

Evaluation of the Role of High-Quality and Sustainable Materials in Reducing Construction and Maintenance Costs of Green Buildings

1. Yosef Asadi Khanegah[✉]*: Department of Architecture, Ta.C., Islamic Azad University, Tabriz, Iran.

*Corresponding Author's Email Address: yosef.asadikhanegah@iau.ac.ir

How to Cite: Asadi Khanegah, Y. (2024). Evaluation of the Role of High-Quality and Sustainable Materials in Reducing Construction and Maintenance Costs of Green Buildings. *Manifestation of Art in Architecture and Urban Engineering*, 2(4), 190-206.

Abstract:

The objective of this study is to evaluate the impact of double-skin façade (DSF) systems and hybrid green high-performance concrete (HP-G-HyFRC) composites on reducing construction, maintenance, and energy costs of green buildings. The study employed COMFEN5 energy modeling and Life Cycle Assessment (LCA) to analyze five scenarios combining solid walls (SW), double-skin façades (DSF), single glazing (SG), double glazing (DG), and expanded polystyrene (EP). The functional unit consisted of a standard bedroom. Cooling energy consumption, CO₂ emissions, U-factor values, embodied energy of materials, and structural performance were evaluated. Mechanical properties of HP-G-HyFRC were assessed through flexural testing. Embodied energy and carbon emissions were calculated using the Green Concrete LCA tool. Energy modeling results showed that the DSF system reduced cooling energy consumption by 10.6% compared to SW. The combined DSF+DG configuration reduced energy use by 18% relative to the baseline (SW+SG). Adding EP insulation to DSF produced an additional 14% reduction. Although HP-G-HyFRC exhibited higher embodied energy than normal-strength concrete, CO₂ emissions in the DSF system were 16% lower as a result of incorporating industrial waste materials such as fly ash and slag. Flexural tests revealed that DSF elements had higher ductility and stiffness relative to solid wall elements, supporting superior mechanical performance and improved durability. U-factor analysis confirmed significantly improved thermal resistance in DSF and DSF+EP configurations. DSF systems combined with HP-G-HyFRC composites effectively enhance thermal performance, reduce operational energy consumption, lower maintenance costs, and mitigate environmental impacts in green buildings. Utilizing industrial by-products in sustainable concrete formulations provides additional ecological and economic advantages, supporting the broader transition to environmentally responsible construction practices.

Keywords: Sustainable materials; Green buildings; Double-skin façade; Hybrid green concrete; Life cycle assessment; Embodied energy.

Received: 24 August 2024

Revised: 10 February 2025

Accepted: 17 February 2025

Published: 18 March 2025



Copyright: © 2024 by the authors. Published under the terms and conditions of Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License.

ارزیابی نقش مصالح باکیفیت و پایدار در کاهش هزینه‌های ساخت و نگهداری ساختمان‌های سبز

۱. یوسف اسدی خانقاه*^{id}: گروه معماری، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران. (نویسنده مسئول)

*پست الکترونیک نویسنده مسئول: yosef.asadikhanegah@iau.ac.ir

نحوه استناددهی: اسدی خانقاه، یوسف. (۱۴۰۳). ارزیابی نقش مصالح باکیفیت و پایدار در کاهش هزینه‌های ساخت و نگهداری ساختمان‌های سبز. تجلی هنر در معماری و شهرسازی، ۲(۴)، ۱۹۰-۲۰۶.

چکیده

هدف این پژوهش ارزیابی تأثیر سیستم‌های نمای دوپوسته و کامپوزیت‌های بتن هیبریدی سبز (HP-G-HyFRC) بر کاهش هزینه‌های ساخت و نگهداری و مصرف انرژی در ساختمان‌های سبز است. این پژوهش با استفاده از مدل‌سازی انرژی در نرم‌افزار COMFEN5 و تحلیل چرخه عمر (LCA) انجام شد. پنج سناریوی مختلف شامل ترکیب نمای جامد (SW)، نمای دوپوسته (DSF)، شیشه تک‌جداره (SG)، شیشه دوجداره (DG) و عایق پلی‌استایرن انبساطی (EP) مورد بررسی قرار گرفت. واحد عملکرد شامل یک اتاق خواب استاندارد بود و شاخص‌هایی مانند مصرف انرژی سرمایشی، انتشار CO₂، ضریب انتقال حرارت (U-factor) و انرژی دربرداشته در تولید مواد اندازه‌گیری شد. ویژگی‌های مکانیکی کامپوزیت‌ها نیز از طریق آزمایش‌های خمشی بررسی گردید. یافته‌ها نشان داد سیستم DSF مصرف انرژی سرمایشی را نسبت به SW به میزان ۱۰.۶٪ کاهش می‌دهد. ترکیب DSF+DG منجر به کاهش ۱۸٪ مصرف انرژی نسبت به حالت پایه (SW+SG) شد. افزودن EP در DSF موجب کاهش اضافی ۱۴٪ انرژی گردید. با وجود افزایش انرژی دربرداشته HP-G-HyFRC نسبت به بتن معمولی، انتشار CO₂ در سیستم DSF حدود ۱۶٪ کمتر بود که ناشی از استفاده از سرباره و خاکستر بادی به‌عنوان جایگزین سیمان است. نتایج مکانیکی نیز نشان داد که DSF سختی و داکتیلیته بالاتری نسبت به نمای جامد دارد. پژوهش حاضر نشان می‌دهد که ترکیب سیستم نمای دوپوسته با کامپوزیت‌های بتن هیبریدی سبز می‌تواند به‌طور مؤثر مصرف انرژی، انتشار آلاینده‌ها و هزینه‌های نگهداری را کاهش داده و عملکرد حرارتی و دوام ساختمان‌های سبز را بهبود دهد. استفاده از مصالح پایدار مبتنی بر مواد زائد صنعتی علاوه بر مزایای محیطی، از نظر اقتصادی نیز در بلندمدت به‌صرفه است.

کلیدواژه‌ها: مصالح پایدار؛ ساختمان سبز؛ نمای دوپوسته؛ بتن هیبریدی سبز؛ چرخه عمر؛ انرژی دربرداشته.

تاریخ دریافت: ۳ شهریور ۱۴۰۳

تاریخ بازنگری: ۲۲ بهمن ۱۴۰۳

تاریخ پذیرش: ۲۹ بهمن ۱۴۰۳

تاریخ انتشار: ۲۸ اسفند ۱۴۰۳



مقدمه

رشد روزافزون جمعیت، توسعه فزاینده شهرها و افزایش مصرف انرژی در بخش ساختمان، دغدغه‌های جهانی جدیدی ایجاد کرده است که در کانون آن‌ها ضرورت حرکت به سوی طراحی و ساخت ساختمان‌های پایدار قرار دارد. بخش ساختمان به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان انرژی‌های فسیلی و منابع طبیعی، سهم قابل توجهی در تولید آلاینده‌های زیست‌محیطی و انتشار گازهای گلخانه‌ای دارد. در چنین فضایی، رویکرد معماری سبز با هدف کاهش مصرف انرژی و ارتقای کارایی زیست‌محیطی، به‌عنوان یکی از جریان‌های مهم در معماری معاصر شکل گرفته است. در همین راستا، مصالح ساختمانی به‌عنوان یکی از مؤثرترین مؤلفه‌های چرخه عمر ساختمان، نقش اساسی در تعیین میزان انرژی مصرفی، دوام سازه، هزینه‌های نگهداری و میزان اثرات زیست‌محیطی بر جای می‌گذارند. بنابراین استفاده از مصالح باکیفیت و پایدار، امروز نه یک انتخاب، بلکه ضرورتی برای مدیریت هزینه‌ها و کاهش فشارهای زیست‌محیطی محسوب می‌شود.

پژوهش‌های متعددی نشان داده‌اند که تکنیک‌ها و مصالح پایدار قادرند به‌صورت چشمگیری مصرف انرژی را کاهش دهند. برای مثال، تکنیک‌هایی همچون بام سبز به‌عنوان یکی از عناصر مهم معماری سبز در مناطق گرم و خشک توانسته‌اند عملکرد حرارتی ساختمان را ارتقا داده و مصرف انرژی را کاهش دهند، چنان‌که نتایج به‌دست آمده در پژوهش علی و همکاران نشان می‌دهد که استفاده از بام سبز در ساختمان‌های آموزشی شهر واسط عراق موجب کاهش معنادار مصرف انرژی سالانه شده است (1). از سوی دیگر، بررسی معماری سبز ایران نیز نشان داده است که بهره‌گیری از اصول پایدار در طراحی، می‌تواند به شکل قابل توجهی در کاهش مصرف انرژی و افزایش کیفیت زیست‌محیطی مؤثر باشد (2). به همین دلیل توجه به مصالح باکیفیت و رویکردهای نوین ساخت، بخش مهمی از تلاش‌های معماران و پژوهشگران را در سال‌های اخیر به خود اختصاص داده است.

