



سنجش میزان جذب دی اکسید کربن در بیوپوسته‌های شفاف ساختمان به منظور ارتقا پایداری محیط زیست شهری

حمیدرضا رضازاده¹، ماریا کردجمشیدی² و فریال احمدی³

تاریخ دریافت: 1397/03/10

تاریخ پذیرش: 1398/03/25

چکیده: یکی از مشکلات اساسی که امروزه گریبان‌گیر کلان‌شهرها شده، آلودگی هواست که ضمن تهدید و به خطر انداختن سلامتی انسان، حیوان و گیاه، باعث افزایش دمای کره زمین و تغییرات اقلیمی شده. یکی از بزرگترین منابع آلوده‌کننده، صنعت ساختمان است به گونه‌ای که جداره‌های آن، دلیل اصلی تولید و تشدید آلودگی هوای شهرهاست؛ لذا در این پژوهش هدف ارائه و معرفی یک سیستم جدید از پوسته‌های شفاف پر شده از ریزجلبک با استفاده از علم بیونیک، در کلان‌شهر آلوده تهران که در مقایسه با گیاهان معمولی دارای خاصیت جذب‌کنندگی بیشتر، پایدار، زنده و ارزان‌قیمت است، جهت نیل به پایداری زیست‌محیطی شهری و بهبود کیفیت هواست. به همین منظور به صورت توصیفی - تحلیلی و با استناد به منابع کتابخانه‌ای، ساختار و تناسبات پنجره‌های دو جداره امروزی از نظر فنی جهت کشت ریزجلبک، بررسی و ابعاد پنجره سبز مشخص شد. پس از طراحی و ساخت به صورت اصولی و فنی با استفاده از روش تجربی و آزمایشگاهی با تزریق ریزجلبک و قراردادن پنجره در محیط واقعی، میزان جذب دی اکسید کربن به عنوان یکی از آلاینده‌های هوا اندازه‌گیری شد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که با رشد ریزجلبک پس از گذشت فقط شش روز، روند جذب دی اکسید کربن از 6.6 درصد تا 45.4 درصد تغییر خواهد کرد.

واژگان کلیدی: آلودگی هوا، جذب دی اکسید کربن، ریزجلبک، بیوپوسته‌های شفاف، پایداری محیط زیست شهری.

¹ کارشناس ارشد، رشته فناوری معماری بیونیک، دانشکده هنر و معماری دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران.

² استادیار، رشته معماری، دانشکده هنر و معماری دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران.

³ استادیار، رشته معماری، دانشکده هنر و معماری دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران. (نویسنده مسئول) f.ahmadi@umz.ac.ir



1- مقدمه

با شروع انقلاب صنعتی، کره زمین با پدیده آلودگی هوا و آتمسفر و به تبع آن گرمایش جهانی روبرو شده است. عواملی از قبیل ارسال بیش از اندازه گازهای گلخانه‌ای به هوا، افزایش ساخت صنایع و کارخانه‌ها و از همه مهم‌تر افزایش مهاجرت از روستاها به شهر در این معضل نقش اساسی دارند (Rozati and Ghanbaran, 2013). افزایش شهرنشینی و کمبود زمین و گران بودن آن برای تأمین مسکن افراد منجر به ساخت و سازهای متراکم در مراکز شهر شده که باعث حبس هوا در بین این بناهای متراکم شهری می‌شود. افزایش جمعیت کره زمین و شهرنشینی و صنعت ساخت و ساز (Daman keshide, 2011) از یک سو و افزایش وسایل نقلیه، انواع صنایع و مصرف سوخت‌های فسیلی (Azmoodeh and Heydari, 2014) از سوی دیگر، باعث ارسال حجم زیاد گازهای آلاینده از جمله منواکسید و دی‌اکسید کربن به هوا شده است که این امر علاوه بر تغییرات اقلیمی (Lechner, 2014)، بر روی سلامت انسان اثرات سوء و مخربی (Mayer, 1999) خواهد داشت. به همین منظور برای کنترل و کاهش آلودگی‌های اتمسفری در کلان‌شهرها راهکارهایی از جمله انتقال صنایع و کارخانه‌ها به خارج از شهر، پیاده محور کردن مراکز شهری، افزایش محدودیت‌های رفت و آمد وسایل نقلیه خصوصی، افزایش حمل و نقل همگانی و عمومی، توسعه فضاهای سبز شهری و غیره بوده است. علی‌رغم تمامی این تلاش‌ها، بهبود و پیشرفت کمی حاصل شده است. از طرفی صنعت ساخت و ساز، زیرساخت‌های شهری و دیگر متعلقات آن در سراسر جهان مسئول بیشترین میزان ارسال گاز دی‌اکسید کربن به جو هستند (Buildings energy data book, 2009). از دیگر مشکلاتی که به واسطه ساختمان‌ها در محیط‌های شهری می‌توان به آن اشاره کرد، پدیده جزیره گرمایی است. این پدیده ضمن به دام انداختن هوا در بین ساختمان‌ها و ایجاد خرده اقلیم، باعث افزایش و پایداری آلاینده‌های هوا می‌شود که از مشکلات عدیده‌ای حال حاضر شهرهاست. جداره‌های ساختمان خود دلیل اصلی تولید و تشدید آلودگی هوای شهرهاست؛ درحالی‌که

همین جداره‌ها به عنوان اجزاء تشکیل دهنده سیمای شهر می‌توانند نقش مؤثری در کیفیت هوای محیط داشته باشند، بعضاً خود به تشدید آلودگی کمک می‌کنند (Rezazadeh et al., 2015). از آنجایی‌که بیشترین سطح شهر را ساختمان‌ها و بدنه‌های شهری شکل داده‌اند، می‌توان در عرصه ساختمان با استفاده از مصالح جاذب آلودگی و الحاق پوشش گیاهی به بدنه بنا، علاوه بر جذب و کاهش آلاینده‌های هوا، به پایداری زیست‌محیطی و احیای بستر طبیعی کلان‌شهرها کمک کرد. در این میان می‌توان با بهره‌گیری از علم بیونیک، با الهام و تقلید از طبیعت با استفاده از روش‌های زنده در تلفیق با جداره ساختمان، هم از نظر اقتصادی و هم از نظر بهبود شرایط محیطی و زیبا سازی منظر شهری، جهت نیل به پایداری زیست‌محیطی شهری و بهبود کیفیت هوا گام برداشت. طراحی بیونیک دارای یک روند سیستماتیک است که انجام آن نیازمند شناخت دقیق از طبیعت، ساختارهای زیستی، نوع هم‌نشینی و ارتباط جانداران با یکدیگر و محیط اطرافشان است. طراح، کار را با مشخص کردن اهداف شروع می‌کند و با توجه به اینکه شباهت و همانندی یک قاعده اصلی در علم بیونیک است، به دنبال سیستم‌هایی با عملکرد مشابه در طبیعت می‌شود و در صورت مناسب بودن، ویژگی‌های ساختاری و عملکردی سیستم بیولوژیکی را به سیستم فنی در طرح انتقال می‌دهد. این روند سیستماتیک دارای شش مرحله است. مرحله اول: تعریف و شناسایی صورت‌مسئله؛ مرحله دوم: تجزیه، تحلیل و تفسیر صورت‌مسئله؛ مرحله سوم: جستجو برای یافتن و کشف راه‌حل‌های طبیعی، زیستی و بیولوژیکی؛ مرحله چهارم: تعریف مقدماتی بر راه‌حل‌های طبیعی، زیستی و بیولوژیکی؛ مرحله پنجم: استخراج اصول و مبانی طبیعی، زیستی، بیولوژیکی و تقلید کردن و مرحله ششم: ارزیابی، سنجیدن و کاربردی کردن اصول و مبانی (Gharooni et al., 2013). به صورت کلی می‌توان گفت که طراحی بیونیک یک طراحی همگراست. بدین معنا که گذشتن از هر یک از این مراحل به معنای اتمام مرحله نیست و در یک حرکت مارپیچی و بر اساس نیاز و روند طراحی دوباره به مراحل



