



استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در طراحی پایدار ساختمان‌ها و معماری معاصر

مهسا آرام فر

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

Mahsa.aramfar@iau.ir

مژده آرام فر

دانشجوی کارشناسی، گروه مهندسی معماری، موسسه آموزش عالی حافظ، شیراز، ایران

Mojdeh.aramfar.85@gmail.com

چکیده

یکپارچه‌سازی منابع انرژی تجدیدپذیر در طراحی ساختمان‌های پایدار و معماری معاصر، به‌عنوان راهکاری کلیدی برای مقابله با چالش‌های زیست‌محیطی جهانی مطرح است. تشدید تغییرات اقلیمی، کاهش منابع فسیلی و افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای، ضرورت گذار به ساختمان‌های کم‌مصرف و خودکفا از نظر انرژی را برجسته کرده است. بر اساس گزارش وضعیت جهانی ساختمان‌ها و ساخت‌وساز ۲۰۲۵/۲۰۲۴ سازمان ملل متحد، بخش ساختمان حدود ۳۲ درصد از تقاضای نهایی انرژی جهان و نزدیک به ۳۴ درصد از انتشار CO₂ مرتبط با انرژی را به خود اختصاص می‌دهد. در سال ۲۰۲۳، انتشار عملیاتی کربن ساختمان‌ها به ۹۰۸ گیگاتن و کربن نهفته به حدود ۲۰۹ گیگاتن رسید که نشان‌دهنده نقش محوری این بخش در دستیابی به اهداف توافق پاریس و مسیر خالص صفر کربن تا ۲۰۵۰ است.

معماری پایدار بر بهره‌وری منابع، طراحی غیرفعال و کاهش اثرات زیست‌محیطی تمرکز دارد، در حالی که معماری معاصر با استفاده از فرم‌های نوآورانه و فناوری‌های پیشرفته، امکان ادغام عملکردی و زیبایی‌شناختی منابع انرژی تجدیدپذیر را فراهم می‌کند. این منابع شامل سامانه‌های فتوولتائیک و حرارتی خورشیدی، توربین‌های بادی کوچک‌مقیاس، پمپ‌های حرارتی زمین‌گرمایی و زیست‌توده هستند که به‌ویژه در قالب سیستم‌های هیبریدی، دستیابی به ساختمان‌های نزدیک به صفر انرژی را ممکن می‌سازند. مرور مطالعات ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۵ نشان می‌دهد ادغام صحیح این منابع می‌تواند مصرف انرژی ساختمان را ۲۰ تا بیش از ۵۰ درصد کاهش دهد. سیستم‌های هیبریدی در بیش از ۸۰ درصد مطالعات از نظر کارایی و پایداری برتر بوده‌اند. این مقاله ضمن بررسی فناوری‌ها، امکان‌سنجی فنی-اقتصادی، موانع اجرایی و مطالعات موردی، راهکارهایی عملی برای سیاست‌گذاران، معماران و مهندسان جهت تسریع گذار به ساختمان‌های کم‌کربن ارائه می‌کند.

واژگان کلیدی: انرژی تجدیدپذیر، معماری پایدار، ساختمان سبز، کاهش انتشار کربن، طراحی هیبریدی

مقدمه

در دوران معاصر، تغییرات اقلیمی، کاهش منابع سوخت‌های فسیلی و افزایش فشار بر اکوسیستم‌های جهانی، ضرورت گذار به سمت مدل‌های توسعه پایدار را بیش از پیش آشکار ساخته است. بخش ساختمان و ساخت‌وساز، به عنوان یکی از بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان انرژی و تولیدکنندگان گازهای گلخانه‌ای، نقش محوری در این گذار ایفا می‌کند. بر اساس گزارش وضعیت جهانی ساختمان‌ها و ساخت‌وساز ۲۰۲۴/۲۰۲۵ سازمان ملل متحد، بخش ساختمان‌ها در سال ۲۰۲۳ حدود ۳۲ درصد از تقاضای انرژی نهایی جهانی را به خود اختصاص داده و مسئول تقریباً ۳۴ درصد از انتشار دی‌اکسید کربن مرتبط با انرژی در سطح جهان بوده است (United Nations Environment Programme & Global Alliance for Buildings and Construction, 2025). انتشار عملیاتی کربن از ساختمان‌ها در سال ۲۰۲۳ به رکورد حدود ۱۰ گیگاتن رسیده و کربن نهفته ناشی از مصالح ساختمانی نیز حدود ۲۱-۱۸ درصد از کل انتشار بخش را تشکیل می‌دهد. این آمار نشان‌دهنده آن است که بدون تحول اساسی در شیوه‌های طراحی، ساخت و بهره‌برداری ساختمان‌ها، دستیابی به اهداف توافق پاریس و مسیر بدون کربن تا سال ۲۰۵۰ غیرممکن خواهد بود.

معماری پایدار، با تأکید بر کاهش حداکثری اثرات زیست‌محیطی از طریق بهره‌وری منابع، طراحی غیرفعال، استفاده از مصالح کم‌کربن و ادغام هوشمند انرژی، به عنوان پاسخی جامع به این چالش‌ها مطرح شده است. در عین حال، معماری معاصر با بهره‌گیری از فرم‌های نوآورانه، مصالح پیشرفته، فناوری‌های دیجیتال و رویکردهای بیوفیلیک، زمینه مناسبی برای یکپارچه‌سازی منابع انرژی تجدیدپذیر^۱ فراهم می‌آورد. این ادغام نه تنها مصرف انرژی را کاهش می‌دهد، بلکه استقلال انرژی ساختمان‌ها را افزایش داده و جنبه‌های زیبایی‌شناختی و عملکردی را نیز ارتقا می‌بخشد (Sharma et al., 2025; Vijayan, 2025).

منابع انرژی تجدیدپذیر اصلی در ساختمان‌ها شامل سیستم‌های فتوولتائیک خورشیدی و حرارتی، توربین‌های بادی کوچک‌مقیاس، پمپ‌های حرارتی زمین‌گرمایی و انرژی زیست‌توده هستند. ادغام این منابع، به ویژه در قالب سیستم‌های هیبریدی، امکان دستیابی به ساختمان‌های نزدیک به صفر انرژی^۲ و حتی ساختمان‌های net-zero energy یا net-zero carbon را فراهم می‌سازد. مطالعات اخیر نشان می‌دهند که اجرای صحیح این سیستم‌ها می‌تواند مصرف انرژی ساختمان را ۲۰ تا بیش از ۵۰ درصد کاهش دهد؛ برای مثال، در برخی پروژه‌های سبز، صرفه‌جویی انرژی تا ۵۴٫۵ درصد، کاهش هزینه انرژی تا ۴۱٫۵ درصد و کاهش انتشار CO₂ تا ۵۰ درصد گزارش شده است (Ghiasi et al., 2025; D'Agostino & Parker, 2019, cited in various reviews). همچنین، ساختمان‌های گواهی‌شده سبز (مانند LEED) به طور متوسط ۲۵ درصد انرژی کمتر مصرف می‌کنند و انتشار CO₂ را تا ۳۴ درصد کاهش می‌دهند (Vijayan, 2025).

