نشریهٔ علمی باغ نظر، ۲۳(۱۶۰)، ۵-۱۸ / مهر ۱۴۰۵
DOI: 10.22034/bagh.2026.546729.5889

ترجمهٔ انگلیسی این مقاله نیز با عنوان:
Energy Performance Optimization of Photobioreactor Façades in Commercial Buildings in Hot-Arid Climates (Case Study: Commercial Building in Qom, Iran)
در همین شمارهٔ مجله به‌چاپ رسیده است.

مقالهٔ پژوهشی

طراحی نمای ساختمان با رویکرد بهینه‌سازی مصرف انرژی با بهره‌گیری از ریزساختارهای زنده (مطالعه موردی: ساختمان تجاری در شهر قم)

فاطمه آخوندی[۱]، حمیدرضا فرشچی[۲*]، روح‌الله میرزایی[۳]

۱. گروه معماری و انرژی، پژوهشکدهٔ انرژی، دانشگاه کاشان، ایران
۲. گروه تکنولوژی معماری، دانشکدهٔ معماری و هنر، دانشگاه کاشان، ایران
۳. گروه محیط زیست، دانشکدهٔ منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۱/۲۹ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۷/۰۱

چکیده

بیان مسئله: در دهه‌های اخیر، بحران‌های زیست‌محیطی ناشی از افزایش گازهای گلخانه‌ای، توجه معماران و برنامه‌ریزان شهری را به طراحی پایدار و بهینه‌سازی مصرف انرژی جلب کرده است. در این راستا، یکی از نوآوری‌های مطرح، استفاده از ریزساختارهای زنده مانند فتوبیوراکتورهای میکروجلبک در طراحی نمای ساختمان‌هاست.

هدف پژوهش: هدف این پژوهش، تعیین میزان تغییر شدت مصرف انرژی سالانه (kWh/m^2) یک ساختمان تجاری در اقلیم گرم و خشک شهر قم با به‌کارگیری نمای فتوبیوراکتور و مقایسهٔ آن با نمای شیشه‌ای مرجع است.

روش پژوهش: این پژوهش از نوع توصیفی-تحلیلی و مبتنی‌بر شبیه‌سازی انرژی است. ابتدا با مرور مبانی نظری، فناوری‌های مرتبط با فتوبیوراکتورهای زیستی و مطالعات موردی بین‌المللی بررسی شد. سپس یک ساختمان تجاری نمونه مدل‌سازی شد و مصرف انرژی سالانه آن در چهار نمای مختلف شامل شیشه‌ای ساده، شیشه‌ای دوجداره، فتوبیوراکتور تک‌پوسته و فتوبیوراکتور دوپوسته با استفاده از نرم‌افزار دیزاین بیلدر و داده‌های اقلیمی شهر قم به‌صورت سالانه شبیه‌سازی شد. همچنین تحلیل حساسیت نسبت به شفافیت سوسپانسیون میکروجلبک، نرخ تهویهٔ فضای بین دوپوسته و ضریب انتقال حرارت شیشه انجام شد.

نتیجه‌گیری: نتایج شبیه‌سازی نشان داد با تغییر نمای ساختمان و استفاده از پنل‌های فتوبیوراکتور، با استفاده از نمای دوپوسته فتوبیوراکتور میانگین مصرف انرژی سالانه از ۲۷۲/۸۵ به ۵۷۱/۸۸ (برحسب kWh/m^2) کاهش یافت. همچنین میزان نوسان حرارتی در جهات مختلف ساختمان کاهش یافت. نتایج تحلیل حساسیت نشان داد عملکرد انرژی نمای دوپوسته بیش از هر چیز به شفافیت سوسپانسیون میکروجلبک و نرخ تهویهٔ فضای بین دوپوسته بستگی دارد، درحالی‌که تغییر ضریب انتقال حرارت پنجره تأثیر چندانی بر مصرف انرژی نشان نداد. نتایج این پژوهش محدود به اقلیم شهر قم و فرض‌های مدلسازی در نرم‌افزار دیزاین بیلدر است و تعمیم آن به سایر اقلیم‌ها نیازمند بررسی مجدد خواهد بود.

واژگان کلیدی: *طراحی زیست‌اقلیمی، نمای فتوبیوراکتور، اقلیم گرم و خشک، ساختمان تجاری، آسایش حرارتی.*

مقدمه

ساختمان‌ها و زیرساخت‌های شهری در طول زمان ساخت و بهره‌برداری، یک مصرف‌کنندهٔ انرژی محسوب می‌شوند. تغییرات آب‌وهوایی و گرم شدن کره زمین بر تقاضای انرژی ساختمان نیز تأثیر گذاشته، و در بسیاری از نقاط جهان نیاز به سرمایش را بالا برده است (Bazazzadeh et al., 2021). طبق آمار اعلام شده توسط آژانس بین‌المللی انرژی، ساختمان‌ها به‌طور متوسط ۳۰درصد مصرف انرژی و ۲۶درصد انتشار گازهای گلخانه‌ای را به خود اختصاص داده‌اند (Largest sectors in final consumption in Iran, 2023). در این راستا، پژوهش‌های اخیر بر توسعهٔ رویکردهای محاسباتی برای درک و کاهش مصرف انرژی در محیط مصنوع متمرکز شده است (Taylor & Bergés, 2014). توسعهٔ

*نویسندهٔ مسئول: ۰۹۱۳۱۶۱۷۵۹۱، farshchi46@kashanu.ac.ir

مدل‌های دقیق برای پیش‌بینی مصرف انرژی ساختمان امری مهم است و منجر به کاهش هزینه‌های عملیاتی و بهبود پایداری ساختمان خواهد شد. نوآوری در این صنعت باید به‌گونه‌ای باشد که علاوه‌بر کاهش مصرف انرژی در زمان بهره‌برداری، اثرات زیست‌محیطی ساختمان را نیز کاهش دهد.

تاکنون راهکارهای مختلفی برای کاهش مصرف انرژی پیشنهاد شده است. طراحی غیرفعال، مانند بهینه‌سازی پارامترهای پوستهٔ ساختمان و نسبت پنجره به دیوار، می‌تواند مصرف انرژی را تا ۳۳ درصد کاهش دهد (Gondal et al., 2021). فناوری‌های خاص مانند توزیع هوا در کف و استفاده از پنجره‌های دوجداره نتایج امیدوارکننده‌ای در کاهش مصرف انرژی نشان داده‌اند (Akram et al., 2022). ازآنجاکه بیشترین اتلاف حرارت را از طریق پوسته ساختمان انجام می‌شود (Chayaamor-Heil & Hannachi-Belkadi, 2017)، می‌توان از سطح آنها برای کاهش مصرف انرژی بهره برد. در این میان، استفاده از پوسته‌های نوآورانه در ساختمان به‌ویژه نماهای زیستی مبتنی‌بر میکروجلبک به‌عنوان یک راهکار نوظهور مطرح شده است. به‌کارگیری فوتوبیوراکتورهای میکروجلبک در نماهای ساختمان علاوه‌بر ایجاد سایه و عایق حرارتی، موجب کاهش بارهای حرارتی و درنتیجه کاهش مصرف انرژی می‌شود (Yaman et al., 2021, Negev et al., 2019). مدل‌سازی‌های اخیر نشان می‌دهد که نماهای میکروجلبک قادرند نیاز به سرمایش را تقریباً از میان برده و تقاضای گرمایش را در آب‌وهوای گرم کاهش دهند (Girard et al., 2023, Martokusumo et al., 2017).

این پژوهش به بررسی تأثیر استفاده از پنل‌های فتوبیوراکتور در کاهش مصرف انرژی سالانه و بهبود آسایش حرارتی در ساختمان‌های تجاری در اقلیم گرم و خشک می‌پردازد.

پیشینهٔ پژوهش

پژوهش‌ها دربارهٔ ادغام میکروجلبک در پوستهٔ ساختمان نشان می‌دهند این فناوری می‌تواند مصرف انرژی و انتشار کربن را به‌طور معناداری کاهش دهد و هم‌زمان کارکردهای زیست‌محیطی مکملی مانند جذب دی اکسید کربن[1] و تولید زیست‌توده فراهم کند. در سطح کاربردی، مطالعهٔ موردی بر یک ساختمان تجاری در شهر جیزهٔ (مصر) نشان داد جایگزینی نما با پنل فتوبیوراکتور[2] می‌تواند ۴۵- ۵۰ درصد مصرف برق را کاهش دهد و از نظر پذیرش اجتماعی نیز مقبولیت نسبی (۵۰-۶۰درصد) دارد؛ هرچند دغدغه‌هایی دربارهٔ هزینهٔ اولیه و نگهداری مطرح است (Hanafi, 2021). از منظر اقتصادی، مقایسهٔ نمای فتوبیوراکتور با سلول‌های خورشیدی[3] نشان می‌دهد بازگشت سرمایهٔ سلول‌های خورشیدی کوتاه‌تر است (۱۶ سال در برابر ۲۴ سال)، اما پنل‌های فتوبیوراکتور در افق بلندمدت سودآورتر و از منظر کم‌آبی و مزایای زیست‌محیطی در برخی مناطق برتری‌هایی دارد (Biloria & Thakkar, 2020).

در مطالعات امکان‌سنجی، نماهای جلبکی در قالب فتوبیوراکتور یکپارچه با پوسته، انتقال نور روز، سایه‌اندازی، عملکرد حرارتی و بهبود کیفیت هوای داخل را ارتقا می‌دهند و ظرفیت تولید سوخت زیستی نیز دارند (Kim, 2013).