با وجود افزایش تمایل جهانی برای استفاده از مصالح پایدار، یکی از چالش‌های اساسی در مسیر تحقق این هدف، محدودیت‌های مرتبط با دوام، هزینه، و ویژگی‌های مکانیکی برخی از مصالح متداول است. در همین زمینه، پیشرفت‌های فناورانه همچون توسعه ژئوپلیمرها، گامی مهم در کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی صنعت ساختمان بوده است. ژئوپلیمرها به‌دلیل استفاده از مواد زائد صنعتی مانند سرباره و خاکستر بادی و نیاز کمتر به سیمان، جایگزین‌های پایداری برای مصالح سنتی به شمار می‌آیند (3). کاهش انرژی دربرداشته و انتشار کمتر دی‌اکسید کربن در تولید این نوع مصالح، آن‌ها را برای استفاده در ساخت‌وسازهای سبز مناسب‌تر می‌سازد.

علاوه بر این، ارتقای عملکرد مصالح و افزایش طول عمر آن‌ها نیز در کاهش هزینه‌های نگهداری ساختمان‌ها نقشی کلیدی ایفا می‌کند. با توجه به مطالعات انجام‌شده در حوزه مهندسی سازه، رفتار مکانیکی مصالح به‌ویژه در مواجهه با نیروهای خمشی و کششی تحت تأثیر پدیده «اثر اندازه» قرار دارد که نخستین بار توسط بازانت مطرح شد (4). مطابق این نظریه، مقاومت و شکل‌پذیری مصالح در مقیاس‌های مختلف تغییر می‌کند، موضوعی که در طراحی سیستم‌های نما و مصالح نوین مانند بتن‌های الیافی هیبریدی اهمیت ویژه‌ای دارد. تحلیل‌های تجربی انجام‌شده توسط نگوین و همکاران نیز نشان داده است که در بتن‌های الیافی با کارایی بالا، افزایش ضخامت المان‌ها می‌تواند به تغییر رفتار خمشی و کاهش شکل‌پذیری منجر شود (5, 6). این یافته‌ها اهمیت انتخاب هوشمندانه مصالح و ترکیب مواد را برای دستیابی به بیشترین کارایی و دوام نشان می‌دهد.

از سوی دیگر، توسعه معماری شهری پایدار، نیازمند توجه هم‌زمان به انرژی عملیاتی و انرژی دربرداشته مصالح است. پژوهش‌های صورت گرفته پیرامون مقایسه مصالح سنتی و پایدار، نشان می‌دهد که برخی مصالح مانند بتن مسلح یا آسفالت دارای اثرات زیست‌محیطی قابل توجهی هستند و انتخاب مصالح جایگزین می‌تواند مزایای قابل ملاحظه‌ای به همراه داشته باشد. برای نمونه، مقایسه پیامدهای زیست‌محیطی آسفالت و بتن مسلح نشان داده است که نوع مصالح و فرآیند تولید آن‌ها، نقش مهمی در انتشار CO₂ و میزان انرژی مصرفی دارند (7). این موضوع ضرورت توجه به مصالح نوین و بازیافت‌پذیر در ساختمان‌سازی را برای دستیابی به اهداف توسعه پایدار تقویت می‌کند.

اهمیت توجه به مسائل زیست‌محیطی، تنها محدود به معماری سبز نیست، بلکه در حوزه حقوق بین‌الملل محیط زیست نیز به‌عنوان یکی از محورهای اصلی پایداری مطرح شده است. بر اساس مطالعات خلعتبری و همکاران، مفهوم آلودگی و خسارت محیط زیستی در اسناد بین‌المللی جایگاه ویژه‌ای یافته و تأکید بر مدیریت منابع و کنترل آسیب‌ها، از مهم‌ترین اصول زیست‌محیطی در سطح جهانی به شمار می‌رود (8). این واقعیت نشان می‌دهد که کاهش آسیب‌های ناشی از ساخت‌وساز مستلزم بهره‌گیری از راهکارهای مبتنی بر مصالح پایدار و روش‌های نوین ساختمانی است.

توجه به روش‌های نوین ساخت، یکی از ابزارهای کلیدی برای تبدیل معماری سنتی به معماری پایدار است. شیخ‌لویی بناب و شقاقی در پژوهشی نشان داده‌اند که انتخاب فناوری‌های نوین ساخت می‌تواند منجر به کاهش هدررفت انرژی، افزایش دوام سازه، و حرکت به سمت معماری سبز گردد (9). از سوی دیگر، استفاده از مصالح پایدار در معماری تاریخی ایران مانند سازه‌های گنبدی و طاقی دوران ساسانی نیز مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. بررسی‌های انجام‌شده توسط منصوری نشان می‌دهد که استفاده از مصالح طبیعی و پایدار در معماری ساسانی، علاوه بر استحکام بالا، نقش مهمی در کنترل شرایط محیطی داشته است (10). این یافته‌ها ثابت می‌کنند که بهره‌گیری از مصالح پایدار، نه تنها یک راهکار مدرن، بلکه ریشه در سنت‌های ساخت‌وساز ایرانی دارد.

از سوی دیگر، مسئله مدیریت ریسک و ارزیابی جوانب مختلف ساختمان‌های سبز نیز از منظر سیاست‌گذاری اهمیت دارد. براساس نتایج پژوهش زرین‌پور و همکاران، استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مانند DEMATEL و ANP می‌تواند در ارزیابی ریسک ساختمان‌های سبز نقش کلیدی داشته باشد و معیارهای مؤثر در بهبود کارایی زیست‌محیطی ساختمان‌ها را شناسایی کند (11). این موضوع نشان می‌دهد که مصالح باکیفیت تنها یکی از ارکان ساخت‌وساز سبز است و تحلیل ساختاری و عملکردی ساختمان‌ها نیز باید با دقت مورد توجه قرار گیرد.

توسعه سیاست‌های تشویقی و چارچوب‌های حمایتی نیز برای افزایش گرایش به مصالح سبز ضروری است. نتایج پژوهش زندی و همکاران در توسعه مدل‌های ارزیابی سیاست‌ها نشان می‌دهد که اجرای سیاست‌های مشوق در سطح کلان می‌تواند سازمان‌ها و سازندگان را به سمت استفاده از مصالح و فناوری‌های پایدار سوق دهد (12). اما چالش اصلی در این مسیر، عدم شناخت دقیق سازندگان و مهندسان نسبت به بازده اقتصادی مصالح پایدار و نبود اطلاعات کافی درباره مزایا و دوام مصالح جایگزین است. مشابه این وضعیت در پژوهش‌های مرتبط با معماری سبز شهری نیز مشاهده شده است، چنان‌که بررسی‌های رضائیان کله‌بستی نشان داده است که بسیاری از شهرها با محدودیت‌های دانش، تقاضا و سیاست‌های تشویقی مواجه هستند (13).

در این میان، سیستم‌های نمای دوپوسته (DSF) و کامپوزیت‌های بتن هیبریدی سبز (HP-G-HyFRC) از جمله فناوری‌های نوین و کارآمدی هستند که می‌توانند به‌طور هم‌زمان عملکرد حرارتی، دوام سازه‌ای و بهره‌وری انرژی را بهبود دهند. DSF با ایجاد یک لایه میانی هوا، مقاومت حرارتی دیوار را افزایش می‌دهد و مصرف انرژی سرمایشی را به شدت کاهش می‌دهد. همچنین کامپوزیت‌های HP-G-HyFRC، به‌دلیل داشتن الیاف هیبریدی و استفاده از مواد زائد

صنعتی، علاوه بر افزایش پایداری زیست محیطی، ویژگی‌های مکانیکی بسیار بهتری نسبت به مصالح معمولی ارائه می‌دهند. یافته‌های تجربی نشان داده است که توزیع ترک‌های ریز و افزایش شکل‌پذیری در این نوع بتن باعث بهبود دوام طولانی‌مدت و کاهش هزینه‌های نگهداری می‌شود (5, 6). این ویژگی‌ها باعث می‌شود ترکیب سیستم DSF با کامپوزیت HP-G-HyFRC به یک راهکار کاملاً مناسب برای ساخت و ساز سبز تبدیل شود.

