نشریهٔ علمی باغ نظر، ۱۷(۸۹)، ۳۳-۴۴ / آبان ۱۳۹۹
DOI: 10.22034/BAGH.2020.188585.4147

ترجمهٔ انگلیسی این مقاله نیز با عنوان:
Algae Façade for Reducing CO_2 Emission and Mitigating Global Warming
در همین شمارهٔ مجله به‌چاپ رسیده است.

مقالهٔ پژوهشی

نماهای زیستی مؤلفه ساماندهی نما و کاهش دی‌اکسید کربن هوا به‌منظور کاهش گرمایش جهانی
(نمونهٔ موردی: خیابان انقلاب تهران)

سعید حقیر*[۱]، لیلا تشکری[۲]، حمیدرضا رضازاده[۳]، فریال احمدی[۴]

۱. گروه معماری، دانشکدهٔ معماری، پردیس هنرهای زیبا، دانشگاه تهران، ایران.
۲. گروه معماری منظر، دانشکدهٔ معماری، پردیس هنرهای زیبا، دانشگاه تهران، ایران.
۳. دانشجوی دکتری تخصصی معماری، گروه معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر اصفهان، اصفهان، ایران.
۴. گروه معماری، دانشکدهٔ هنر و معماری، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران.

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۳/۱۳ تاریخ اصلاح:۹۸/۱۱/۲۶ تاریخ پذیرش: ۹۸/۱۲/۰۳ تاریخ انتشار: ۹۹/۰۸/۰۱

چکیده

بیان مسئله: کالبد جدارهٔ خیابان‌های شهری از مهم‌ترین ابعاد طراحی تأثیرگذار بر زیبایی منظر شهری هستند. ازاین‌رو جداره‌های شهری ازجمله عناصر محیطی تأثیرگذار درزمینهٔ ارتقای کیفیت‌های بصری زیبایی‌شناسی در فضاهای شـهری محسـوب می‌شوند. در این بین یکی از معضلات اصلی شهرها بحث افزایش موضعی دمای هوا به‌واسطهٔ افزایش دی‌اکسید کربن است؛ این در حالی است که برنامه‌های مدیریت کنترل کیفی هوا عمدتاً بر کنترل منابع تولید دی‌اکسید کربن متمرکز هستند. حرکت به‌سوی معماری و شهرسازی همساز با محیط‌زیست، تغییر استراتژی‌های طراحی و خلق راهکارهای نوین برای بازگرداندن تعادل به طبیعت، ضمن تأمین نیازهای بشر امروزی سبب توسعهٔ روزافزون کاربرد سیستم‌های سبز عمودی در سراسر دنیا شده است.

هدف پژوهش: هدف، ارائهٔ راهکاری برای تلفیق زیست‌آکتورهای حاوی ریزجلبک با نمای ساختمان است؛ به نحوی که ضمن حفظ هویت و یکپارچگی کلی سیمای آن، موجب جذب دی‌اکسید کربن موجود در هوا شود تا از افزایش دمای هوا بکاهد.

روش پژوهش: با توجه به بدیع و بین‌رشته‌ای بودن موضوع پژوهش، روش انجام این تحقیق مستلزم روشی ترکیبی است. این پژوهش به گونهٔ توصیفی - تحلیلی و ازنظر ماهیت، در زمره پژوهش‌های کاربردی قرار دارد؛ لذا ابتدا با استفاده از منابع کتابخانه‌ای و استناد به متون علمی به روش کیفی، به معرفی و بررسی ریزجلبک‌ها به‌عنوان موجودات جاذب آلودگی هوا پرداخته است، سپس نمای خیابان انقلاب به‌عنوان یکی از گره‌های آلودهٔ شهری برداشت شد. درنهایت با استخراج سطوح مناسب برای نصب زیست‌آکتورهای حاوی ریزجلبک، نمای خیابان انقلاب مورد بازطراحی قرار گرفت.

نتیجه‌گیری: استفاده از ریزجلبک‌ها به عنوان یکی از میکروارگانیسم‌های زنده با قابلیت جذب بالای دی‌اکسید کربن از هوا و تلفیق آنها با نماهای ساختمان در محفظه‌هایی به نام زیست‌آکتور، باعث تبدیل این جداره‌ها به سطوح فتوسنتزکننده در جهت پاسخ به تغییرات گرمایی اقلیم، بهبود عملکرد حرارتی غیرفعال ساختمان، تبدیل یک ساختمان معمولی به یک ساختمان زنده و درنهایت جداره‌های ساختمان را به یک کارخانه تولید انرژی تبدیل می‌کند.

واژگان کلیدی: *سیمای شهری، دی‌اکسید کربن، خیابان انقلاب تهران، نماهای زیستی، ریزجلبک.*

* نویسندهٔ مسئول: saeed.haghir@ut.ac.ir ، ۰۹۱۲۴۴۳۴۹۲۷

مقدمه و بیان مسئله

افزایش دی‌اکسید کربن موجود در جو، ارتباط نزدیکی با تغییرات اقلیمی، به‌ویژه گرمایش جهانی دارد (Malik, Lan & Lenzen, 2016). تخمین زده شده که مناطق شهری، بیش از دو سوم انرژی جهان را مصرف و بیش از ۷۰ درصد دی‌اکسید کربن در جهان را تولید می‌کنند (IEA, 2012). بنابراین مهم است برای مقابله با مشکل تغییرات اقلیمی جهانی، کربن دی‌اکسید منتشرشده در شهرها کاهش یابد (Wang, Liu, Zhou, Hu & Ou, 2017). بنابراین کاهش انتشار کربن دی‌اکسید، همزمان با حفظ سرعت توسعهٔ اقتصادی، یک چالش دوجانبه برای دولت‌ها در عرصهٔ بین‌المللی است. درنتیجه مطالعاتی که به عوامل تأثیرگذار بر بهینگی انتشار کربن دی‌اکسید می‌پردازند، اهمیت فزاینده‌ای می‌یابد (Li, Zhou, Wang & Hu, 2018). از جدار ساختمان به‌عنوان مرز فضای داخل با محیط پیرامون، انتظار می‌رود با کنترل عوامل بیرونی و استفادهٔ بهینه از ظرفیت‌های محیط، ضمن کمک به تأمین آسایش بهره‌برداران، سهم مهمی در کاهش آلودگی هوا در شهرها داشته باشد.

پرسش‌های پژوهش

این پژوهش براساس این پرسش اصلی شکل گرفته است که «الحاق نمای زیستی (زیست‌آکتور حاوی ریزجلبک) به نمای ساختمان تا چه میزانی باعث کاهش دی‌اکسید کربن موجود در هوا می‌شود و چه تأثیری بر سیمای شهری منطقه دارد؟» پژوهش‌هایی که درخصوص جذب دی‌اکسید کربن و راهکارهای مقابله با آن انجام شده، به بحث کنترل منابع تولیدکننده می‌پردازند و به نظر می‌رسد از کربن موجود صرف‌نظر کرده باشند. اما این پژوهش با پذیرش وضعیت موجود و محدودکردن حوزهٔ مطالعاتی به آن، با مطرح‌کردن سه سؤال فرعی به شرح زیر در جهت هدف اصلی خود و ارائهٔ راهکاری نوین، مدرن، برگرفته از طبیعت زنده و پایدار گام برمی‌دارد.