با وجود پیشرفت‌های چشمگیر در فناوری‌های تجدیدپذیر و طراحی پایدار طی سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۵، موانعی نظیر هزینه اولیه بالا، محدودیت‌های ذخیره‌سازی انرژی، چالش‌های ادغام با شبکه برق، مسائل زیبایی‌شناختی و پذیرش اجتماعی همچنان وجود دارد (Integrating renewable energy into building energy systems, 2025). این مقاله با رویکرد مروری جامع، به بررسی اصول نظری، فناوری‌های نوین، امکان‌سنجی اقتصادی و فنی، موانع اجرایی و مطالعات موردی موفق می‌پردازد. هدف اصلی، ارائه دیدگاهی یکپارچه از چگونگی ادغام انرژی‌های تجدیدپذیر در طراحی پایدار ساختمان‌ها و معماری معاصر است تا به سیاست‌گذاران، معماران و مهندسان در تسریع گذار به سمت ساختمان‌های کم‌کربن و مقاوم کمک کند. در نهایت، این گذار نه تنها

¹ RES: Renewable Energy Sources

² NZEB: Nearly Zero-Energy Buildings

به کاهش انتشار کربن کمک می‌کند، بلکه رفاه ساکنان، ارزش اقتصادی ساختمان‌ها و تحقق اهداف توسعه پایدار جهانی را نیز ارتقا می‌بخشد.

اهمیت پژوهش

ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر مانند خورشیدی، بادی، زمین‌گرمایی و زیست‌توده در طراحی پایدار ساختمان‌ها و معماری معاصر، یکی از مهم‌ترین اولویت‌های حوزه معماری، مهندسی عمران و توسعه پایدار در دهه‌های اخیر است. این موضوع نه تنها یک انتخاب فنی، بلکه یک ضرورت زیست‌محیطی، اقتصادی، اجتماعی و اخلاقی به شمار می‌رود. اهمیت آن را می‌توان از ابعاد زیر بررسی کرد:

۱- مقابله با بحران تغییرات اقلیمی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای
بخش ساختمان و ساخت‌وساز در سطح جهانی حدود ۳۲ درصد از تقاضای انرژی نهایی و تقریباً ۳۴ درصد از انتشار دی‌اکسید کربن مرتبط با انرژی را به خود اختصاص می‌دهد (United Nations Environment Programme & Global Alliance for Buildings and Construction, 2025). در سال ۲۰۲۳، انتشار عملیاتی کربن از ساختمان‌ها به حدود ۱۰ گیگاتن رسید و کربن نهفته ناشی از مصالح و فرآیند ساخت نیز بخش قابل توجهی از کل انتشار را تشکیل می‌دهد. بدون تحول اساسی و ادغام گسترده انرژی‌های تجدیدپذیر، دستیابی به اهداف توافق پاریس و مسیر net-zero emissions تا سال ۲۰۵۰ غیرممکن است. استفاده از RES در ساختمان‌ها می‌تواند انتشار CO₂ را تا ۵۰ درصد کاهش دهد و به طور مستقیم به کاهش گرمایش جهانی و حفاظت از اکوسیستم‌ها کمک کند (Ghiasi et al., 2025; Springer, 2025).

۲- کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و افزایش امنیت و استقلال انرژی
منابع فسیلی محدود، ناپایدار و تحت تأثیر نوسانات قیمت و بحران‌های ژئوپلیتیکی هستند. انرژی‌های تجدیدپذیر منابع نامحدود، محلی و اغلب رایگان (مانند تابش خورشیدی بالا در بسیاری از مناطق ایران) ارائه می‌دهند. ادغام این منابع در ساختمان‌ها منجر به استقلال انرژی، کاهش وابستگی به شبکه برق مرکزی و افزایش تاب‌آوری در برابر اختلالات انرژی می‌شود. در برخی پروژه‌ها، ساختمان‌های انرژی‌مثبت^۳ حتی مازاد انرژی تولید می‌کنند و به شبکه برمی‌گردانند (Vijayan, 2025).

۳- صرفه‌جویی اقتصادی و بازگشت سرمایه سریع‌تر
ساختمان‌های پایدار مجهز به RES مصرف انرژی را ۲۰ تا بیش از ۵۰ درصد کاهش می‌دهند؛ در برخی موارد صرفه‌جویی انرژی تا ۵۰،۵۴ درصد، کاهش هزینه‌های انرژی تا ۵۷،۴۱ درصد و کاهش هزینه‌های نگهداری تا ۲۰ درصد گزارش شده است (Ghiasi et al., 2025). ساختمان‌های گواهی‌شده سبز (مانند LEED یا استانداردهای مشابه) به طور متوسط ۲۵ درصد انرژی کمتر مصرف می‌کنند و ارزش اقتصادی بالاتری دارند. با کاهش هزینه‌های فناوری‌های تجدیدپذیر (مانند پنل‌های خورشیدی)، دوره بازگشت سرمایه کوتاه‌تر شده و این سیستم‌ها از نظر اقتصادی جذاب‌تر هستند (IRENA reports cited in Distrelec, 2024).

۴- بهبود کیفیت زندگی، سلامت و رفاه ساکنان
ادغام RES همراه با طراحی غیرفعال کیفیت هوای داخل ساختمان را بهبود می‌بخشد، نور و تهویه طبیعی را افزایش می‌دهد و محیطی سالم‌تر، آرام‌تر و سازگارتر با سلامت جسمی و روانی ایجاد می‌کند. این موضوع در معماری معاصر که بر رویکردهای بیوفیلیک

³ energy-positive

و انسان محور تأکید دارد، اهمیت دوجندانی پیدا می کند و به افزایش بهره‌وری و رضایت ساکنان منجر می شود (Sharma et al., 2025).