بنابراین، با توجه به چالش‌های گسترده انرژی، هزینه، پایداری و اثرات زیست محیطی، و با عنایت به مطالعات گسترده در زمینه معماری سبز (2, 14)، مصالح پایدار (3)، اثرات زیست محیطی مصالح (7)، سیاست‌گذاری‌های تشویقی (12)، روش‌های نوین ساخت (9) و رفتار مکانیکی مصالح (4, 5)، ضرورت انجام پژوهشی جامع به منظور بررسی نقش مصالح باکیفیت و پایدار در کاهش هزینه‌های ساخت و نگهداری ساختمان‌های سبز به وضوح احساس می‌شود. بر این اساس، هدف این پژوهش ارزیابی نقش مصالح باکیفیت و پایدار، به ویژه سیستم نمای دوپوسته و کامپوزیت‌های بتن هیبریدی سبز، در کاهش هزینه‌های ساخت و نگهداری ساختمان‌های سبز است.

روش شناسی

این پژوهش با هدف ارزیابی تأثیر سیستم‌های نمای دوپوسته (DSF) بر مصرف انرژی و انتشار کربن دی اکسید در ساختمان‌ها انجام شده است. برای این منظور، از ابزار مدل‌سازی COMFEN5 استفاده شد تا مصرف انرژی و انتشار کربن دی اکسید مورد نیاز برای حفظ دمای مناسب در اتاق به طور دقیق ارزیابی گردد. در این مطالعه، پنج سناریو با ترکیب‌های مختلف از سیستم‌های نمای جامد (SW)، نمای دوپوسته (DSF)، شیشه تک‌جداره (SG)، شیشه دوجداره (DG) و عایق پلی‌استایرن انبساطی (EP) برای مقایسه تأثیر آن‌ها بر مصرف انرژی و انتشار کربن دی اکسید در شرایط مختلف بررسی شد. واحد عملکرد این پژوهش یک اتاق خواب در یک ساختمان چندطبقه بود که ویژگی‌هایی نظیر ارتفاع ۲٫۸ متر، عرض ۴ متر و عمق ۴ متر داشت. مساحت پنجره به ۳۰٪ از مساحت نمای کل در نظر گرفته شد و ابعاد پنجره به صورت $۱٫۶۸ \times ۲$ متر فرض شد. نسبت پنجره به دیوار برابر ۳۰٪ انتخاب شد. برای سیستم نمای جامد، از بتن معمولی با نسبت آب به سیمان ۰٫۵۴ و برای تولید لایه‌های سیستم DSF از بتن الیافی هیبریدی سبز با کارایی بالا HP-G-HyFRC با نسبت آب به بایندر ۰٫۲۵ استفاده شد. در این کامپوزیت، از ترکیب سیمان، سرباره، خاکستر بادی و الیاف فولادی و پلی وینیل الکل (PVA) به عنوان تقویت‌کننده‌های گسسته استفاده شد. دمای مطلوب برای راحتی ساکنان ساختمان ۲۴ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد و برای تحلیل تنها مصرف انرژی سرمایشی و انتشار کربن دی اکسید در نظر گرفته شد. در مدل‌سازی، هیچ بار تجهیزات به مدل اضافه نشد و تنها بار سرمایشی در نظر گرفته شد. از تحلیل‌های مدل‌سازی برای بررسی اثرات تغییرات در ویژگی‌های سیستم نمای ساختمان مانند نوع شیشه و عایق استفاده شد. نتایج مدل‌سازی برای هر سناریو شامل مصرف انرژی سرمایشی، انتشار کربن دی اکسید و صرفه‌جویی در انرژی به طور جداگانه گزارش شده است. همچنین، تأثیرات استفاده از عایق پلی‌استایرن در DSF به طور خاص مورد بررسی قرار گرفت. برای محاسبه تأثیرات زیست محیطی تولید بتن و مواد مختلف، از ابزار Green Concrete LCA استفاده شد. این ابزار تأثیرات زیست محیطی هر مرحله از تولید

¹ Solid Wall

² Single pane glass

³ double glass

⁴ Expanded polystyrene

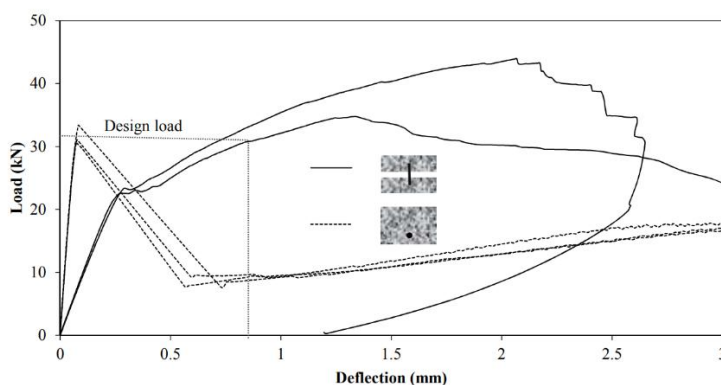
⁵ Polyvinyl alcohol

بتن و مواد آن، شامل تولید سیمان، حمل و نقل، ساخت و تخریب را محاسبه می‌کند. در نهایت، تأثیرات زیست‌محیطی سیستم‌های DSF در کاهش مصرف انرژی و انتشار کربن دی‌اکسید با استفاده از مدل‌های مختلف سناریو به‌طور دقیق تحلیل شد. همچنین، مزایای استفاده از الیاف هیبریدی و استفاده از مواد زائد صنعتی مانند سرباره و خاکستر بادی در سیستم‌های DSF برای کاهش تأثیرات منفی بر محیط زیست بررسی شد.

یافته‌ها

ویژگی‌های مکانیکی سیستم‌های نما

مقاومت‌های فشاری نمونه‌های استوانه‌ای 100×200 میلی‌متر که به مدت ۲۸ روز مرطوب نگهداری شده‌اند، برای بتن ساده ۴۵ مگاپاسکال و برای بتن الیافی هیبریدی سبز با کارایی بالا (HP-G-HyFRC) ۸۴ مگاپاسکال به دست آمد. پاسخ خمشی عناصر نمای جامد (SW) و نمای دوپوسته (DSF) در شکل ۱ نشان داده شده است. نمونه‌ها تا جابجایی $L/150$ یا ۳ میلی‌متر بارگذاری شدند. مشاهده شد که پس از ترک خوردن ماتریس، ظرفیت باربری نمای جامد به طور ناگهانی به دلیل کمبود تقویت‌کننده کاهش یافت. این کاهش همچنین نشان‌دهنده تشکیل یک ترک بزرگ در سطح پایین سیستم بود. از طرف دیگر، ظرفیت باربری عناصر DSF به تدریج پس از اولین ترک که در انتهای شاخه الاستیک منحنی‌های بار-انحراف ایجاد شد، افزایش یافت. بارهای نهایی و داکتیلیته آن‌ها بالاتر از مقادیر نمای جامد بود. ظرفیت ساختاری بالاتر DSF در هنگام حمل و نصب بسیار حائز اهمیت است. این موضوع تضمین می‌کند که DSF می‌تواند به راحتی جایگزین سیستم نمای جامد شود. همچنین، این سیستم ممکن است به عنوان اجزای ساختاری برای تحمل بارهای عمودی و افقی در ساختمان‌های کم‌ارتفاع استفاده شود. نسبت سختی DSF نسبت به SW تا جابجایی $L/150$ (۳ میلی‌متر) برابر با ۲ به دست آمد. این بدان معناست که DSF ظرفیت جذب انرژی بالاتری نسبت به سیستم نمای جامد دارد و این رفتار برای ساختمان‌های واقع در مناطق مستعد طوفان‌های باد و بارهای ضربه‌ای مفید است.

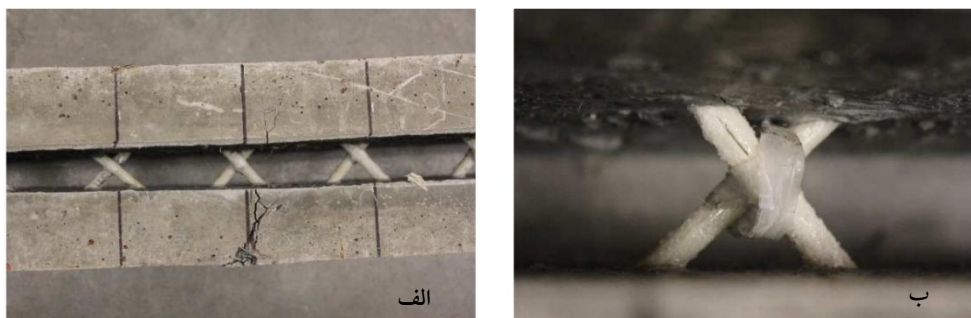


شکل ۱- نتایج آزمایش خمشی برای نمای جامد و DSF از بتن الیافی هیبریدی سبز با کارایی بالا

همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، DSF به دلیل شکست کششی بتن یا خرد شدن فیبر تقویت شده با پلیمر^۱ (GFRP) دچار خرابی می‌شود. این امر توضیح می‌دهد که چرا پاسخ‌های خمشی عناصر DSF در شکل ۱ متغیر است. عناصر DSF که قبل از رسیدن به حد ۳ میلی‌متر شکست خوردند، به دلیل خرد شدن کانکتور GFRP بودند. به دلیل حالت شکست شکننده آن، خرد شدن کانکتور GFRP باعث کاهش تغییر شکل نهایی شد. همچنین، هیچ‌گونه شکست کشش

¹ Glass fiber-reinforced polymer

بار GFRP در هیچ یک از عناصر DSF مشاهده نشد. این امر به پوشش دهی GFRP با شن و اپوکسی مربوط می شود که منجر به بهبود پیوند مکانیکی بین ماتریس و رابط GFRP شد. به طور کلی، چندین ترک میکروسکوپی گسسته در سطح کششی سیستم DSF مشاهده شد (شکل ۳). علاوه بر بهبود پاسخ خمشی، تشکیل ترک های میکروسکوپی گسسته برای عایق بندی مفید است زیرا از نشت هوا بین داخل و خارج ساختمان جلوگیری می کند.



