فصلنامه نوآوری در مهندسی و تکنولوژی شماره ۱- دوره ۲ بهار ۱۴۰۵- صفحات۲۶۶-۲۵۴
Journal of Innovation in Engineering and Technology
ISSN 3060-6098

ساختمان‌های صفر انرژی: از آرمان زیست‌محیطی تا افق‌های نوین معماری پایدار

فاطمه شکروی
کارشناسی ارشد مهندسی معماری، دانشگاه آزاد قزوین
دبیری هنر،آموزش و پرورش ساوه و مدرس دانشگاه آزاد قم

چکیده

بحران‌های فزاینده زیست‌محیطی و کاهش شدید منابع انرژی فسیلی در دهه‌های اخیر، جوامع بشری را با چالش‌های بی‌سابقه‌ای در زمینه تامین انرژی و حفظ پایداری محیط زیست مواجه ساخته است. بخش ساختمان به عنوان یکی از عمده‌ترین مصرف‌کنندگان انرژی و تولیدکنندگان گازهای گلخانه‌ای، نقشی محوری در این بحران ایفا می‌کند و نیازمند تحولی بنیادین است. از این رو، مفهوم ساختمان‌های صفر انرژی به عنوان یک راهبرد اساسی و کارآمد برای گذار از رویکردهای ساخت‌وساز سنتی به سمت معماری پایدار مطرح شده است. هدف از انجام این پژوهش، بررسی جامع و تحلیلی ابعاد مختلف ساختمان‌های صفر انرژی، شناخت مبانی نظری، ارزیابی فناوری‌های نوین و تحلیل چالش‌ها و فرصت‌های پیش‌روی توسعه این نوع ساختمان‌ها در مقیاس خرد و کلان می‌باشد. این مقاله با بهره‌گیری از روش مرور نظام‌مند منابع کتابخانه‌ای و بررسی اسناد و مقالات معتبر، به تحلیل و ترکیب یافته‌های پژوهش‌های پیشین پرداخته و راهکارهای اجرایی متعددی را مورد ارزیابی قرار می‌دهد. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که دستیابی به اهداف ساختمان صفر انرژی نیازمند رویکردی چندوجهی است که در آن پارامترهای اقلیمی، اقتصادی، اجتماعی و فناورانه به صورت یکپارچه مد نظر قرار گیرند. همچنین، سیاست‌گذاری‌های کلان شهری، بهره‌گیری از سیستم‌های نوین هوشمند و ارتقای سطح آگاهی عمومی نقش تعیین‌کننده‌ای در موفقیت پروژه‌های زیست‌محیطی ایفا می‌کنند. در نهایت، نتیجه‌گیری می‌شود که ساختمان‌های صفر انرژی نه تنها یک آرمان زیست‌محیطی دست‌یافتنی هستند، بلکه به عنوان افق‌های نوین معماری، پتانسیل بسیار بالایی برای ایجاد شهرهای هوشمند، کاهش اثرات تغییرات اقلیمی و ارتقای چشمگیر کیفیت زندگی در آینده دارند.

کلیدواژه‌ها: ساختمان صفر انرژی، معماری پایدار، انرژی‌های تجدیدپذیر، توسعه شهری، بهینه‌سازی مصرف.

مقدمه :