۵- نوآوری معماری، زیبایی شناسی و تحول در فرم ساختمان

ادغام سیستم‌های BIPV⁴، توربین‌های بادی کوچک، سقف‌های سبز و سیستم‌های هیبریدی، امکان خلق فرم‌های نوآورانه، نماهای هوشمند و ساختمان‌های انرژی مثبت را فراهم می کند. این رویکرد معماری را از مصرف کننده صرف انرژی به تولیدکننده تبدیل کرده و زیبایی شناسی پایدار را با عملکرد ترکیب می نماید (ArchEyes, 2025; IntechOpen, 2025).

۶- اهمیت فرهنگی، بومی و اقلیمی در ایران و کشورهای مشابه

ایران با پتانسیل بالای تابش خورشیدی، باد و اقلیم‌های متنوع، ظرفیت منحصربه‌فردی برای بهره‌گیری از RES دارد. ترکیب اصول معماری سنتی ایرانی (بادگیر، حیاط مرکزی، مصالح بومی) با فناوری‌های مدرن، می تواند الگویی بومی از معماری پایدار معاصر ارائه دهد و به حفظ هویت فرهنگی در کنار حفاظت محیط زیست کمک کند (مقالات سیویلیکا و SID, 2025). در نهایت، این موضوع یک ضرورت فوری برای دستیابی به توسعه پایدار، کاهش اثرات تغییرات اقلیمی و تضمین آینده‌ای قابل سکونت است. معماران، مهندسان و سیاست‌گذاران با تمرکز بر ادغام RES می‌توانند نقش رهبری در ساخت جهانی سبزتر، مقاوم‌تر و عادلانه‌تر ایفا کنند (UNEP Global Status Report 2024/2025; Discover Sustainability, 2025).

اهداف پژوهش

پژوهش حاضر با هدف بررسی جامع ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر در طراحی ساختمان‌های پایدار و معماری معاصر انجام می‌شود. اهداف اصلی و فرعی به شرح زیر هستند:

اهداف اصلی

- شناسایی و تحلیل اصول، فناوری‌ها و استراتژی‌های ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر (مانند خورشیدی فتوولتائیک و حرارتی، بادی کوچک مقیاس، زمین گرمایی و زیست توده) در طراحی ساختمان‌های پایدار و معماری معاصر به منظور دستیابی به
- ساختمان‌های نزدیک به صفر انرژی یا انرژی مثبت (United Nations Environment Programme & Global Alliance for Buildings and Construction, 2025).
- ارزیابی تأثیر ادغام RES بر کاهش مصرف انرژی، انتشار گازهای گلخانه‌ای و کربن نهفته در چرخه عمر ساختمان‌ها، با تمرکز بر دستیابی به اهداف توافق پاریس و مسیر net-zero تا سال ۲۰۵۰ (Ghiasi et al., 2025).

اهداف فرعی

- بررسی موانع فنی، اقتصادی، زیبایی شناسی و سیاستی در ادغام RES در ساختمان‌های موجود و جدید، و ارائه راهکارهای عملی برای غلبه بر آنها (Integrating renewable energy into building energy systems, 2025).
- تحلیل مطالعات موردی موفق جهانی و بومی (با تأکید بر پتانسیل ایران) برای استخراج الگوهای قابل تعمیم در معماری معاصر پایدار (Sharma et al., 2025).
- پیشنهاد چارچوبی یکپارچه برای معماران، مهندسان و سیاست‌گذاران جهت تسهیل پذیرش گسترده‌تر سیستم‌های هیبریدی RES و فناوری‌های هوشمند در طراحی ساختمان (Vijayan, 2025).
- بررسی نقش ادغام RES در ارتقای کیفیت زندگی ساکنان، رفاه زیست محیطی و ارزش اقتصادی ساختمان‌ها در بلندمدت (Discover Sustainability, 2025).

فرضیات پژوهش

بر اساس مرور ادبیات و مطالعات اخیر، فرضیات زیر مطرح می‌شوند:

۱. فرضیه اصلی: ادغام صحیح و هوشمند منابع انرژی تجدیدپذیر در طراحی پایدار ساختمان‌ها و معماری معاصر، مصرف انرژی عملیاتی را حداقل ۲۰-۵۰ درصد کاهش می‌دهد و انتشار CO₂ مرتبط با ساختمان را تا ۵۰ درصد پایین می‌آورد، بدون آسیب قابل توجه به جنبه‌های زیبایی‌شناختی و عملکردی (Ghiasi et al., 2025; United Nations Environment Programme, 2025).
۲. فرضیه ۱: سیستم‌های هیبریدی (ترکیب دو یا چند منبع تجدیدپذیر مانند خورشیدی + زمین‌گرمایی) نسبت به سیستم‌های تک‌منبع، کارایی، تاب‌آوری و پایداری بالاتری (بیش از ۸۰ درصد موارد) ارائه می‌دهند و امکان دستیابی به ساختمان‌های net-zero energy را تسهیل می‌کنند. (Ghiasi et al., 2025; IntechOpen, 2025).
۳. فرضیه ۲: استفاده از فناوری‌های یکپارچه با ساختمان (مانند BIPV و سیستم‌های هوشمند IoT) هزینه‌های اولیه را جبران کرده و دوره بازگشت سرمایه را کوتاه‌تر می‌کند (تا کمتر از ۱۰ سال در مناطق با تابش خورشیدی بالا)، ضمن افزایش ارزش اقتصادی و زیبایی‌شناختی ساختمان. (Vijayan, 2025; ArchEyes, 2025).
۴. فرضیه ۳: در اقلیم‌های متنوع ایران (با پتانسیل بالای خورشیدی و بادی)، ترکیب اصول معماری سنتی (مانند بادگیر و حیاط مرکزی) با فناوری‌های مدرن RES، بهره‌وری انرژی و سازگاری اقلیمی را بیش از ۴۰ درصد نسبت به ساختمان‌های متعارف افزایش می‌دهد و به حفظ هویت فرهنگی کمک می‌کند.
۵. فرضیه ۴: موانع اصلی پذیرش گسترده RES (هزینه اولیه، محدودیت‌های ذخیره‌سازی، چالش‌های ادغام با شبکه و مسائل زیبایی‌شناختی) با سیاست‌گذاری مناسب (مشوق‌های مالی، استانداردها و آموزش) و نوآوری‌های فناوری قابل رفع هستند و منجر به تسریع گذار به ساختمان‌های کم‌کربن می‌گردند (Springer, 2025; UNEP Global Status Report, 2025).