شکل ۲- حالات شکست DSF: (الف) شکست کششی HP-G-HyFRC، و (ب) خرد شدن میله GFRP



شکل ۳- ترک های متعدد در سطح پایینی DSF

تنش در حداکثر بار برای عناصر DSF چندین برابر بیشتر از نمای جامد بود. نگرانی این بود که این تغییر شکل بزرگ ممکن است به عناصری که به DSF متصل شده اند، مانند پنل های پنجره، آسیب برساند. یک ارزیابی اولیه با مقایسه تغییر شکل در بار طراحی با حد تغییر شکل انجام شد. بار طراحی به عنوان بار نهایی عناصر دیوار جامد در نظر گرفته شد. برای ساخت کف که از عناصر غیرسازه ای پشتیبانی می کند یا به آنها متصل است و احتمال آسیب دیدن توسط انحرافات بزرگ وجود دارد، بخشی از تغییر شکل کل که پس از اتصال عناصر غیرسازه ای رخ می دهد نباید از فاصله آزاد تقسیم بر عامل ۴۸۰ بیشتر شود، که معادل ۰.۹۴ میلی متر برای فاصله آزاد ۴۵۰ میلی متر است. این معیار، اگرچه برای دیوارها محافظه کارانه است، به سیستم های نمایی اعمال شد. در بار طراحی ۳۲ کیلو نیوتن، تغییر شکل مربوطه ۰.۸۵ میلی متر به دست آمد. این کمتر از حد مجاز است و بنابراین می توان نتیجه گرفت که DSF در کوتاه مدت آسیبی به اتصال های غیرسازه ای وارد نمی کند. از آنجا که پرکننده اپوکسی قدرت سازه ای قابل توجهی ندارد، نتایج مشاهده شده در اینجا می توانند به طور محافظه کارانه ای برای حالت DSF با اپوکسی به عنوان ماده پرکننده نیز اعمال شوند.

انرژی دربرداشته از اجزای بتن و مخلوط‌های بتن

جدول ۱ نتایج مربوط به انرژی دربرداشته و دی‌اکسید کربن (محاسبه شده بر اساس ۱۰۰ سال) برای اجزای بتن به ازای هر ۱۰۰۰ کیلوگرم و دو مخلوط بتن به ازای هر متر مکعب را خلاصه می‌کند. به دلیل استفاده از مواد زائد و فرآورده‌های تولید کمتر، سرباره و خاکستر بادی انرژی دربرداشته کمتری دارند و دی‌اکسید کربن کمتری نسبت به سیمان تولید می‌کنند. انرژی و دی‌اکسید کربن برای آب، پلیمر فوق روان‌کننده^۱ (SP) و افزودنی اصلاح‌کننده ویسکوزیته^۲ (VMA) ناچیز بود و به صفر تنظیم شدند. انرژی و دی‌اکسید کربن برای GFRP به همان مقداری در نظر گرفته شد که برای الیاف PVA اعمال شده بود. در مقایسه با الیاف فولادی، الیاف PVA انرژی دربرداشته بسیار بالاتری نشان دادند که به دلیل انرژی بالای مواد اولیه الیاف PVA است. انرژی مواد اولیه نمایانگر انرژی ذخیره‌شده در زنجیره‌های هیدروکربنی است که برای تولید محصولات پلیمری استفاده می‌شود. با این حال، از آنجا که کربن‌ها در محصولات نهایی قفل می‌شوند، انتشار کربن برای الیاف PVA به طور قابل توجهی بیشتر از مقدار الیاف فولادی نبود EP. بالاترین انرژی و شدت کربن دی‌اکسید را به ازای هر ۱۰۰۰ کیلوگرم داشت، اگرچه سهم آن در انرژی دربرداشته کلی و دی‌اکسید کربن سیستم‌های DSF به دلیل چگالی پایین آن (۳۰ کیلوگرم/متر مکعب) و حجم نسبتاً کم مورد نیاز برای سیستم DSF، نسبتاً کوچک است. نتایج مربوط به مخلوط‌های بتن نشان داد که HP-G-HyFRC انرژی و دی‌اکسید کربن بیشتری برای تولید به ازای هر متر مکعب نسبت به مخلوط بتن با مقاومت نرمال^۳ (NSC) دارد. همچنین مشخص شد که در HP-G-HyFRC، پرمصرف‌ترین اجزای انرژی و دی‌اکسید کربن به ازای هر واحد حجم، سیمان و تقویت‌کننده الیاف بودند. بنابراین، استفاده بهینه از کامپوزیت نیاز به استفاده کمتر از آن برای همان هدف دارد. سیستم DSF به جای سیستم دیوار جامد که در آن حجم مواد به میزان ۲۵٪ کاهش یافته است، مثالی از این مورد است. همچنین جالب است که افزایش دی‌اکسید کربن در HP-G-HyFRC به طور متناسب با افزایش انرژی نسبت به NSC نیست. این به دلیل استفاده از انرژی نسبتاً تمیز در تولید الیاف فولادی و PVA است.

جدول ۱- انرژی دربرداشته و انتشار کربن از اجزای بتن، میلگرد، EP (به ازای هر ۱۰۰۰ کیلوگرم)، و مخلوط‌های بتن (به ازای هر متر مکعب)

مورد	انرژی (MJ)	دی‌اکسید کربن (kg)
سیمان	۵۰۸۴	۱۰۴۵
سرباره	۱۸۲۵	۱۲۶
خاکستر بادی	۱۰۷۵	۷۱
دانه‌بندی ریز	۲۶۵	۲۰
دانه‌بندی درشت	۱۲۵	۲۰
آب/VMA/SP	۰	۰
میلگرد	۱۶۳۹۵	۱۲۴۱
الیاف فولادی	۱۸۰۳۲	۱۵۲۰
PVA / GFRP	۷۳۳۷۰	۲۰۰۰
EP	۸۸۶۰۰	۳۲۹۰
مخلوط بتن NSC	۲۴۸۷	۴۶۸
مخلوط بتن HP-G-HyFRC	۴۶۸۹	۵۴۹

^۱ Superplasticizer

^۲ Viscosity modifying admixture

^۳ Normal Strength Concrete

جدول ۲ مقادیر مواد، انرژی‌های دربرداشته و انتشار دی‌اکسید کربن مورد نیاز برای تولید ۳ سیستم دیوار استفاده‌شده در این مطالعه را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که اگرچه حجم بتن برای DSF نسبت به SW حدود ۲۵٪ کمتر بود، اما انرژی دربرداشته آن حدود ۳۸٪ بیشتر بود. انرژی دربرداشته بالاتر به دلیل استفاده بیشتر از چسباننده‌ها و حضور الیاف در HP-G-HyFRC مورد استفاده در DSF است. برای هر ۱ متر مکعب از مخلوط بتن، HP-G-HyFRC شامل ۷۱۲ کیلوگرم چسباننده است که بیشتر از ۴۲۶ کیلوگرم استفاده‌شده در NSC است. همچنین، همانطور که در جدول ۱ نشان داده شده، الیاف به عنوان تقویت‌کننده‌های گسسته در HP-G-HyFRC انرژی‌برتر از دیگر اجزای بتن برای تولید هستند. این الیاف حدود ۳۵ برابر انرژی بیشتری نسبت به سیمان دارند. با این حال، دی‌اکسید کربن در DSF حدود ۱۶٪ کمتر از SW است. این به دلیل استفاده از مواد کمتر در DSF و شدت‌های پایین‌تر دی‌اکسید کربن سرباره و خاکستر بادی است که به عنوان جایگزین سیمان در HP-G-HyFRC استفاده شده‌اند. در مقایسه با DSF با شکاف هوا، DSF با EP به عنوان ماده پرکننده، انرژی دربرداشته را ۱۶٪ افزایش داده و دی‌اکسید کربن دربرداشته را ۶٪ افزایش داده است.