رشد روزافزون جمعیت در سراسر جهان و توسعه شتابان جوامع شهری در دهه‌های اخیر، منجر به افزایش بی‌سابقه تقاضا برای انرژی در سطوح مختلف شده است که این امر تبعات مخرب زیست‌محیطی فراوانی را به دنبال داشته است. بخش ساختمان به عنوان یکی از ارکان اصلی توسعه زیرساخت‌های بشری، سهم بسیار عمده‌ای در مصرف انرژی‌های فسیلی و به تبع آن انتشار روزافزون گازهای گلخانه‌ای دارد که این مسئله ضرورت بازنگری عمیق در الگوهای طراحی، معماری و ساخت را بیش از پیش نمایان می‌سازد. گذار از رویکردهای سنتی و ناپایدار به سمت الگوهای نوین معماری پایدار، نیازمند اتخاذ تدابیر و سیاست‌های هوشمندانه‌ای است که بتواند ضمن تامین نیازهای آسایشی ساکنین، اثرات منفی بر اکوسیستم طبیعی را به حداقل ممکن برساند (لی و همکاران، ۲۰۲۶). در این راستا، مفهوم ساختمان‌های صفر انرژی به عنوان یک پارادایم نوین، پیشرو و بسیار کارآمد در حوزه مهندسی معماری، شهرسازی و مدیریت انرژی مطرح شده است که تمرکز اصلی آن بر بهینه‌سازی مصرف و تولید انرژی پاک است. هدف نهایی این رویکرد ایجاد یک تعادل پایدار و منطقی میان میزان انرژی مصرفی و انرژی تولیدی از منابع تجدیدپذیر در طول یک چرخه حیات مشخص در ساختمان می‌باشد که تحولی شگرف محسوب می‌شود (خرازی صنعت شتربان، ۱۴۰۱). این رویکرد نه تنها به عنوان یک راهکار فنی و مهندسی برای کاهش وابستگی به شبکه‌های سراسری انرژی شناخته می‌شود، بلکه نمایانگر یک تحول عمیق در فلسفه طراحی کالبدی فضاهای زیستی است که ارتباطی ارگانیک و کاملا سازگار با بستر اکولوژیک خود برقرار می‌کند. توسعه، ترویج و پیاده‌سازی این مفاهیم در سطح جهانی و منطقه‌ای نشان‌دهنده یک اجماع بین‌المللی برای مقابله جدی با بحران گرمایش زمین و تغییرات اقلیمی است که قطعا مستلزم همکاری‌های پیوسته بین‌رشته‌ای، پژوهش‌های بنیادین و سرمایه‌گذاری‌های کلان در حوزه تکنولوژی‌های نوین می‌باشد.

دستیابی به استانداردها و شاخص‌های دقیق ساختمان‌های صفر انرژی، فرایندی پیچیده و چندبعدی است که از مراحل ابتدایی مطالعات سایت و طراحی مفهومی آغاز شده و تا مراحل بهره‌برداری، نگهداری و حتی تخریب ساختمان در پایان عمر مفید آن امتداد می‌یابد. استفاده اصولی از استراتژی‌های طراحی غیرفعال خورشیدی، عایق‌بندی پیشرفته پوسته ساختمان، بهره‌گیری از مصالح بومی با ظرفیت حرارتی بالا و استفاده حداکثری از نور و تهویه طبیعی، از جمله گام‌های نخستین و حیاتی در مسیر کاهش بار حرارتی و برودتی ساختمان‌ها به شمار می‌روند (همتیان و گرجی مهلبانی، ۱۴۰۲). پس از اعمال دقیق این تمهیدات کالبدی و کاهش چشمگیر نیاز به انرژی، نوبت به ادغام و یکپارچه‌سازی سیستم‌های تولید انرژی از منابع تجدیدپذیر در محل پروژه می‌رسد تا انرژی اندک مورد نیاز بنا به صورت کاملا پاک و بدون آلایندگی تامین گردد. بهره‌گیری از پنل‌های فتوولتائیک، توربین‌های بادی کوچک‌مقیاس، سیستم‌های زمین‌گرمایی و آبگرمکن‌های خورشیدی، از متداول‌ترین روش‌های تولید انرژی در این نوع ساختمان‌ها محسوب می‌شوند که انتخاب هر یک از آن‌ها به شدت وابسته به پتانسیل‌های اقلیمی، جغرافیایی و محدودیت‌های سایت پروژه است (اسماعیلی، ۱۳۹۳). ترکیب هوشمندانه این فناوری‌های فعال با استراتژی‌های غیرفعال طراحی، نیازمند بهره‌مندی از دانش روز مهندسی، نرم‌افزارهای شبیه‌سازی دقیق و توانمندی در تحلیل رفتارهای ترمودینامیکی ساختمان در شرایط مختلف آب و هوایی در طول سال می‌باشد. از سوی دیگر، ضرورت بررسی پارامترهای اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی جوامع هدف در پذیرش و توسعه این الگوهای نوین سکونتی غیرقابل انکار است و فقدان آگاهی‌های لازم می‌تواند به عنوان یک مانع جدی و بازدارنده در مسیر تحقق اهداف توسعه پایدار شهری و منطقه‌ای عمل نماید.