بخشی از پژوهش‌ها بر کاهش بارهای سرمایش و اثرات اقلیمی تأکید دارند: کاهش بار و بهبود آسایش در اقلیم‌های گرم و خشک و مدیترانه‌ای (Negev et al., 2019, Yaman et al., 2021)، برتری معنادار نمای فتوبیوراکتور نسبت به شیشه تک‌جداره و دوجداره و حساسیت نتایج به اندازهٔ بازشو و تراکم جلبک (Talaei et al., 2022)، و حذف تقریباً کامل نیاز سرمایش در برخی سناریوها برپایهٔ مدل‌سازی معتبر (Girard et al., 2023). در ایران، مرور و مقایسهٔ پوسته‌های زیست‌مبنا نشان می‌دهد نمای جلبک در جبههٔ آفتاب‌گیر اقلیم گرم عملکرد مطلوبی دارد اما چالش‌های ناشی از بار مردهٔ ساختمان و فرایندهای تعمیر و نگهداری این سیستم پابرجاست (Bastanfard, 2018)؛ همچنین به‌کارگیری سایبان‌های میکروجلبک در تهران، تعدیل تابش و بهبود آسایش داخل را نشان داده است (قائمی، ۱۴۰۰). افزون بر این، نماهای تطبیق‌پذیر می‌توانند با کاهش اجزای تأسیساتی، وزن و ارتفاع، ردپای کربن ساخت را کاهش دهند (Borschewski et al., 2023) و دیوارهای سبز در گرما، بار سرمایش را به‌طور چشم‌گیر کم کنند (Ramadhan & Mahmoud, 2023). نمونه‌های دیگر به بهینه‌سازی پارامترهای نور، هیدرودینامیک، اختلاط و مقیاس‌پذیری در این پنل‌ها (Zhao et al., 2022, Shankar et al., 2022)، ارزیابی تیپولوژی‌ها (Sukačová et al., 2021)، ادغام با نمای دوپوسته و استخراج پارامترهای بهینهٔ هندسی (Elmalky & Araji, 2023)، جذب کربن (Haghir et al., 2020, Villalba et al., 2023)، شبیه‌سازی‌های اقلیمی پیشرفته (Pozzobon, 2024) و کاربردهای عملکردی نظیر تأمین آب گرم، بهبود روشنایی و کاهش هزینهٔ سرمایش اشاره دارند (Nguyen et al, 2025).

باوجود شواهد امیدبخش دربارهٔ کارایی انرژی و کاهش ردپای کربن[4]، هنوز نیاز به ارزیابی‌های کمّی در اقلیم‌ها و شهرهای ایران، تحلیل چرخهٔ عمر و هزینه‌های تعمیر و نگهداری، آب مصرفی و پذیرش کاربران در مقیاس واقعی وجود دارد. این پژوهش با تمرکز بر شرایط اقلیمی و استفاده از یک چارچوب مدل‌سازی و محاسباتی، می‌کوشد تأثیر استفاده از این فناوری بر کاهش مصرف انرژی را در شرایط بومی‌سازی شده بررسی کند.

مبانی نظری

• سوخت‌های کربن-خنثی

سوخت‌های کربن-خنثی آن دسته از حامل‌های انرژی‌اند که در چرخهٔ عمر، افزایشی در CO_2 جو ایجاد نمی‌کنند؛ به

عبارت دقیق‌تر، CO_2 آزادشده هنگام مصرف با جذب در مرحلهٔ تولید جبران می‌شود (Li et al., 2022). سه مسیر کلیدی عبارت‌انداز: سوخت‌های زیستی (وابسته به تعادل جذب-رهاسازی در رشد زیست‌توده)، سوخت‌های سنتزی از هیدروژن الکترولیتی و کربن دی اکسید (Janaki et al., 2024)، و مسیرهای مبتنی‌بر برق تجدیدپذیر برای تولید هیدروژن[5] و سپس مصرف مستقیم در پیل سوختی یا تبدیل به سوخت زیستی (Galimova et al., 2023). وجود پتانسیل بالا، چالش‌هایی مانند نیاز به کاتالیزورهای کارآمد، زیرساخت‌های نو، و هزینهٔ تولید همچنان مانع تولید این سوخت در مقیاس بزرگ هستند (Myers, 2022).

• بهینه‌سازی انرژی در ساختمان تجاری

بخش ساختمان سهم بالایی از انرژی جهانی را مصرف می‌کند (نزدیک به ۴۰درصد) (Akram et al., 2022) و در ساختمان‌های تجاری، HVAC معمولاً بزرگ‌ترین بخش مصرف‌کننده است (Pease et al., 2021). چارچوب‌های کارآمد شامل: (الف) طراحی هم‌زمان انرژی در مراحل اولیه با اتکا به مدل‌سازی انرژی برای مقایسهٔ سناریوها (Ali et al., 2021) (ب) بهینه‌سازی چندمعیاره با توجه به نیاز انرژی، هزینه و پیامدهای محیط‌زیستی (Jun & Fei, 2024)، و (ج) استفاده از دادهٔ محور و هوش مصنوعی برای کنترل تطبیقی سیستم‌ها براساس آب‌وهوا و الگوهای بهره‌برداری (Sonta et al., 2021). در ایران نیز با توجه به اتکای بالای تولید برق به گاز، کاهش تقاضای برق در ساختمان عملاً کاهش مصرف گاز و انتشار گازهای گلخانه‌ای را به دنبال دارد (IEA, 2022).

• ریزساختارهای زنده و نمای میکروجلبک

ادغام سیستم‌های زنده در پوستهٔ ساختمان (معماریِ زنده) به‌عنوان راهکاری برای کاهش بار انرژی و ارتقای کیفیتِ محیط مطرح است. نماهای زنده (گیاهان یا میکروارگانیسم‌ها) علاوه‌بر اثرات فیزیکی (سایه، عایق، تبادل رطوبتی)، قابلیت تولید زیست‌توده و ترسیب کربن را دارند (Salisbury et al., 2023). فتوبیوراکتورهای میکروجلبک به‌عنوان نسل جدید نماهای زنده، در کاهش بار گرمایش و سرمایش، تولید زیست‌توده و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای مؤثر گزارش شده‌اند (Talaei & Prieto, 2024).

میکروجلبک‌ها با رشد سریع و فتوسنتز مؤثر، کاندیدای مناسب برای نماهای فعال هستند. رشد بهینه تابع شدت و تناوب نور، دما (20°C– 30°C بسته به گونه)، مواد مغذی، pH (اغلب ۷-۹)، CO_2، شوری و اختلاط و هوادهیِ کنترل‌شده است (Wang et al., 2012, Zhang et al., 2022 Gouveia, 2011). انتخاب گونه برپایهٔ بازده زیست‌توده، تحمل شرایط محیطی، و محصول هدف انجام می‌شود (Hosseini Tafreshi & Shariati, 2009, Pistocchi et al., 2024).

• سامانه‌های کشت و ادغام در ساختمان

فتوبیوراکتورها (لوله‌ای، صفحه تخت، ستونی، مارپیچی و بیوفیلم) شرایط رشد را پایدار و قابل‌کنترل می‌کنند و نسبت به حوضچه‌های باز آلودگی و نوسان عملکرد کمتری دارند (Sukačová et al., 2021). معیارهای طراحی برای ادغام در نما شامل: (۱) مدیریت نور (شدت، توزیع، مهار نوری)، (۲) مدیریت گرما (۹۵درصد تابشِ جذب‌شده می‌تواند به گرما تبدیل شود، لذا دفع و بازیافت حرارت مهم است)، (۳) اختلاط جرم برای جلوگیری از رسوب و نقاط تاریک و (۴) تأمین کربن دی اکسید از هوای برگشت سیستم تهویهٔ مطبوع۶، مسیر مواد مغذی و نگهداری است (Sedighi et al., 2023, Yaman et al., 2021). انتخاب بین صفحه تخت و لوله‌ای معمولاً با معیارهای نورگیری، کنترل دما، و یکپارچگی معماری انجام می‌شود (Arora et al., 2024).

روش پژوهش

این پژوهش از نظر هدف، کاربردی و از نظر ماهیت، توصیفی-تحلیلی است. هدف اصلی، بررسی تأثیر استفاده از نماهای فتوبیوراکتور حاوی کشت جلبک بر کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌های تجاری است. رویکرد پژوهش ترکیبی بوده و شامل مطالعات کتابخانه‌ای، تحلیل نمونه‌های موردی و مدل‌سازی عددی با نرم‌افزارهای شبیه‌سازی انرژی می‌شود.

در بخش نظری، مبانی علمی و پیشینهٔ مرتبط از منابع معتبر، استانداردهای طراحی اقلیمی و پروژه‌های اجراشده مرور شد. سپس نمونه‌های بین‌المللی ساختمان‌هایی با نمای فتوبیوراکتور تحلیل شدند تا چارچوب طراحی ساختمان پایه استخراج شود.

برای بخش کمی، یک ساختمان تجاری در اقلیم گرم و خشک (شهر قم) طراحی و در نرم‌افزار دیزاین بیلدر[7] مدل‌سازی شد. این نرم‌افزار مبتنی‌بر موتور محاسباتی EnergyPlus بوده و امکان تحلیل دقیق بارهای سرمایشی، گرمایشی و مصرف انرژی کل را فراهم می‌کند. چهار وضعیت نمای مختلف تعریف شد:

- شیشهٔ تک‌جداره،
- شیشهٔ دوجداره،
- نمای فتوبیوراکتور تک‌پوسته،
- نمای فتوبیوراکتور دوپوسته.

در تمام سناریوها شرایط اقلیمی مدل، ابعاد، کاربری، مصالح (سقف، کف و دیوارها) و زمان‌بندی استفاده از فضاها ثابت نگه داشته شد تا تأثیر نوع نما به‌صورت مستقل بررسی شود. شاخص‌های اصلی شامل مصرف انرژی سالیانه، درصد تغییر نسبت به حالت پایه و اثربخشی این نما بر کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای بودند.