مروری بر ادبیات

ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر در طراحی ساختمان‌های پایدار و معماری معاصر، طی دهه اخیر به یکی از موضوعات کلیدی در تحقیقات حوزه معماری، مهندسی انرژی و توسعه پایدار تبدیل شده است. مطالعات نشان می‌دهند که بخش ساختمان‌ها مسئول حدود ۳۲-۴۰ درصد مصرف انرژی جهانی و ۳۴ درصد انتشار CO₂ مرتبط با انرژی است و بنابراین، ادغام RES راهکاری اساسی برای دستیابی به ساختمان‌های نزدیک به صفر انرژی، انرژی مثبت و net-zero carbon محسوب می‌شود (United Nations Environment Programme & Global Alliance for Buildings and Construction, 2025).

۱. پیشرفت‌های فناوری و استراتژی‌های ادغام

تحقیقات اخیر بر فناوری‌های کلیدی مانند سیستم‌های فتوولتائیک یکپارچه با ساختمان^۴، سیستم‌های حرارتی خورشیدی، توربین‌های بادی کوچک‌مقیاس، پمپ‌های حرارتی زمین‌گرمایی و انرژی زیست‌توده تمرکز دارند. یک بررسی سیستماتیک از ۹۲ مطالعه نشان داد که ادغام RES می‌تواند صرفه‌جویی انرژی ۲۰-۵۰ درصدی ایجاد کند، به ویژه در سیستم‌های هیبریدی که در

^۴ Building-Integrated Photovoltaics

^۵ Building-Integrated Photovoltaics (BIPV)

بیش از ۸۰ درصد موارد کارایی، تاب‌آوری و پایداری بالاتری نسبت به سیستم‌های تک‌منبع ارائه می‌دهند (Integration of renewable sources in buildings, 2025). همچنین، بررسی دیگری از مطالعات ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۵ بر پنج تم اصلی تأکید کرد: ادغام فتوولتائیک، استراتژی‌های بازسازی^۶، چارچوب‌های حاکمیتی، کاربردهای شبکه هوشمند و پذیرش ذی‌نفعان (Integrating renewable energy into building energy systems, 2025).

۲. مزایا و تأثیرات زیست‌محیطی و اقتصادی

ادغام RES نه تنها انتشار کربن عملیاتی و نهفته را کاهش می‌دهد، بلکه هزینه‌های انرژی را تا ۵۷ درصد پایین می‌آورد و ارزش اقتصادی ساختمان‌ها را افزایش می‌دهد (Ghiasi et al., 2025). گزارش جهانی وضعیت ساختمان‌ها و ساخت‌وساز ۲۰۲۵/۲۰۲۴ نشان می‌دهد که سهم انرژی تجدیدپذیر در مصرف ساختمان‌ها از ۱۷٫۵ درصد باید تا ۲۰۳۰ به ۴۶ درصد برسد و تولید onsite از ۶ درصد به ۱۸ درصد افزایش یابد (United Nations Environment Programme, 2025). مطالعات موردی نشان‌دهنده کاهش ۵۰ درصدی مصرف انرژی و انتشار CO₂ در ساختمان‌های سبز گواهی‌شده (مانند LEED) هستند (Vijayan, 2025).

۳. موانع و چالش‌ها

علی‌رغم پیشرفت‌ها، موانع اقتصادی (هزینه اولیه بالا)، فنی (محدودیت ذخیره‌سازی و ادغام با شبکه)، زیبایی‌شناختی (تأثیر بر فرم معماری) و سیاستی (عدم مشوق‌های کافی) همچنان وجود دارد (Discover Sustainability, 2025). در زمینه بازسازی ساختمان‌های موجود، چالش‌های بیشتری گزارش شده، اما استراتژی‌های هیبریدی و هوشمند (IoT و AI) این موانع را کاهش می‌دهند (IntechOpen, 2025).

۴. روندهای نوظهور و زمینه بومی

تحقیقات جدید بر نقش هوش مصنوعی در بهینه‌سازی طراحی، ادغام RES با فناوری‌های هوشمند و سازگاری با اقلیم‌های متنوع تأکید دارند (Sharma et al., 2025). در ایران و کشورهای مشابه، مطالعات بر ترکیب اصول معماری سنتی (بادگیر، حیاط مرکزی) با RES مدرن تمرکز کرده‌اند تا بهره‌وری انرژی را بیش از ۴۰ درصد افزایش دهند و هویت فرهنگی را حفظ کنند.

^۶ retrofitting

همچنین، بررسی‌های اخیر نشان‌دهنده پتانسیل بالای انرژی خورشیدی و بادی در مناطق شهری، روستایی و ساحلی است (Ghiasi et al., 2025).

۵. خلأهای تحقیقاتی

با وجود رشد سریع ادبیات، خلأهایی در ارزیابی تکنو-اقتصادی بلندمدت، آزمون دوام سیستم‌ها، استانداردسازی و مطالعات موردی بومی گسترده وجود دارد. نیاز به تحقیقات بین‌رشته‌ای برای غلبه بر موانع سیاستی و افزایش پذیرش اجتماعی برجسته است (Springer, 2025; ArchEyes, 2025).

دیاگرام شماتیک انرژی بادی-زمین گرمایی در تابستان

شکل ۱ نمایشی جامع از یک ساختمان بلندمرتبه پایدار در حالت تابستان است که با ترکیب استراتژی‌های خنک‌سازی غیرفعال و سیستم‌های فعال کم‌مصرف مبتنی بر انرژی تجدیدپذیر، به طور چشمگیری مصرف انرژی سرمایشی را کاهش می‌دهد، اثر جزیره گرمایی شهری^۷ را مقابله می‌کند و به سمت ساختمان نزدیک به صفر انرژی حرکت می‌کند. طراحی کلی بر پایه بیوکلیماتیک استوار است و از منابع طبیعی مانند زمین (با دمای پایدار)، خورشید، باد و پوشش گیاهی بهره می‌برد. سیستم مدیریت ساختمان هوشمند به طور خودکار بین حالت‌های پسیو و اکتیو سوئیچ می‌کند تا مصرف انرژی به حداقل برسد.