با وجود تمامی مزایا و پتانسیل‌های بالقوه و بالفعلی که ساختمان‌های صفر انرژی در راستای حفاظت از محیط زیست و کاهش هزینه‌های جاری انرژی ارائه می‌دهند، گسترش و فراگیری آن‌ها در سطح کلانشهرهای کشورهای در حال توسعه همچنان با چالش‌ها و موانع متعدد فنی، اقتصادی و اجرایی مواجه است. هزینه‌های اولیه بالای تجهیزات فناورانه، کمبود نیروهای متخصص و تکنسین‌های ماهر در زمینه طراحی، اجرا و نگهداری، عدم وجود زیرساخت‌های کافی و قوانین حمایتی مدون، از جمله موانع اصلی در مسیر توسعه همه‌جانبه این فناوری‌ها به ویژه در اقلیم‌های خاص به شمار می‌روند (نامداراکبری و اصغری، ۱۳۹۷). با این حال، تجربیات موفق در بسیاری از کشورهای توسعه‌یافته نشان می‌دهد که با تدوین سیاست‌های تشویقی کارآمد، ارائه یارانه‌های دولتی هدفمند، اصلاح قوانین ساخت‌وساز و ارتقای سطح دانش و آگاهی عمومی، می‌توان بستر مناسبی را برای عبور از این موانع و حرکت به سوی شهرهای دوستدار محیط زیست فراهم آورد. بررسی دقیق روند رو به رشد تقاضا برای مسکن انعطاف‌پذیر و سازگار با محیط، حتی در میان جوامع کوچ‌نشین و عشایری نیز نشان‌دهنده اهمیت روزافزون توجه به الگوهای مسکن اکولوژیک و مبتنی بر حداقل مصرف انرژی در تمامی لایه‌های اجتماعی است (حصاری و حافظی، ۱۴۰۱). در این راستا، انجام مطالعات جامع، بومی‌سازی فناوری‌های وارداتی، ارزیابی دقیق پتانسیل‌های انرژی‌های تجدیدپذیر در نقاط مختلف جغرافیایی و بهره‌گیری از تجربیات جهانی، گام‌های اساسی در تدوین نقشه‌های راهبردی ملی برای توسعه ساختمان‌های صفر انرژی محسوب می‌شوند. مقاله حاضر با درک این ضرورت حیاتی و با رویکردی انتقادی و جامع، به بررسی ابعاد گوناگون این پدیده پرداخته و تلاش می‌کند تا با تبیین دقیق مبانی نظری، تحلیل پیشینه‌های علمی و ارزیابی یافته‌های نوین، تصویری روشن و کاربردی از افق‌های پیش‌روی معماری پایدار و ساختمان‌های دوستدار محیط زیست ارائه دهد.

سوالات پژوهش

- مفهوم ساختمان‌های صفر انرژی و مبانی نظری مرتبط با معماری پایدار از منظر شاخص‌های ترمودینامیکی، اکولوژیکی و مهندسی سیستم‌های انرژی چگونه تبیین و در مجامع علمی بین‌المللی تعریف می‌شود؟
- فناوری‌های نوین، استراتژی‌های طراحی کالبدی غیرفعال و رویکردهای ادغام سیستم‌های فعال تولید انرژی تجدیدپذیر چه نقشی در ارتقای کارایی و کاهش بار مصرفی ساختمان‌های مسکونی و تجاری ایفا می‌کنند؟
- چالش‌های اساسی و موانع عمده اقتصادی، اجتماعی، فنی و سیاستی در مسیر توسعه و اجرای موفقیت‌آمیز ساختمان‌های صفر انرژی در مقیاس‌های خرد معماری و مقیاس‌های کلان توسعه پایدار شهری کدامند؟
- چگونه می‌توان با بهره‌گیری از ابزارهای شبیه‌سازی پیشرفته، سیستم‌های هوشمند کنترل مصرف و استراتژی‌های تطبیقی اقلیمی، راهکارهای عملی و بومی‌سازی شده‌ای برای اقلیم‌های متنوع جغرافیایی ارائه نمود؟