۱- چگونه طبیعت و معماری می‌توانند در بحث جذب و کاهش دی‌اکسید کربن موجود در هوا به‌صورت هماهنگ ایفای نقش کنند؟

۲- نمای زیستی چیست و به چه نحوی قابلیت اتصال به نماهای شهری دارند؟

۳- نماهای زیستی در بالابردن کیفیت فضای شهری و خیابان‌ها تا چه اندازه مؤثر هستند؟

روش انجام پژوهش

این مقاله از نظر هدف غایی در زمره پژوهش‌های کاربردی قرار می‌گیرد و به دو روش مرور متون براساس استناد به منابع کتابخانه‌ای، روش برداشت‌های میدانی و محاسبات عددی 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 نحوهٔ استفاده از ریزجلبک‌ها در تلفیق با نمای ساختمان و اثرات آن پرداخته شد. در بخش دوم با برداشت نمای جنوبی خیابان انقلاب به‌صورت میدانی و از طریق عکس‌برداری، سطوحی که قابلیت نصب زیست‌آکتورها را داشته باشند، استخراج شد. در بخش بعدی با توجه به ابعاد به‌دست‌آمده طبق پژوهش‌های پیشین و همسان‌سازی آن با ویژگی‌های فنی زیست‌آکتور، ابعاد مناسب جهت طراحی زیست‌آکتور استخراج شده است. درنهایت با مدول‌بندی و طراحی نمای جنوبی خیابان انقلاب با استفاده از ابعاد پایه زیست‌آکتور، میزان جذب و کاهش دی‌اکسید کربن در این معبر شهری از طریق محاسبات ریاضی و عددی محاسبه شد. همچنین در این پژوهش به‌منظور شناخت و انتخاب گونهٔ مناسب ریزجلبک، پس از مصاحبهٔ تخصصی با شرکت‌ها و پژوهشکده‌های مربوطه، ریزجلبک کلرلا[1] 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 ریزجلبک‌ها، سرعت رشد و تکثیر بالا، قابلیت تحمل دما تا ۴۵ درجه سانتی‌گراد (متناسب با اقلیم گرم و خشک) و درصد بالای جذب دی‌اکسید کربن، انتخاب شده است.

مبانی نظری و پیشینهٔ تحقیق

• دی‌اکسید کربن هوا و وضعیت آن در جهان

افزایش میانگین دمای هوا متأثر از افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای در اتمسفر است که تغییرات اقلیمی را به همراه دارد. در میان گازها و ترکیباتی که به تشدید تغییرات آب و هوا و گرمایش جهانی دامن می‌زنند، دی‌اکسیدکربن به‌عنوان فراوان‌ترین و بحرانی‌ترین عامل شناخته شده است و به‌عنوان مبنایی برای ارزیابی و همسان‌سازی دیگر گازها و ترکیب‌های دخیل در این پدیدهٔ اقلیمی مورد استناد قرار می‌گیرد. بررسی‌ها نشان داده است که میزان انتشار این گاز بین سال‌های ۱۹۷۰ و ۲۰۰۷ با حدود ۸۰ درصد افزایش از ۲۱ به ۳۸ گیگاتن رسیده است (IPCC, 2006). کشور ایران در سال ۲۰۱۵ در جایگاه نهم جهان از منظر انتشار گازهای گلخانه‌ای قرار گرفت و در جریان نشست پاریس متعهد به کاهش چهار درصدی انتشارها تا سال ۲۰۳۰ نسبت به وضع موجود شد (شفیع‌پورمطلق و توکلی، ۱۳۹۵). از همین‌رو کنترل و مدیریت گازهای گلخانه‌ای به‌عنوان یکی از چالش‌های اساسی قرن حاضر شناخته شده است.

• استفاده از طبیعت در معماری برای کنترل دی‌اکسید کربن هوا

در حال حاضر یکی از دغدغه‌های مهم مدیران شهری و متخصصان

محیط‌زیست در سراسر دنیا، جذب و کاهش دی‌اکسید کربن در هواست که در سال‌های اخیر به یکی از بحران‌های مهم جهانی تبدیل شده است؛ در همین راستا پژوهش‌های زیادی در خصوص جذب و کاهش دی‌اکسید کربن صورت گرفته است که همگی آن‌ها روش‌هایی را پیشنهاد کرده‌اند (Lal, 2008; Pachauri, et al., 2014; Zhao & Su, 2014; Zhang, 2015; Elliot, 2016). در یک دسته‌بندی کلی می‌توان دو روش زنده[۲] و غیرزنده[۳] برای جذب دی‌اکسید کربن طبق مطالعات صورت گرفته ارائه داد. جذب دی‌اکسید کربن توسط تغییرات فیزیکی و شیمیایی در خلال تکنیک‌های مهندسی را روش غیرزنده و جذب دی‌اکسید کربن با بهره‌گیری از عناصر طبیعت نظیر آب، گیاهان یا میکروارگانیسم‌ها[۴] را روش زنده می‌نامند. متأسفانه علی‌رغم بالا بودن سرعت در توقف و کنترل میزان دی‌اکسید کربن در روش غیرزنده، این روش پایدار نیست و همچنین به‌واسطه استفاده از مواد شیمیایی بر روی سلامت انسان نیز اثر منفی دارد؛ اما در روش زنده، اگرچه سرعت جذب و کنترل دی‌اکسید کربن پایین است، اما این روش ارزان‌قیمت، مفید برای دیگر فرایندهای محیطی، دارای حداقل تأثیر بر سلامت انسان و عدم نیاز به تکنولوژی خاص است (Lal, 2008). تاکنون روش‌های زنده متعددی برای جذب دی‌اکسید کربن ارائه شده است که از مهم‌ترین آنها می‌توان به جذب دی‌اکسید کربن به‌وسیله اقیانوس، جذب دی‌اکسید کربن به‌وسیله زمین و جذب دی‌اکسید کربن به‌وسیله گیاهان اشاره کرد (Elliot, 2016). در بین موارد ذکرشده، جذب دی‌اکسید کربن به‌وسیله گیاهان، پایدارترین، سریع‌ترین، مفیدترین و اقتصادی‌ترین روش است. دراین‌بین گیاهان تک‌سلولی نظیر خزه‌ها، گلسنگ‌ها و ریزجلبک‌ها به‌واسطه ساختار سادهٔ خود و نسبت سطح به حجم بالا، عملکرد بهتری نسبت به گونهٔ عالی گیاهان در جذب دی‌اکسید کربن دارند (رضازاده، ۱۳۹۷)، همچنین ریزجلبک‌ها به‌واسطهٔ شرایط کشت و نگهداری قابلیت ترکیب با نمای ساختمان را دارند که در این صورت می‌توان جداره‌ها و نماهای ساده شهری را به جداره‌ها و نماهای زیستی تبدیل کرد.

• استفاده از ریزجلبک در جدارهٔ ساختمان

ریزجلبک‌ها گونه‌ای از میکروارگانیسم‌های زنده‌ای هستند که عمدتاً تک‌سلولی بوده و در ساده‌ترین شکل یک نمونه گیاهی قرار دارند (Pearson, 1995). این موجودات به دلیل نسبت سطح به حجم بالا، توانایی بسیار بالایی نسبت به گونه‌های عالی گیاهان در میزان جذب آلودگی‌های هوا دارند (Alabi, Bibeau & Tampier, 2009). ریزجلبک‌ها با جذب دی‌اکسید کربن از هوا یا آب در خلال عمل فتوسنتز، حدود ۶۰ الی ۷۵ درصد اکسیژن موردنیاز انسان‌ها و حیوانات (Wolkers, Barbosa, Kleinegris, Bosma & Wijffels, 2011) را تولید می‌کنند. ریزجلبک‌ها ۱۰ برابر بیشتر از یک درخت بالغ و چمن‌ها توانایی فتوسنتز دارند؛ به‌طوری‌که برای تولید یک کیلوگرم بیومس ریزجلبک، ۱/۸ کیلوگرم دی‌اکسید کربن جذب شده است (Elrayies, 2018).