گرفته است. به طوری که در سال 2008 مقاله‌ای به نام کاهش دی‌اکسیدکربن به وسیله کشت چگالی بالایی از ریز جلبک در فتوبیوراکتور³ توسط چيو⁴ و همکاران به چاپ رسیده است. محققان این مقاله معتقدند که ریز جلبک پرورش یافته در فتوبیوراکتور مانند یک سیستم بیولوژیکی با بازدهی بالا برای تبدیل دی‌اکسید کربن به بیومس عمل می‌کند و آن‌ها برای این امر از جلبک کلرلا⁵ استفاده کردند و هدف آن‌ها تعیین میزان رشد جلبک، میزان حذف دی‌اکسید کربن از جریان هوای تزریقی، میزان تولید بیومس و میزان تولید چربی بوده است (Chiu, et al., 2008). در سال 2009 مقاله‌ای به نام جذب دی‌اکسید کربن در جلبک، تولید بیومس به عنوان ابزاری برای کاهش گازهای گلخانه‌ای با تأکید بر سیاست‌ها و استراتژی انرژی در نیوزیلند توسط محققى به نام پاکر⁶ گزارش شده که در این گزارش محقق به بررسی کلیات در مورد جذب دی‌اکسید کربن توسط جلبک و تولید بیومس و بررسی این روش به عنوان تکنولوژی جدید در بحث انرژی در کشور نیوزیلند پرداخته است. در این گزارش بیان شده است که جلبک‌ها، چه جلبک‌های دریایی و چه جلبک‌های آب شیرین بازدهی بیشتری در فتوسنتز نسبت به گیاهان عالی دارند و میزان کربن بیشتری را نیز جذب خواهند کرد و جلبک‌ها را دارای ویژگی‌هایی دانست که آن‌ها را برای این هدف مناسب کرده است (Packer, 2009). در سال 2010 مقاله‌ای به نام افزایش تثبیت دی‌اکسید کربن و تولید سوخت زیستی از طریق ریز جلبک‌ها به چاپ رسیده است. محققان این مقاله دی‌اکسید کربن را مشکل مهمی برای پایداری جهانی دانسته‌اند و یکی از راهکارهای کاهش آن را تثبیت زیستی با استفاده از ریز جلبک‌ها می‌دانند. آن‌ها در این مقاله به طور خلاصه به بررسی تکنولوژی تثبیت زیستی دی‌اکسید کربن در ریز جلبک‌ها و بررسی تولیدات احتمالی مانند سوخت زیستی و یا محصولات باارزش دیگر پرداخته‌اند و این محصولاتی که در نتیجه پرورش ریز جلبک‌ها به دست می‌آید شامل محصولات غذایی برای انسان و حیوان، کود و همچنین مواد شیمیایی صنعتی و بیوانرژی دانسته‌اند (Kumar, et al., 2010).

قبل از گذشت وجود دارد. در همین راستا به منظور استفاده از ریز جلبک در طراحی جداره ساختمان با هدف جذب و کاهش آلودگی هوا، دو روش برای طراحی معرفی می‌شود. این دو روش شامل استفاده از عملکرد و فرایندهای جذب ریز جلبک و استفاده مستقیم از خود ریز جلبک در طراحی جداره است. ریز جلبک‌ها همانند دیگر گیاهان کلروفیل دار¹ از طریق فرآیند فتوسنتز به تولید مواد مغذی برای رشد می‌پردازند. این فرآیند در طبیعت به طور گسترده به واسطه دریافت نور خورشید توسط موجودات کلروفیل دار در حال انجام است و همین امر باعث جذب مقدار قابل توجهی دی‌اکسید کربن اتمسفری و تولید اکسیژن می‌شود. فرآیند فتوسنتز نیازمند حضور دی‌اکسید کربن، آب، نور و مولکول کلروفیل است؛ به این صورت که دی‌اکسید کربن و آب باهم ترکیب شده و در کلروپلاست² تشکیل یک مولکول قند می‌دهد. گاز اکسیژن به عنوان یک محصول فرعی آزاد و به درون اتمسفر رها می‌شود. بنابراین برای شبیه‌سازی این عملکرد در معماری به عنوان یک پنجره سبز زنده و جاذب، نیازمند طراحی و ساخت لایه‌هایی برای انجام عملیات فتوسنتز است. فارغ از نوع مصالح لایه‌ها و پیچیدگی هر کدام از لحاظ ساختاری، لایه‌های متعددی به منظور جذب دی‌اکسید کربن و تولید اکسیژن لازم و ضروری است. نکته شایان ذکر این است که تمامی این واکنش‌ها و مراحل به کمک یک سری آنزیم انجام می‌شود که شبیه‌سازی این آنزیم‌ها در دنیای واقعی و معماری کاری غیر ممکن است؛ لذا با توجه به نبود تکنولوژی و محدودیت‌های پیش رو، یافتن راه‌حلی ساده و متناسب با محدودیت‌های فعلی امری منطقی و بهینه است (Rezazadeh, 2018). در نهایت با استفاده مستقیم ریز جلبک و الحاق آن به جداره ساختمان از طریق پنجره، می‌توان یک راه‌حل ساده، منطقی و مقرون به صرفه پیشنهاد نمود.

امروزه استفاده از میکروارگانیسم‌های زنده که نسبت به گونه‌های عالی گیاهی از نظر جذب آلاینده‌های اتمسفری و شرایط رشد و نمو، عملکرد و بازدهی بیشتری دارند، مورد توجه پژوهشگران زیادی قرار

در سال 2011 هو⁷ و همکاران با بررسی سیستم‌های کاهش انتشار دی‌اکسید کربن با استفاده از ریز جلبک‌ها گزارش نمودند که دی‌اکسید کربن به‌عنوان مشکل عمده تغییر اقلیم و مسأله بحرانی است و تثبیت زیستی دی‌اکسید کربن با استفاده از ریز جلبک را رویکرد جالبی دانسته‌اند به‌طوری‌که از نظر سود ناشی از تولید و کاربرد بیومس نیز بسیار قابل توجه است (Ho, et al., 2011). توسعه صنعتی، افزایش جمعیت، گسترش شهرنشینی و در نتیجه توسعه حمل‌ونقل، آلودگی هوا را در شهر تهران به یکی از مهم‌ترین چالش‌های مردم و مسئولان تبدیل کرده است؛ مشکلی که به سبب تعدد منابع و همین‌طور نهادهای تصمیم‌گیرنده، ابعاد پیچیده‌ای داشته و کاهش آن به غیر از مباحث فنی و نیاز به شناخت منابع، نیازمند همکاری بالای مردم و مسئولان امر است. گزارش کیفیت هوای شهر تهران در سال 1394، پنجمین سند منتشر شده‌ی شرکت کیفیت هوا است که کیفیت هوای شهر تهران در سال 1394 را در یک مجموعه منسجم مورد بررسی قرار داده و وضعیت غلظت آلاینده‌ها را از بعد زمانی و مکانی تحلیل کرده است. بر اساس این گزارش، در شهر تهران طی سال 1394، 21 پاک (6 درصد)، 233 روز سالم (64 درصد)، 105 روز ناسالم برای گروه‌های حساس جامعه (29 درصد)، 5 روز ناسالم برای عموم افراد جامعه (بیش از 1 درصد) و 1 روز بسیار ناسالم (کمتر از 1 درصد) رخ داده است. با وجود افزایش تعداد روزهای پاک و کاهش روزهای آلوده در این سال نسبت به سال‌های اخیر، همچنان 30 درصد روزهای سال 1394 در شرایط فراتر از حد استاندارد قرار داشته‌اند. طی سال 1394، کمترین و بیشترین تعداد روزهای آلوده به ترتیب در فصل‌های تابستان (به‌ویژه مرداد) و زمستان (آذر و دی) رخ داده است. در مجموع با توجه به شکل زیر می‌توان گفت تهران در زمره آلوده‌ترین شهرهای جهان قرار دارد و با توجه به موقعیت سیاسی و استراتژیک آن به‌عنوان پایتخت، ضرورت دارد که در این شهر تمهیداتی ویژه برای کنترل و کاهش آلودگی هوا صورت پذیرد (Annual report on Tehran's air quality, 2016).