جدول ۲- مواد، انرژی دربرداشته و انتشار کربن برای SW، DSF و DSF+EP

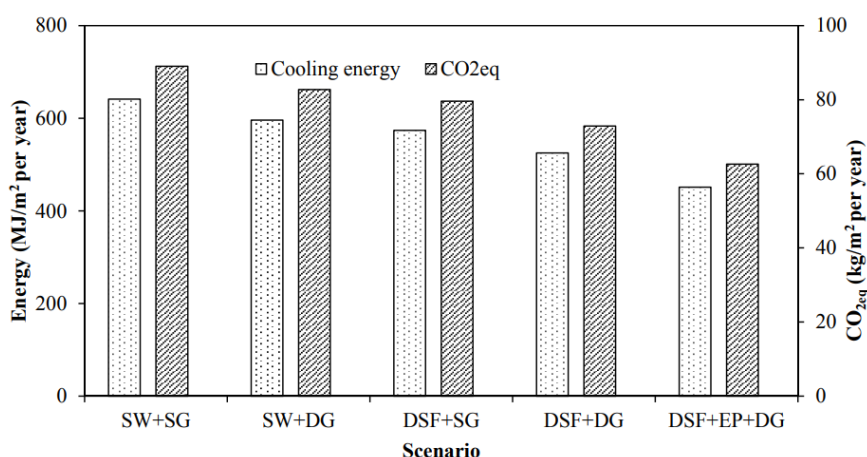
مورد	SW	DSF	DSF+EP
بتن (متر مکعب)	۰.۹۴	۰.۷۱	۰.۷۱
میلگرد فولادی (کیلوگرم)	۲۳.۵	-	-
میلگرد GFRP (کیلوگرم)	-	۶.۱	۶.۱
EP (کیلوگرم)	-	-	۷.۰۶
انرژی (MJ)	۲۷۲۶	۳۷۵۸	۴۳۸۳
دی‌اکسید کربن (کیلوگرم)	۴۷۰	۳۹۵	۴۱۸
انرژی/مساحت طبقه (MJ/m^2)	۱۷۰	۲۳۵	۲۷۴
دی‌اکسید کربن /مساحت طبقه (kg/m^2)	۲۹.۴	۲۴.۷	۲۶.۲

نتایج مدل‌سازی انرژی عملیاتی

ضریب‌های انتقال حرارت (U-factor) برای اجزای دیوار که از طریق ابزار تحلیل شیشه در COMFEN۵ محاسبه شده‌اند، در جدول ۳ گزارش شده است. با معرفی شکاف هوا، ضریب U تقریباً به نصف کاهش یافت. به طور مشابه، با تغییر از شیشه تک‌جداره (SG) به شیشه دوجداره (DG)، ضریب U برای سیستم‌های شیشه‌کاری ۵۳٪ کاهش یافت. همچنین مشاهده می‌شود که ضریب U برای SG بیشتر از ضریب U برای نمای جامد (SW) است. این بدان معناست که پنجره‌ها مقاومت کمتری در برابر ورود حرارت به داخل ساختمان دارند. از طرف دیگر، DG ضریبی مشابه با DSF دارد. از نتایج این‌طور پیش‌بینی می‌شود که سیستم‌های دیوار و پنجره با ویژگی‌های حرارتی بهبود یافته برای انتقال حرارت و عملکرد انرژی ساختمان حیاتی هستند. در مورد DSF، استفاده از EP به عنوان لایه عایق به طور قابل توجهی انتقال حرارت سیستم را کاهش داد. ضریب U در DSF+EP تقریباً سه برابر کمتر از ضریب U در DSF کاهش یافت.

جدول ۳- ضریب‌های U برای اجزای دیوار ($\text{w/m}^2\text{k}$)

DG	SG	DSF+EP	DSF	SW
۲.۶۹	۵.۸۲	۰.۹۷	۲.۶۶	۴.۷۳



شکل ۴- انرژی و انتشار کربن دی اکسید برای سناریوهای مختلف

نتایج انرژی عملیاتی و دی اکسید کربن از مدل سازی COMFEN5

نتایج مصرف انرژی سرمایشی 600 MJ/m^2 در سال در محدوده انرژی سرمایشی معمول برای ساختمان های مسکونی در کشورهای توسعه یافته است. همچنین مشاهده شد که با تغییر از شیشه تک جداره (SG) به شیشه دوجداره (DG) (با حفظ سیستم نمای جامد SW)، مصرف انرژی ۷٪ کاهش یافت و با تغییر از SW به DSF (با حفظ SG)، مصرف انرژی ۱۰.۶٪ کاهش یافت. نتایج نشان می دهند که افزایش مقاومت حرارتی در سیستم شیشه یا دیوار به کاهش مصرف انرژی کمک کرده است. همچنین، بهبود مقاومت حرارتی دیوار به دلیل نسبت پایین تر پنجره به دیوار (WWR) معادل ۰.۳ در واحد عملکرد، تأثیر بیشتری در کاهش مصرف انرژی داشت. استفاده ترکیبی از DSF و DG به کاهش مصرف انرژی به میزان ۱۸٪ از حالت پایه (SW+SG) کمک کرد. این صرفه جویی معادل مجموع صرفه جویی های انرژی از بهبود مقاومت حرارتی دیوار و شیشه به صورت جداگانه است. پر کردن شکاف هوا در DSF با استفاده از EP، انرژی عملیاتی را بیشتر کاهش داد. از DSF+DG به DSF+EP+DG، انرژی بیشتر به میزان ۱۴٪ کاهش یافت. روند مشابهی برای انتشار کربن دی اکسید نیز مشاهده شد. لازم به ذکر است که بار روشنایی و تجهیزات در این تحلیل نادیده گرفته شده است. این امکان مقایسه بار سرمایشی و در نتیجه مقایسه مؤثرتری از کارایی سیستم های نمای را فراهم می کند.

عدم قطعیت ها در داده ها

ارزیابی چرخه عمر انجام شده نمایانگر تعدادی از عدم قطعیت ها است. مسافت های پیموده شده برای مواد خام سیمان، دانه بندی ها و سایر اجزای بتن به طور دلخواه بر اساس منابع وارداتی محتمل به سنگاپور انتخاب شده اند. فرآیندهای تولید و منابع مختلف انرژی برای تولید ممکن است سطح عدم قطعیت را افزایش دهند (7). علاوه بر این، فرآیند تولید الیاف PP (پلی پروپیلن) کمی متفاوت از PVA است و به همین دلیل نتایج موجودی چرخه عمر (LCI) الیاف PP ممکن است نمایانگر نتایج مشابه برای الیاف PVA نباشد. فرضیات استفاده شده در مدل سازی COMFEN5 می تواند از سناریوی واقعی انحراف داشته باشد. به عنوان مثال، در حال حاضر COMFEN5 اجازه تغییر در برنامه زمانی سیستم گرمایش، تهویه و تهویه مطبوع را نمی دهد. در تحلیل ما فرض بر این بوده که کولر هوا به مدت ۲۴ ساعت در روز روشن است. همچنین، افت کارایی ناشی از نشت هوا در COMFEN5 قابل محاسبه نیست. با این حال، با تنظیمات ثابت مدل سازی،

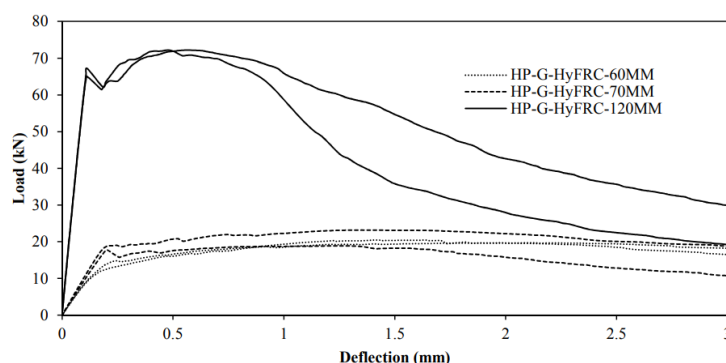
انتظار می‌رود که خطاها در مدل‌سازی انرژی برای تمامی سناریوها در سطح مشابهی باشد. در بدترین سناریو، جایی که صرفه‌جویی انرژی عملیاتی نصف کاهش یابد، دوره بازگشت سرمایه نیز دو برابر خواهد شد و به ۱۲ سال برای DSF+DG می‌رسد. این سطح از دوره بازگشت سرمایه با توجه به مزایای زیست‌محیطی سیستم همچنان قابل قبول است.