ازآنجایی‌که جداره‌های شهر و ساختمان‌ها، سطوحی وسیع در تماس با هوای آلوده محسوب می‌شوند، تلفیق ریزجلبک در نمای ساختمان‌ها به‌عنوان نماهای زیستی، ضمن جذب آلودگی هوا، باعث تبدیل این جداره‌ها به سطوح فتوسنتزکننده در جهت پاسخ به تغییرات گرمایی اقلیم، بهبود عملکرد حرارتی غیرفعال ساختمان و تبدیل یک ساختمان معمولی به یک ساختمان سالم و زنده می‌شود (ibid.) و درنهایت جداره‌های ساختمان را به یک کارخانه تولید انرژی تبدیل می‌کند (Cervera-Sardá, Gómez-Pioz & Ruiz-de-Elvira, 2014). برای تلفیق ریزجلبک با نمای ساختمان، استفاده از یک محفظه برای فراهم‌سازی شرایط رشد و نمو به نام زیست‌رآکتور ضروری است (Mata, Martins & Caetano, 2010) که با توجه به گونه‌بندی زیست‌رآکتورها و قابلیت اتصال به جداره و نمای ساختمان، سیستم بسته (Wolkers, et al., 2011) بهترین گزینه است که با نمایش‌دادن تغییرات ظاهری ایجادشده در محیط کشت و نمود آن در نمای ساختمان باعث تغییرپذیری و پویایی سیمای شهری می‌شود.

• زیست‌رآکتور بسته

نسبت سطح به حجم بالا، مهم‌ترین اصل برای تولید ریزجلبک به میزان بسیار زیاد است و این ویژگی به‌واسطه توزیع یکنواخت و بهینهٔ نور در تمامی محیط کشت و بهبود فرایند فتوسنتز به دست آمده است؛ بنابراین شکل و هندسه زیست‌رآکتور تأثیر بسزایی در بهره‌وری سیستم دارد (Kunjapur & Eldridge, 2010). دراین‌بین زیست‌رآکتور صفحه‌ای با ارائهٔ یک هندسهٔ مناسب و نسبت سطح به حجم بالا، این هدف را برای صنعت ساختمان محقق می‌سازد.

ضخامت مناسب برای زیست‌رآکتور براساس مسافت طی‌شده توسط پرتوهای نوری از داخل محفظه کشت ریزجلبک به‌نحوی‌که هیچ منطقهٔ تاریکی باقی نماند، مشخص می‌شود، که این اندازه براساس آزمایش‌های متعدد ۱۵ میلی‌متر است (Degen, Uebele, Retze, Schmid-Staiger & Trösch, 2001)؛ درصورتی‌که بهینه‌ترین ضخامت برای زیست‌رآکتورها ۵ الی ۶ سانتی‌متر برآورد شده است (Marsullo, Mian, Ensinas, Manente, Lazzaretto & Marechal, 2015). ازآنجایی‌که میزان رشد ریزجلبک‌ها به‌طور مستقیم به نحوهٔ مخلوط‌سازی محیط کشت وابسته است، لذا زیست‌رآکتور صفحه‌ای با انتشار حباب‌های هوا از پایین‌ترین قسمت پانل و ترکیب طبیعی محیط کشت و جلوگیری از انباشته‌شدن اکسیژن محلول، دارای عملکرد مناسبی است (Kumar & Goyal, 2011). جهت‌گیری نسبت به پرتوهای خورشید در این سیستم ازجمله مؤلفه‌های مهم

و حیاتی است. براساس نظر سیارا و همکاران، جهت‌گیری شرقی - غربی برای مکان‌های با عرض جغرافیایی بیشتر از ۳۵ درجه و جهت‌گیری شمالی - جنوبی برای عرض‌های جغرافیایی زیر ۳۵ درجه به‌منظور بهره‌برداری بیشتر الزامی است (Sierra, Acién, Fernández, García, González & Molina, 2008). در تحقیقی که اسلگرس[5] انجام داد، مشاهده شد جهت‌گیری زیست‌آکتورهای صفحه‌ای در عرض‌های جغرافیایی بالاتر (شرقی - غربی) به نسبت عرض‌های جغرافیایی پایین‌تر (شمالی - جنوبی) دارای اختلاف ۵۰ درصدی در میزان تولیدات و خروجی سیستم است (Slegers, 2014)؛ بنابراین می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت جهت‌گیری جنوبی و جنوب غربی زیست‌آکتورهای صفحه‌ای در عرض‌های جغرافیایی بالا، بهترین جبهه برای قرارگیری این سیستم روی نمای ساختمان است (Elnokaly & Keeling, 2016).

• الزامات موردنیاز و جزئیات فنی برای طراحی نمای زیستی

برای ایجاد یک زیست‌آکتور بهینه، نیاز به تأمین ورودی‌های سیستم از منابع تأمین‌کنندهٔ تضمین‌شده با استفاده از جزئیات فنی مناسب است تا به خروجی قابل‌توجهی دست یافت. ورودی‌ها، منابع تأمین‌کننده، جزئیات فنی و خروجی‌های یک زیست‌آکتور به شرح جدول ۱ است.

• فواید و اثرات استفاده از زیست‌آکتور حاوی ریزجلبک در نمای ساختمان

اثرات استفاده از زیست‌آکتورها در نمای ساختمان ضمن جذب دی‌اکسید کربن هوا، شامل تولید بخشی از انرژی موردنیاز ساختمان از طریق بیومس، کنترل میزان نور ورودی به داخل فضا، کنترل دید و منظر، خاصیت عایق حرارتی، عایق صوتی، پایداری زیست‌محیطی، کاهش هزینه‌های کلی ساختمان و زیبایی است (Elrayies, 2018) که در جدول ۲ به‌صورت مختصر به توضیح هرکدام پرداخته شده است.

با توجه به جدول ۲، یکی از مسائل مورد بحث در بین متخصصان استفاده از ریزجلبک در ساختمان، هزینه‌های مربوط به نصب، راه‌اندازی و نگهداری آن است. براساس محاسبات صورت‌گرفته، به ازای ساخت ۵۰۰ مترمربع زیست‌آکتور، هزینه‌ای در حدود ۳۰ یورو (معادل ۴۵۰ هزار تومان) به ازای هر یک مترمربع باید در نظر گرفته شود (Torgal, Buratti, Kalaiselvam, Granqvist & Ivanov, 2016). با توجه به آمار ارائه‌شده در جدول ۳، تمایل بر کاهش هزینه‌ها وجود دارد؛ لذا پژوهشگران با هدف این هزینه‌ها (Issarapayup, Powtongsook & Pavasant, 2011)، به تحقیق بر جنبه‌های مختلف ریزجلبک و ساخت زیست رآکتور پرداخته‌اند تا به طرق مختلف باعث کاهش هزینه شوند.

جدول ۱. ورودی‌ها، منابع تأمین‌کننده، جزییات فنی و خروجی‌های یک زیست‌آکتور. مأخذ: نگارندگان.