• مطالعات میدانی

شهر قم به‌طور مشخص در اقلیم بیابانی خشک و بسیار گرم

واقع شده است که مشخصه‌های اصلی آن بارش اندک سالانه (کمتر از ۲۵۰ میلی‌متر)، دمای بسیار بالا در تابستان (بیش از ۴۰ درجه سانتی‌گراد)، اختلاف دمای زیاد شبانه‌روز، تبخیر و تعرق شدید، پوشش گیاهی محدود و خاک‌های شور و کم‌عمق است. این شرایط سبب می‌شود که الگوهای طراحی معماری متناسب با اقلیم گرم و خشک اهمیت ویژه‌ای پیدا کند.

در چنین شرایطی، توصیه‌های طراحی شامل انتخاب فرم‌های فشرده و درون‌گرا با حیاط مرکزی، استفاده از ارتفاع کم و تعداد طبقات محدود برای کاهش تبادل حرارتی، به‌کارگیری مصالح بومی با ظرفیت حرارتی بالا (نظیر خشت و آجر) و رنگ‌های روشن جهت بازتاب تابش خورشید است. همچنین، بازشوها باید کوچک، محدود و عمدتاً در جهت شمال-جنوب تعبیه شوند. همچنین استفاده از ارسی‌ها و پنجره‌های مشبک، تعبیهٔ سایبان، ایوان و بازشوهای مرتفع در جهت کنترل تابش مستقیم و کمک به تهویه در فصول گرم در معماری بومی دیده می‌شود. این راهکارها در مجموع موجب ارتقای آسایش حرارتی، کاهش مصرف انرژی و افزایش سازگاری بنا با شرایط محیطی می‌شوند.

• سایت و معرفی پروژه

زمین مدنظر با مساحت ۳۶۵۰ مترمربع در شهر قم، در محلهٔ چهارم شهرک پردیسان، بلوار ابوطالب واقع شده است. ابعاد زمین حدود ۶۰ در ۶۰ متر و با چرخش حدود ۱۵ درجه به‌سمت جنوب شرقی است. موقعیت و کاربری‌های اطراف زمین طبق طرح تفصیلی در تصویر ۱ و وضعیت فعلی آن در تصویر ۲ نشان داده می‌شود.

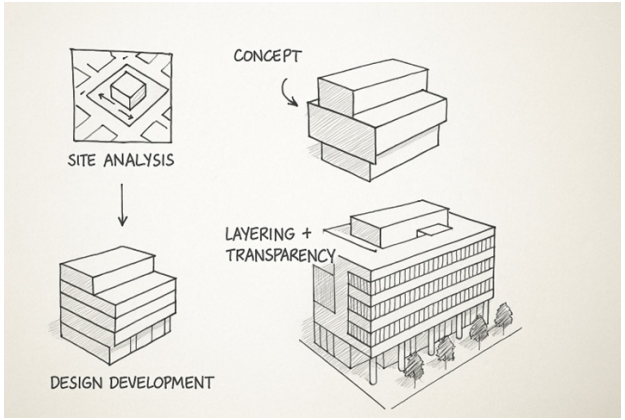
در طراحی این ساختمان تجاری در اقلیم گرم و خشک، بهره‌گیری از اصول معماری اقلیمی به‌منظور بهینه‌سازی مصرف انرژی، تأمین آسایش حرارتی کاربران و کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی موردتوجه قرار گرفت. فرم کلی ساختمان به‌صورت مربع انتخاب شده که به‌طور سنتی در معماری بومی مناطق خشک و گرم ایران دیده می‌شود. این فرم فشرده با

تصویر ۱. موقعیت و ابعاد زمین. مأخذ: نگارندگان.

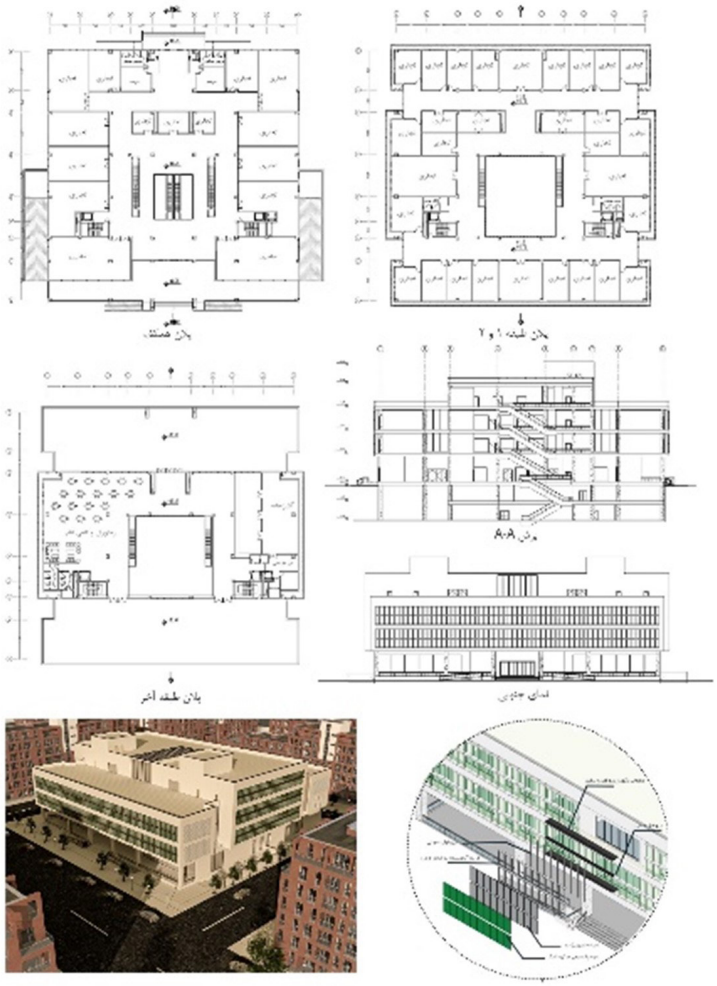
نسبت سطح به حجم پایین، در کاهش تبادل حرارتی با محیط مؤثر بوده و از اتلاف انرژی جلوگیری می‌کند (تصویر ۳).

طراحی معماری نمای فتوبیوراکتور برپایهٔ هم‌زمانی دو هدف اصلی انجام گرفت: نخست، ایجاد سیستمی غیرفعال که بتواند در کاهش مصرف انرژی ساختمان مؤثر واقع شود و دوم، حفظ کیفیت فضایی، زیبایی‌شناسی و منطق سازه‌ای نما. در این راستا، اصول طراحی شامل هماهنگی با مدولاسیون نمای ساختمان، قابلیت انطباق با اقلیم، امکان تعمیر و نگهداری آسان، و سازگاری با الزامات نورگیری فضاهای داخلی در نظر گرفته شد. در انتخاب فرم کلی و نحوهٔ چینش پنل‌ها، سعی شد تعادل میان عملکرد زیستی فتوبیوراکتور و الزامات معماری نما برقرار شود. به‌جای استفاده از سیستم‌های متحرک یا پیچیده، از پنل‌های تخت با آرایش منظم و ماژولار بهره گرفته شد که به‌راحتی در ساختار نمای تجاری قابل پیاده‌سازی باشد. سیستم مورداستفاده در این پروژه از نوع فتوبیوراکتور تخت است. پلان‌ها و سایر مدارک طرحی در تصویر ۴ نشان داده می‌شود.

تصویر ۲. وضع موجود. مأخذ: googlemap.com.



تصویر ۳. اسکیس طرح. مأخذ: نگارندگان.



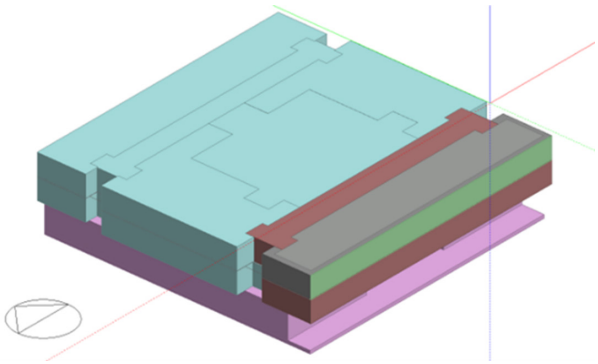
تصویر ۴. پلان‌ها و سایر مدارک معماری. مأخذ: نگارندگان.

• مدل‌سازی و داده‌های ورودی به نرم‌افزار

به‌منظور ارزیابی دقیق تأثیر استفاده از پنل‌های فتوبیوراکتور در نمای ساختمان بر مصرف انرژی، فرایند شبیه‌سازی انرژی برای طبقهٔ سوم ساختمان، که دارای کاربری تجاری است، انجام گرفت. با توجه به وسعت زیاد پلان و به‌منظور نتایج دقیق‌تر، تحلیل انرژی فضاهای داخلی در چهار جهت اصلی (شمال، جنوب، شرق و غرب) به‌صورت مجزا صورت گرفت تا تأثیر موقعیت جغرافیایی بر عملکرد انرژی سیستم نما نیز بررسی شود (تصویر ۵). در این شبیه‌سازی، چهار وضعیت مختلف برای طراحی دیوار خارجی در نظر گرفته شد و سایر عناصر ساختمانی نظیر سقف، کف، دیوارهای داخلی و سیستم‌های تأسیساتی در تمامی حالت‌ها یکسان فرض شدند تا نتایج به‌دست‌آمده صرفاً براساس تغییر در نوع نمای خارجی قابل تحلیل باشد. پارامترهای اصلی مدلسازی در جدول ۱ نمایش داده می‌شود.