اهداف پژوهش

- تبیین و تشریح جامع تعاریف، مفاهیم کلیدی و چارچوب‌های نظری مرتبط با ساختمان‌های صفر انرژی، ساختمان‌های با انرژی مثبت و نقش آن‌ها در تحقق آرمان‌های زیست‌محیطی و اصول معماری اکولوژیک مدرن.
- شناسایی، دسته‌بندی و ارزیابی دقیق فناوری‌های نوین ساختمان‌سازی، مصالح پیشرفته، و راهکارهای استفاده بهینه از منابع انرژی خورشیدی، بادی و زمین‌گرمایی در راستای به حداقل رساندن نیاز ساختمان به شبکه‌های سنتی.
- بررسی تطبیقی و تحلیل دستاوردهای عملی پروژه‌های اجرا شده در کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه به منظور استخراج الگوهای موفق، درک موانع موجود و ارزیابی پتانسیل‌های بومی‌سازی این مفاهیم در اقلیم‌های متفاوت.

- ارائه راهبردها، پیشنهادات کاربردی و رهیافت‌های مدیریتی به طراحان، معماران، سیاست‌گذاران شهری و مهندسان انرژی جهت تسهیل فرآیند گذار به سمت توسعه پایدار کالبدی و ایجاد زیرساخت‌های زیست‌محیطی کارآمد.

تعاریف و مبانی نظری

مفهوم ساختمان‌های صفر انرژی در ادبیات تخصصی معماری و مهندسی انرژی، به بناهایی اطلاق می‌گردد که با بهره‌گیری هوشمندانه از استراتژی‌های پیشرفته طراحی، بهینه‌سازی حداکثری مصرف انرژی و یکپارچه‌سازی با سیستم‌های تولید انرژی پاک، قادرند تمام یا بخش عمده‌ای از انرژی سالانه مورد نیاز خود را در محل پروژه تامین نمایند. این ساختمان‌ها به گونه‌ای طراحی، مهندسی و اجرا می‌شوند که برآیند تبادل انرژی آن‌ها با شبکه سراسری برق و گاز در طول یک بازه زمانی مشخص، معمولاً یک سال کامل، برابر با صفر و یا حتی از نظر تولید انرژی دارای تراز مثبت باشد. اساس این رویکرد بر پایه یک سلسله مراتب منطقی و دقیق علمی استوار است که در گام نخست بر به حداقل رساندن بار حرارتی، برودتی و الکتریکی ساختمان از طریق ارتقای چشمگیر کارایی کالبدی، افزایش کیفیت عایق‌بندی پوسته خارجی و بهره‌گیری از نور و تهویه طبیعی متمرکز می‌شود (رضائی و بیاتلو، ۱۴۰۴). پس از کاهش بنیادین نیازهای انرژی بنا، در گام بعدی، تمرکز بر روی تامین این نیاز اندک از طریق استقرار و استخراج انرژی از منابع کاملا تجدیدپذیر، پایدار و بدون آلایندگی کربنی است که عمدتاً شامل سامانه‌های فتوولتائیک یکپارچه با ساختمان، پمپ‌های حرارتی زمین‌گرمایی با راندمان بالا و توربین‌های بادی در مقیاس خرد شهری می‌گردد. در این راستا، گذار از مفهوم سنتی ساختمان به عنوان یک مصرف‌کننده صرف انرژی، به هویتی نوین به عنوان تولیدکننده و کنشگر فعال در شبکه انرژی هوشمند، یک تغییر بنیادین در مبانی نظری معماری اکولوژیکی و شهرسازی پایدار به حساب می‌آید که الزامات طراحی ویژه‌ای را می‌طلبد (کولوکوتسا و همکاران، ۲۰۲۲). از منظر ترمودینامیکی، این بناها سیستم‌هایی باز با مدیریت دقیق تبادلات انرژی هستند که با اتکا بر اصول آنتروپی پایین، تلاش می‌کنند تا اتلاف حرارتی به محیط پیرامون را کاهش داده و در عین حال، دریافت‌های خورشیدی را به صورت هوشمندانه کنترل و مدیریت نمایند.