از آنجا که هر فعالیتی برای ارتقای کیفیت زندگی و توسعه انسانی در محیط‌زیست تحقق می‌یابد، لذا وضعیت محیط زیست و منابع آن از نظر پایداری یا ناپایداری بر فرآیند توسعه تأثیر گذار خواهد بود (Zameni and Vali beig, 2018). بر این اساس، هر بحثی درباره توسعه بدون توجه به مفهوم پایداری زیست‌محیطی، ناتمام تلقی می‌شود. با این اوصاف اگر توسعه پایدار هدف نهایی به‌شمار رود، پایداری زیست‌محیطی شرط لازم برای تحقق توسعه پایدار است (Maleki, 2014). در تمامی پژوهش‌هایی که به آن‌ها اشاره شد، از ریز جلبک به‌منظور فعالیت‌های ویژه‌ای از جمله تثبیت دی‌اکسید کربن، ایجاد یک منبع سوختی پایدار و پاک، استفاده در صنعت کشاورزی، داروسازی، مواد آرایشی و بهداشتی، صنایع و کارخانه‌ها، مواد اولیه برای تولید غذاهای ارزان‌قیمت و تولید اکسیژن در مقیاس‌های بسیار بزرگ و غیر قابل استفاده در صنعت ساختمان و معماری استفاده کرده‌اند. اما تاکنون در صنعت ساختمان به‌منظور جذب، تثبیت و کاهش دی‌اکسید کربن به روش زنده و با استفاده از ریز جلبک‌ها به صورت تجربی و آزمایشگاهی در مقیاس کوچک با بازدهی بالا، پژوهشی صورت نگرفته و راهکاری‌های ارایه شده برای جذب آلاینده‌ها در حوزه مصالح نوین و یا فناوری نانو به روش غیر زنده است. لذا این پژوهش با الهام از طبیعت و استفاده از علم بیونیک، با هدف ارائه و معرفی یک سیستم جدید از جداره‌های ساختمان با عنوان پنجره سبز با استفاده از ریز جلبک‌ها (میکروارگانیسم‌های زنده تک سلولی) که در مقایسه با گیاهان معمولی دارای خاصیت جذب‌کنندگی بیشتر و همچنین سهولت استفاده و بهره‌برداری هستند، درصد برداشتن گامی مؤثر در جهت ارتقاء پایداری زیست‌محیطی در کلان‌شهرهای آلوده خود به‌ویژه تهران است.

1-1- ریز جلبک

ریز جلبک‌ها گروهی از میکروارگانیسم‌های تک سلولی با توانایی فتوسنتز هستند که در ساده‌ترین شکل یک نمونه گیاهی (فاقد ریشه، ساقه، برگ و سایر اندام‌های گیاهی) قرار دارند (Smith, 1955; Whittaker, 1969).



اما در سیستم بسته برخلاف سیستم باز، تمامی پارامترهای تأثیرگذار در روند جذب دی‌اکسید کربن قابل کنترل و اندازه‌گیری است (Carvalho, et al., 2006). یکی از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار افزایش کارایی سیستم، نور است. نور دریافتی سیستم باید به اندازه بهینه و مناسب باشد. اگر سلول‌های ریز جلبک در مقابل شدت زیاد نور قرار گیرند، به دلیل حساسیت بالا، موجب مرگ و نابودی طیف وسیعی از آن‌ها می‌شود؛ در مقابل اگر نور به اندازه کافی به آن‌ها نرسد، عملیات فتوسنتز و جذب دی‌اکسید کربن کاهش یافته و کارایی سیستم کم می‌شود (Rubio, et al., 2003). به همین خاطر در اکثر پروژه‌ها برای کنترل بهتر نور از سیستم بسته استفاده می‌شود. این سیستم خود دارای انواع مختلفی از جمله زیست‌رآکتور لوله‌ای، صفحه‌ای (تخت) و ستونی است (جدول 1).

2- روش تحقیق

این مقاله از نظر هدف غایی در زمره پژوهش‌های کاربردی قرار می‌گیرد و به دو روش مرور متون بر اساس استناد به منابع کتابخانه‌ای و روش تجربی و آزمایشگاهی انجام گرفته است. روند پژوهشی این نوشتار را می‌توان در چهار بخش اصلی تقسیم کرد. در بخش اول با بهره‌گیری از منابع علمی و کتابخانه‌ای، به معرفی و بررسی روش بهره‌گیری از علم بیونیک و نحوه استفاده از ریز جلبک‌ها در تلفیق با پنجره ساختمان پرداخته شد.

(Pearson, 1995). این موجودات به دلیل نسبت سطح به حجم بالا، توانایی بسیار بالایی در میزان جذب و کاهش آلودگی‌های هوا دارند (Alabi, et al., 2009). این موجودات به این دلیل که دارای تنوع زیاد و ساختاری ساده هستند، ویژگی‌های آن‌ها نیز به فراخور محیط زندگی گسترده است. با توجه به حدود موضوع پژوهش می‌توان ویژگی‌های مرتبط با موضوع را شامل: نسبت زیاد سطح به حجم، بزرگ‌ترین منبع تولیدکننده اکسیژن اتمسفر، قابلیت تبدیل به انرژی پاک و پایدار، شرایط حیات و نگهداری حداقلی، بهبود و فراهم سازی شرایط آسایش حرارتی ساختمان، بازی نور و سایه، عایق صوتی و عایق حرارتی برشمرد (Goldenberg, 2000; Ahmad and Wyckoff, 2003; Hossain, et al., 2008; Alabi, et al., 2009; Chinnasamy, et al., 2012; Hemming, et al., 2012; Elliot, 2016). به منظور کشت ریز جلبک برای جذب و کاهش دی‌اکسید کربن، دو سیستم باز و بسته وجود دارد. در سیستم باز که از حوضچه‌هایی برای پرورش ریز جلبک استفاده می‌کنند، کنترل تمامی شرایط و پارامترهای تأثیرگذار برای عملیات جذب دی‌اکسید کربن، بسیار سخت و دشوار است. در این روش بزرگ‌ترین تهدید از بین رفتن ریز جلبک‌ها توسط میکروب‌ها و سایر میکروارگانیسم‌های مخرب است. کنترل نور ورودی و دریافتی، میزان نور دریافتی روزانه، نوسانات دمایی روزانه و فصلی، مخلوط سازی محلول حوضچه، pH آب از دیگر پارامترهای مهمی هستند که کنترل آن‌ها در سیستم باز دشوار است (Brennan and Owende, 2010).

جدول 1- انواع محیط کشت ریز جلبک

Tab. 1- Types of microalgae cultivation environments

نوع محیط کشت			باز
بسته	صفحه‌ای (تخت)	لوله‌ای	
ستونی			

در بخش دوم با توجه به ابعاد استاندارد پنجره‌های دوجداره و همسان‌سازی آن با ویژگی‌های فنی زیست‌رأکتور صفحه‌ای به‌عنوان گونه بهینه، ابعاد مناسب جهت طراحی پنجره سبز استخراج شده است. در گام بعدی با توجه به نحوه کارکرد پنجره به عنوان زیست‌رأکتور صفحه‌ای، جزییات اجرایی و فنی پنجره طراحی شده است. سپس با بررسی شرایط کشت و بهره‌گیری از روش تجربی، گونه مناسب ریز جلبک جهت جذب دی‌اکسید کربن در اقلیم گرم‌وخشک انتخاب گردید. این مرحله به این دلیل انجام شده است که ریز جلبک‌ها موجوداتی هستند که توانایی رشد و نمو در انواع محیط‌ها را داشته و بسته به گونه ریز جلبکی، شرایط و عواملی باید فراهم باشند تا بازدهی آن‌ها از نظر رشد و تکثیر در حد قابل قبول و بهینه قرار بگیرد که بتوانند به اهداف استفاده از ریز جلبک دست یابند. ازجمله این عوامل می‌توان به نور خورشید، دما، حضور دی‌اکسید کربن، مواد مغذی و pH آب اشاره کرد (Alabi, et al., 2009; Duan and Shi, 2014; Zhu, et al., 2014; Zhang, 2015). از این‌رو در این پژوهش به‌منظور شناخت و انتخاب گونه مناسب ریز جلبک، پس از مصاحبه تخصصی با شرکت‌ها و پژوهشکده‌های مربوطه، ریز جلبک کلرلا⁸ به دلیل موجود بودن در بانک ذخایر جلبکی خلیج فارس، مقاومت بالا در شرایط بحرانی و پراسترس کشت، در دسترس بودن، ارزان‌قیمت بودن به نسبت مابقی ریز جلبک‌ها، سرعت رشد و تکثیر بالا، قابلیت تحمل دما تا 45 درجه سانتی‌گراد (متناسب با اقلیم گرم و خشک) و درصد بالای جذب دی‌اکسید کربن (Hanagata, et al., 1992)، انتخاب شده است. در نهایت بعد از طراحی محیط کشت، پنجره طراحی شده در محیط آزمایشگاه و محیط شهری مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفته است.