فایل داده‌های آب و هوایی از نوع TMYx بوده و براساس داده‌های دورهٔ زمانی ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۳ تدوین شده است. فایل نوع TMYx حاوی داده‌های یک «سال مصنوعی» است که در آن، از میان داده‌های واقعی ماه‌هایی انتخاب می‌شوند که رفتارشان بیشترین نزدیکی را با میانگین اقلیم بلندمدت دارند. فایل مذکور از وب‌سایت معتبر OneBuilding دریافت شد. تمامی داده‌ها بدون هیچ‌گونه پردازش، اصلاح، هموارسازی یا میانگین‌گیری اضافی و بدون اعمال هر تغییری در ساختار فایل، مستقیماً در نرم‌افزار شبیه‌سازی وارد شدند. تحلیل‌ها و نتایج این پژوهش بر همین داده‌ها تکیه دارد (WMO Region 2 Asia: Iran, 2025).

به‌دلیل زیربنای وسیع طرح و امکان مقایسهٔ دقیق‌تر، نمای هر جهت جغرافیایی به‌طور جداگانه مدل‌سازی شد. فضای موردمطالعه در طبقهٔ سوم مجتمع تجاری قرار دارد. فضای اصلی با مشخصات فعالیت مطابق با استاندارد اشری[9] برای فضای تجاری (ساعت فعالیت از ۹ الی ۲۱ ، سیستم سرمایش و گرمایش مکانیکی، روشنایی و سایر تجهیزات)، و فضاهای مجاور به‌صورت حجم آدیاباتیک[10] (بدون تبادل حرارت) در نرم‌افزار مدل‌سازی شد. طول، عرض و ارتفاع مفید فضای



تصویر۵. مدل‌سازی در نرم‌افزار دیزاین بیلدر. مأخذ: نگارندگان.

موردمطالعه به ترتیب ۶۰، ۱۰ و ۴ متر لحاظ شد. دیوارهای خارجی (به‌جز نمای اصلی) و مصالح کف و سقف همراه با عایق حرارتی استاندارد در نظر گرفته شد تا تأثیر نوع نما بر مصرف انرژی دقیق‌تر محاسبه شده و مقایسه ازنظر علمی معتبر باشد. ضریب انتقال حرارت نمای ساختمان در چهار وضعیت (طبق خروجی‌های نرم‌افزار) در جدول ۲ آمده است. در مدل‌سازی نمای شیشهٔ تک جداره، بازشو شیشه‌ای ساده تک جداره به میزان ۷۰درصد سطح دیوار (حدود ۲۵درصد مساحت کف فضا) مدل‌سازی شد. در نمای شیشهٔ دوجداره، مشخصات فریم بازشو و ابعاد آن ثابت باقی ماند و تنها بخش نورگذر به شیشهٔ دوجداره ساده با لایهٔ هوا به ضخامت ۱۳ میلی‌متر استفاده شد. نمای فتوبیوراکتور از پنل‌های شیشه‌ای با فریم فلزی تشکیل شده

جدول ۱. پارامترهای اصلی مدلسازی. مأخذ: نگارندگان.

مصالح (ضریب انتقال حرارت)			
موقعیت	نام ماده	ضخامت (m)	مقدار (W/m۲K)
دیوار خارجی	بلوک سیمانی سبک با پوشش خارجی آجرنما و اندود داخلی گچ	۰/۳	۰/۳۵۱
دیوار داخلی	بلوک سفالی با اندود گچ	۰/۲	۱/۵۹
سقف	سقف بتنی با عایق پلی استایرن	۰/۳۵	۰/۴۸۶
	فعالیت		
	فضای تجاری		مقدار
الگوی فعالیت	نرخ اشغال	نفر در صد مترمربع	۱۶
	زمان فعالیت		۹ تا ۲۲
کنترل محیطی دما	گرمایش		۲۰
	تنظیم مجدد گرمایش		۱۳
	سرمایش		۲۶
	تنظیم مجدد سرمایش		۳۲
	بازشوها		
ابعاد	نسبت پنجره به دیوار (درصد)		۷۰
	ارتفاع پنجره (متر)		۲
	فاصله از کف (متر)		۰/۴
	سیستم HVAC		
نوع سیستم	فن کویل چهار لوله ای (سرد-گرم)		
تهویه	مکانیکی		
نرخ نفوذ	(ACH)		۰/۴۷۵

است. در مدل‌سازی سوسپانسیون میکروجلبک در نرم‌افزار دیزاین بیلدر، به‌دلیل عدم شناسایی خصوصیات زیستی این ماده توسط نرم‌افزار، ویژگی‌های حرارتی آن از پژوهش‌های پیشین استخراج شد. در یکی از پژوهش‌ها، ضریب هدایت حرارتی سوسپانسیون در دمای معمولی۵۵/ ۰ W/mK گزارش شد (Fu et al., 2021). همچنین، ضریب جذب خورشیدی سوسپانسیون میکروجلبک طبق داده‌های پژوهشی دیگر بین ۷۰/ ۰ تا ۸۵/ ۰ قرار دارد، که نشان‌دهندهٔ جذب ۷۰ تا ۸۵ درصد انرژی تابشی خورشید است (Verso et al., 2019). برای تعریف این ماده در نرم‌افزار، از خصوصیات متریال معادل آب با ضخامت ۷ سانتیمتر، چگالی ۱۰۵۰ kg/m³، هدایت حرارتی ۵۵/ ۰ W/mK، ضریب جذب نور خورشیدی ۷/ ۰ و بازتاب منظم ۵/ ۰ استفاده شد. سایر پارامترهای اصلی مدلسازی در جدول ۱ نشان داده شد. نمای دوپوسته از ترکیب پنل‌های فتوبیوراکتور در پوسته خارجی (با نسبت ۱۰۰درصد دیوار)، فضای واسط به عرض ۷۰ سانتیمتر و پوستهٔ داخلی از متشکل از دیوار آجری و بازشو شیشه‌ای (با نسبت ۷۰درصد سطح دیوار) تشکیل شد. به‌منظور عملکرد درست حرارتی نمای دوپوسته، هر ۴ متر دریچه‌های گردش هوا[11] در بالا و پایین نما مدل‌سازی شد تا تهویه به‌درستی انجام شود.

یافته‌ها و بحث

• تأثیر نما بر کاهش مصرف انرژی

نتایج شبیه‌سازی نشان داد که انتخاب نوع نمای ساختمان تأثیر قابل‌توجهی بر میزان مصرف انرژی دارد. به‌طورکلی، نماهای پیشرفته‌تر مانند فتوبیوراکتور جلبک و نمای دوپوسته، به‌ویژه در جهت‌های جنوبی و شرقی، عملکرد بهتری در کاهش مصرف انرژی از خود نشان دادند. این بهبود به‌دلیل قابلیت جذب و ذخیره‌سازی انرژی خورشیدی و همچنین عایق‌بندی حرارتی بهتر این نماها است. در مقابل، نماهای شیشه‌ای ساده به‌دلیل تلفات حرارتی بیشتر، مصرف انرژی بالاتری داشتند. با استفاده از نمای دوپوسته فتوبیوراکتور میانگین مصرف انرژی سالانه از ۲۷۲/۵۸ kWh/m² به ۱۷۵/۸۸ kWh/m² کاهش یافت. نتایج شبیه‌سازی در جدول ۳ نشان داده می‌شود.

طبق جدول ۳، نمای دوپوسته فتوبیوراکتور کمترین مصرف انرژی را در تمام نماها از خود نشان داد. میانگین مصرف آن از نمای شیشه‌ای ساده ۳۵درصد کمتر است. با مقایسهٔ یافته‌ها با یکدیگر و محاسبهٔ نوسان انرژی در جهات مختلف، مشخص شد نمای فتوبیوراکتور دوپوسته کمترین نوسان انرژی را در جهات مختلف دارد. پس می‌توان نتیجه گرفت شرایط داخلی پایدارتری را فراهم می‌آورد. علاوه‌بر این، با مقایسهٔ دقیق‌تر میزان کاهش مصرف انرژی در هر جهت جغرافیایی، مشخص شد این نما بیشترین تأثیر را در کاهش مصرف انرژی جبههٔ جنوبی ساختمان دارد. جزییات کاهش مصرف انرژی در جدول ۴ بیان شده است.

در نتایج شبیه‌سازی‌ها مشخص شد که اختلاف میان ضریب انتقال حرارت در چهار سناریوی شیشهٔ تک‌جداره، شیشه دوجداره، فتوبیوراکتور و نمای دوپوسته فتوبیوراکتور، به‌تنهایی

جدول ۲. ضریب انتقال حرارت نمای خارجی. مأخذ: نگارندگان.

جنس نمای خارجی	ضریب انتقال حرارت (U)	توضیحات
شیشهٔ تک‌جداره	بالا (۵/۸ W/m²K)	بدون کنترل تابش
شیشهٔ دوجداره	متوسط (≈ ۳/۳ W/m²K)	نمای رایج با عملکرد بهتر
پنل فتوبیوراکتور	متوسط (≈۳/۰۵ W/m²K)	جذب تابش و تولید زیست‌توده
دوپوسته (فتوبیوراکتور + شیشه)	۱،۰۷*	تهویه‌پذیری بین پوسته‌ها و دسترسی به پنل‌ها
*این ضریب با محاسبات ریاضی به دست آمد.		

جدول۳. نتایج شبیه‌سازی مصرف انرژی برحسب kWh/m². مأخذ: نگارندگان.