عناصر اصلی سیستم در تابستان:

- سقف سبز^۸ با اینرسی حرارتی بالا: پوشش گیاهی و لایه خاک، گرمای روز را جذب کرده و شب‌ها آزاد می‌کنند. این امر دمای سطح سقف را تا حدود ۳۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به سقف معمولی کاهش می‌دهد، اثر جزیره گرمایی شهری را کم می‌کند و از بیش‌گرمایش داخل ساختمان جلوگیری می‌نماید. مطالعات نشان می‌دهند که سقف‌های سبز می‌توانند دمای هوای اطراف را تا ۵- تا ۱۰- درجه سانتی‌گراد کاهش دهند و بار سرمایشی ساختمان را به طور قابل توجهی پایین بیاورند.
- نما دوپوسته^۹ با کنترل تابش خورشیدی: لایه خارجی شیشه‌ای با فاصله هوایی، اثر دودکشی^{۱۰} ایجاد می‌کند؛ هوای گرم بین دو لایه بالا رفته و خارج می‌شود. ضریب $g=0.21$ (پایین برای کاهش گرمای خورشیدی) و ضریب نفوذ نور $\tau=0.38$ ، تابش مستقیم را کنترل کرده و بار سرمایشی ناشی از خورشید را کاهش می‌دهد. در تابستان، این نما می‌تواند گرمای ورودی را تا ۳۰- تا ۶۰٪ نسبت به نمای تک‌پوسته کم کند.
- جمع‌کننده‌های خورشیدی حرارتی evacuated tube (۱۱۴ مترمربع): این پنل‌های خلأ آب داغ تولید می‌کنند که چیلر جذبی را تغذیه می‌کند. چیلر خورشیدی هوای خارجی را پیش‌خنک کرده و سرمایش تولید می‌کند بدون نیاز به برق زیاد.

⁷ urban heat island effect

⁸ green roof

⁹ double skin facade

¹⁰ stack effect

سیستم‌های خورشیدی-جذبی با evacuated tube می‌توانند مصرف برق سرمایشی را تا ۵۰٪-۸۴٪ کاهش دهند، بسته به نوع پنل و شرایط اقلیمی است.

- سیستم زمین به هوا^{۱۱}: لوله‌های مدفون در زمین، هوای خارجی گرم را پیش‌خنک می‌کنند (دمای زمین در عمق مناسب حدود ۱۲-۱۸ درجه ثابت است). این روش پسیو می‌تواند دمای هوای ورودی را ۶-۱۵ درجه کاهش دهد و بار سرمایشی را تا ۲۰٪-۷۶٪ کم کند، به ویژه وقتی با دیگر سیستم‌ها ترکیب شود.
- حلقه‌های زمین‌گرمایی عمودی (۱۶ حلقه geothermal loops) با پمپ حرارتی: reversible در تابستان، گرمای ساختمان به زمین دفع می‌شود. سیستم‌های زمین‌گرمایی مصرف انرژی گرمایش و سرمایش را ۴۰ تا ۶۰ درصد کاهش می‌دهند نسبت به سیستم‌های معمولی، زیرا COP (ضریب عملکرد) آن‌ها به ۴-۶ می‌رسد.
- سرمایش تابشی^{۱۲} و رطوبت‌زدایی در نیمه‌بشکه: لوله‌های خنک‌کننده زیرزمینی یا کویل‌ها، سرمایش تابشی فراهم می‌کنند که احساس راحتی را در دمای بالاتر هوا ایجاد می‌کند. همچنین هوای ورودی رطوبت‌زدایی می‌شود.
- توربین‌های بادی کوچک و پنل‌های PV: برق محلی برای پمپ‌ها، فن‌ها و تجهیزات کم‌مصرف تولید می‌کنند.
- چاه نور^{۱۳} و تهویه طبیعی: نور طبیعی عمیق رسیده و هوای گرم از بالا خارج می‌شود.

عملکرد کلی:

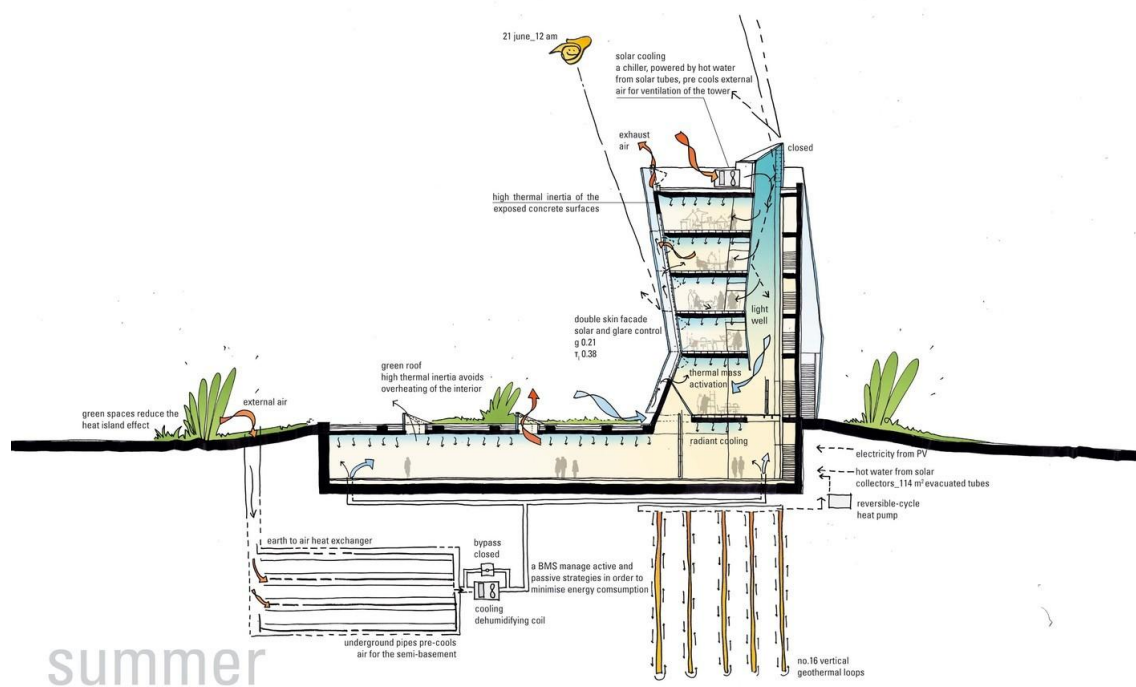
این طراحی هیبریدی (پسیو + اکتیو تجدیدپذیر) بار سرمایشی را به شدت کاهش می‌دهد: ابتدا با روش‌های غیرفعال (سقف سبز، نما دوپوسته، زمین به هوا) حداکثر ممکن پیش‌خنک می‌کند، سپس سیستم‌های فعال خورشیدی و زمین‌گرمایی فقط برای جبران

¹¹ earth-to-air heat exchanger

¹² radiant cooling

¹³ light well

باقی مانده وارد عمل می شوند. نتیجه می تواند کاهش مصرف انرژی سرمایشی تا ۵۰-۷۰ درصد یا بیشتر نسبت به ساختمان استاندارد باشد، همراه با بهبود کیفیت هوا و راحتی حرارتی. این رویکرد در اقلیم های گرم و شهری (مانند بسیاری از شهرهای ایران یا خاورمیانه) بسیار کارآمد است و نمونه ای از بهترین شیوه های طراحی پایدار مدرن محسوب می شود. (U.S. EPA, Using Green Roofs to Reduce Heat Islands, 2025).