تأثیر زیست‌محیطی سیستم DSF

اجرای سیستم DSF در ساختمان‌ها می‌تواند مزایای زیست‌محیطی زیادی به همراه داشته باشد. علاوه بر قابلیت کاهش انرژی عملیاتی، سیستم DSF ساخته‌شده با HP-G-HyFRC همچنین شامل مواد زائد از جمله خاکستر بادی و سرباره است که در غیر این صورت به محل‌های دفن زباله می‌رفتند و باعث آلودگی سیستم‌های زیست‌محیطی متصل می‌شدند. ارزیابی چرخه عمر در این مطالعه محدود به انرژی و انتشار کربن دی‌اکسید است. با این حال، بارهای زیست‌محیطی دیگر مانند انتشار مواد شیمیایی سمی و پسماندهای خطرناک مورد ارزیابی قرار نگرفته‌اند. استفاده از مواد زائد صنعتی سرباره و خاکستر بادی به‌عنوان جایگزین سیمان در بتن می‌تواند در این زمینه مفید باشد. با در نظر گرفتن دوام، ما جنبه‌های عمر خدمت را به ارزیابی چرخه عمر اضافه می‌کنیم. ایده‌آل این است که انرژی دربرداشته، انرژی عملیاتی و انتشار کربن دی‌اکسید به طول عمر مورد انتظار DSF نرمال‌سازی شوند. به این ترتیب، نه تنها تأثیرات تولید مواد، بلکه تأثیرات عمر خدمت نیز بر اساس معیارهای طراحی در نظر گرفته می‌شود. مقاومت ترک HP-G-HyFRC به تضمین دوام بالا و عمر خدمت طولانی سیستم DSF کمک خواهد کرد. تشکیل ترک‌های توزیع‌شده تحت بارگذاری همچنین از نشت هوا به داخل و خارج ساختمان جلوگیری خواهد کرد. حضور الیاف هیبریدی که عملکرد برتر HP-G-HyFRC را فراهم می‌آورند، به این معناست که می‌توان از سرباره و خاکستر بادی با کیفیت پایین‌تر به‌عنوان جایگزین سیمان استفاده کرد و قابلیت استفاده از مواد زائد در بتن را گسترش داد.

تأثیر اندازه

تأثیر اندازه بر ویژگی‌های مکانیکی بتن برای اولین بار به‌طور سیستماتیک توسط بازانت گزارش شد (4). با استفاده از نظریه ترک‌های پراکنده، نشان داده شد که استحکام در مواد شکننده با افزایش اندازه المان کاهش می‌یابد. تأثیر اندازه بر بتن‌های الیاف تقویت‌شده با عملکرد فوق‌العاده بالا توسط بسیاری از محققان گزارش شده است (4-6). در این مطالعه، آزمایش‌های خمشی بر روی المان‌های خمشی HP-G-HyFRC با فاصله آزاد ۴۵۰ میلی‌متر و سه ضخامت ۶۰ میلی‌متر، ۷۰ میلی‌متر و ۱۲۰ میلی‌متر انجام شد. پاسخ‌های خمشی در شکل ۵ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت، رفتار سخت‌شدن انحرافی صاف نیز شروع به ناپدید شدن کرد. پس از تشکیل اولین ترک برای المان‌های خمشی ۱۲۰ میلی‌متری، یک کاهش بزرگ و ناگهانی در سطح بار مشاهده شد که نشان‌دهنده شروع ترک بزرگ غالب است. در مقابل، این کاهش برای المان‌های خمشی ۶۰ میلی‌متر و ۷۰ میلی‌متر کمتر مشهود یا اصلاً وجود نداشت. نتایج این پژوهش مزایای استفاده از لایه‌های نازک HP-G-HyFRC در DSF را تأیید می‌کند تا اطمینان حاصل شود که عملکرد مکانیکی برتر کامپوزیت، به‌ویژه در رابطه با سخت‌شدن انحرافی، همچنان قابل دستیابی است.



شکل ۵- تأثیر اندازه بر پاسخ‌های خمشی عناصر HP-G-HyFRC

بحث و نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از سیستم‌های نمای دوپوسته (DSF) و کامپوزیت‌های بتن هیبریدی سبز (HP-G-HyFRC) می‌تواند به‌طور قابل توجهی مصرف انرژی سرمایشی، انتشار دی‌اکسیدکربن و بخشی از هزینه‌های ساخت و نگهداری ساختمان‌های سبز را کاهش دهد. کاهش ۱۰.۶ درصدی مصرف انرژی در حالت استفاده از DSF نسبت به نمای جامد و کاهش ۱۸ درصدی در ترکیب DSF با شیشه دوجداره (DG) بیانگر آن است که افزایش مقاومت حرارتی پوسته خارجی ساختمان تأثیری مستقیم بر عملکرد انرژی دارد. این یافته‌ها با مطالعاتی که پیش‌تر اهمیت استفاده از فناوری‌های سبز را برای کاهش مصرف انرژی نشان داده‌اند همسو است، چنان‌که نتایج پژوهش علی و همکاران درباره استفاده از بام سبز در اقلیم گرم شهر واسط نیز نشان داد که افزایش مقاومت حرارتی پوسته می‌تواند به کاهش چشمگیر مصرف انرژی منجر شود (1). بنابراین، داده‌های این پژوهش نیز تأیید می‌کند که بهبود رفتار حرارتی ساختمان از طریق ارتقای مصالح و تکنیک‌های ساخت، یکی از مؤثرترین مسیرها برای دستیابی به معماری پایدار است.

یکی از یافته‌های مهم این پژوهش، عملکرد حرارتی قابل توجه سیستم DSF+EP است که منجر به کاهش ۱۴ درصدی بیشتر انرژی نسبت به حالت DSF+DG شد. این نتیجه نشان می‌دهد که ترکیب سیستم‌های چندلایه با عایق‌های سبک و مقاوم مانند پلی‌استایرن انبساطی (EP) می‌تواند انتقال حرارت را به شدت کاهش دهد. در مطالعات مرتبط با سیستم‌های دیوار سبز نیز تأکید شده است که استراتژی‌های مبتنی بر افزایش ضخامت مؤثر پوسته و ایجاد لایه‌های هوای میانی، ساختاری کارآمد برای جلوگیری از اتلاف انرژی محسوب می‌شود. بررسی فاطمی‌نیک درباره کارایی دیوارهای سبز نشان داد که ایجاد فاصله حرارتی مؤثر در پوسته، نقشی کلیدی در بهبود آسایش حرارتی ایفا می‌کند (14). همچنین در پژوهش زندی و همکاران نیز اشاره شده است که سیستم‌های دارای لایه‌های مرکب مقاومت بیشتری در برابر انتقال حرارت داشته و می‌توانند بخشی از هزینه‌های عملیاتی را کاهش دهند (12). تطابق نتایج حاضر با مطالعات مذکور نشان می‌دهد که مدل‌های مبتنی بر لایه‌گذاری چندگانه، نه تنها نظریه‌پردازی، بلکه در عمل نیز می‌توانند منجر به بهبود کارایی انرژی ساختمان شوند.

از منظر مکانیکی، نتایج آزمایش‌های خمشی نشان داد که کامپوزیت HP-G-HyFRC نسبت به بتن معمولی دارای مقاومت فشاری و خمشی بسیار بیشتری است و رفتار شکل‌پذیرتری دارد. توانایی این کامپوزیت در ایجاد ترک‌های ریز گسسته به‌جای ترک‌های بزرگ، علاوه بر افزایش دوام، موجب جلوگیری از نشت هوا در سیستم DSF می‌شود. این یافته دقیقاً با تئوری «اثر اندازه» که بازانت مطرح کرده است تطبیق دارد: نظریه‌ای که بیان می‌کند تغییر ابعاد یا ضخامت المان‌ها می‌تواند رفتار شکست را تغییر داده و از شکنندگی به شکل‌پذیری نزدیک‌تر کند (4). همچنین پژوهش‌های نگوین نیز نشان داده‌اند که بتن‌های الیافی با کارایی

بالا در ضخامت‌های کم می‌تواند رفتار خمشی مطلوب‌تری داشته باشند و ظرفیت انرژی آن‌ها بیشتر گردد (5, 6). نتایج فعلی نیز این یافته‌ها را تقویت می‌کند و نشان می‌دهد که استفاده از لایه‌های نازک HP-G-HyFRC در سیستم‌های پوسته‌ای مانند DSF، علاوه بر بهبود عملکرد حرارتی، کیفیت مکانیکی و دوام سازه را افزایش می‌دهد.