جهت	نمای شیشه‌ای تک جداره	نمای شیشه‌ای دوجداره	نمای PBR	نمای دوپوسته PBR
شمال	۲۵۰/۱۴	۲۴۰/۶۵	۱۹۹/۸۶	۱۷۸/۵۰
جنوب	۱۳/۳۰۵	۲۹۲/۶۴	۲۱۵/۷۹	۱۷۹/۱۸
شرق	۵۲/۲۷۰	۲۶۱/۲۹	۲۰۱/۹۱	۱۷۲/۳۷
غرب	۳۴/۲۶۴	۲۵۵/۳۴	۱۹۶/۷۲	۱۷۳/۴۷

قادر به تبیین تفاوت قابل‌توجه در میزان مصرف انرژی نیست. علت اصلی آن است که ضریب انتقال حرارت صرفاً میزان هدایت حرارتی پوسته را بیان می‌کند، درحالی‌که در اقلیم‌های گرم و خشک سهم عمدهٔ بار سرمایشی و گرمایشی ناشی از تابش خورشید و نفوذ حرارت تابشی است. ازاین‌رو، نماهای فتوبیوراکتور حتی در شرایطی که ضریب انتقال حرارت آنها تفاوت چشمگیری با شیشه‌های دوجداره متداول ندارند، به‌دلیل کاهش قابل‌توجه ضریب عبور خورشیدی و جذب بخش عمده‌ای از تابش توسط مایع حاوی میکروجلبک، ورود حرارت به فضای داخلی را تا حد قابل‌توجهی محدود می‌کنند. این موضوع در نتایج شبیه‌سازی به‌صورت کاهش مصرف انرژی انعکاس یافته است.

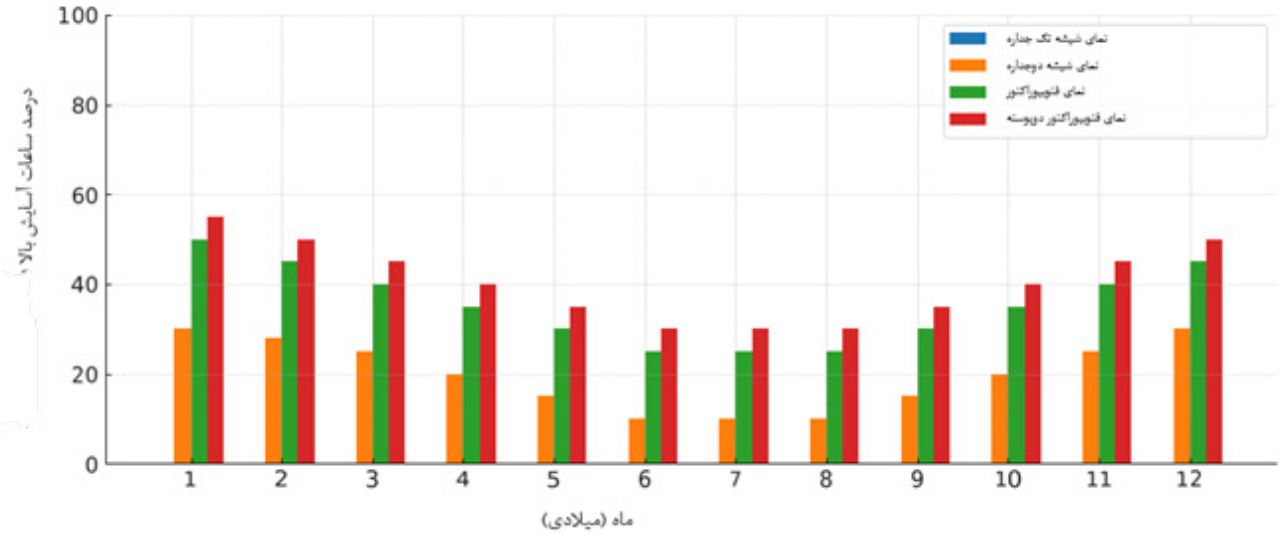
- **تأثیر نما بر آسایش حرارتی**

برای سنجش شرایط آسایش حرارتی فضاهای داخلی، از شاخص PMV[۱۲] به‌عنوان شاخص اصلی معرفی‌شده در استانداردهای اشری ۵۵ استفاده شد. این شاخص که توسط فنکر ارائه شده، میانگین احساس حرارتی افراد را در بازهٔ ۳- (خیلی سرد) تا ۳+ (خیلی گرم) بیان می‌کند. محدودهٔ مطلوب آن بین ۰/۵- تا ۰/۵+ و محدودهٔ قابل‌قبول بین ۱- تا ۱+ تعریف می‌شود. در این پژوهش، جهت ارزیابی آسایش حرارتی طرح‌های پیشنهادی، مقادیر PMV نمای جنوبی در چهار سناریوی طراحی از نرم‌افزار استخراج و نتایج به‌صورت نمودار ماهانه در تصویر ۶ ارائه شده است.

نتایج تحلیل شاخص PMV نشان داد نوع جداره نقش تعیین‌کننده‌ای در آسایش حرارتی سالانه دارد. نمای شیشه تک‌جداره عادی بیشترین نارضایتی را ایجاد کرده و تقریبا هیچ زمانی آسایش مطلوب وجود ندارد. جایگزینی آن با شیشهٔ دوجداره موجب بهبود نسبی شد، اما عملکرد این نما تابستان همچنان ضعیف باقی ماند. نمای فتوبیوراکتور تک‌پوسته شرایط مطلوب‌تری ایجاد کرد، به‌ویژه در زمستان با بیش از ۴۰درصد ساعات در محدودهٔ آسایش. بهترین عملکرد مربوط به نمای دوپوسته با فتوبیوراکتور خارجی بود که با ترکیب سایه‌اندازی، جذب کنترل‌شده تابش و لایه عایق هوا، بیشترین پایداری حرارتی و کمترین نارضایتی را فراهم کرده و پتانسیل بالایی در کاهش بار انرژی گرمایش و سرمایش دارد.

جدول ۴. کاهش مصرف انرژی (برحسب درصد). مأخذ: نگارندگان .

جهت	شیشهٔ دوجداره	فتوبیوراکتور	فتوبیوراکتور دوپوسته
شمال	٪۳/۸	٪۲۰/۱	٪۲۸/۶۵
جنوب	٪۴/۱۳	٪۲۹/۳۵	٪۴۱/۳
شرق	٪۳/۴۱	٪۲۵/۳۹	٪۳۶/۲۸
غرب	٪۳/۴۱	٪۲۵/۵۷	٪۳۴/۳۸
میانگین	٪۳/۶۹	٪۲۵/۱	٪۳۵/۱۵



تصویر ۶. آسایش حرارتی مطلوب در نماهای پیشنهادی (برحسب درصد). مأخذ: نگارندگان.

• اعتبارسنجی نرم‌افزار

با توجه به اینکه فناوری نمای فتوبیوراکتور تاکنون تنها در ساختمان BIQ هامبورگ آلمان اجرا شده، مقایسهٔ مستقیم نتایج این پژوهش با داده‌های واقعی آن پروژه به‌دلیل تفاوت‌های اقلیمی، کاربری و الگوهای بهره‌برداری امکان‌پذیر نبود. از این‌رو، اعتبارسنجی این پژوهش برپایهٔ سناریوهای مرجع و استانداردهای بین‌المللی انجام گرفت. به این منظور، تمامی مدل‌ها در نرم‌افزار دیزاین بیلدر با موتور انرژی پلاس[۱۳] و براساس مقادیر پیش‌فرض استانداردهای اشری (۵۵ و ۶۲/۱) تعریف شده و شرایط بهره‌برداری، نرخ تهویه، بارهای داخلی و پروفایل‌های حضور افراد مطابق الگوهای پیش‌فرض نرم‌افزار تنظیم شد.

علاوه‌بر این، برای اطمینان از صحت مدل شبیه‌سازی انرژی، نتایج مدل عددی با یک مطالعهٔ مرجع معتبر در زمینهٔ پنجره‌های میکروجلبک مقایسه شد. مطالعهٔ مرجع، مقاله «Algae Windows: A Novel Approach Towards Sustainable Building Design and Energy Conservation» است که در آن عملکرد حرارتی یک اتاق کنفرانس در کشور ویتنام با ابعاد ۱۴×۶×۳/۵ متر در سه وضعیت پنجرهٔ تک‌جداره، دوجداره و پنجرهٔ میکروجلبک شبیه‌سازی شده است (Nguyen et al., 2025).

ابتدا، هندسهٔ مدل شامل ابعاد و جهت‌گیری دیوارها، تعداد و موقعیت و ابعاد پنجره‌ها (۱۰ پنجره، هر یک به ابعاد ۱/۵× ۱/۳ متر) به‌طور دقیق مطابق مقاله در نرم‌افزار دیزاین بیلدر تعریف شد. سپس خواص حرارتی و نوری اجزای پوسته شامل ضریب انتقال حرارت دیوارها، سقف و کف و همچنین ضرایب انتقال حرارت و عبور نور مرئی شیشه‌ها برای سه نوع پنجرهٔ تک‌جداره، دوجداره و میکروجلبک براساس مقادیر گزارش‌شده در مقاله اعمال شد. شرایط بهره‌برداری شامل تعداد نفرات (۱۱ نفر، ۷۰ وات گرمای محسوس برای هر نفر)، توان روشنایی و تجهیزات (۷ وات بر مترمربع)، نرخ نفوذ هوا (۰/۵ تعویض هوا در ساعت)، بازهٔ دمای آسایش (۲۵ تا ۲۶ درجه سانتی‌گراد) و ساعات فعالیت سیستم از ساعت ۶ تا ۱۷ نیز مطابق مطالعه مرجع تنظیم شد.

در ادامه، برای سه حالت پنجرهٔ تک‌جداره، دوجداره و میکروجلبک، شبیه‌سازی سالانه انجام و بار سرمایش سالانه اتاق از نرم‌افزار استخراج شد. مطابق مقاله، مقادیر بار سرمایش سالانه برای سه حالت به‌ترتیب برابر ۳۰۸۲۰/۱، ۲۹۳۲۲/۹ و ۲۷۱۱۸/۷ کیلووات‌ساعت گزارش شده است. مقادیر حاصل از شبیه‌سازی انرژی برای هر سه حالت به ترتیب برابر با ۲۸۷۹۲/۸، ۲۷۳۳۹/۱ و ۲۶۵۹۷/۹ به دست آمد. برای ارزیابی دقت شبیه‌سازی، دو شاخص خطای NMBE و CV(RMSE) محاسبه شدند. مقدار NMBE برای این مطالعه ۰/۰۵۰۹- به‌دست آمد که نشان‌دهندهٔ انحراف منفی مدل از مقادیر واقعی است، بدین معنا که پیش‌بینی‌های مدل به‌طور متوسط کمی کمتر از مقادیر واقعی بودند. همچنین، CV(RMSE) ۰/۰۵۷۰ به‌دست آمد که میزان انحراف استاندارد خطا را نسبت به میانگین مقادیر واقعی نشان می‌دهد.