شکل ۱ شماتیک بادی-زمین گرمایی

روش تحقیق

این پژوهش با هدف بررسی نقش انرژی های تجدیدپذیر (خورشیدی، بادی، زمین گرمایی و زیست توده) در طراحی ساختمان های پایدار و معماری معاصر انجام می شود. تمرکز اصلی بر کاهش مصرف انرژی، کم کردن انتشار گازهای گلخانه ای و رسیدن به ساختمان های نزدیک به صفر انرژی است. بر اساس گزارش های اخیر، بخش ساختمان حدود ۳۲ درصد مصرف انرژی جهانی و ۳۴



درصد انتشار دی اکسید کربن را به خود اختصاص می دهد؛ بنابراین، ادغام انرژی های پاک می تواند مصرف انرژی را تا ۴۰ تا ۷۰ درصد کاهش دهد (UNEP, 2025; REN21, 2025).
این تحقیق از روش ترکیبی (کمی و کیفی) استفاده می کند تا جنبه های فنی، اقتصادی و اجتماعی موضوع را به طور کامل پوشش دهد. رویکرد استقرایی و اکتشافی است و از داده های واقعی برای استخراج الگوها و پیشنهادهای کاربردی بهره می برد.

آمار و داده های (۲۰۲۳-۲۰۲۵)

سهم ساختمان ها در مصرف انرژی و انتشار کربن جهانی:

- ساختمان ها و بخش ساخت و ساز ۳۲٪ از مصرف انرژی جهانی و ۳۴٪ از انتشار CO₂ را به خود اختصاص می دهند. (UNEP Global Status Report for Buildings and Construction 2024/2025)
- انتشار عملیاتی CO₂ ساختمان ها در سال ۲۰۲۳ به رکورد ۹.۸ گیگاتن رسید، در حالی که انتشار embodied carbon حدود ۲.۹ گیگاتن بود.

سهم انرژی های تجدیدپذیر در بخش ساختمان ها:

- سهم تجدیدپذیرها در مصرف نهایی انرژی (TFEC) بخش ساختمان ها در سال ۲۰۲۳-۲۰۲۴ حدود ۱۷.۵-۱۷.۷٪ است (REN21 GSR 2025) و UNEP 2024/2025، که از ۱۲.۱٪ در یک دهه قبل افزایش یافته، اما هنوز بسیار پایین تر از اهداف است.
- هدف تا ۲۰۳۰: افزایش سهم تجدیدپذیرها (on-site + off-site) به ۴۶٪ و سهم تولید on-site به ۱۸٪ (از ۶٪ فعلی).

بازار ساختمان های Net-Zero Energy:

- اندازه بازار جهانی NZE در سال ۲۰۲۳ حدود ۴۶.۶ میلیارد دلار بود و پیش بینی می شود تا ۲۰۳۰ به ۱۴۱.۸۳ میلیارد دلار برسد (CAGR ≈ ۱۷.۵٪) (Grand View Research).
- پیش بینی دیگر: از ۶۰.۲۱ میلیارد دلار در ۲۰۲۵ به بیش از ۲۹۴ میلیارد دلار تا ۲۰۳۵ (CAGR > ۱۷.۲٪).
- ساختمان های NZE کمتر از ۱٪ کل موجودی ساختمان های جهانی را تشکیل می دهند، اما رشد سریع در حال رخ دادن است.

صرفه جویی انرژی با ادغام تجدیدپذیرها:

- ساختمان های سبز و پایدار معمولاً ۳۰-۴۰٪ صرفه جویی انرژی نسبت به ساختمان های معمولی دارند.
- در ساختمان های Net-Zero: تولید انرژی تجدیدپذیر ۱۰۰٪ مصرف سالانه را جبران می کند (با ترکیب کارایی بالا + تولید on-site مانند PV خورشیدی).
- در برخی مطالعات موردی: ادغام PV خورشیدی + سیستم های گرمایش زمین گرمایی می تواند ۵۰-۷۰٪ مصرف انرژی را کاهش دهد.

سرمایه گذاری و سیاست ها:

- سرمایه گذاری جهانی در کارایی انرژی ساختمان ها در ۲۰۲۴ حدود ۲۷۰ میلیارد دلار بود؛ هدف تا ۲۰۳۰ دو برابر شدن به ۵۲۲ میلیارد دلار.
- بیش از ۶۰ کشور سیاست هایی برای ادغام تجدیدپذیر + کارایی انرژی در ساختمان ها دارند.

بحث و یافته ها

فرمول های کلیدی محاسبه صرفه جویی انرژی و عملکرد سیستم های تجدیدپذیر در ساختمان ها این فرمول ها در طراحی، شبیه سازی (مانند EnergyPlus) و ارزیابی عملکرد استفاده می شوند.

۱. شدت مصرف انرژی (معیار اصلی کارایی ساختمان)^{۱۴}:

$$EUI = \frac{\text{مصرف کل انرژی سالانه (kWh یا MJ)}}{\text{مساحت کل کف ساختمان (m}^2\text{)}}$$

مثال: ساختمان با مصرف ۱۲۰۰۰۰ kWh و مساحت ۱۰۰۰۰ m² → EUI = ۱۲ kWh/m²/year.
هدف برای ساختمان های پایدار: کمتر از ۱۵۰-۱۰۰ kWh/m²/year.

۲. صرفه جویی انرژی با سیستم تجدیدپذیر^{۱۵}:

$$\text{Energy Savings (\%)} = \left(\frac{\text{RES مصرف پس از ادغام (Baseline) - مصرف پایه}}{\text{مصرف پایه}} \right) \times 100$$

Baseline: مصرف بدون RES (معمولاً از مدل سازی یا داده های تاریخی).

RES: انرژی تولید شده توسط PV، باد، زمین گرمایی و غیره.

۳. تولید انرژی خورشیدی PV^{۱۶}:

$$\text{Annual Energy (kWh)} = \text{PR} \times \text{PSH} \times \text{ظرفیت نصب شده (kWp)}$$

PR^{۱۷}: معمولاً ۰.۸۵-۰.۷۵ (شامل تلفات اینورتر، گردوغبار، دما و غیره).