ورودی و خروجی	منابع تأمین‌کننده	جزئیات فنی
ورودی‌ها	دی‌اکسید کربن	تأمین دی‌اکسید کربن موردنیاز ریزجلبک از طریق گازهای خروجی نیروگاه‌ها، صنایع، کارخانه‌ها، هوای آلوده بزرگراه‌ها و غیره. لازم و منطقی است ازنظر جغرافیایی، یک منبع تولید دی‌اکسید کربن در نزدیکی پروژه وجود داشته باشد. در غیر این صورت تأمین دی‌اکسید کربن باید از طریق ساختمان انجام شود (U.S. DOE, 2010). همچنین تجهیزاتی نظیر دستگاه قبضه‌کنندهٔ دی‌اکسید کربن در ترکیب با ساختمان می‌تواند مشکل انتقال و ذخیره‌سازی دی‌اکسید کربن را برطرف کند. دستگاه قبضه‌کنندهٔ دی‌اکسید کربن نیازمند جریان الکتریسیته است که با نصب توربین بادی در ترکیب با آن، الکتریسیته مورد نیاز از راه پایدار تأمین می‌شود.
	آب	ریزجلبک توانایی رشد و نمو در انواع آب‌ها را دارد. آب مورد استفاده در این سیستم قابلیت استفاده مجدد دارد؛ بنابراین چرخهٔ آب در زیست‌آکتور می‌تواند به‌صورت بسته طراحی شود (Elrayies, 2018). از منابع تأمین‌کنندهٔ آب برای استفاده در زیست‌آکتورها می‌توان به آب دریا، آب باران، آب نمک، آب شور و بد مزه و حتی آب فاضلاب یا آلوده اشاره کرد.
	مواد مغذی	آب خاکستری و سیاه ساختمان. مواد مغذی موردنیاز ریزجلبک می‌تواند از طریق آب فاضلاب ساختمان تأمین شود.
	ریزجلبک	بعد از کشت ریزجلبک در زیست‌آکتور، نگهداری از آن در یک بازهٔ دمایی کنترل‌شده تا زمان بهره‌برداری بسیار مهم و حیاتی است. برای این منظور از محفظه‌های کنترل‌شده ازلحاظ دمایی استفاده می‌شود.
خروجی‌ها	گرما	زیست‌آکتورهای نما با تبدیل نور خورشید به گرما به‌عنوان یک عایق حرارتی عمل می‌کنند. درصدی از گرمای تولیدشده به رشد ریزجلبک کمک می‌کند، اما گرمای مازاد باید به‌وسیله مبدل‌های حرارتی به‌منظور گرمایش ساختمان جذب شوند.
	بیومس ریزجلبک	وجود یک سیستم پالایش مانند دستگاه سانتریفیوژ به‌منظور استخراج بیومس و دیگر فرآورده‌ها از ریزجلبک ضروری است. روغن استخراج‌شده برای تولید انواع سوخت‌های زیستی، بیومس ریزجلبک برای تولید الکتریسیته در نیروگاه‌ها و آب باقی‌ماندهٔ مجدد در چرخه کشت ریزجلبک استفاده می‌شوند.
	اکسیژن	در زیست‌آکتورها ضروری است که اکسیژن محلول در محیط کشت به‌وسیله دستگاه‌های گازِ مایع زدا حتماً زدوده شود (Machado, Anderson & Buse, 2013). همچنین گاز اکسیژن نیز به‌وسیله تجهیزات مخصوص جمع‌آوری می‌شود (Suali & Sarbatly, 2012).

• سیما و منظر شهری

مورفولوژی شهری علاوه‌بر عوامل اقتصادی - اجتماعی، به خاطر نقش بالقوه‌ای که می‌تواند در مقابله با تغییرات اقلیمی داشته باشد، به شکل فزاینده‌ای موردتوجه قرار گرفته است (Li, et al., 2018). نماهای شهری به‌عنوان یکی از شاخص‌های شهری می‌تواند در بهبود این معضل مؤثر واقع شود. یکی از معضلات کلیدی حال حاضر در کلان‌شهرهای کشور ازجمله تهران، بحران موجود در سیمای شهر است. این بحران از منظر خرد و کلان قابل بررسی است؛ از منظر کلان ریشهٔ مشکل، در نظام هدایت تحولات کالبدی شهر نهفته است (منصوری و خانی، ۱۳۷۸) و از منظر خرد، سه معضل اضافات، الحاقات و فرسودگی نماها باعث اغتشاش بصری و افت کیفی سیمای شهری شده است. در نظام موجود درخصوص مباحث کلان مرتبط با سیما و منظر شهری اقدامات زیادی شده است، اما توجه به معضلاتی که در مقیاس خرد بر سیمای شهری حادث شده، چندان مورد پژوهش قرار نگرفته است (جعفری و نیلی، ۱۳۹۷). در کنار معضل اغتشاشات بصری این نکته نیز حائز اهمیت است که آلودگی‌های محیط زیستی در حوزهٔ شهری، به‌طور ویژه رد پای اثر کربن[۷] هوا در مراکز شهری رو به افزایش بوده، بنابراین توجه هرچه بیشتر به این دو مقوله از اهمیت بالایی برخوردار است.

• زیبایی‌شناسی جداره‌های شهری

ارزش‌های زیباشناسی سیمای شهری فضای خیابان متفاوت از ارزش‌های دیگر عناصر کالبدی شهر است. فضای خیابان با داشتن محتوای خطی و عملکرد عبوری، برای معرفی سیمای خود شرایطی خاص دارد (ذکاوت، ۱۳۸۴). با توجه به اینکه خیابان، فضایی متشکل از معماری‌های مختلف است، لذا زیبایی خیابان در بعد کالبدی آن، مجموعه قواعد شکلی خیابان را

جدول ۲. فواید و اثرات استفاده از زیست‌رآکتور حاوی ریزجلبک در نمای ساختمان. مأخذ: نگارندگان.

اثر ایجادشده	جزئیات اثر
تولید انرژی موردنیاز ساختمان از طریق بیومس	سوخت‌های زیستی (بیومس) گونهٔ جدیدی از منابع انرژی تجدیدپذیر و پایدار هستند که به‌هیچ‌عنوان بر پدیده گرمایش جهانی و تغییرات اقلیمی تأثیری ندارند (Elrayies, 2018). ریزجلبک‌ها به‌عنوان یک منبع پایدار و تضمین‌کننده تولید بیومس، از ۶۰ درصد چربی‌های ذخیره‌شده درون سلول‌های خود، ۵۰ درصد را به روغن خالص برای تبدیل به منابع انرژی زیستی تبدیل می‌کنند (Edwards, 2008). لازم به ذکر است بیومس تولید شده در موتورخانه به‌وسیله دستگاه سانتریفیوژ از محیط کشت جدا شده و در مخازن تعبیه‌شده ذخیره می‌شود.
کنترل میزان نور ورودی	ازآنجایی‌که ریزجلبک‌های سبز قابلیت جذب پرتوهای قرمز رنگ را دارند، زیست‌رآکتور نیز می‌تواند به‌عنوان یک دستگاه سایه‌ساز برای ساختمان عمل کند و بر میزان نفوذ نور خورشید به درون فضا تأثیر بگذارد (Pagliolico, Verso, Bosco, Mollea & La Forgia, 2017). هرچقدر غلظت ریزجلبک‌ها در زیست‌رآکتور بیشتر باشد، میزان کمتری از نور به فضای درون نفوذ می‌کند (Öncel, Köse & Öncel, 2016; Elnokaly & Keeling, 2016).
کنترل دید و منظر و نمود ظاهری زیست‌رآکتور	الحاق زیست‌رآکتور به نمای ساختمان بر روی شفافیت، میزان ارتباط بصری درون و بیرون و جنبه‌های بصری و ظاهری بنا تأثیر می‌گذارد (Decker, Hahn & Harris, 2016; Pagliolico, et al., 2017). همچنین تغییرات رنگی روزانه و فصلی ریزجلبک‌ها به‌واسطهٔ میزان رشد و همچنین سیالیت و پویایی زیست‌رآکتور به‌واسطهٔ حرکت حباب‌های هوای درون پانل، باعث ایجاد یک نمای جذاب و تغییرپذیر برای ساختمان می‌شود.
عملکرد حرارتی	زیست‌رآکتورهای نما با جذب پرتوهای خورشید و ایجاد سایه (Decker, et al., 2016; Flynn, 2016) باعث می‌شوند که فضای درونی ساختمان در روزهای آفتابی خنک‌تر باشد که میزان سایه‌سازی و خنکی فضا با غلظت ریزجلبک‌ها رابطه مستقیم دارد (Kim & Todorovic, 2013). همین زیست‌رآکتورها در زمستان گرمای اضافی جذب‌شده را برای گرم‌کردن ساختمان مصرف می‌کنند. این فرایند را می‌توان به‌عنوان رابطهٔ هم‌زیستی۶ زیست‌رآکتور با ساختمان تعریف کرد (Pruvost, Le Gouic, Lepine, Legrand & Le Borgne, 2016).
عملکرد صوتی	ریزجلبک‌ها با شکست صوت به‌وسیلهٔ ساختار فیزیکی خود باعث کاهش مقدار آن می‌شود، بنابراین افزایش غلظت ریزجلبک‌ها باعث افزایش خاصیت آکوستیکی زیست‌رآکتور می‌شود (Sardá & Vicente, 2016).
پایداری زیست‌محیطی	ریزجلبک‌ها با قابلیت‌های چندگانهٔ خود، نظیر جذب دی‌اکسید کربن، تصفیهٔ فاضلاب و تولید اکسیژن نسبت به سایر منابع انرژی تجدیدپذیر دارای برتری هستند (Klinthong, Yang, Huang & Tan, 2015).
هزینهٔ سرمایه (سرمایهٔ اولیه جهت نصب و راه‌اندازی)	اگرچه زیست‌رآکتورهای بسته با قابلیت کنترل و نظارت دقیق بر پارامترهای تأثیرگذار بر رشد ریزجلبک باعث افزایش بهره‌وری آن می‌شوند، ولی هزینهٔ نصب و راه‌اندازی گزاف به‌عنوان اصلی‌ترین مانع برای این سیستم‌ها است (Kunjapur & Eldridge, 2010). هزینه ساخت و راه‌اندازی زیست‌رآکتورها نسبت به میزان کاهش مصرف انرژی و فواید بلند مدتی که برای ساختمان و محیط‌زیست ایجاد می‌کند، چندان زیاد نیست (Schiller, 2014). با توجه به گزارش‌های ارایه‌شده، در یک بازه ۹ الی ۱۳ ساله بسته به نوع زیست‌رآکتور قابل جبران است (Sardá & Vicente, 2016).
زیبایی نما	از آنجایی که مقوله زیبایی و زیبایی‌شناسی کاملاً نسبی و وابسته به شرایط است، اما تلفیق میکروارگانیسم‌های زنده به جداره‌های ساختمان باعث ارتقای جنبه‌های زیبایی آن می‌شود. ریزجلبک‌ها با ساختار و عملکرد فیزیکی و شیمیایی پویا و سیال خود می‌توانند باعث حیات جداره‌های بی‌روح و کسل‌کنندهٔ ساختمان شوند و به آنها حیات ببخشند (Elrayies, 2018).