• تحلیل حساسیت نتایج به پارامترهای کلیدی طراحی

به‌منظور ارزیابی میزان تأثیرپذیری نتایج شبیه‌سازی از فرضیات طراحی، در این بخش تحلیل حساسیت عملکرد انرژی نمای فتوبیوراکتور دوپوسته نسبت به سه پارامتر کلیدی شامل شفافیت سوسپانسیون میکروجلبک، نرخ تهویهٔ فضای بین دوپوسته، و مقدار U-value شیشه انجام شد.

تحلیل حساسیت انجام‌شده نشان داد که تغییر غلظت سوسپانسیون میکروجلبک در طول چرخهٔ رشد تأثیر قابل‌توجه بر مصرف انرژی سالانه ساختمان موردمطالعه دارد. در مدل‌سازی انرژی، سوسپانسیون به‌صورت یک لایهٔ معادل آب با ضخامت ۷ سانتی‌متر، چگالی kg/m^3 ۱۰۵۰ و هدایت حرارتی W/mK ۰/۵۵ در نظر گرفته شد و تغییرات سه مرحلهٔ رشد (شروع کشت، نیمه رشد و قابل برداشت)، تنها از طریق اصلاح خواص نوری مؤثر لایهٔ فتوبیوراکتور اعمال شد. ضریب جذب خورشیدی به ترتیب برابر با ۰/۵۵، ۰/۷ (وضعیت پایه) و ۰/۸۵ تنظیم شد. در مرحلهٔ شروع کشت، که متناظر با غلظت‌های پایین میکروجلبک و شفافیت بالای سوسپانسیون است، افزایش عبور تابش خورشیدی از نما باعث افزایش بار سرمایشی سالانه شد، به‌طوری‌که مصرف انرژی سالانه به مقادیر تقریبی در جبهه‌های شمالی، جنوبی، شرقی و غربی به ترتیب به ۱۸۳/۹، ۱۸۶/۴، ۱۷۹/۳ و ۱۸۲/۱ ($kWh/m^2.year$) رسید که این اعداد بیانگر افزایشی در حدود ۳ تا ۶ درصد نسبت به حالت پایه هستند. در مقابل، در مرحلهٔ قابل برداشت که غلظت زیست‌توده افزایش و شفافیت سوسپانسیون کاهش یافته، کاهش انتقال تابش خورشیدی به داخل ساختمان و تقویت اثر سایه‌اندازی نما موجب کاهش مصرف انرژی سالانه شد، به‌گونه‌ای که مقادیر مصرف انرژی به حدود ۱۷۴/۹، ۱۷۳/۸، ۱۶۷/۲و ۱۶۶/۵ ($kWh/m^2.year$) به‌ترتیب در جهات شمال، جنوب، شرق و غرب کاهش یافت و کاهشی معادل ۱ تا ۵ درصد نسبت به وضعیت پایه را نشان داد. درمجموع، نتایج شبیه‌سازی بیانگر آن است که تغییر وضعیت سوسپانسیون میکروجلبک از مرحلهٔ شروع کشت تا فاز برداشت ۵ تا ۷ درصد در مصرف انرژی سالانه ساختمان ایجاد کند، که این حساسیت در جبهه‌های با دریافت تابش خورشیدی مؤثرتر، به‌ویژه نماهای شرقی و غربی، بیشترین مقدار را دارد.

جهت تحلیل حساسیت اثر تهویه نرخ تهویهٔ فضای میانی بین دوپوسته بر کاهش مصرف انرژی، حالت مبنا برابر با ۰/۵ (ACH) در نظر گرفته شد که حداقل تهویه باوجود دریچه‌های ورود و خروج هوا در پایین و بالای پوسته را نشان می‌دهد. در ادامه برای تحلیل حساسیت نتایج نسبت به نرخ تهویه، دو سناریو با نرخ تهویه ۱ و ۵ بررسی شد. نتایج نشان داد با افزایش تهویه از ۰/۵ به ۱ ، مجموع مصرف انرژی در جهت شمال ۱/۸۱درصد کاهش، جهت جنوب ۳/۰۷درصد کاهش، جهت شرق ۱/۳۴درصد کاهش و جهت غرب ۴/۳۸درصد کاهش یافت. همچنین با افزایش تهویه به ۵، مصرف انرژی در جهت شمال ۵/۴۷درصد کاهش، جهت جنوب ۸/۵۲درصد کاهش، جهت شرق به ۳/۷۶درصد کاهش و جهت غرب به ۱۲/۰۲درصد کاهش نشان داد. همچنین بررسی بارهای فصلی نشان داد بااینکه افزایش تهویهٔ فضای بین دوپوسته گرمایش فصل سرد را اندکی تشدید می‌کند، اما کاهش بار سرمایش فصل گرم غالب بوده و درمجموع سبب کاهش مصرف سالانه ساختمان می‌شود.

تحلیل حساسیت به ضریب هدایت حرارتی شیشه پنل فتوبیوراکتور نشان داد که تغییر این مقدار، حتی با دامنهٔ نسبتاً بزرگ ۲۰± درصد برای هر دو لایهٔ شیشه، تنها منجر به تغییر محدود در عملکرد انرژی ساختمان می‌شود. در این حالت، ضریب هدایت حرارتی معادل پنل فتوبیوراکتور از حدود ۳/۰۵ W/m^2K به بازهٔ تقریبی ۲/۹۸ W/m^2K تا ۳/۱۰ تغییر کرد و درنتیجه، ضریب هدایت حرارتی معادل کل نمای دوپوسته از مقدار مبنا ۱/۰۵ W/m^2K تنها به حدود ۱/۰۴ W/m^2K تا ۱/۰۶ رسید. این تغییر کمتر از ۱ درصدی در ضریب هدایت حرارتی کل نما، با توجه به سهم مقاومت حرارتی فضای واسط ۷۰ سانتی‌متری، سبب می‌شود اثر نهایی بر مصرف انرژی سالانه ساختمان در حد چند دهم درصد باقی بماند. بنابراین، نتایج بیانگر آن است که در نمای دوپوسته فتوبیوراکتور، حساسیت مصرف انرژی نسبت به U-value شیشه پایین بوده و پارامترهایی نظیر نرخ تهویهٔ فضای بین پوسته و ویژگی‌های جذب و عبور تابش خورشیدی نقش غالب‌تری در تعیین عملکرد انرژی ساختمان ایفا می‌کنند.

- **تحلیل اقتصادی**

باوجود مزیت‌های زیست‌محیطی و اثرات مثبت سیستم فتوبیوراکتور در نمای ساختمان، توسعهٔ این فناوری در مقیاس واقعی تنها در صورتی امکان‌پذیر است که ازنظر اقتصادی نیز مقرون‌به‌صرفه باشد. هزینهٔ ساخت نمای جلبکی بسته در مقیاس ساختمانی به‌طور متوسط حدود ۱۸۰۰ تا ۱۹۰۰ دلار به ازای هر مترمربع برآورد شده و هزینه‌های سالانه نگهداری و بهره‌برداری حدود ۲۶۰ تا ۲۸۵ دلار به ازای هر مترمربع است. بنابراین، توجیه اقتصادی کوتاه‌مدت این سیستم محدود است و ارزش آن عمدتاً در منافع بلندمدت زیست‌محیطی، کاهش انتشار CO_2 و بهبود عملکرد انرژی ساختمان نهفته است. تحلیل‌های موجود برپایهٔ داده‌های آزمایشی یا شبیه‌سازی است و نوسانات قیمت و یارانهٔ انرژی در ایران باعث شده فاصله میان هزینهٔ سرمایه‌گذاری و بازگشت سرمایه نسبت به سایر کشورها بیشتر باشد. این تحلیل مبتنی‌بر روش بودجه‌بندی سرمایه‌ای و با استفاده از شاخص‌های خالص ارزش فعلی و دورهٔ بازگشت سرمایه است. مفروضات کلیدی در جدول ۵ خلاصه شده‌اند.

طبق داده‌ها، درآمد حاصل از صرفه‌جویی در مصرف انرژی ساختمان نمونهٔ سال اول بالغ‌بر ۳ /۴۱۲/۵۳۶/۰۰۰ ریال (معادل ۲۶۲۲ دلار) پیش‌بینی می‌شود. این عدد نشان می‌دهد که در سال اول عملیات، حتی با صرفه‌جویی قابل‌توجه انرژی، سیستم با کسری عملیاتی بسیار بالایی مواجه است. با اعمال نرخ رشد سالانهٔ ۳۰درصد در دورهٔ ۲۰ ساله، جمع کل درآمد حاصل از صرفه‌جویی انرژی حدود

جدول ۵. فرضیات تحلیل اقتصادی. مأخذ: نگارندگان.

پارامتر	مقدار
کاهش مصرف انرژی سالانه	۹۷ kWh/m^2
زیربنای مفید ساختمان	۷۰۰۰ مترمربع
مساحت نما	۱۶۳۲ متر مربع
تعرفه برق تجاری (پایه)	۵۰۴۰ ریال (۰/۰۰۳۸ دلار)
هزینهٔ سرمایه‌گذاری اولیه (مترمربع نما)	۱۸۵۰ دلار
هزینهٔ عملیاتی و نگهداری سالانه (مترمربع نما)	۲۷۵ دلار
نرخ افزایش سالانه قیمت برق	٪۳۰
نرخ تنزیل (هزینه فرصت سرمایه)	٪۲۵
عمر مفید تحلیل	۲۰ سال

۱/۶۵۲/۰۰۰ دلار خواهد بود. در مقابل، هزینهٔ سرمایه‌گذاری اولیه برای اجرای نما و عملیات نگهداری آن، حدود ۳/۳۸۷/۶۰۰ دلار است.