2-1- هندسه و تناسبات ابعادی پنجره سبز

بزرگترین ویژگی برای داشتن بازدهی بیشتر هر نوع رأکتور، داشتن نسبت سطح به حجم بالا است (Tamburic, et al., 2011). زیست‌رأکتور صفحه‌ای، به این دلیل که سطح زیادی از آن در مقابل نور قرار

می‌گیرد و دارای کمترین مسافت برای عبور نور و بالاترین نسبت سطح به حجم در مقایسه با سایر رأکتورها (Brennan and Owende, 2010; Singh and Sharma, 2012) بسیار مورد توجه و استفاده قرار می‌گیرد. همچنین بر اساس پژوهش‌های صورت گرفته، فاصله 15 میلی‌متر برای مسافت طی شده توسط پرتوهای نوری به این دلیل که باعث ایجاد منطقه تاریک درون رأکتور نمی‌شود (Degen, et al., 2001) به‌عنوان ضخامت بهینه مشخص شده است. از لحاظ هندسی، شکل این زیست‌رأکتور بسیار مشابه پنجره‌های دوجداره است؛ با این تفاوت که به جای گاز آرگون در فضای خالی بین پنجره، محیط کشت و ریز جلبک تلقیح شده است. در همین راستا به منظور همسان‌سازی ابعاد و ضخامت پنجره سبز پیشنهادی با ابعاد استاندارد پنجره ارائه‌شده توسط کمیته تخصصی معماری سازمان نظام مهندسی ساختمان، بهترین عرض باز شو جهت پنجره دوجداره لولایی بین 40 تا 90 سانتی‌متر و از نظر ارتفاع بین 100 تا 180 سانتی‌متر مناسب است. همچنین از نظر ضخامت و فاصله بین دو شیشه (لایه هوا) در این نوع پنجره‌ها، استاندارد 8، 12، 16، 20 و 24 میلی‌متر تعریف شده؛ که با توجه به گونه‌بندی اقلیم ایران، ضخامت 8، 16 و 24 میلی‌متر دارای کارکرد مناسب است (Terms and Conditions for the preparation and drawing of architectural maps, 2010). از آنجایی که ضخامت استاندارد 16 میلی‌متر پنجره با ضخامت بهینه 15 میلی‌متری زیست‌رأکتور صفحه‌ای هماهنگ و همسان است، به منظور اثبات تکنولوژی و ارزیابی توان سیستم، انتخاب شد. همچنین در پژوهشی که توسط Kim (2013) انجام شده است، نسبت مناسب ارتفاع به عرض پانل حاوی ریز جلبک را 2.5 به دست آورده است. بر اساس نتایج پژوهش kim، این تناسبات باعث ایجاد کمترین اثر فشار مایع درونی و میزان اتلاف حرارتی در پانل می‌شود (Kim, 2013). در نهایت با توجه به استاندارد های ارتفاع و عرض پنجره‌ها، ارتفاع 100، عرض 40 سانتی‌متر با تناسبات 2.5 و ضخامت لایه محیط کشت 16 میلی‌متر به عنوان ابعاد مورد نظر و با قابلیت تجاری‌سازی برای طراحی پنجره سبز در نظر گرفته شد.

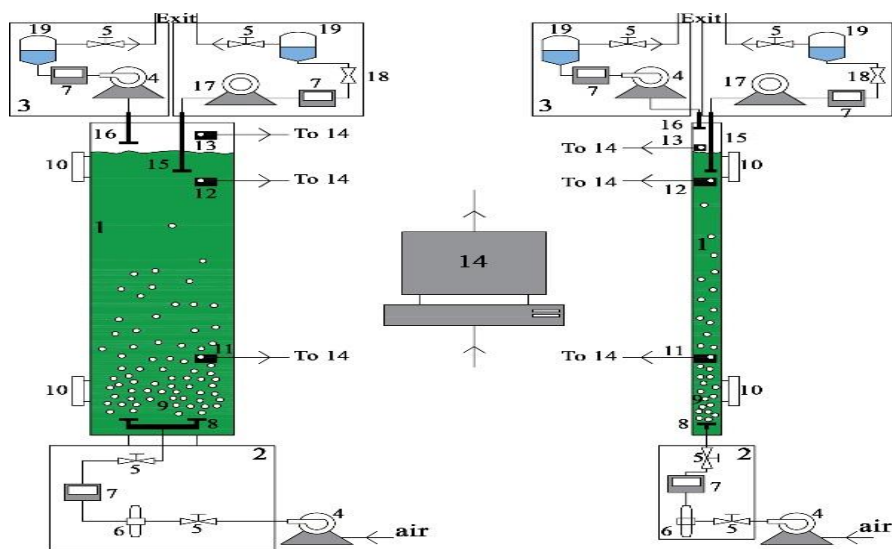
یکی از مشکلاتی که زیست‌رأکتورها وجود دارد، ته‌نشینی و رسوب ریز جلبک‌ها به دیواره‌های محیط کشت است. در این پنجره با تزریق هوا از پایین و آزادسازی آن به صورت حباب، یک نیروی محرکه طبیعی گردش در پنجره ایجاد می‌شود که این امر باعث مخلوط‌سازی ریز جلبک‌ها شده و از ته‌نشینی و رسوب آن‌ها جلوگیری به عمل می‌آورد (Chiang, et al., 2003; Carvalho, et al., 2006; Williams and Laurens, 2010; Kumar, et al., 2011; Singh and Sharma, 2012; Wang, et al., 2012; Duan and Shi, 2014; Yen, et al., 2014).

2-3- روش انجام آزمایش

به منظور کشت ریز جلبک کلرلا با استفاده از ترکیب نمک دریا و آب شهری، محیط کشتی با شوری 25 ppt به میزان چهار لیتر تهیه گردید (Bagheri, 2015). لازم

2-2- نحوه کارکرد پنجره سبز

در پایین این پنجره یک پمپ هوا تعبیه گشته که با جذب هوای آلوده از محیط بیرون، آن را به‌طور یکنواخت از پایین به درون پنجره وارد می‌سازد. هوای تزریق‌شده به‌صورت حباب درون پنجره به سمت بالا حرکت می‌کنند و در این مسیر ریز جلبک‌ها از طریق فرآیند فتوسنتز، دی‌اکسید کربن موجود درون هوا را جذب و اکسیژن تولید می‌کنند. این اکسیژن هم به‌صورت محلول در آب و هم به‌صورت گاز در پنجره آزاد می‌شود. در بالای پنجره به میزان 20 الی 30 سانتی‌متر فضای خالی برای انباشت اکسیژن گازی تعبیه گشته که مجدد توسط یک پمپ مکنده از پنجره خارج شده و به فضای بیرون یا درون انتقال می‌یابد (شکل 1).



شکل 1- نمای روبرو، نمای جانبی پنجره. اجزای تشکیل‌دهنده به ترتیب شماره: 1- محل کشت ریز جلبک، 2- ورودی هوای آلوده به پنجره، 3- جداکننده خروجی‌های پنجره، 4- کمپرسور هوا، 5- شیر کنترل‌کننده سرعت و مقدار گاز (هوا)، 6- سترون-ساز هوا (صافی)، 7- جریان‌سنج الکترونیکی گاز، 8- توزیع‌کننده حباب، 9- حباب، 10- دماسنج، 11- حسگر و کنترل‌کننده pH، 12- حسگر اکسیژن محلول (DO)، 13- حسگر اکسیژن گازی، 14- رایانه و پردازشگر داده، 15- مکنده اکسیژن محلول، 16- مکنده اکسیژن گازی، 17- کمپرسور، 18- مبدل مایع به گاز اکسیژن، 19- مخزن ذخیره‌کننده

Fig. 1- Front and Side view of window. The components are: 1-Micro-algae culture site, 2-Air inlet, 3-Outlet separator, 4-Air compressor, 5-Air controller valve, 6-Air sterilizer, 7-Electronic flowmeters, 8-Bubble distributor, 9-Bubble, 10-Thermometer, 11-PH controller, 12-Soluble Oxygen Sensor, 13-Gas Oxygen Sensor, 14-CPU, 15-Soluble Oxygen Sucker, 16-Gas Oxygen Sucker, 17-Compressor, 18-Liquid transducer to oxygen gas, 19-Storage tank.