جدول ۳. هزینهٔ ساخت، نصب و نگهداری زیست رآکتور بر مبنای مساحت. مأخذ: Torgal, et al., 2016.

مساحت زیست رآکتور (مترمربع)	۱۰۰	۲۰۰	۵۰۰	۱۰۰۰	۵۰۰۰
هزینهٔ کل (یورو)	۱۰۰۶۰/۵	۱۲۵۷۳/۹	۱۶۳۴۳/۹	۲۲۶۲۷/۳	۷۷۸۹۴/۵
هزینه به ازای هر مترمربع (یورو)	۱۰۰/۶	۶۲/۹	۳۲/۷	۲۲/۶	۱۵/۶

دربر می‌گیرد که باید در هماهنگی با یکدیگر عمل کنند و مجموعه‌ای پیوسته را به وجود آورند. نما یکی از مؤثرترین عناصر تأثیرگذار بر کیفیت بصری بنا و درنتیجه کیفیت فضاهای شهری و از عوامل ارتقای کیفیت‌های بصری زیبایی‌شناسی در فضاهای شهری محسوب می‌شود. ازآنجایی‌که نمای شهرهای امروز بدون توجه به اصول زیبایی‌شناسی معماری و شهرسازی شکل می‌گیرند، درنتیجه مستلزم بازنگری هستند (موسوی سروینه باغی و صادقی، ۱۳۹۵).

• نما، محرک زیبایی و تلطیف‌کنندهٔ هوا

پوستهٔ خارجی ساختمان به‌عنوان یکی از مؤثرترین عناصر زیبایی‌شناختی در نمای شهری و همچنین به‌عنوان مفصل درون و بیرون فضای مسکونی، نقش مهمی بر سیمای شهر بر عهده دارد (شیرازیان، حسینی و نوروزیان ملکی، ۱۳۹۳). یکی از رویکردهای مهم در حوزهٔ معماری و شهرسازی، توجه به طبیعت به‌مثابهٔ الگو و راهکاری برای تعدیل مشکلات زیست‌محیطی است. پاسخگویی طبیعت در حل مسائل و مشکلات انسان طی سالیان دراز ثابت شده و بقای انسان و محیط انسانی وابسته به حفظ و تداوم جهان زیستی اوست؛ لذا در راستای ارتقای کیفیت زندگی، معماری با جذب دی‌اکسید کربن هوا و تبدیل عناصر و اندام‌های خود به‌مثابهٔ سامانه‌های زنده کوچک، در جهت اهداف توسعه پایدار نقش بسزایی ایفا می‌کند. شناخت سطوح بالقوهٔ شهری برای نصب پانل‌های جاذب دی‌اکسید کربن به‌وسیلهٔ میکروارگانیسم‌های زنده (ریزجلبک‌ها) بسیار مهم است. ازاین‌رو در این بخش جداره‌های خیابان انقلاب به‌عنوان یکی از محورهای مهم شهر تهران، همچنین به دلیل ترافیک شهری و حجم بالای دی‌اکسید کربن موردبررسی و امکان‌سنجی نصب زیست‌رآکتورهای حاوی ریزجلبک روی آنها قرار گرفته است.

بحث

• نمای ساختمان‌های خیابان انقلاب

در بسیاری از کلان‌شهرهای دنیا، ساختار فیزیکی سطوح به همراه تمرکز فعالیت‌های انسانی منجر به افزایش دمای مناطق مرکزی شهر و بروز پدیده‌هایی همچون جزایر گرمایی و تولید انواع آلاینده‌های جوی شده، که هم بر آسایش زیستی ساکنین و هم بر برنامه‌ریزی‌های مدیریت شهری همچون کنترل آلودگی‌ها تأثیرگذار بوده است. خیابان انقلاب نیز به‌عنوان یکی از مراکز شهری از مقولهٔ آلودگی و گرمایش هوا مستثنا نیست. علاوه‌بر مشکل کیفیت هوا، مشکلات و ناهماهنگی‌هایی که در نماهای خیابان انقلاب وجود دارد نیز سبب شده چهرهٔ شهر ناخوشایند و نازیبا شود. یکی از راهکارهای حل معضل کیفیت پایین هوا و بهبود وضعیت نمای خیابان نصب پانل‌های حاوی ریزجلبک است که ضمن جذب و کاهش دی‌اکسید کربن هوا در این معبر، به ساماندهی سیمای شهری نیز کمک خواهد کرد. از آنجایی که تحرک و پویایی در نمای ساختمان به طور نسبی باعث افزایش جنبه‌های زیبایی در منظر شهری می‌شود، ریزجلبک‌ها با ساختار و عملکرد فیزیکی و شیمیایی پویا و سیال خود می‌توانند باعث حیات جداره‌های بی‌روح و کسل‌کنندهٔ ساختمان شده و به آنها حیات ببخشند (Elrayies, 2018) و باعث بالابردن کیفیت سیمای شهری شوند. در همین راستا با حضور در خیابان انقلاب و عکس‌برداری از نمای جنوبی آن، مساحت سطوحی که قابلیت نصب زیست‌رآکتور (سطوح بلا استفاده و بدون بازشو) داشتند، محاسبه شد. مساحت این سطوح ۶۹۰۰ مترمربع است (تصویر ۱-الف و ب). با توجه به هندسه و ابعاد زیست‌رآکتور، این سطوح مدول‌بندی و مساحت کل زیست‌رآکتورها و تعداد آنها مشخص شد.