مثال: پنل ۱۰ kWp در منطقه با PSH ۱۸۰۰ و PR=۰.۸ → تولید ≈ ۱۴۴۰۰ kWh/year.

۴. صرفه جویی هزینه انرژی^{۱۸}:

$$\text{Cost Savings} = \text{هزینه نگهداری سالانه} - (\text{نرخ برق (تومان/kWh)} \times \text{RES تولید})$$

برای بازگشت سرمایه^{۱۹}: هزینه اولیه سیستم ÷ صرفه جویی سالانه.

۵. ظرفیت مورد نیاز PV برای پوشش کامل مصرف^{۲۰}:

$$\text{ظرفیت مورد نیاز PV (kWp)} = \frac{\text{مصرف سالانه ساختمان (kWh)}}{\text{PSH سالانه} \times \text{PR} \times ۳۶۵}$$

مثال: مصرف ۲۰۰۰۰ kWh/year، PSH=۱۶۰۰، PR=۰.۸ → ظرفیت ≈ ۱۵.۶ kWp.

۶. زمان بازگشت انرژی^{۲۱} برای سیستم PV :

$$EPBT \text{ (سال)} = \frac{\text{انرژی تجمعی مصرف شده برای ساخت سیستم (kWh)}}{\text{تولید سالانه انرژی (kWh)}}$$

معمولاً ۱-۳ سال برای PV مدرن.

جدول ۱ انرژی تجدید پذیر در ساختمان ها

منبع اصلی	هدف تا ۲۰۳۰	مقدار فعلی (۲۰۲۴-۲۰۲۵)	شاخص
UNEP Buildings-GSR 2024/2025	کاهش شدید	۳۲٪	سهم بخش ساختمان در مصرف انرژی جهانی
UNEP Buildings-GSR 2024/2025	کاهش شدید	۳۴٪	سهم بخش ساختمان در انتشار CO ₂ جهانی
REN21 GSR 2025	۴۶٪	۱۷.۷٪ (۲۰۲۴-۲۰۲۲)	سهم انرژی تجدیدپذیر در TFEC ساختمان ها
REN21 / UNEP	۱۸٪	۶٪~	سهم تولید on-site تجدیدپذیر در ساختمان ها
Grand View Research / Research Nester	۱۴۰-۲۹۴ میلیارد دلار	~۴۶-۶۰ میلیارد دلار (۲۰۲۳-۲۰۲۵)	اندازه بازار ساختمان های Net-Zero Energy
IEA مطالعات موردی و	—	۳۰-۴۰٪ (معمول)؛ تا ۷۰٪ در NZE	صرفه جویی انرژی در ساختمان های سبز NZE
UNEP	کاهش شدید	~۹.۸ Gt (۲۰۲۳)	انتشار CO ₂ عملیاتی ساختمان ها
IEA / REN21	دو برابر شدن تا ۵۲۲ میلیارد	~۲۷۰ میلیارد دلار (۲۰۲۴)	سرمایه گذاری جهانی در کارایی انرژی ساختمان ها

آمار جدول:

REN21 GSR 2025: سهم تجدیدپذیرها در مصرف نهایی انرژی (TFEC) بخش ساختمان ها در ۲۰۲۴ حدود ۱۷.۷٪ است (رشد از ۱۲.۱٪ در دهه قبل).

بیش از ۶۰ کشور سیاست ادغام تجدیدپذیر + کارایی انرژی در ساختمان دارند.

بازار NZE: رشد CAGR ≈ ۱۷-۲۰٪ (Grand View Research) → ۱۷.۵٪ تا ۲۰۳۰؛ برخی پیش بینی ها تا ۱۹.۸۹٪).

¹⁴ Energy Use Intensity (EUI)

¹⁵ Energy Savings

¹⁶ Annual Energy Output

¹⁷ Performance Ratio

¹⁸ Energy Cost Savings

¹⁹ Payback Period

²⁰ Net-Zero

²¹ Energy Payback Time (EPBT)

بحث و نتیجه گیری

استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در طراحی پایدار ساختمان‌ها و معماری معاصر، نه تنها یک گزینه فنی یا زیبایی‌شناختی، بلکه یک ضرورت استراتژیک برای دستیابی به اهداف اقلیمی جهانی، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و ایجاد محیط‌های زندگی سالم‌تر و مقاوم‌تر در برابر تغییرات آب‌وهوایی است. بخش ساختمان و ساخت‌وساز همچنان یکی از بزرگ‌ترین عوامل انتشار CO₂ در جهان به شمار می‌رود؛ این بخش حدود ۳۲ درصد از مصرف نهایی انرژی جهانی و ۳۴ درصد از انتشار CO₂ مرتبط با انرژی و فرآیندها را به خود اختصاص داده است (UNEP, Global Status Report for Buildings and Construction 2024/2025). با این حال، پیشرفت‌های قابل توجهی در سال‌های اخیر مشاهده شده است: شدت انرژی (انرژی مصرفی به ازای هر متر مربع) در سطح جهانی بین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۳ حدود ۱۰ درصد کاهش یافته و سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در مصرف نهایی انرژی بخش ساختمان‌ها نزدیک به ۵ درصد افزایش یافته است.

در سال ۲۰۲۴، سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در مصرف نهایی انرژی بخش ساختمان‌ها^{۲۲} به ۱۷.۷ درصد رسیده است که نسبت به ۱۲.۱ درصد یک دهه قبل، رشد قابل توجهی نشان می‌دهد (REN21, Renewables 2025 Global Status Report - Buildings Sector). این افزایش عمدتاً ناشی از گسترش سریع سیستم‌های خورشیدی فتوولتائیک روی بام^{۲۳}، گرمایش الکتریکی با پمپ حرارتی، و ادغام سیستم‌های تجدیدپذیر در طراحی ساختمان‌های جدید است. همچنین، ظرفیت خورشیدی روی بام در سال ۲۰۲۴-۲۰۲۳ حدود ۲۲ درصد رشد داشته و در بسیاری از کشورها به دلیل افزایش قیمت برق و ناپایداری شبکه، تقاضای خانگی و تجاری برای این سیستم‌ها به شدت افزایش یافته است.

