. In A. Richmond (Ed.), *Handbook of microalgal mass culture* (pp. 25-41). CRC Press.
- [12] Burlew, J. S. (1976). Current status of the large-scale culture of algae. In J. S. Burlew (Ed.), *Algal culture: From laboratory to pilot plant* (pp. 3-23). Carnegie Institution of Washington.
- [13] Bustami, R. A., Belusko, M., Ward, J., & Beecham, S. (2018). Vertical greenery systems: A systematic review of research trends. *Building and Environment*, 146, 226-237.
- [14] Pastore, M., Primavera, A., Milocco, A., Barbera, E., & Sforza, E. (2022). Tuning the solid retention time to boost microalgal productivity and carbon exploitation in an industrial pilot-scale LED photobioreactor. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 61(22), 7739-7747.
- [15] Bernard, O., & Rémond, B. (2012). Validation of a simple model accounting for light and temperature effect on microalgal growth. *Bioresource Technology*, 123, 520-527.





- [16] Rossi, S., Carecci, D., & Ficara, E. (2023). Thermal response analysis and compilation of cardinal temperatures for 424 strains of microalgae, cyanobacteria, diatoms and other species. *Science of the Total Environment*, 873, 162275.
- [17] Berden Zrimec, M., Sforza, E., Pattaro, L., Carecci, D., Ficara, E., Idà, A., Ferrer-Ledo, N., Canziani, S., Mangini, S., Lazar, B., Papadaki, S., Markou, G., Tzovenis, I., & Reinhardt, R. (2024). Advances in Spirulina cultivation: Techniques, challenges, and applications. In *Insights into algae - Fundamentals, culture techniques and biotechnological uses of microalgae and cyanobacteria*. IntechOpen.
- [18] Rosso, L., Lobry, J. R., & Flandrois, J. P. (1993). An unexpected correlation between cardinal temperatures of microbial growth highlighted by a new model. *Journal of Theoretical Biology*, 162(4), 447-463.
- [19] AlFadhly, N. K. Z., Alhelfi, N., Altemimi, A. B., Verma, D. K., & Cacciola, F. (2022). Tendencies affecting the growth and cultivation of genus Spirulina: An investigative review on current trends. *Plants*, 11(22), 3063.
- [20] Ghaffari Ashtiani, A., & Sharifan, A. (2019). [Title of the article]. In *\*Proceedings of the 3rd International and 26th National Iranian Food Science and Technology Congress\**, Tehran, Iran.
- [21] Berden Zrimec, M., Sforza, E., Pattaro, L., Carecci, D., Ficara, E., Idà, A., Ferrer-Ledo, N., Canziani, S., Mangini, S., Lazar, B., Papadaki, S., Markou, G., Tzovenis, I., & Reinhardt, R. (2024). Advances in Spirulina cultivation: Techniques, challenges, and applications. In *Insights into algae - Fundamentals, culture techniques and biotechnological uses of microalgae and cyanobacteria*. IntechOpen
- [22] Sheikhzadeh, A., Babalipour, A., & Memari, N. (2015). Afzayesh-e toolid-e sianobaktri-e spirulina ba kontrol-e ham zadan, tarkib-e shimiayi-e mohit-e kesh [Increasing production of Spirulina cyanobacteria by controlling mixing and chemical composition of culture medium]. *Journal of Plant Research (Iranian Journal of Biology)*, 28(2), 344.
- [23] Yu, J., Hu, H., Wu, X., Wang, C., Zhou, T., Liu, Y., Ruan, R., & Zheng, H. (2019). Continuous cultivation of Arthrospira platensis for phycocyanin production in large-scale outdoor raceway ponds using microfiltered culture medium. *Bioresource Technology*, 287, 121420.
- [24] Mortazavi, M. H., Ganj Khanlou, M., Zali, A., & Nematollahi, M. A. (2019). Feasibility of cultivating Spirulina platensis using water from the Persian Gulf. *Aquaculture Sciences*, 7(13), 189-194
- [25] Manirafasha, E., Ndikubwimana, T., Zeng, X., Lu, Y., & Jing, K. (2016). Phycobiliprotein: Potential microalgae derived pharmaceutical and biological reagent. *Biochemical Engineering Journal*, 109, 282-296..
- [26] Mittal AK, Chisti Y, Banerjee UC. Synthesis of metallic nanoparticles using plant extracts. *Biotechnol Adv.* 2013 Mar-Apr;31(2):346-56. doi: 10.1016/j.biotechadv.2013.01.003. Epub 2013 Jan 12. PMID: 23318667.
- [27] Eustance, E., Wray, J. T., Badvipour, S., & Sommerfeld, M. R. (2016). Volatile nutrients - Improving utilization of ammonia and carbon dioxide in microalgal cultivation: A review. *Current Biotechnology*, 5(2), 130-141.
- [28] Kodama, M., Ikemoto, H., & Miyachi, S. (1993). A new species of highly CO<sub>2</sub>-tolerant fast-growing marine microalga suitable for high-density culture. *Journal of Marine Biotechnology*, 1, 21-25.



- [29] Dismukes, G. C., Carrieri, D., Bennette, N., Ananyev, G. M., & Posewitz, M. C. (2008). Aquatic phototrophs: efficient alternatives to land-based crops for biofuels. *Current Opinion in Biotechnology*, 19(3), 235-240..
- [30] Braga, V. S., Moreira, J. B., Costa, J. A. V., & de Moraes, M. G. (2018). Cultivation strategy to stimulate high carbohydrate content in *Spirulina* biomass. *Bioresource Technology*, 269, 221-226.
- [31] Mooij PR, Stouten GR, van Loosdrecht MC, Kleerebezem R. Ecology-based selective environments as solution to contamination in microalgal cultivation. *Curr Opin Biotechnol*. 2015 Jun;33:46-51. doi: 10.1016/j.copbio.2014.11.001. Epub 2014 Nov 20. PMID: 25445547.
- [32] Renata Koníčková, Kateřina Vaňková, Jana Vaníková, Katerina Vánová, Lucie Muchová, Iva Subhanová, Marie Zadinová, Jaroslav Zelenka, Ales Dvořák, Michal Kolář, Hynek Strnad, Silvie Rimpelová, Tomas Ruml, Ronald J. Wong, Libor Vítek, Anti-cancer effects of blue-green alga *Spirulina platensis*, a natural source of bilirubin-like tetrapyrrolic compounds, *Annals of Hepatology*, Volume 13, Issue 2, 2014, Pages 273-283, ISSN 1665-2681, [https://doi.org/10.1016/S1665-2681\(19\)30891-9](https://doi.org/10.1016/S1665-2681(19)30891-9)
- [33] Ooms, M., Dinh, C., Sargent, E. et al. Photon management for augmented photosynthesis. *Nat Commun* 7, 12699 (2016). <https://doi.org/10.1038/ncomms12699>
- [34] G. Torzillo, B. Pushparaj, F. Bocci, W. Balloni, R. Materassi, G. Florenzano, Production of *Spirulina* biomass in closed photobioreactors, *Biomass*, Volume 11, Issue 1, 1986, Pages 61-74, ISSN 0144-4565, [https://doi.org/10.1016/0144-4565\(86\)90021-1](https://doi.org/10.1016/0144-4565(86)90021-1).
- 35 Du, X., Zhu, C., Hu, C., Hao, H., Xiao, Y., & Chi, Z. (2025). Techno-economic analysis of *Spirulina* biomass production in the floating photobioreactors for fishmeal replacements. *Journal of Cleaner Production*, 472, 144350. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652625013502>