• هندسه و تناسبات ابعادی زیست‌رآکتور

بزرگ‌ترین ویژگی برای داشتن بازدهی بیشتر هر نوع رآکتور، داشتن نسبت سطح به حجم بالاست. زیست‌رآکتور 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 رآکتورهاست، بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد. باید عنوان کرد فاصلهٔ ۱۵ میلی‌متر برای مسافت طی شده توسط پرتوهای نوری، به این دلیل که باعث ایجاد منطقه تاریک درون رآکتور نمی‌شود، به‌عنوان ضخامت بهینه مشخص شده است. همچنین در پژوهشی که توسط کیم و تودوروویچ (Kim & Todorovic, 2013) انجام گرفته است، نسبت مناسب ارتفاع به عرض زیست‌رآکتور حاوی ریزجلبک را ۲/۵ به دست آورده است. براساس نتایج پژوهش کیم، این تناسبات باعث ایجاد کمترین اثر فشار مایع درونی و میزان اتلاف حرارتی در زیست‌رآکتور می‌شود. درنهایت با توجه به استانداردهای ارتفاع و عرض پنجره ارائه‌شده توسط کمیته تخصصی معماری سازمان نظام‌مهندسی ساختمان، ارتفاع ۱۰۰، عرض ۴۰ سانتی‌متر با تناسبات ۲/۵ و ضخامت لایه محیط کشت ۱۶ میلی‌متر به‌عنوان ابعاد موردنظر و با قابلیت

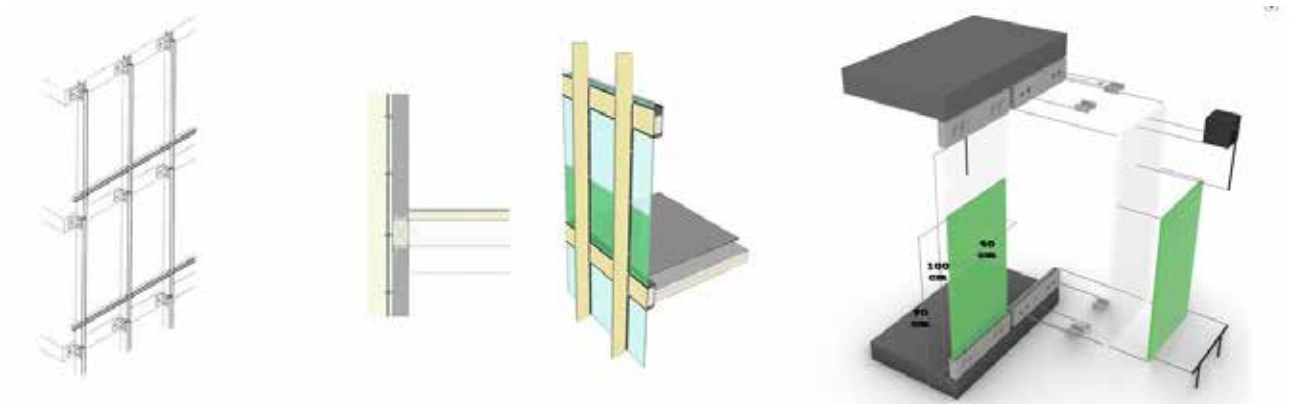
تصویر۱. الف) مقایسهٔ سیمای شهری جبههٔ جنوبی خیابان انقلاب با در نظر گرفتن پانل‌های حاوی ریزجلبک. مأخذ: نگارندگان.

تصویر ۱. ب) مقایسهٔ سیمای شهری جبههٔ جنوبی خیابان انقلاب با در نظر گرفتن پانل‌های حاوی ریزجلبک. مأخذ: نگارندگان.

تجاری‌سازی برای طراحی زیست‌آکتور در نظر گرفته شد. به‌منظور نصب زیست‌آکتور به نمای ساختمان از یک سازه پشتیبان با قابلیت نصب به هر نوع نمایی استفاده شده است. این سازه ضمن نگهداری زیست‌آکتور از تنش‌های ناشی از مایع درون، از نیروهای جانبی نظیر باد جلوگیری می‌کند و باعث پایداری زیست‌آکتور روی نمای ساختمان می‌شود (تصویر ۲).

• نحوهٔ کارکرد زیست‌آکتور

به‌منظور کشت ریزجلبک کلرلا، با استفاده از ترکیب نمک دریا و آب شهری، محیط کشتِ با شوری ۲۵ ppt به میزان چهار لیتر تهیه و در شرایط کاملاً استریل با نسبت یک به پنج، مقدار یک لیتر از استوک کلرلا در چهار لیتر محیط کشتِ مخلوط و به درون زیست‌آکتور منتقل شد. اتاق کشت کاملاً استریل و پنجره با استفاده از لامپ مهتابی به قدرت ۱۰۰۰ لوکس با دورهٔ متناوب ۱۲ ساعت روشنایی با نور مصنوعی و ۱۲ ساعت تاریکی توسط پریز اتوماتیک (تایمردار)، نوردهی شد (تصویر۳). دمای اتاق کشت در تمام مدت آزمایش ۲۵ الی ۲۷ درجه سانتی‌گراد بود. هوادهی با استفاده از دستگاه پمپ آکواریوم مرکزی انجام شد؛ این پمپ در پایین زیست‌آکتور تعبیه شد که با جذب هوای آلوده از محیط بیرون، در هر دقیقه ۳/۵ لیتر هوا را به‌طور یکنواخت از پایین به درون زیست‌آکتور وارد می‌سازد. هوای تزریق‌شده به‌صورت حباب درون زیست‌آکتور به سمت بالا حرکت می‌کنند و در این مسیر ریزجلبک‌ها از طریق فرایند فتوسنتز، دی‌اکسید کربن موجود درون هوا را جذب و اکسیژن تولید می‌کنند. همچنین این فرایند از ته‌نشینی و رسوب ریزجلبک در بدنهٔ زیست‌آکتور جلوگیری می‌کند. در قسمت بالای زیست‌آکتور به میزان ۲۰ الی ۳۰ سانتی‌متر فضای خالی برای انباشت اکسیژن گازی تعبیه شده که توسط یک پمپ مکنده از آن خارج می‌شود و به فضای بیرون یا درون انتقال می‌یابد، همچنین اکسیژن محلول با استفاده از دستگاه جاذب اکسیژن محلول در مایع، جذب و در مخزن تعبیه‌شده در بالای زیست‌آکتور جمع‌آوری می‌شود تا در سیستم تهویهٔ مطبوع ساختمان استفاده شود. مراحل اندازه‌گیری غلظت دی‌اکسید کربن موجود در هوا براساس ساعات شلوغ، پرترافیک و اوج آلودگی شهر تهران در ساعات ۱۰، ۱۳ و ۱۶ هرروز و به مدت ۶ روز انجام شد. محل آزمایش، میدان ولیعصر تهران که با توجه به میزان آلودگی و حجم دی‌اکسید کربن، جزو نقاط آلودهٔ شهر و نزدیک به ایستگاه سنجش کیفیت هوایِ خیابان فاطمی است، انتخاب شده است. پنجرهٔ فوق‌الذکر پس از طراحی و ساخت به صورت اصولی و فنی، در جای یکی از پنجره‌های اتاق آزمایش که همجوار با ضلع جنوبی میدان بود، نصب شد. در طول آزمایش، تمامی داده‌ها فقط از همین محل و نقطه جمع‌آوری شدند تا تغییر مکان و فضا تأثیری بر میزان ورودی‌ها نداشته باشد. باید اذعان کرد، در بازهٔ زمانی که نور خورشید وجود دارد، نیاز به نوردهی مصنوعی توسط لامپ نیست و فقط در هنگام شب عملیات نوردهی به ریزجلبک‌ها انجام می‌شود تا به صورت مداوم و مستمر عملیات فتوسنتز را انجام دهند. دورهٔ نوردهی به پنجره براساس ساعات فوق به‌نحوی‌که دوره روشنایی با نور مصنوعی از ساعت ۱۰ شب الی ۱۰ صبح و دورهٔ تاریکی از ۱۰ صبح الی ۱۰ شب بود، تنظیم شد. با این احتساب، ساعت ۱۰ پایان دورهٔ روشنایی با نور مصنوعی و شروع دورهٔ تاریکی و ساعت ۱۶ میانهٔ دورهٔ تاریکی است. میزان غلظت دی‌اکسید کربن و میزان جذب آن توسط زیست‌آکتور با استفاده از CO_2سنج اندازه‌گیری شد. با بررسی مقادیر جذب به‌صورت میانگین روزانه، در روز اول میانگین جذب، ۶/۶ درصد، روز دوم ۹/۷ درصد، روز سوم ۱/۱۷ درصد، روز چهارم ۱۵/۸ درصد، روز پنجم ۴۰/۷ درصد و درنهایت روز ششم با ۴۵/۴ درصد جذب بالاترین مقدار را به خود اختصاص داده است. با تجمیع میانگین جذب در دورهٔ ۶ روزه، میزان جذب به‌طور میانگین ۲۲/۵۵ درصد است. با این احتساب به‌صورت روزانه، ۵۰۴۰ لیتر هوای حاوی دی‌اکسید و مونوکسید کربن وارد یک زیست‌آکتور می‌شود که پس از جذب کربن، میزان ۱۱۳۶/۵ لیتر هوای پاک از آن خارج می‌شود. بعد از گذشت این بازهٔ ۶ روزه، تمامی محتویات زیست‌آکتور