این نتایج نشان می‌دهد که حتی با رشد قابل‌توجهٔ صرفه‌جویی انرژی، باتوجه به قیمت حامل‌های انرژی در ایران این سیستم در طول ۲۰ سال قادر به بازگرداندن کل سرمایه اولیهٔ خود از طریق صرفه‌جویی انرژی نیست. بنابراین برای توجیه اقتصادی کامل، لازم است یا هزینهٔ سرمایه کاهش یابد، یا منابع درآمد جانبی و سایر مزایای اقتصادی (مانند فروش زیست‌توده یا اعتبار محیط‌زیستی) در نظر گرفته شود.

• ملاحظات بیولوژیکی و تعمیر و نگهداری

باتوجه به اقلیم گرم و خشک شهر قم، برای انتخاب نوع میکروجلبک، ویژگی‌های کلیدی شامل تحمل گرما، تحمل شوری و میزان pH مطلوب درنظر گرفته شد. براین اساس، دو گونه کلرلا ولگاریس و دونالیلا سالینا به‌عنوان گونه‌های فرضی میکروجلبک انتخاب شدند. پارامترهای بیولوژیک مرتبط با آن‌ها در جدول ۶ نشان داده می‌شود (Wolkers et al., 2011).

نگهداری و تعویض واحدهای فتوبیوراکتور در نمای ساختمان برپایهٔ طراحی ماژولار انجام شده تا هر پنل به‌صورت مستقل و بدون اختلال در عملکرد کل نما قابل سرویس باشد. نگهداری دوره‌ای شامل بررسی شفافیت پنل‌ها، کنترل رشد میکروجلبک، بررسی نشتی‌ها و تمیزکاری داخلی و خارجی است که غالباً بدون باز کردن پنل انجام می‌شود. در صورت بروز خرابی، پنل معیوب به‌طور موضعی از مدار جدا شده و تعمیر یا در صورت نیاز تعویض می‌شود. این رویکرد، زمان توقف سیستم را به حداقل رسانده و با اجرای نگهداری پیشگیرانه، عمر مفید سیستم و کارایی انرژی نما حفظ می‌شود.

نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش نشان داد که انتخاب نوع نما اثر چشمگیری بر کارایی انرژی و شرایط آسایش حرارتی ساختمان دارد. نتایج شبیه‌سازی بیانگر آن است که نمای دوپوستهٔ فتوبیوراکتور در تمام جهات جغرافیایی بهترین عملکرد را داشته و نسبت به نماهای رایج (شیشه‌ای تک‌جداره و دوجداره) مصرف انرژی کمتری را ثبت کرده است. برای نمونه، در جبههٔ جنوبی مصرف انرژی از ۳۰۵/۳۱ kWh/m^2 در نمای شیشه‌ای تک‌جداره به ۱۷۹/۱۸ kWh/m^2 در نمای دوپوسته فتوبیوراکتور کاهش یافت که معادل ۴۱/۳ درصد صرفه‌جویی است. در جهت‌های شمال، شرق و غرب نیز کاهش مصرف انرژی به‌ترتیب ۲۸/۶۵، ۳۶/۲۸ و ۳۴/۳۸ درصد نسبت به نمای شیشه‌ای تک‌جداره به دست آمد. به‌طور میانگین، مصرف انرژی سالانه نمای دوپوسته فتوبیوراکتور حدود ۳۵درصد کمتر از نمای شیشه‌ای ساده بود. این کاهش، یعنی حدود ۹۷ kWh/m^2 در سال، منجر به جلوگیری از انتشار حدود ۴۶/۵۶ $kgCO_2/m^2$ به ازای هر مترمربع زیربنای ساختمان خواهد شد.

نتایج تحلیل حساسیت نشان داد عملکرد انرژی نمای فتوبیوراکتور دوپوسته بیش از هر چیز به شفافیت سوسپانسیون میکروجلبک و نرخ تهویهٔ فضای بین دوپوسته بستگی دارد، درحالی‌که تغییر ضریب انتقال حرارت پنجره تأثیر چندانی بر مصرف انرژی نشان نداد.

از منظر آسایش حرارتی نیز نتایج نشان داد که نمای دوپوسته فتوبیوراکتور با ایجاد ترکیبی از سایه‌اندازی، جذب کنترل‌شده تابش خورشید و عایق حرارتی هوایی توانست بیشترین ساعات آسایش را فراهم آورد و نوسانات حرارتی را در طول سال به حداقل برساند. در مقابل، نماهای شیشه‌ای تک‌جداره و حتی دوجداره، در بسیاری از ماه‌های سال قادر به تأمین شرایط مطلوب آسایش حرارتی نبودند.

به‌طورکلی، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از نمای دوپوسته فتوبیوراکتور علاوه‌بر کاهش قابل‌توجه مصرف انرژی، موجب ارتقای کیفیت محیط داخلی و پایداری شرایط حرارتی می‌شود. این یافته‌ها اهمیت بهره‌گیری از فناوری‌های نوین نما را در طراحی پایدار ساختمان‌ها، به‌ویژه در اقلیم‌های گرم و خشک، برجسته می‌سازد. پیشنهاد می‌شود مطالعات آتی با تمرکز بر تحلیل چرخهٔ عمر،

جدول ۶. فرضیات رشد گونه جلبک پیشنهادی. مأخذ: Wolkers et al., 2011.

گونه	کلرلا ولگاریس	دونالیلا سالینا
حداکثر سرعت رشد (day^{-1})	۱/۵	۱/۲
شدت نور بهینه ($\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$)	۲۰۰	۱۵۰
دمای بهینه (C°)	۲۵	۳۰
نیاز آب (L/g)	۲	۳
نیاز CO_2 (mol/g)	۰/۰۲	۰/۰۳

ارزیابی و برآورد اقتصادی پیشرفته، تحلیل عملکرد نور و میزان پذیرش بصری این سیستم نما انجام گیرد تا امکان به‌کارگیری عملی آن در پروژه‌های واقعی فراهم شود.

اعلام عدم تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که انجام این پژوهش برای ایشان هیچ‌گونه تعارض منافعی نداشته است.

پی‌نوشت‌ها

۱. CO_2
۲. PBR
۳. PV
۴. Carbon footprint
۵. H۲
۶. HVAC
۷. Design Builder
۸. EPW
۹. ASHRAE
۱۰. Adiabatic Component
۱۱. Vent
۱۲. Predicted Mean Vote
۱۳. EnergyPlus

فهرست منابع

• قائمی, مینا. (۱۴۰۰). *طراحی سایبان متحرک به کمک انرژی خورشید و فتوبیوراکتور های زنده جلبکی (نمونه موردی: ساختمان‌های اداری)*، [پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد، دانشگاه حکیم سبزواری].

• Akram, M. W., Mohd Zublie, M. F., Hasanuzzaman, M., & Rahim, N. A. (2022). Global prospects, advance technologies and policies of energy-saving and sustainable building systems: A review. *Sustainability, 14*(3), 1316. (https://doi.org/10.3390/su14031316?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle)

• Ali, U., Shamsi, M. H., Hoare, C., Mangina, E., & O'Donnell, J. (2021). Review of urban building energy modeling (UBEM) approaches, methods and tools using qualitative and quantitative analysis. *Energy and buildings, 246*, 111073. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111073

• Arora, R., Sudhakar, K., & Rana, R. (2024). Photobioreactors for building integration: A overview of designs and architectural potential. *Heliyon, 10*. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e35168

• Bastanfard, M. (2018). Controlling Air Pollution with the Use of Bio Facades (A solution to Control Air Pollution in Tehran). *The Monthly Scientific Journal of Bagh-e Nazar, 15*(65), 25-40. https://doi.org/10.22034/bagh.2018.74077

• Bazazzadeh, H. ., Nadolny, A. ., & Safaei, S. S. H. . (2021). Climate Change and Building Energy Consumption: A Review of the Impact of Weather Parameters Influenced by Climate Change on Household Heating and Cooling Demands of Buildings. *European Journal of Sustainable Development, 10*(2), 1-12 https://doi.org/10.14207/ejsd.2021.v10n2p1

• Biloria, N., & Thakkar, Y. (2020). Integrating algae building technology in the built environment: A cost and benefit perspective. *Frontiers of Architectural Research, 9*(2), 370-384. (https://doi.org/10.1016/j.foar.2019.12.004)

• Borschewski, D., Voigt, M. P., Albrecht, S., Roth, D., Kreimeyer, M., & Leistner, P. (2023). Why are adaptive facades not widely used in practice? Identifying ecological and economical benefits with life cycle assessment. *Building and Environment, 232*, 110069. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110069

• Chayaamor-Heil, N., & Hannachi-Belkadi, N. (2017). Towards a platform of investigative tools for biomimicry as a new approach for energy-efficient building design. *Buildings, 7*(1), 19. https://doi.org/10.3390/buildings7010019?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle

• Elmalky, A. M., & Araji, M. T. (2023).. Multi-objective problem of optimizing heat transfer and energy production in algal bioreactive façades. *Energy, 268*, 126650. https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.126650

• Fu, Q., Chen, H., Xiao, C., Huang, Y., Xia, A., Zhu, X., & Liao, Q. (2021). Investigation on effective thermal conductivity of microalgae suspensions in a shear flow. *Applied Thermal Engineering, 186*, 116440. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116440