به ذکر است که استوک خالص ریز جلبک کلرلا از مرکز توسعه فناوری میکروآلگ خلیج فارس و آزمایشگاه پارساب لیان واقع در مرکز رشد خلیج فارس بوشهر تهیه شده است. در شرایط کاملاً استریل با نسبت یک به پنج، مقدار یک لیتر از استوک کلرلا در چهار لیتر محیط کشت مخلوط و به درون پنجره منتقل گردید. در همین راستا به منظور بررسی و مقایسه تأثیر حضور استوک ریز جلبک در محیط کشت با حالتی که ریز جلبک حضور ندارد، در شروع کار با هوادهی محیط کشت بدون ریز جلبک به عنوان تیمار شاهد، مقادیر ورودی و خروجی ثبت گردید و پس از آن با تزریق استوک ریز جلبک با نسبت یک به پنج، فرآیند آزمایش شروع شد. اتاق کشت کاملاً استریل و پنجره با استفاده از لامپ مهتابی به قدرت 1000 لوکس با دوره متناوب 12 ساعت روشنایی با نور مصنوعی و 12 ساعت تاریکی توسط پرریز اتوماتیک (تایمردار)، نوردهی شد. دمای اتاق کشت در تمام مدت آزمایش 25 الی 27 درجه سانتیگراد بود. هوادهی با استفاده از دستگاه پمپ آکواریوم مرکزی انجام شد؛ به طوری که با ایجاد تلاطم مواد مغذی مورد نیاز در اختیار ریز جلبک قرار گیرد و از ته نشینی و رسوب آن در پنجره جلوگیری شود. به منظور ایجاد شرایط واقعی، پمپ مکند هوا در خارج از بنا قرار داده شد تا به طور مستقیم هوای آلوده را وارد پنجره کند. مراحل اندازه گیری غلظت دی اکسید کربن موجود در هوا بر اساس ساعات شلوغ، پرتراфик و اوج آلودگی شهر تهران در ساعات 10، 13 و 16 هر روز انجام شد. محل آزمایش، میدان ولیعصر تهران که با توجه به میزان آلودگی، جزو نقاط آلوده شهر و نزدیک به ایستگاه سنجش کیفیت هوای خیابان فاطمی است، انتخاب گردیده است. پنجره فوق الذکر پس از طراحی و ساخت به صورت اصولی و فنی، در جای یکی از پنجره های اتاق آزمایش که همجوار با ضلع جنوبی میدان بود، نصب گردید. در طول آزمایش تمامی داده ها فقط از همین محل و نقطه جمع آوری شدند تا تغییر مکان و فضا تأثیری بر میزان ورودی ها نداشته باشد. باید اذعان کرد، در بازه زمانی که نور خورشید وجود دارد، نیاز به نوردهی مصنوعی توسط لامپ نیست و

فقط در هنگام شب عملیات نوردهی به ریز جلبک ها انجام می شود تا به صورت مداوم و مستمر عملیات فتوسنتز را انجام دهند. دوره نوردهی به پنجره بر اساس ساعات فوق به نحوی که دوره روشنایی با نور مصنوعی از ساعت ده شب الی ده صبح و دوره تاریکی از ده صبح الی ده شب بود، تنظیم شد. با این احتساب، ساعت 10 پایان دوره روشنایی با نور مصنوعی و شروع دوره تاریکی و ساعت 16 میانه دوره تاریکی است. میزان غلظت دی اکسید کربن و دمای هوای ورودی و خروجی پنجره در ساعات شلوغ و اوج تراфик با استفاده از CO₂ سنج (آنالایزر گاز) اندازه گیری شد.

3- نتایج و بحث

با ثبت داده ها به صورت روزانه، در سه نوبت بر اساس ساعات اوج تراфик و آلودگی در میدان ولیعصر به عنوان یک گره آلوده شهری، به مدت زمان شش روز، نتایج حاصل از آزمایش نشان داد که با گذشت زمان و رشد و تکثیر ریز جلبک ها، میزان جذب دی اکسید کربن از هوا نیز افزایش می یابد (جدول 2). در ساعت 10:00 روز اول آزمایش، ابتدا با هوادهی تیمار شاهد به حجم 4 لیتر، مشاهده گردید که دی اکسید کربن هوا از 1091 ppm به 962 ppm کاهش یافت که نشان دهنده کاهش 11.8 درصدی است. پس از این مرحله، یک لیتر استوک کلرلا به پنجره تلقیح شد و سپس در ساعت 13:00 بعد از گذشت 3 ساعت از تلقیح استوک به محیط کشت، مجدد نتایج ثبت شد. در این زمان دی اکسید کربن هوا از 1303 ppm به 1224 ppm کاهش یافت که نشان دهنده کاهش 6.1 درصدی است. کاهش جذب دی اکسید کربن در ساعت 13:00 نسبت به ساعت 10:00 زمانی که ریز جلبک حضور نداشت، نشان دهنده شوک وارد شده به ریز جلبک ها است. در ساعت 16:00 که میانه دوره تاریکی است، دی اکسید کربن هوا از 1109 ppm به 1033 ppm کاهش یافت که نشان دهنده کاهش 7.1 درصدی است. روز دوم آزمایش در ساعت 10:00، دی اکسید کربن هوا از 868 ppm به 655 ppm کاهش یافت که نشان دهنده کاهش 24.5 درصدی است.



جدول 2- نتایج و داده‌های ثبت شده از پنجره سبز

Tab. 3- Green Window's Data

روز	ساعت	میزان CO2 ورودی (ppm)	میزان CO2 خروجی (ppm)	میزان جذب (ppm)	دمای هوای ورودی (°C)	حجم مایع (لیتر)	میزان تبخیر (لیتر)
1	10:00 (تیمار شاهد)	1091	962	129	26	4.16	-
	13:00	1303	1224	79	25.8	5.16	-
	16:00	1109	1033	79	24.1	-	-
2	10:00	868	655	213	24.2	5	0.16
	13:00	1307	1228	80	25.4	-	-
	16:00	1445	1386	59	26.6	-	-
3	10:00	864	704	160	24.5	4.91	0.09
	13:00	870	697	173	24.8	-	-
	16:00	1102	950	152	24.6	-	-
4	10:00	895	722	173	23.9	4.83	0.08
	13:00	1017	791	226	24.7	-	-
	16:00	1023	957	66	25.1	-	-
5	10:00	1121	546	576	24.5	4.79	0.05
	13:00	1097	619	478	25.7	-	-
	16:00	1167	844	323	26.3	-	-
6	10:00	1189	512	677	24.8	4.7	0.09
	13:00	1291	709	582	25.9	-	-
	16:00	1201	789	412	26.6	-	-

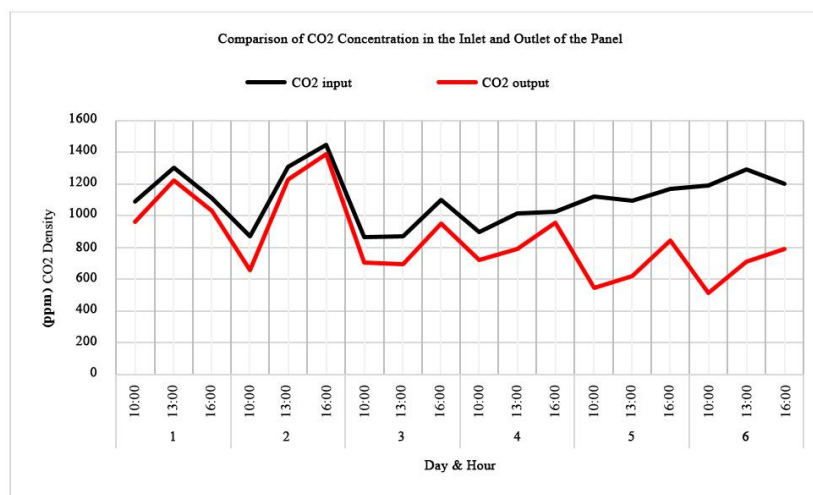
کاهش یافت که نشان دهنده کاهش 19.3 درصدی است. در ساعت 13:00، دی اکسید کربن هوا از 1017 ppm به 791 ppm کاهش یافت که نشان دهنده کاهش 22.2 درصدی است. نهایتاً در ساعت 16:00، دی اکسید کربن هوا از 1023 ppm به 957 ppm کاهش یافت که نشان دهنده کاهش 6.5 درصدی است. روز پنجم آزمایش، در ساعت 10:00، دی اکسید کربن هوا از 1121 ppm به 546 ppm کاهش یافت که نشان دهنده کاهش 51.4 درصدی است. در ساعت 13:00، دی اکسید کربن هوا از 1097 ppm به 619 ppm کاهش یافت که نشان دهنده کاهش 43.8 درصدی است. نهایتاً در ساعت 16:00، دی اکسید کربن هوا از 1167 ppm به 844 ppm کاهش یافت که نشان دهنده کاهش 27.7 درصدی است. کاهش میزان جذب در ساعت 16:00 نسبت به ساعت 10:00 حاکی از آن است که با حضور نور، عملیات جذب در خلال فرآیند فتوسنتز انجام می‌شود و میزان آن بیشتر است؛ درحالی که بدون حضور نور (دوره تاریکی)، ریز جلبک‌ها با تنفس، تعرق و مصرف انرژی از منابع