تصویر ۲. ابعاد مورد نظر، سازهٔ پشتیبان و نحوهٔ اتصال زیست‌آکتور به نما. مأخذ: رضازاده، ۱۳۹۷.

تصویر ۳. زیست رآکتور ساخته‌شده و تجهیزات مورد استفاده در فرایند آزمایش. مأخذ: نگارندگان.

با استفاده از پمپ تخلیه به موتورخانه مرکزی که در زیرزمین تعبیه شده، منتقل می‌شود. در این مرحله با استفاده از دستگاه سانتریفیوژ، بیومس تولیدی از محیط کشت جدا شده و برای مصارف سوختی ساختمان در مخازن مربوطه جمع‌آوری می‌شوند؛ سپس با اختلاط ریزجلبک با محیط کشت با نسبت ذکرشده، مایع جدید به درون زیست‌رآکتور باز گردانده و سیستم برای بارگزاری یک دوره ۶ روزهٔ جدید آماده می‌شود. با این کار میزان شفافیت زیست‌رآکتور و حجم آب تبخیرشده در فرایند جذب همیشه در یک حالت یکسان و مناسب قرار خواهند داشت. با مدول‌بندی نمای جنوبی خیابان انقلاب، تعداد ۲۶۶۶ زیست‌رآکتور با مجموع مساحت ۱۰۶۶ مترمربع تعبیه شد. همان‌گونه که در تصویر ۱ مشاهده می‌شود، این تعداد با توجه به طرح معماری و هندسهٔ نمای اصلی صورت گرفت تا ضمن ایجاد زیبایی و یکپارچگی کل نما، هویت آن خدشه‌دار نشود.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش با ارائهٔ راهکاری برای تلفیق زیست‌رآکتورهای حاوی جلبک با نمای ساختمان‌های خیابان انقلاب به‌عنوان یکی از معبرهای مهم شهری، ضمن حفظ هویت و یکپارچگی کلی سیمای آن، موجب جذب دی‌اکسید کربن موجود در هوا شده تا از افزایش دمای موضعی هوا در آن منطقه بکاهد. تلفیق زیست‌رآکتور با نمای ساختمان‌ها، با ایجاد یک فرصت ویژه باعث تبدیل این جداره‌ها به سطوح فتوسنتزکننده در جهت پاسخ به تغییرات گرمایی اقلیم، بهبود عملکرد حرارتی غیرفعال ساختمان، تبدیل یک ساختمان معمولی به یک ساختمان سالم و زنده می‌شود و درنهایت جداره‌های ساختمان را به یک کارخانه تولید انرژی تبدیل می‌کند. درنهایت با نصب زیست‌رآکتورها به نمای ساختمان، در روز اول میانگین جذب، ۶/۶ درصد، روز دوم ۹/۷ درصد، روز سوم ۱۷/۱ درصد، روز چهارم ۱۵ /۸ درصد، روز پنجم ۴۰/۷ درصد و درنهایت روز ششم با ۴۵/۴ درصد جذب بالاترین مقدار را به خود اختصاص داد. با تجمیع میانگین جذب در دوره ۶ روزه، میزان جذب به‌طور میانگین ۲۲/۵۵ درصد است. نتایج این پژوهش به‌خوبی نشان می‌دهد درصورتی‌که بتوان مساحت قابل‌توجهی از جداره‌های ساختمان و بدنه‌های شهری را با این زیست‌رآکتور پوشش داد، در بازهٔ زمانی بسیار کوتاه می‌توان میزان دی‌اکسید کربن موجود در هوا را به مقدار قابل توجهی به‌صورت پایدار کاهش داد و در جهت ارتقای بهبود کیفیت هوا و حفظ و پایداری محیط زیست شهری به‌عنوان سیاست و هدف اصلی این نوشتار، گام مؤثری برداشت.

پی‌نوشت‌ها

۱. Chlorella
۲. Biotic
۳. Abiotic
۴. Micro Organism
۵. Slegres
۶. Symbiotic
۷. Carbon Footprint

فهرست منابع

• جعفری، طوفان و نیلی، حمیدرضا. (۱۳۹۷). نظام اجرای پروژه‌های پیرایش، مرمت و ساماندهی شهری. *منظر*، ۱۰(۴۴)، ۵۰-۵۹.
• ذکاوت، کامران. (۱۳۸۴). معماری خیابانی و هویت سیمای شهری در ایران. *دانش نما*، ۱۰۲(۱۰۴)، ۱۲۸-۱۳۹.
• رضازاده، حمیدرضا. (۱۳۹۷). *امکان‌سنجی طراحی جدارهٔ ساختمان برای کاهش میزان آلودگی هوا با استفاده از میکروارگانیسم‌ها: طراحی ساختمان اداری در شیراز*. پایان‌نامهٔ منتشرشدهٔ کارشناسی ارشد در رشته فناوری معماری بیونیک. بابلسر، مازندران، ایران.
• شفیع‌پور مطلق، مجید و توکلی، آزاده. (۱۳۹۵). الزام‌های ایران برای ایجاد مدل متوازن توسعهٔ منطقه‌ای در راستای تحقق اهداف بین‌المللی کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای. *راهبرد اجتماعی فرهنگی*، ۵(۲۱)، ۱۴۳-۱۶۸.
• شیرازیان، محمدحسین؛ حسینی، سید باقر و نوروزیان ملکی، سعید. (۱۳۹۳). مطالعهٔ تطبیقی جداره‌های خارجی (نما) در ساختمان‌های مسکونی تهران با روش تحلیل سلسله مراتبی. *هویت شهر*، ۱۸، ۶۱-۷۰.
• منصوری، سید امیر و خانی، علی. (۱۳۷۸). *طرح ویژهٔ نوسازی بافت‌های فرسوده*. تهران: سازمان نوسازی شهرداری تهران.
• موسوی سروینه باغی، الهه سادات و صادقی، علیرضا. (۱۳۹۵). ارائهٔ فرایند طراحی جداره‌های شهری در جهت ارتقای کیفیت‌های بصری زیبایی‌شناسی منظر شهری، نمونه موردی: خیابان احمدآباد مشهد. *مدیریت شهری*، ۱۵(۴۳)، ۹۹-۱۱۴.