در بررسی دقیق‌تر مبانی نظری این حوزه، تعاریف متعددی برای تفکیک سطوح مختلف کارایی انرژی در ساختمان‌ها ارائه شده است که درک تفاوت‌های ظریف آن‌ها برای سیاست‌گذاری و ارزیابی عملکرد پروژه‌ها بسیار ضروری و حیاتی است. ساختمان‌های تقریبا صفر انرژی (NZEB) بناهایی هستند که عملکرد انرژی آن‌ها به شدت بالا و بهینه است و مقدار بسیار اندک انرژی مورد نیاز آن‌ها باید تا حد بسیار زیادی از منابع انرژی تجدیدپذیر، از جمله منابع تولید شده در محل پروژه یا نواحی نزدیک به آن تامین گردد. از سوی دیگر، ساختمان‌های انرژی مثبت (PEB) گامی فراتر از حالت خنثی نهاده و با تولید مازاد انرژی الکتریکی یا حرارتی پاک در طول سال، به عنوان یک نیروگاه کوچک‌مقیاس عمل کرده و قابلیت تزریق توان مازاد به شبکه برق سراسری یا شبکه‌های محلی مجاور خود را دارا می‌باشند (باروتیتا و همکاران، ۲۰۲۳). این تعاریف نشان می‌دهند که مسیر دستیابی به پایداری مطلق کالبدی، طیفی گسترده از راهکارها را شامل می‌شود که هر یک از آن‌ها نیازمند زیرساخت‌های مهندسی، شبکه‌های انتقال هوشمند موسوم به گرید هوشمند و ابزارهای پیشرفته مدیریت بار مصرفی هستند. همچنین، مفهوم صفر کربن در ارتباط تنگاتنگ با صفر انرژی قرار دارد، با این تفاوت که تمرکز اصلی آن بر جبران کامل انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از عملیات ساخت، استخراج مصالح، بهره‌برداری و حتی تخریب ساختمان است که رویکردی بسیار جامع‌تر تحت عنوان ارزیابی چرخه حیات (LCA) را شامل می‌شود. بنابراین، موفقیت در پیاده‌سازی این الگوها به شدت وابسته به شرایط اقلیمی منطقه، فناوری‌های در دسترس، سیاست‌های تشویقی دولت‌ها در زمینه خرید تضمینی برق مازاد و سطح بلوغ فناوری در زنجیره تامین مصالح پیشرفته ساختمانی می‌باشد (دوراکوویچ، ۲۰۲۶). در

نهایت، مبانی نظری توسعه پایدار در بخش ساختمان تاکید دارد که بهینه‌سازی فناوری‌ها باید همزمان با توجه به ابعاد اقتصادی، رفاهی و آسایش روانی ساکنین صورت پذیرد تا نتایج پایداری در بلندمدت تضمین گردد.