این افزایش در جذب نشان دهنده هماهنگ شدن ریز جلبک‌ها با شرایط محیط کشت، رشد و تکثیر آن‌ها با گذشت زمان و بالا رفتن کارایی سیستم است. در ساعت 13:00، دی اکسید کربن هوا از 1307 ppm به 1228 ppm کاهش یافت که نشان دهنده کاهش 6.1 درصدی است. نهایتاً در ساعت 16:00، دی اکسید کربن هوا از 1445 ppm به 1386 ppm کاهش یافت که نشان دهنده کاهش 4.1 درصدی است. روز سوم آزمایش در ساعت 10:00، دی اکسید کربن هوا از 864 ppm به 704 ppm کاهش یافت که نشان دهنده کاهش 18.5 درصدی است. در ساعت 13:00، دی اکسید کربن هوا از 870 ppm به 697 ppm کاهش یافت که نشان دهنده کاهش 19.9 درصدی است. نهایتاً در ساعت 16:00، دی اکسید کربن هوا از 1102 ppm به 950 ppm کاهش یافت که نشان دهنده کاهش 13.8 درصدی است. با مقایسه درصد جذب روز سوم با روز دوم، رشد تصاعدی ریز جلبک‌ها ثابت می‌شود. روز چهارم آزمایش در ساعت 10:00، دی اکسید کربن هوا از 895 ppm به 722 ppm

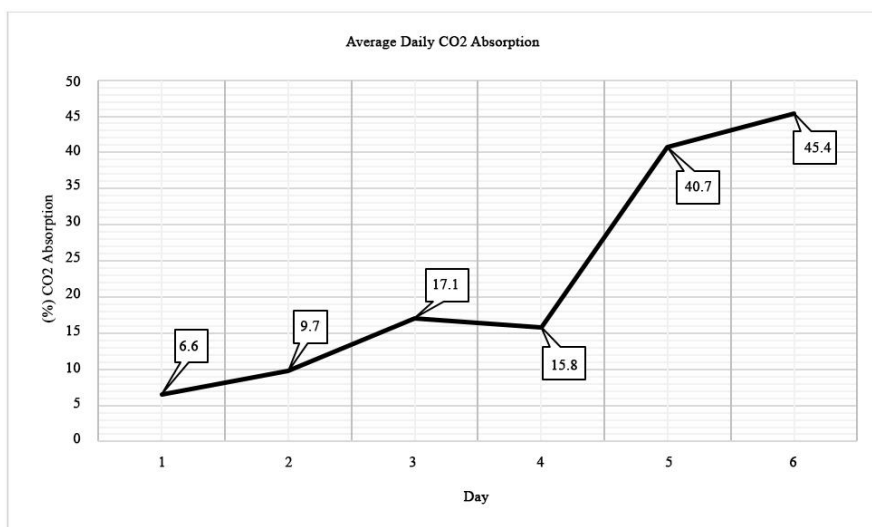
ذخیره شده پروتئینی خود، مشارکت کمتری در جذب دی اکسید کربن دارند. سرانجام در روز ششم آزمایش، در ساعت 10:00، دی اکسید کربن هوا از 1189 ppm به 512 ppm کاهش یافت که نشان دهنده کاهش 56.9 درصدی است. در ساعت 13:00، دی اکسید کربن هوا از 1291 ppm به 709 ppm کاهش یافت که نشان دهنده کاهش 45.1 درصدی است. نهایتاً در ساعت 16:00، دی اکسید کربن هوا از 1201 ppm به 789 ppm کاهش یافت که نشان دهنده کاهش 34.3 درصدی است. با توجه به داده های ثبت شده در طی این شش روز می توان نتیجه گرفت که روند جذب دی اکسید کربن از هوا با گذشت زمان و رشد ریز جلبک ها، به صورت لگاریتمی افزایش یافته (شکل 2)، به نحوی که در روز اول میانگین جذب 6.6 درصد و در روز ششم این مقدار به 45.4 درصد می رسد.

با بررسی مقادیر جذب به صورت میانگین روزانه، افزایش میزان جذب مشاهده می شود؛ به نحوی که در روز اول میانگین جذب، 6.6 درصد، روز دوم 9.7 درصد، روز سوم 17.1 درصد، روز چهارم 15.8 درصد، روز پنجم 40.7 درصد که نشان دهنده رشد و جهش تصاعدی ریز جلبک ها نسبت به روزهای قبل است. در نهایت روز ششم با 45.4 درصد جذب دی اکسید کربن در طول دوره آزمایش بالاترین مقدار را به خود اختصاص داده است (شکل 3).

با مقایسه میزان جذب دی اکسید کربن در دو ساعت 10 و 16 (جدول 3)، می توان نتیجه گرفت که حضور نور به شدت بر کارایی سیستم تأثیر گذاشته و در خلال فتوسنتز، درصد جذب ریز جلبک ها افزایش می یابد. اما در ساعت 16:00 در میانه دوره تاریکی، مشاهده می شود که میزان جذب به نسبت دوره روشنایی کاهش داشته که نشان از تعرق و تنفس ریز جلبک ها است. همین موضوع باعث کاهش مشارکت آن ها در جذب دی اکسید کربن می شود. با توجه به رشد ریز جلبک ها و بالا رفتن تراکم سلولی آن ها در محیط کشت، به مرور زمان و هماهنگ با نرخ رشد، رنگ مایع درون پنجره تغییر می کند و طیف رنگی متفاوتی ارائه می دهد (شکل 4). این مقوله از سه جهت قابل بررسی است؛ اول این که با تغییر رنگ پنجره با گذشت زمان، نمای تغییر پذیر و جذابی برای ساختمان ایجاد می کند که می توان آن را از منظر سیمای شهری بررسی نمود. دوم، با رشد ریز جلبک ها میزان شفافیت پنجره کاهش می یابد و می توان از آن به عنوان یک دستگاه سایه ساز در اقلیم های گرم و خشک استفاده کرد. طبق مشاهدات صورت گرفته، این پنجره با کنترل و تعدیل شدت نور آفتاب، از ورود بیش از اندازه پرتوهای خورشید به درون فضا ممانعت و از ایجاد خیرگی و افزایش دمای بیش از اندازه فضای داخل جلوگیری می کند.



شکل 2- مقایسه میزان غلظت دی اکسید کربن در هوای ورودی و خروجی پنجره
Fig. 2- Comparison of CO₂ Concentration in the Inlet and Outlet of the Window



شکل 3- درصد جذب دی اکسید کربن به صورت روزانه

Fig. 3- Average Daily CO₂ Absorption

جدول 3- مقایسه درصد جذب پنجره در ساعت روشنایی و تاریکی

Tab. 3- Comparison of Absorption at the Time of Light and Darkness

روز	ورودی ساعت 10:00 (ppm)	خروجی ساعت 10:00 (ppm)	میزان جذب	درصد جذب	ورودی ساعت 16:00 (ppm)	خروجی ساعت 16:00 (ppm)	میزان جذب	درصد جذب
1	1303	1224	79	6.1	1109	1033	76	6.9
2	868	655	213	24.5	1445	1386	59	4.1
3	864	704	160	18.5	1102	950	152	13.8
4	895	722	173	19.3	1023	957	66	6.5
5	1121	546	575	51.3	1167	844	323	27.7
6	1189	512	677	56.9	1201	789	412	34.3



شکل 4- طیف رنگی ایجاد شده در پنجره به مرور زمان. راست: محیط کشت پس از گذشت 12 ساعت، وسط: محیط کشت

پس از گذشت 180 ساعت (زمان تخلیه)، چپ: محیط کشت پس از گذشت 1 ماه

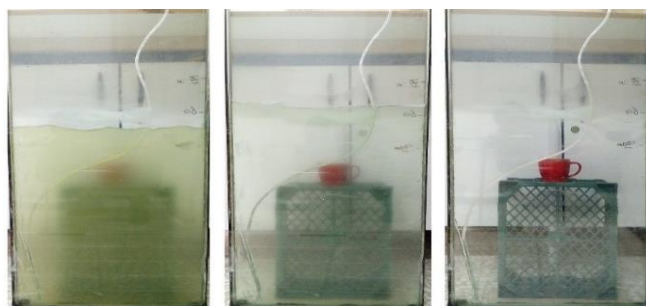
Fig. 4- The color spectrum in the window over time. Right: Culture after 12 hours, Middle: Culture after 180 hours (Discharge time), Left: Culture after 1 month

سوم، این تغییر شفافیت پنجره، باعث محدود کردن دید در ساختمان می‌شود (شکل 5)؛ به عبارت دیگر پنجره‌هایی که به واسطه موقعیتشان نیاز به شیشه مشجر دارند، می‌توانند از این نوع پنجره سبز با ویژگی محدودکنندگی دید استفاده نمایند. این موضوع با فرهنگ ایران هماهنگ بوده به طوری که باعث آرامش ساکنین خانه و پنهان ماندن محارم از دید ناشناسان می‌شود.