• Alabi, A., Bibeau, E. & Tampier, M. (2009). *Microalgae Technologies & Processes for Biofuels-bioenergy Production in British Columbia: Current Technology, Suitability & Barriers to Implementation: Final Report*. United Kingdom: British Columbia Innovation Council.

• Cervera-Sardá, R., Gómez-Pioz, J. & Ruiz-de-Elvira, A. (2014). *Architecture as an Energy Factory: Pushing the Envelope*. In Construction and Building Research (pp. 209-217). Dordrecht: Springer.

• Decker, M., Hahn, G. & Harris, L. (2016). *Bio-enabled façade systems-managing complexity of life through emergent technologies*. Proceedings of the 34th eCAADe Conference on Complexity & Simplicity. Oulu, Finland: University of Oulu.

• Degen, J., Uebele, A., Retze, A., Schmid-Staiger, U. & 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.

• Edwards, M. (2008). *Green algae strategy: end oil imports and engineer sustainable food and fuel*. Tempe, Arizona: CreateSpace.

• Elliot, S. (2016). *Cohousing in the Flower City: A Carbon Capture Design*. Rochester Institute of Technology: Golisano Institute for Sustainability, Department of Architecture.

• Elnokaly, A. & Keeling, I. (2016). An empirical study investigating the impact of micro-algal technologies and their application within intelligent building fabrics. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 216, 712-723.

• Elrayies, G. (2018). Microalgae: prospects for greener future buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1175-1191.

• Flynn, E. (2016). Experimenting with living architecture: a practice perspective. Architectural *Research Quarterly*, 20(1), 20-28.

• IEA. (2012). *World Energy Outlook 2012*. Paris: International Energy Agency (IEA).

• IPCC (2006). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC.

• Issarapayup, K., Powtongsook, S. & Pavasant, P. (2011). Economical review of Haematococcus pluvialis culture in flat-panel airlift photobioreactors. *Aquac. Eng.* 44 (3), 65–71.

• Kim, J. & Todorovic, M. (2013). Tuning control of buildings glazing's transmittance dependence on the solar radiation wavelength to optimize daylighting and building's energy efficiency. *Energy Build*, 63, 108–118.

• Klinthong, W., Yang, Y. H., Huang, C. H. & Tan, C. S. (2015). A review: microalgae and their applications in CO2 capture and renewable energy. *Aerosol Air Qual Res*, 15(2), 712–742.

• Kumar, A. & Goyal, P. (2011). Forecasting of daily air quality index in Delhi. *Science of the Total Environment*, 409(24), 5517-5523.

• Kunjapur, A. & Eldridge, R. (2010). Photobioreactor design for commercial biofuel production from microalgae. *Ind Eng Chem Res*, 49(8), 3516-3526.

• Lal, R. (2008). Carbon sequestration. Philosophical Transactions of the Royal Society B: *Biological Sciences*, 363(1492), 815-830.

• Li, S., Zhou, C., Wang, S. & Hu, J. (2018). Dose urban landscape pattern affect CO2 emission efficiency? Empirical evidence from megacities in China. *Journal of Cleaner Production*, 203, 164-178.

• Machado, J., Anderson, B. & Buse, T. (2013). *Green algae photobioreactor*. AIChE Annual Metting. Global challenges for engineering a sustainable future. San Francisco, California, USA: AIChE .

• Malik, A., Lan, J. & Lenzen, M. (2016). Trends in global greenhouse gas emissions from 1990 to 2010. *Environmental science & technology*, 50, 4722-4730.

• Marsullo, M., Mian, A., Ensinas, A., Manente, G., Lazzaretto, A. & Marechal, F. (2015). Dynamic modeling of the microalgae cultivation phase for energy production in open raceway ponds and flat panel photobioreactors. *Front Energy Res*, 3(1), 18-36.

• Mata, T., Martins, A. & Caetano, N. (2010). Microalgae for biodiesel production and other applications: a review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 14(1), 217-232.

• Öncel, S., Köse, A. & Öncel, D. (2016). *Façade integrated photobioreactors for building energy efficiency*. In Start-Up Creation: the smart eco-efficient built environment (pp. 237-299). London: Elsevier.

• Pachauri, R., Allen, M., Barros, V., Broome, J., Cramer, W., Christ, R., . . . Dasgupta, P. (2014). *Climate change 2014: synthesis report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Switzerland: IPCC.

• Pagliolico, S., Verso, V., Bosco, F., Mollea, C. & La Forgia, C. (2017). A novel photo-bioreactor application for microalgae production as a shading system in buildings. *Energy Procedia*, 111, 151-160.

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

• Pruvost, J., Le Gouic, B., Lepine, O., Legrand, J. & Le Borgne, F. (2016). Microalgae culture in building-integrated photobioreactors: biomass production modelling and energetic analysis. *Chemical Engineering Journal*, 284, 850-861.

• Sardá, R. & Vicente, C. (2016). *Case studies on the architectural integration of photobioreactors in building*

Façades. London: Springer.

• Schiller, B. (2014). *This Algae-Powered Building Actually Works*. Retrieved from http://www.fastcoexist.com/3033019/this-algae-powered-building-actuallyworks.

• Sierra, E., Acién, F., Fernández, J., García, J., González, C. & Molina, E. (2008). Characterization of a flat plate photobioreactor for the production of microalgae. *Chemical Engineering Journal*, 138(1), 136-147.

• Slegers, P. (2014). *Scenario studies for algae production*. Wageningen: Wageningen University.

• Suali, E. & Sarbatly, R. (2012). Conversion of microalgae to biofuel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6), 4316–4342.

• Torgal, F. P., Buratti, C., Kalaiselvam, S., Granqvist, C. G. & Ivanov, V. (2016). *Nano and Biotech Based Materials for Energy Building Efficiency*. Springer International Publishing.

• U.S. DOE. (2010). *National algal biofuels technology roadmap: a technology roadmap resulting from the National algal biofuels workshop*. U.S.: Department of Energy.

• Wang, S., Liu, X., Zhou, C., Hu, J. & Ou, J. (2017). Examining the impacts of socioeconomic factors, urban form,and transportation networks on CO2 emissions in China's megacities. *Applied Energy*, 185, 189-200.

• Wolkers, H., Barbosa, M., Kleinegris, D., Bosma, R. & Wijffels, R. (2011). *Microalgae: The Green Gold of the Future, Large-Scale Sustainable Cultivation of Microalgae for the Production of Bulk Commodities*. Netherlands: The Ministry of Economic Affairs AaI.

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

COPYRIGHTS
Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to the Bagh-e Nazar Journal. This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

نحوهٔ ارجاع به این مقاله

حقیر، سعید؛ تشکری، لیلا؛ رضازاده، علیرضا و احمدی، فریال. (۱۳۹۹). نماهای زیستی مؤلفه ساماندهی نما و کاهش دی‌اکسید کربن هوا به‌منظور کاهش گرمایش جهانی (نمونه موردی خیابان انقلاب تهران). *باغ نظر*، ۱۷(۸۹)، ۳۳-۴۴.

DOI: **10.22034/BAGH.2020.188585.4147**
URL: http://www.bagh-sj.com/article_115433.html