از منظر زیست‌محیطی، نتایج چرخه عمر (LCA) نشان داد که هرچند تولید HP-G-HyFRC انرژی دربرداشته بیشتری نسبت به بتن معمولی دارد، اما به دلیل جایگزینی بخشی از سیمان با سرباره و خاکستر بادی، انتشار دی‌اکسید کربن در سیستم DSF حدود ۱۶ درصد کمتر از سیستم نمای جامد است. این موضوع با یافته‌های پژوهشی درباره ژئوپلیمرها همسو است. او نشان داد که استفاده از مواد زائد صنعتی در مصالح سبز می‌تواند انتشار CO₂ را کاهش دهد و جایگزینی برای مصالح انرژی‌بر باشد (3). در پژوهش‌های دیگر نیز مانند تحلیل زیست‌محیطی مصالح توسط هوروات و هندریکسون تأکید شده است که انرژی دربرداشته و مقدار CO₂ آزادشده در تولید مصالح ساختمانی بسیار متفاوت است و انتخاب مصالح کم‌انرژی می‌تواند سهم بزرگی در کاهش پیامدهای زیست‌محیطی داشته باشد (7). بنابراین نتایج این پژوهش نیز نشان می‌دهد که استفاده از HP-G-HyFRC در سیستم DSF، با وجود انرژی اولیه بالاتر، در مجموع موجب بهبود عملکرد زیست‌محیطی ساختمان می‌شود.

تحلیل U-factor نیز به‌وضوح نشان داد که DSF+EP دارای کمترین مقدار ضریب انتقال حرارت بوده و عملکردی بسیار مطلوب‌تر از شیشه تک‌جداره و نمای جامد دارد. این یافته با مطالعاتی که درباره اهمیت پوسته خارجی ساختمان در معماری سبز انجام شده همخوانی دارد، به‌ویژه پژوهش علی درباره معماری سبز ایران که تأکید دارد یکی از مهم‌ترین عوامل اتلاف انرژی، پوسته‌های نامناسب و مصالح غیر استاندارد هستند (2). همچنین پژوهش رضائیان کله‌بستی نیز نشان داده است که مدیریت انرژی در ساختمان‌های سبز وابسته به انتخاب صحیح مصالح و برآورد دقیق عملکرد حرارتی آن‌ها است (13).

در بُعد فرهنگی و تاریخی نیز یافته‌های پژوهش منصوری درباره سازه‌های طاقی و گنبدی ساسانی نشان می‌دهد که استفاده از مصالح پایدار و انتخاب صحیح فرم‌های معماری می‌تواند نقش مهمی در کنترل شرایط محیطی داشته باشد (10). ارتباط این یافته با نتایج مقاله حاضر در آن است که پایداری در معماری، مفهومی مدرن نیست، بلکه ریشه در تاریخ معماری ایران دارد و مصالح پایدار امروز ادامه همان منطق معماری اقلیمی گذشته‌اند. چنین هم‌پوشانی‌ای تأکید می‌کند که تأثیر مصالح مناسب در بهبود عملکرد انرژی و کاهش هزینه‌ها نه تنها در فناوری‌های جدید، بلکه در تجربه تاریخی ما نیز قابل مشاهده بوده است.

از نظر تکنیکی و تولید، نتایج نشان می‌دهد که حضور الیاف هیبریدی در HP-G-HyFRC موجب افزایش انرژی شکست و شکل‌پذیری مصالح شده و این موضوع با دیدگاه شیخ‌لویی بناب درباره اهمیت روش‌های نوین ساخت در کاهش هدررفت انرژی همخوانی دارد (9). همچنین یافته‌های حاصل از تحلیل ریسک ساختمان‌های سبز توسط زرین‌پور و همکاران و توسعه سیستم ارزیابی سیاست‌های تشویقی توسط زندگی و همکاران نیز تأکید می‌کند که مصالح پایدار می‌توانند نقش مهمی در تصمیم‌گیری‌های فنی و سیاست‌گذاری ایفا کنند (11, 12). این یافته‌ها نشان می‌دهد که مصالح پایدار، نه تنها در سطح فنی، بلکه در سطح سیاست‌گذاری و اقتصاد ساخت نیز جایگاهی کلیدی دارند.

در مجموع، پیوند نتایج این مطالعه با ادبیات پژوهش تأکید می‌کند که استفاده از سیستم‌های نمای دوپوسته و مصالح پیشرفته همچون HP-G-HyFRC می‌تواند منجر به بهبود عملکرد حرارتی ساختمان، کاهش مصرف انرژی، کاهش انتشار آلاینده‌ها، افزایش دوام و نهایتاً کاهش هزینه‌های ساخت و نگهداری شود. این همسویی گسترده با مطالعات پیشین نشان می‌دهد که مسیر توسعه ساختمان‌های سبز در ایران و جهان، به‌شدت وابسته به نوع مصالح، فناوری ساخت و

رویکرد مبتنی بر تحلیل چرخه عمر است. بنابراین انتخاب مصالح باکیفیت و پایدار باید به عنوان یک اولویت راهبردی در فرآیند طراحی و اجرای پروژه‌های ساختمانی لحاظ شود.

یکی از محدودیت‌های این پژوهش، انجام تحلیل انرژی با فرضیات ثابت و عدم لحاظ کردن تغییرات واقعی در بهره‌برداری از ساختمان است. همچنین امکان تغییر کامل پروفایل سیستم تهویه و سرمایش در نرم‌افزار COMFEN وجود نداشت و این موضوع می‌تواند بر دقت نتایج تأثیر بگذارد. محدودیت دیگر، تمرکز بر تنها یک نوع فضا (اتاق خواب) به عنوان واحد عملکرد است که ممکن است رفتار انرژی در فضاهای با کاربری‌های متفاوت را منعکس نکند. همچنین تحلیل چرخه عمر تنها به انرژی دربرداشته و CO_2 محدود شد و سایر شاخص‌های زیست‌محیطی مانند سمیت مواد، پسماند و اثرات آب در تحلیل لحاظ نگردید.

پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آتی، عملکرد DSF و HP-G-HyFRC را در اقلیم‌های مختلف، جهت‌گیری‌های متنوع نما و کاربری‌های گوناگون ساختمان تحلیل کنند. همچنین استفاده از مدل‌سازی پویا به جای مدل‌سازی ایستا می‌تواند دقت تحلیل انرژی را افزایش دهد. بررسی اثرات زیست‌محیطی کامل شامل سمیت، آلودگی آب، بازیافت‌پذیری مصالح و دوام بلندمدت آن‌ها نیز می‌تواند چشم‌انداز دقیق‌تری ارائه دهد. مطالعه اقتصادی دقیق‌تر شامل تحلیل هزینه-فایده، دوره بازگشت سرمایه و آثار اقتصادی مصالح پایدار نیز از دیگر زمینه‌های مهم پژوهشی است.

سازندگان و طراحان باید در پروژه‌های جدید، استفاده از DSF همراه با عایق‌های سبک مانند EP را به عنوان یک گزینه اصلی برای صرفه‌جویی انرژی مدنظر قرار دهند. همچنین توصیه می‌شود نهادهای دولتی و شهرداری‌ها، سیاست‌های تشویقی مشخصی برای استفاده از مصالحی مانند HP-G-HyFRC طراحی کنند. استفاده از مدل‌های ارزیابی ریسک و سیستم‌های ارزیابی چندمعیاره نیز می‌تواند به تصمیم‌گیری بهتر در انتخاب مصالح پایدار کمک کند.

مشارکت نویسندگان

در نگارش این مقاله تمامی نویسندگان نقش یکسانی ایفا کردند.

تشکر و قدردانی

از تمامی کسانی که در طی مراحل این پژوهش به ما یاری رساندند تشکر و قدردانی می‌گردد.

تعارض منافع

در انجام مطالعه حاضر، هیچ‌گونه تضاد منافی وجود ندارد.

حمایت مالی

این پژوهش حامی مالی نداشته است.

موازین اخلاقی

Extended Abstract

Introduction

Sustainable construction has emerged as a critical response to the global challenges of climate change, rapid urban expansion, resource depletion, and escalating energy consumption in the built environment. Buildings, which account for a significant share of operational energy use and embodied environmental impacts, require a fundamental transformation in terms of materials, design strategies, and construction technologies. Consequently, green buildings—designed to minimize environmental burdens, optimize energy efficiency, and reduce long-term maintenance costs—have become a central element of contemporary architectural and engineering discourse. A core component of these advancements is the use of high-quality and sustainable materials that simultaneously enhance structural durability, thermal performance, and environmental compatibility.

Previous studies have demonstrated the effectiveness of green building technologies in reducing energy consumption and improving environmental performance. For example, the implementation of green roof systems in educational buildings in Iraq was shown to significantly reduce energy demand for cooling through improved thermal regulation of the building envelope (1). Similarly, investigations into the evolution of green architecture in Iran highlight that integrating sustainable principles into architectural design can markedly decrease energy consumption and environmental pollution (2). Sustainable materials, including geopolymers derived from industrial waste products such as fly ash and slag, have also been recognized for their lower embodied energy and reduced carbon emissions compared to conventional cement-based materials (3).