4- نتیجه‌گیری

امروزه آلودگی هوا به عنوان یک معضل عدیده‌ای گریبان گیر ک شورهای در حال توسعه شده است؛ به نحوی که این آلودگی علاوه بر به خطر انداختن محیط زیست، گرمایش جهانی و تغییرات اقلیمی، برای سلامتی انسان یک تهدید جدی محسوب می‌شود. در همین راستا صنعت ساختمان یکی از مهم‌ترین منابع آلوده‌کننده هوا هست؛ در صورتی که می‌توان با بهره‌گیری از علم بیونیک و الهام از طبیعت، با تلفیق و الحاق پوشش‌های جاذب آلودگی هوا به جداره‌های ساختمان، علاوه بر جذب و کاهش آلاینده‌های هوا، به پایداری زیست‌محیطی و احیای بستر طبیعی کلان‌شهرها کمک کرد. در این پژوهش با بهره‌گیری از علم بیونیک و به روش زنده، با استفاده مستقیم از ریز جلبک تک سلولی کلرلا که نسبت به گونه‌های عالی گیاهی از نظر جذب آلاینده‌های اتمسفری و شرایط رشد و نمو، عملکرد و بازدهی بیشتری دارد، گونه‌ای جدید از پنجره سبز ارائه گردید.

با استفاده از استانداردهای پنجره دو جداره، پنجره سبز با ارتفاع 100 و عرض 40 سانتی‌متر و ضخامت 16 میلی‌متر طراحی شد. سپس با شبیه‌سازی و فرآهم‌آوری محیط کشت ریز جلبک و با انجام آزمایش در میدان ولیعصر تهران، به عنوان یکی از گرته‌های آلوده پایتخت، نتایج به دست آمده نشان داد که با رشد ریز جلبک پس از گذشت فقط شش روز، روند جذب دی‌اکسید کربن از 6.6 درصد تا 45.4 درصد تغییر خواهد کرد. در نهایت با توجه به رشد ریز جلبک‌ها و بالا رفتن تراکم سلولی آن‌ها در محیط کشت، به مرور زمان و هماهنگ با نرخ رشد، رنگ مایع درون پنجره تغییر می‌کند و طیف رنگی متفاوتی ارائه می‌دهد. این تغییر رنگ باعث ایجاد نمای تغییرپذیر در منظر شهری، استفاده به عنوان یک دستگاه سایه ساز در اقلیم‌های گرم و خشک به منظور کنترل و تعدیل شدت نور ورودی و ممانعت از ایجاد خیرگی و افزایش دمای بیش از اندازه فضای داخل و همچنین با محدود کردن دید ساختمان باعث آرامش ساکنین خانه و پنهان ماندن محارم از دید ناشناسان می‌شود. نتایج این پژوهش به خوبی نشان می‌دهد در صورتی که بتوان مساحت قابل توجهی از جداره‌های ساختمان و بدنه‌های شهری را با این پنجره پوشش داد، در بازه زمانی بسیار کوتاه می‌توان میزان آلودگی‌های هوا را تا 50 درصد به صورت پایدار کاهش داد و در جهت ارتقاء بهبود کیفیت هوا و حفظ و پایداری محیط زیست شهری به عنوان سیاست و هدف اصلی این نوشتار، گام مؤثری برداشت.



شکل 5- تغییر شفافیت پنجره و محدود کردن دید در ساختمان. راست: پنجره حاوی محیط کشت (بدون ریز جلبک)، وسط: پنجره حاوی محیط کشت بعد از 12 ساعت، چپ: پنجره حاوی محیط کشت بعد از گذشت 180 ساعت

Fig. 5- Change the transparency and limit the visibility of the building. Right: The window contains a medium (without algae), Middle: The window contains a medium after 12 hours, left: The window contains a medium after 180 hours



Alabi, A., Bibeau, E., and Tampier, M. (2009). Microalgae Technologies and Processes for Biofuels-bioenergy Production in British Columbia: Current Technology, Suitability and Barriers to Implementation: Final Report. United Kingdom: British Columbia Innovation Council. Annual report on Tehran's air quality in 2015 (2016). Tehran Air Quality Organization, Tehran: City Publishing Center, Report Code: QM95/02/01(U)/1.

Azmoodeh, M., and Heydari, Sh. (2014). Quantitative measure of the absorption of pollutants from vehicles by green walls. Journal of Environmental Science and Technology (JEST). 16(1), 361-370. http://journals.srbiau.ac.ir/article_8266_612.html.

Bagheri, Sh. (2015). The effect of vitamins on *Chlorella* sp growth. Ahvaz: Faculty of Agriculture and Natural Resources, Islamic Azad University of Ahvaz.

Brennan, L., and Owende, P. (2010). Biofuels from microalgae—a review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. Renewable and sustainable energy reviews, 14(2), 557-577. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032109002408>

Buildings energy data book. (2009). Buildings energy data book. United State: US Department of Energy.

Carvalho, A., Meireles, L., and Malcata, F. (2006). Microalgal reactors: a review of enclosed system designs and performances. Biotechnology progress, 22(6), 1490-1506. <https://aiche.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1021/bp060065r>.

Chiang, S.-H., Shi, F., and Gu, X. (2003). A new development in flotation process. Journal of the Chinese Institute of Chemical Engineers, 34(1), 7-15.

Chinnasamy, S., Rao, P., Bhaskar, S., Rengasamy, R., Singh, M., and Arora, R. (2012). Algae: a novel biomass feedstock for biofuels. Microbial biotechnology: Energy and environment, 224-239. <https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=zQOwOjeU55wC&oi=fnd&pg=PA224&dq=Algae:+a+novel+biomass+feedstock+for+biofuels&ots=3oPSKyoo1E&sig=6zPPHf3AcU3r146vaX1Pw->

در نهایت باید اذعان کرد طرح ارایه شده قابلیت تبدیل به یک محصول صنعتی به عنوان یک دستگاه جاذب و کاهش دهنده آلودگی هوا را دارد. از آنجایی که تمامی راهکارهای ارایه شده در جهت کاهش آلودگی هوا بر روی منبع تولید کننده و انتشار دهنده آلودگی تمرکز دارند، این طرح با تمرکز بر آلودگی های موجود در هوا می تواند در نماهای ساختمان های واقع شده در کلان شهرهای آلوده مورد استفاده قرار گیرد. لازم به ذکر است با توجه به تغییر رنگ ایجاد شده در محیط کشت پنجره های طراحی شده (به عنوان یک زیست راکتور صفحه ای) در اثر رشد و افزایش غلظت ریز جلبک ها، می توان علاوه بر ایجاد تنوع در سیمای شهری در ساعات مختلف شبانه روز، تا حدود بسیار زیادی محرمیت فضاهای داخلی را با کنترل نمود. علاوه بر موارد ذکر شده، می توان عنوان کرد که این پنجره دارای قابلیت تبدیل شدن و الحاق به هر انواع مبلمان شهری و اتصال به انواع بدنه های شهری است؛ لذا بهره گیری از عملکرد و مکانیزم رفتاری این پنجره می تواند به عنوان منبع الهام برای طراحی انواع مبلمان شهری مد نظر گرفته شود و ضمن ایجاد زیبایی در مراکز شهری، به بهبود کیفیت هوا و پایداری زیست محیطی کلان شهرها کمک نمود.

پی نوشت

- ¹ Chlorophyll
- ² Chloroplasts
- ³ Photo Bioreactor
- ⁴ Chiu
- ⁵ Chlorella
- ⁶ Packer
- ⁷ Ho
- ⁸ Chlorella

منابع

Ahmad, N., and Wyckoff, A. (2003). Carbon dioxide emissions embodied in international trade of goods (Vol. 15). Paris: OECD Science, technology and industry working papers. https://www.oecd-ilibrary.org/science-and-technology/carbon-dioxide-emissions-embodied-in-international-trade-of-goods_421482436815.



Driven+Processes&ots=DGFd2vieBC&sig=x-KUyD2FwTPND-v3n9leayMuVbI.

Hanagata, N., Takeuchi, T., Fukuju, Y., Barnes, D., and Karube, I. (1992). Tolerance of microalgae to high CO₂ and high temperature. *Phytochemistry*, 31(10), 3345-3348. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0031942292836820>.

Hemming, S., Sapounas, A., and Voogt, W. (2012). *Algenteeltsystemen voor de tuinbouw: Integratie*. Wageningen: Wageningen UR Glastuinbouw. <https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/437660>.