معماری معاصر با بهره‌گیری از فناوری‌های یکپارچه مانند BIPV، سیستم‌های گرمایش و سرمایش زمین‌گرمایی، توربین‌های بادی کوچک‌مقیاس، و ذخیره‌سازی باتری، به سمت مفهوم ساختمان‌های نزدیک به صفر انرژی و صفر خالص انرژی حرکت کرده است. بازار جهانی NZEB در سال ۲۰۲۵ حدود ۶۰ میلیارد دلار ارزش داشته و پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۳۵ با نرخ رشد ترکیبی سالانه بیش از ۱۷.۲ درصد به بیش از ۲۹۴ میلیارد دلار برسد. این روند نشان‌دهنده گذار از ساختمان‌های مصرف‌کننده انرژی به ساختمان‌هایی است که نه تنها مصرف خود را به حداقل می‌رسانند، بلکه انرژی مازاد تولید می‌کنند و به شبکه کمک می‌کنند.

با وجود این پیشرفت‌ها، چالش‌های جدی همچنان باقی است: پیشرفت کلی هنوز بسیار کندتر از اهداف توافق پاریس است؛ انتشار عملیاتی CO₂ ساختمان‌ها در سال‌های اخیر افزایش یافته (۵.۴ درصد از ۲۰۱۵) و شدت انرژی تنها ۹.۵ درصد کاهش یافته در حالی که هدف ۱۸.۲ درصد بوده است. بیش از نیمی از ساخت‌وسازهای جدید در کشورهای در حال ظهور بدون کدهای انرژی اجباری انجام می‌شود و انتشار کربن نهفته در مصالح همچنان عمدتاً بدون نظارت و مقررات کافی باقی مانده است. همچنین، هزینه اولیه بالا، موانع فنی در بازسازی ساختمان‌های موجود، و نیاز به هماهنگی سیاست‌ها در سطح ملی و بین‌المللی از جمله محدودیت‌های کلیدی هستند.

چشم‌انداز آینده بسیار امیدوارکننده است: تا سال ۲۰۳۰، اهداف جهانی شامل افزایش سهم تجدیدپذیرها در بخش ساختمان به ۴۶ درصد (و تولید on-site به ۱۸ درصد) و دو برابر شدن سرمایه‌گذاری سالانه در کارایی انرژی و تجدیدپذیرها به حدود ۵۲۲ میلیارد دلار است.

^{۲۲} TFEC

^{۲۳} rooftop solar PV



ابتکارات کلیدی در حوزه ساختمان‌های پایدار و مقاوم در برابر تغییرات اقلیمی در سال‌های اخیر، به ویژه پس از COP28 (۲۰۲۳) و COP29 (۲۰۲۴)، چندین ابتکار بین‌المللی مهم برای تسریع کربن‌زدایی^{۲۴} و افزایش مقاومت اقلیمی^{۲۵} در بخش ساختمان و ساخت‌وساز راه‌اندازی شده‌اند. این ابتکارات عمدتاً زیر چتر GlobalABC^{۲۶} سازمان ملل متحد^{۲۷} و Breakthrough Agenda فعالیت می‌کنند. هدف مشترک آن‌ها این است که ساختمان‌های نزدیک به صفر انتشار و مقاوم در برابر تغییرات اقلیمی تا سال ۲۰۳۰ به استاندارد جدید جهانی تبدیل شوند.

در معماری معاصر، ترکیب طراحی غیرفعال، مواد کم‌کربن، هوش مصنوعی برای مدیریت انرژی، و اقتصاد چرخشی (مانند EPR schemes برای بازیافت مصالح) می‌تواند انتشار کل چرخه حیات ساختمان را به طور چشمگیری کاهش دهد. در نهایت، ادغام انرژی‌های تجدیدپذیر در طراحی پایدار ساختمان‌ها نه تنها به کاهش اثرات زیست‌محیطی کمک می‌کند، بلکه مزایای اقتصادی (کاهش هزینه‌های عملیاتی و بازگشت سرمایه سریع)، اجتماعی (بهبود کیفیت هوای داخلی، سلامت ساکنان) و زیبایی‌شناختی (ایجاد فرم‌های نوآورانه و هماهنگ با طبیعت) را نیز به همراه دارد. دستیابی به این تحول نیازمند اقدام فوری و هماهنگ میان دولت‌ها، صنعت ساخت‌وساز، معماران، سرمایه‌گذاران و جامعه است. اگر سیاست‌های قوی (کدهای انرژی اجباری net-zero، یارانه‌های هدفمند، و استانداردهای embodied carbon)، نوآوری‌های فنی، و تغییر رفتار مصرف‌کنندگان با هم ترکیب شوند، بخش ساختمان می‌تواند از یکی از بزرگ‌ترین منابع انتشار کربن به یکی از پیشرانان اصلی گذار به اقتصاد کم‌کربن تبدیل شود.

²⁴ decarbonization

²⁵ climate resilience

²⁶ Global Alliance for Buildings and Construction

²⁷ UNEP



منابع

- ArchEyes. (2025). Building Tomorrow: How Renewable Energy is Revolutionizing Sustainable Architecture.
- Discover Sustainability. (2025). Integrating renewable energy into building energy systems: a systematic review of strategies, barriers, and policy interfaces. *Springer*.
- Ghiassi, Z., Wang, M., Mehrandezh, M., & Paranjape, R. (2025). Renewable Energy Integration into Industrial and Residential Buildings: A Study Across Urban, Rural, and Coastal Areas. *IET Renewable Power Generation*.
- IEA. (2025). *Renewables 2025 – Analysis and forecasts to 2030*.
- IntechOpen. (2025). Renewable Energy and Smart Technologies Integration for Adaptive and Sustainable Architecture.
- Integration of renewable sources in buildings: A review of energy savings, feasibility, and challenges. (2025). *Energy Reports*.
- REN21. (2025). *Renewables 2025 Global Status Report – Buildings Sector*.
- Research Nester. (2025). *Net Zero Energy Buildings Market Size & Share, Growth Report 2035*.
- Sharma, A., Singh, S. N., Serratos, M. M., Sahu, D., & Strezov, V. (2025). Urban energy transition in smart cities: A comprehensive review of sustainability and innovation. *Sustainable Futures*, 10, 100940.
- UNEP. (2025). *Emissions from building sector stopped rising for the first time since 2020*.
- United Nations Environment Programme & Global Alliance for Buildings and Construction. (2025). *Global Status Report for Buildings and Construction 2024/2025: Not just another brick in the wall*.
- U.S. Department of Energy (energy.gov) و EPA – Geothermal Heat Pumps و Green Roofs.
- Vijayan, [Initial]. (2025). A Review of Sustainable Implications of Energy-Efficient Buildings in the Environment. *Advances in Civil Engineering*.