In addition to material innovations, structural behavior plays a vital role in achieving long-term sustainability. The size effect theory proposed by Bazant indicates that the mechanical behavior of brittle materials—such as concrete—changes as the dimensions of structural members vary, affecting their resistance to cracking and failure (4). This theoretical foundation has been further expanded by experimental studies on ultra-high-performance hybrid fiber-reinforced concrete (UHP-HFRC), which demonstrate that reductions in thickness lead to enhanced ductility, distributed microcracking, and improved flexural toughness (5, 6). Such properties make hybrid fiber-reinforced composites particularly advantageous for thin façade systems where both mechanical strength and crack resistance are essential for maintaining thermal integrity.

The environmental implications of construction materials remain a key concern within sustainability research. Comparative analyses of materials such as asphalt and reinforced concrete have shown that variations in embodied energy, CO₂ emissions, and material composition substantially affect environmental performance over the building life cycle (7). Broader environmental perspectives highlight the urgency of addressing pollution, ecological damage, and material waste within international frameworks, reinforcing the need for sustainable construction practices (8). Additionally, studies on sustainable urban architecture emphasize the importance of reducing energy loss through improved building envelopes, including the use of green walls and façade optimization strategies (14). Risk assessments of green buildings using multi-criteria evaluation systems further underscore the role of sustainable materials in enhancing long-term resilience and performance (11).

Parallel to contemporary material innovations, historical studies reveal that sustainable construction is deeply rooted in traditional architecture. Research on Sasanian dome and arch structures shows that the use of natural, durable materials

contributed to both environmental adaptation and long-term structural sustainability (10). Modern investigations into new construction methods emphasize the necessity of integrating advanced technologies and durable materials to optimize resource use and reduce environmental degradation (9). Furthermore, policy-oriented research indicates that effective incentive systems are essential for encouraging the adoption of sustainable building practices (12), while an awareness of urban sustainability principles remains critical for ensuring climate-sensitive development (13).

Building on these diverse lines of research, this study evaluates the role of high-quality and sustainable materials—specifically the double-skin façade (DSF) system and hybrid green high-performance fiber-reinforced concrete (HP-G-HyFRC)—in reducing construction and maintenance costs, enhancing energy efficiency, and minimizing environmental impacts throughout the lifecycle of green buildings.

Methods and Materials

This study employed a quantitative modeling and life cycle assessment approach to analyze the performance of sustainable façade systems. Energy simulations were conducted using COMFEN5 to evaluate cooling energy demand across different façade configurations, including solid walls (SW), double-skin façades (DSF), single glazing (SG), double glazing (DG), and DSF systems incorporating expanded polystyrene insulation (EP). A standardized bedroom unit in a multi-story building served as the functional space for analysis.

Mechanical testing of HP-G-HyFRC and conventional concrete specimens was performed to compare compressive strength, flexural capacity, and cracking behavior. Flexural tests were conducted until a deflection limit of $L/150$ was reached. The life cycle impacts of selected materials were assessed using Green Concrete LCA tools to calculate embodied energy and CO₂ emissions per cubic meter of material. Comparative analyses were carried out among SW, DSF, and DSF+EP systems to determine total embodied impacts per square meter of façade area.

Findings

Energy modeling results indicated that the use of DSF reduced cooling energy consumption by 10.6% compared to traditional solid wall construction. Coupling DSF with double glazing (DG) produced an 18% reduction in cooling energy relative to the baseline condition (SW+SG). The introduction of EP insulation within the DSF cavity yielded an additional 14% reduction in cooling energy from the DSF+DG scenario to the DSF+EP+DG configuration.

Mechanical testing demonstrated that HP-G-HyFRC exhibited significantly higher compressive strength (84 MPa) than conventional concrete (45 MPa) and displayed superior flexural performance characterized by distributed microcracking and enhanced ductility. In contrast, traditional solid wall elements experienced sudden loss of load-bearing capacity after initial cracking.

Life cycle assessment showed that although HP-G-HyFRC required more embodied energy for production than normal-strength concrete, the DSF system incorporating HP-G-HyFRC generated approximately 16% lower CO₂ emissions than the solid wall due to reduced material volume and the use of lower-carbon industrial byproducts such as slag and fly ash. DSF+EP systems exhibited slightly higher embodied energy than DSF alone but maintained favorable overall environmental performance.

Thermal performance analysis revealed significant improvements in U-factor values for DSF and DSF+EP systems, with DSF+EP achieving the lowest heat transfer values among all configurations. This translated into substantial operational energy savings and improved thermal comfort.

Discussion and Conclusion

The results of this study confirm that integrating double-skin façade systems with HP-G-HyFRC materials can substantially improve thermal performance, structural durability, and environmental sustainability in building construction. The reductions in cooling energy demand achieved across all DSF configurations demonstrate the significant contribution of advanced façade design to operational energy efficiency. The notable improvements in mechanical behavior of HP-G-HyFRC suggest that these materials not only enhance structural performance but also support long-term durability, thereby reducing maintenance costs.

While embodied energy of HP-G-HyFRC is higher than conventional concrete, its lower CO₂ emissions, increased service life, and potential for incorporating industrial waste make it an environmentally favorable option within a life cycle framework. The combination of DSF and low-carbon materials provides a holistic approach to achieving sustainable building envelopes that reduce lifecycle impacts and improve energy efficiency.

Overall, the findings highlight the promise of innovative façade systems and sustainable materials as key enablers of high-performance green buildings. The integration of structural efficiency, thermal optimization, and environmental responsibility underscores the importance of material-driven strategies in transitioning toward sustainable construction practices.

References

1. Ali a-T, Zarkesh A, Yeganeh M. Analysis of the Impact of Green Building Techniques on Reducing Energy Consumption (Green Roof Technique in Educational Buildings in Wasit City, Iraq). *Journal of Sustainability, Development, and Environment*. 2023;4(14):15-37.
2. Ali M. A Survey of Green Architecture in Iran. *Green Architecture Journal*. 2022;7(27):25-36.
3. Alireza E. Investigating the Properties of Geopolymers for Use as Sustainable Materials. *Basparesh Quarterly*. 2023;13(1):65-77.
4. Bazant ZP. Size effect in blunt fracture: concrete, rock, metal. *Journal of Engineering Mechanics*. 1984;110(4):518-35.
5. Nguyen DL, Kim DJ, Ryu GS, Koh KT. Size effect on flexural behavior of ultra-high-performance hybrid fiber-reinforced concrete. *Composites Part B: Engineering*. 2013;45(1):1104-16.
6. Nguyen DL, Ryu GS, Koh KT, Kim DJ. Size and geometry dependent tensile behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. *Composites Part B: Engineering*. 2014;58(0):279-92.
7. Horvath A, Hendrickson C. Comparison of environmental implications of asphalt and steel-reinforced concrete pavements. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 1998;1626(-1):105-13.
8. Khal'atbari Y, Bavand DH, Zare A, Pourhashemi SA. Analysis of the Concepts of Pollution and Damage in International Environmental Law. *Journal of Environmental Science and Technology*. 2021;23(5):125-41.
9. Sheikhlouei Bonab V, Shaghaghi S. Principles and Strategies of New Construction Methods in Architectural Sustainability with Emphasis on Buildings Constructed with Construction Technology. *Journal of Islamic Art Studies*. 2023;20(50):411-27.
10. Mansouri M. Investigating Construction Methods and Structural Sustainability of Dome and Arch Structures with Sustainable Materials in Sasanian Architecture (Case Study: Siahgol Iwan Fire Temple). *Rahpuyeh Architecture and Urban Planning Journal*. 2024;2(4):69-81.
11. Zarrin Pour N, Amiri M, Ne'matollahi MH. Risk Assessment of Green Buildings Using a Combined DEMATEL and Analytic Network Process Approach. *Journal of Decision Making and Operations Research*. 2021;6(1):115-31.
12. Zandi F, Lurk A, Amin Nejad B. Developing a Fuzzy Evaluation System to Determine the Effectiveness of Incentive Policies on Promoting Green Buildings. *Journal of Structural and Construction Engineering*. 2023;10(7):153-81.
13. Rezaeian Kaleh Bast E. Green Architecture, with Emphasis on Sustainable Urban Development. *Journal of Contemporary Research in Sciences and Research*. 2019;1(1):34-41.
14. Fatemi Nik A. Evaluating Green Wall Systems, a Solution for Reducing Building Energy Loss and its Role in Sustainable Urban Architecture. 2021.