Ho, S.-H., Chen, C.-Y., Lee, D.-J., and Chang, J.-S. (2011). Perspectives on microalgal CO₂ emission mitigation systems—a review. *Biotechnology advances*, 29(2), 189-198. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734975010001412>.

Hossain, A., Salleh, A., Boyce, A., Chowdhury, P., and Naquiuddin, M. (2008). Biodiesel fuel production from algae as renewable energy. *American journal of biochemistry and biotechnology*, 4(3), 250-254. <http://eprints.um.edu.my/7725/>

Kim, K.-H. (2013). Beyond green: growing algae facade. ARCC Conference Repository. ARCC architectural research centers consortium. <https://arcc-journal.org/index.php/repository/article/view/211>.

Kumar, A., Ergas, S., Yuan, X., Sahu, A., Zhang, Q., Dewulf, J., . . . Van Langenhove, H. (2010). Enhanced CO₂ fixation and biofuel production via microalgae: recent developments and future. *Trends in biotechnology*, 28(7), 371-380. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167779910000715>.

Kumar, K., Dasgupta, C., Nayak, B., Lindblad, P., and Das, D. (2011). Development of suitable photobioreactors for CO₂ sequestration addressing global warming using green algae and cyanobacteria. *Bioresource technology*, 102(8), 4945-4953. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852411001234>.

Lam, M., and Lee, K. (2014). Scale up and commercialization of Algal cultivation and Biofuel production. In *Biofuels from algae* (pp.

z9bL8#v=onpage&q=Algae%3A%20a%20novel%20biomass%20feedstock%20for%20biofuels&f=false.

Chiu, S.-Y., Kao, C.-Y., Chen, C.-H., Kuan, T.-C., Ong, S.-C., and Lin, C.-S. (2008). Reduction of CO₂ by a high-density culture of *Chlorella* sp. in a semicontinuous photobioreactor. *Bioresource technology*, 99(9), 3389-3396.

Daman keshide, M. (2011). The effects of replacement of burnt-out gasoline-powered cars on Tehran's air pollution. *Journal of Political-Economic*, 286-299. <https://www.sid.ir/Fa/Journal/ViewPaper.aspx?ID=226575>.

Degen, J., Uebele, A., Retze, A., Schmid-Staiger, U., and Trösch, W. (2001). A novel airlift photobioreactor with baffles for improved light utilization through the flashing light effect. *Journal of biotechnology*, 92(2), 89-94. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852407006384>.

Duan, Y., and Shi, F. (2014). Bioreactor design for algal growth as a sustainable energy source. *Reactor and Design in Sustainable Energy Technology*, 27-60. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096085244595669000028>

Elliot, S. (2016). Cohousing in the Flower City: A Carbon Capture Design. Rochester Institute of Technology: Golisano Institute for Sustainability, Department of Architecture. <https://scholarworks.rit.edu/theses/9201/>

Gharooni, F., Omranipour, A., and Yazdi, M. (2013). Architectural design with bionic approach, case study Design of architectural shells inspired by the abacus shell. *Journal of Art and Urbanism Armanshahr*, 11, 127-140. <https://www.sid.ir/Fa/Journal/ViewPaper.aspx?ID=241476>

Goldenberg, J. (2000). *World Energy Assessment, Preface*. New York: United Nations Development Programme.

Hafez, H., Nakhla, G., El Naggar, H., Ibrahim, G., and Elnashaie, S. (2014). *Biological Hydrogen Production: Light-Driven Processes*. (S. Sherif, G. Yogi, E. Stefanakos, and A. Steinfeld, Eds.) Boca Raton, Fla.: CRC Press. <https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=jGkLBAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA321&dq=Biological+Hydrogen+Production:+Light->



Rozati, H., and Ghanbaran, A. (2014). Improve of urban environmental quality approach to urban agriculture (Case study: Isfahan). *Journal of Sustainable Architecture and Urban Design (JSAUD)*, 1(1), 1-12. http://jsaud.sru.ac.ir/article_178.html.

Rubio, F., Camacho, F., Sevilla, J., Chisti, Y., and Grima, E. (2003). A mechanistic model of photosynthesis in microalgae. *Biotechnology and Bioengineering*, 81(4), 459-473. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/bit.10492>.

Sharma, P., Khetmalas, M., and Tandon, G. (2013). Biofuels from green microalgae. In *Biotechnology: Prospects and Applications* (pp. 95-112). New Delhi, India: Springer.

Singh, R., and Sharma, S. (2012). Development of suitable photobioreactor for algae production—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(4), 2347-2353. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032112000275>.

Smith, G. (1955). *Cryptogamic Botany: Vol. I—Algae and Fungi* (Second ed., Vol. 1). United Kingdom: McGraw-Hill: JSTOR.

Tamburic, B., Zemichael, F., Crudge, P., Maitland, G., and Hellgardt, K. (2011). Design of a novel flat-plate photobioreactor system for green algal hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(11), 6578-6591. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319911004459>

Terms and Conditions for the preparation and drawing of architectural maps (in Residential use). (2010). Architectural Committee of Building Engineering Organization, fifth edition, Bandarabbas: Building Engineering Systems Publication.

Ugwu, C., Aoyagi, H., and Uchiyama, H. (2008). Photobioreactors for mass cultivation of algae. *Bioresource technology*, 99(10), 4021-4028. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852407001368>.

Wang, B., Lan, C., and Horsman, M. (2012). Closed photobioreactors for production of microalgal biomasses. *Biotechnology advances*, 30(4), 904-912. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734975012000328>.

261-286). San Diego, U.S.A: Elsevier. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444641922000196>.

Lechner, N. (2014). Heating, cooling, lighting: Sustainable design methods for architects (Fourth Edition ed.). London: John Wiley and sons. <https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=WjetCwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR11&dq=Heating,+cooling,+lighting:+Sustainable+design+methods+for+architects+&ots=YNN7AQME73&sig=2rUbkuOeRWsuyhi9X5OWgm7FqGs#v=onepage&q=Heating%2C%20cooling%2C%20lighting%3A%20Sustainable%20design%20methods%20for%20architects&f=false>.

Maleki, S., Ahmadi, R., Monfared, S., and Motavegi, M. (2014). Investigating the Sustainability of Environmental Development Using Statistical Analysis in Marijan Province Cities of Khuzestan. *Journal of geographical information*, 23(90), 61-72. http://www.sepehr.org/m/article_12168.html.

Mata, T., Martins, A., and Caetano, N. (2010). Microalgae for biodiesel production and other applications: a review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 14(1), 217-232. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032109001646>.

Mayer, H. (1999). Air pollution in cities. *Atmospheric environment*, 33(24), 4029-4037. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231099001442>.

Packer, M. (2009). Algal capture of carbon dioxide; biomass generation as a tool for greenhouse gas mitigation with reference to New Zealand energy strategy and policy. *Energy Policy*, 37(9), 3428-3437. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421508007623>.

Pearson, L. (1995). The diversity and evolution of plants. Florida: CRC Press.

Rezazadeh, H. (2018). Feasibility of Desinging Building's Envelopes to Reduce Air Pollution by Micro Organisms: Designing Office Building in Shiraz. Faculty of Art and Architecture of Mazandaran University: 124 pages.

Rezazadeh, H., Kolahkaj, M., and Kordjamshidi, M. (2015). The envelope of tall buildings, a threat or opportunity. The second conference of high-rise buildings, Effects of high buildings on urban sustainability.



Zameni, M., and Vali beig, N. (2018). Compiling and prioritizing strategies of construction in Minoo Island according to the environment sustainability. *Journal of Sustainable Architecture and Urban Design*, 5(2), 27-38. http://jsaud.sru.ac.ir/article_967.html.

Zhang, X. (2015). *Microalgae removal of CO2 from flue gas*. London: UK: IEA Clean Coal Centre.

Zhu, L., Hiltunen, E., Antila, E., Zhong, J., Yuan, Z., and Wang, Z. (2014). Microalgal biofuels: flexible bioenergies for sustainable development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 1035-1046. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113007521>.

Whittaker, R. (1969). New concepts of kingdoms of organisms. *Science*, 163(3863), 150-160. http://pevsnerlab.kennedykrieger.org/genomics/1969_whittaker.pdf.

Williams, P., and Laurens, L. (2010). Microalgae as biodiesel and biomass feedstocks: review and analysis of the biochemistry, energetics and economics. *Energy and Environmental Science*, 3(5), 554-590. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2010/ee/b924978h/unauth>.

Yen, H., Hu, I., Chen, C., and Chang, J. (2014). *Design of photobioreactors for algal cultivation*. San Diego, CA: Elsevier. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978044464192200010X>.