• Galimova, T., Ram, M., Bogdanov, D., Fasihi, M., Gulagi, A., Khalili, S., & Breyer, C. (2023). Global trading of renewable electricity-based fuels and chemicals to enhance the energy transition across all sectors towards sustainability. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 183*, 113420. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113420

• Girard, F., Toublanc, C., Andres, Y., Dechandol, E., & Pruvost, J. (2023). System modeling of the thermal behavior of a building equipped with facade-integrated photobioreactors: Validation and comparative analysis. *Energy and buildings, 292*, 113147. (https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113147)

• Gondal, I. A., Syed Athar, M., & Khurram, M. (2021). Role of passive design and alternative energy in building energy optimization. *Indoor and Built Environment, 30*(2), 278-289. https://doi.org/10.1177/1420326X19887486?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle

• Gouveia, L. (2011). *Microalgae as a Feedstock for Biofuels. In Microalgae as a Feedstock for Biofuels* (pp. 1-69). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

• Haghir, S., Tashakori, L., Rezazadeh, H. R., & Ahmadi,

F. (2020). Algae Façade for Reducing CO2 Emission and Mitigating Global Warming (Case Study: Tehran Enghelab Street). *The Monthly Scientific Journal of Bagh-e Nazar, 17*(89), 33-44. https://doi.org/10.22034/bagh.2020.188585.4147

• Hanafi, W. H. H. (2021). Bio-algae: a study of an interactive facade for commercial buildings in populated cities. *Journal of Engineering and Applied Science, 68*(1), 37 .https://doi.org/10.1186/s44147-021-00037-5)

• Hosseini Tafreshi, A., & Shariati, M. (2009). Dunaliella biotechnology: methods and applications. *Journal of applied microbiology, 107*(1), 14-35. https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2009.04153.x

• Janaki, S. T., Madheswaran, D. K., Naresh, G., & Praveenkumar, T. (2024). Beyond Fossil: The synthetic fuel surge for a green energy resurgence. *Clean Energy, zkae050. Clean Energy, 8*(5), 1–19. https://doi.org/10.1093/ce/zkae050

• Jun, H., & Fei, H. (2024). *Research on multi-objective optimization of building energy efficiency based on energy consumption and thermal comfort.* Building Services Engineering Research & Technology. https://doi.org/10.1177/01436244241240066

• Kim, K.-H. (2013). *A feasibility study of an algae façade system. Proceedings of international conference on sustainable building Asia* (SB13). https://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB_DC26782.pdf

• *Largest sectors in final consumption in Iran* (IEA). (2022). The International Energy Agency. Retrieved 2/12 from (https://www.iea.org/countries/iran/efficiency-demand)

• Li, S., Li, X., & Ho, S.-H. (2022). Microalgae as a solution of third world energy crisis for biofuels production from wastewater toward carbon neutrality: An updated review. *Chemosphere, 291*, 132863. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132863.

• Martokusumo, W., Koerniawan, M. D., Poerbo, H. W., Ardiani, N. A., & Krisanti, S. H. (2017). Algae and building façade revisited. a study of façade system for infill design. *Journal of Architecture and Urbanism, 41*(4), 296-304. (https://doi.org/10.3846/20297955.2017.1411847.)

• Myers, A. (2022). *Stanford engineers create a catalyst that can turn carbon dioxide into gasoline 1,000 times more efficiently.* Stanford Report. Retrieved 2/11 from (https://news.stanford.edu/stories/2022/02/turning-carbon-dioxide-gasoline-efficiently)

• Negev, E., Yezioro, A., Polikovsky, M., Kribus, A., Cory, J., Shashua-Bar, L., & Golberg, A. (2019). Algae Window for reducing energy consumption of building structures in the Mediterranean city of Tel-Aviv, Israel. *Energy and buildings, 204*, 109460. (https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109460)

• Nguyen, T. D., Le, H. T. H., Khoo, K. S., & Bui, H. M. (2025). Algae Windows: A Novel Approach Towards Sustainable Building Design and Energy Conservation. *Polish Journal of Environmental Studies 34*(3), 3243-3255. https://doi.org/10.15244/pjoes/188699

• Pease, P., Chhabra, J., & Zolfaghari, Z. (2021). *Planning for net zero by 2050, what HVAC system interventions will today's code minimum commercial buildings require? arXiv preprint arXiv:2111.03899.* https://doi.org/10.48550/arXiv.2111.03899

• Pistocchi, R., Guerrini, F., Vanucci, S., Montalbetti, L., Simonazzi, M., Mazzotti, M., Abbondanzi, F., Emiliani, G., & Pezzolesi, L. (2024). Good practices for the industrial cultivation of the cyanobacterium Arthrospira platensis under a greenhouse in a temperate zone (northern Italy). *Italian Botanist, 18,* 193-214. https://doi.org/10.3897/italianbotanist.18.143333

• Pozzobon, V. (2024). Microalgae bio-reactive façade: A radiative-convective model powered by hourly illumination computation and historical weather data. *Journal of Building Engineering, 90*, 109407. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109407

• Ramadhan, A. M., & Mahmoud, A. H. (2023). Evaluating the efficiency of a living wall facade as a sustainable energy-saving alternative in hot arid regions. *Journal of Engineering and Applied Science, 70*(1), 1-25. https://doi.org/10.1186/s44147-023-00259-9

• Salisbury, A., Blanusa, T., Bostock, H., & Perry, J. (2023). Careful plant choice can deliver more biodiverse vertical greening (green façades). *Urban Forestry & Urban Greening, 89*, 128118. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2023.128118

• Sedighi, M., Pourmoghaddam Qhazvini, P., & Amidpour, M. (2023). Algae-powered buildings: A review of an innovative, sustainable approach in the built environment. *Sustainability, 15*(4), 3729. https://doi.org/10.3390/su15043729?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle

• Shankar, U., Lenka, S. K., Ackland, M. L., & Callahan, D. L. (2022). Review of the structures and functions of algal photoreceptors to optimize bioproduct production with novel bioreactor designs for strain improvement. *Biotechnology and Bioengineering, 119*(8), 2031-2045. https://doi.org/10.1002/bit.28116

• Sonta, A., Dougherty, T. R., & Jain, R. K. (2021). Data-driven optimization of building layouts for energy efficiency. *Energy and buildings, 238*, 110. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110815

• Sukačová, K., Lošák, P., Brummer, V., Máša, V., Vícha, D., & Zavřel, T. (2021). Perspective design of algae photobioreactor for greenhouses—A comparative study. *Energies, 14*(5), 1338. https://doi.org/10.3390/en14051338?urlappend=%3Futm_

source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle

• Talaei, M., & Prieto, A. (2024). *A review on performance of sustainable microalgae photobioreactor façades technology: exploring challenges and advantages*. Architectural Science Review, 1-28. https://doi.org/10.1080/00038628.2024.2305889?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle

• Talaei, M., Mahdavinejad, M., Azari, R., Haghighi, H. M., & Atashdast, A. (2022). *Thermal and energy performance of a user-responsive microalgae bioreactive façade for climate adaptability*. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 52, 101894. (https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101894)

• Taylor J. E., & Bergés, M. (2014). Special Issue on Computational Approaches to Understand and Reduce Energy Consumption in the Built Environment. *Journal of Computing in Civil Engineering 28*(1), 1-1. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000359

• Verso, V. R. L., Javadi, M. H., Pagliolico, S., Carbonaro, C., & Sassi, G. (2019). Photobioreactors as a dynamic shading system conceived for an outdoor workspace of the state library of Queensland in Brisbane: Study of daylighting performances. *Journal of Daylighting, 6*(2), 148-168. https://solarlits.com/jd/6-148

• Villalba, M. R., Cervera, R., & Sánchez, J. (2023). Green Solutions for Urban Sustainability: Photobioreactors for Algae Cultivation on Façades and Artificial Trees. *Buildings, 13*(6), 1541. https://www.mdpi.com/2075-5309/13/6/1541

• Wang, B., Lan, C. Q., & Horsman, M. (2012). Closed photobioreactors for production of microalgal biomasses. *Biotechnology advances, 30*(4), 904-912. https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2012.01.019

• *WMO Region 2 Asia: Iran.* (2025). https://climate.onebuilding.org/WMO_Region_2_Asia/IRN_Iran/index.html#IDQM_Qom-

• Wolkers, H., Barbosa, M., Kleinegris, D. M., Bosma, R., Wijffels, R. H., & Harmsen, P. (2011). Microalgae: the green gold of the future?: large-scale sustainable cultivation of microalgae for the production of bulk commodities.

• Yaman, Y., Tokuç, A., Sener, I., Altunacar, N., Köktürk, G., Deniz, I., & Ezan, M. (2021). Energy Efficient Buildings with Algae. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*.https://doi.org/10.1088/1755-1315/798/1/012001?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle

• Zhang, S., Zhang, L., Xu, G., Li, F., & Li, X. (2022). A review on biodiesel production from microalgae: Influencing parameters and recent advanced technologies. *Frontiers in Microbiology, 13*, 970028. https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.970028

• Zhao, R., Wang, L., Wang, Q., Dai, S., Han, Z., Lei, X., & Mao, X. Z. (2022). Integrated model for design, optimization, scale-up, culture scheme, and production evaluation of a bioreactor and its application for improving algal biomass and carbon fixation in bioreactors. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 10*(48), 15939-15949. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c05332

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:
آخوندی، فاطمه؛ فرشچی، حمیدرضا و میرزایی، روح‌الله. (۱۴۰۵). طراحی نمای ساختمان با رویکرد بهینه‌سازی مصرف انرژی با بهره‌گیری از ریزساختارهای زنده (مطالعه موردی: ساختمان تجاری در شهر قم). *باغ نظر*، ۲۳(۱۶۰)، ۵-۱۸.

DOI: 10.22034/bagh.2026.546729.5889
URL: https://www.bagh-sj.com/article_246394.html