رویکردهای نظری در حوزه معماری پایدار و طراحی اکولوژیکی، بر استفاده از روش‌های متنوعی به منظور تطبیق حداکثری ساختمان با شرایط اقلیمی سایت و بهره‌گیری از پتانسیل‌های طبیعی بستر طرح تاکید می‌ورزند که این اصول سنگ بنای طراحی ساختمان‌های صفر انرژی محسوب می‌شوند. استفاده از معماری خورشیدی غیرفعال، جهت‌گیری بهینه حجم ساختمان به منظور دریافت حداکثری تابش زمستانه و کنترل سایه‌اندازی تابستانه، استفاده از سیستم‌های جرم حرارتی بالا جهت ذخیره و آزادسازی تدریجی گرما، و طراحی هندسی مناسب پنجره‌ها برای ایجاد جریان‌های همرفتی و تهویه طبیعی متقاطع، از جمله استراتژی‌های کلیدی در این زمینه می‌باشند. علاوه بر راهکارهای کالبدی غیرفعال، ورود تکنولوژی‌های فعال هوشمند و سیستم‌های مدیریت ساختمان (BMS) نقش بی‌بدیلی در کنترل دقیق، مانیتورینگ لحظه‌ای و بهینه‌سازی مصرف حامل‌های انرژی در بخش‌های روشنایی، سرمایش و گرمایش فضاهای داخلی ایفا می‌نمایند (فرازمند و همکاران، ۱۳۹۵). در رویکرد سیستمی یکپارچه، ساختمان نه به عنوان مجموعه‌ای از اجزای مجزا، بلکه به عنوان یک ارگانیسم زنده و هوشمند در نظر گرفته می‌شود که تمامی زیرسیستم‌های آن در هماهنگی کامل با یکدیگر عمل کرده و به تغییرات محیطی درون و بیرون پاسخ‌های متناسب و فوری می‌دهند. به کارگیری نرم‌افزارهای شبیه‌سازی پیشرفته انرژی در مراحل اولیه طراحی مفهومی، امکان مدل‌سازی رفتار ترمودینامیکی ساختمان و پیش‌بینی دقیق میزان مصرف و تولید انرژی را فراهم می‌آورد و بدین ترتیب به تیم طراحی اجازه می‌دهد تا سناریوهای مختلف کالبدی، متریال‌ها و سیستم‌های مکانیکی را با یکدیگر مقایسه و بهینه‌ترین حالت ممکن را انتخاب نمایند (براتی و همکاران، ۱۴۰۲). تمامی این فرآیندهای نظری و عملی نشان‌دهنده تغییر پارادایم از طراحی‌های فرم‌گرا و انرژی‌بر به سمت معماری عملکردگرا، پاسخگو، همساز با اقلیم و به شدت دوستدار محیط زیست می‌باشد.

جدول ۱. مفاهیم کلیدی، ویژگی‌ها و رویکردهای اجرایی مرتبط با معماری پایدار و ساختمان‌های صفر انرژی

مفاهیم کلیدی	توضیحات و ویژگی‌های اصلی	رویکردهای اجرایی و فناوری‌های مرتبط
ساختمان صفر انرژی (ZEB)	برآیند صفر بین مصرف سالانه و تولید انرژی از منابع تجدیدپذیر.	عایق‌بندی پیشرفته، پنل‌های فتوولتائیک، پمپ‌های زمین‌گرمایی، شیشه‌های چندجداره.
ساختمان تقریبا صفر انرژی	کارایی حرارتی بسیار بالا و تامین نیاز اندک انرژی از منابع پاک محلی.	سیستم‌های تهویه مکانیکی با بازیابی حرارتی، طراحی غیرفعال خورشیدی، مصالح نوین.
ساختمان با انرژی مثبت	تولید انرژی مازاد بر نیاز سالانه و قابلیت تزریق به شبکه سراسری شهری.	ادغام سیستم‌های ترکیبی خورشیدی-بادی، شبکه‌های هوشمند دوطرفه، ذخیره‌سازهای باتری.

معماری اکولوژیک (صفر کربن)	به حداقل رساندن ردپای کربن در کل چرخه حیات متریال و ساخت.	استفاده از مصالح بومی با انرژی تجسم یافته پایین، بازیافت مصالح، ارزیابی چرخه حیات.
سیستم‌های هوشمند انرژی	پایش، کنترل و بهینه‌سازی خودکار تاسیسات مکانیکی و الکتریکی بنا.	اینترنت اشیاء، سنسورهای حضور، روشنایی تطبیقی، سیستم‌های BMS یکپارچه ابری.

پیشینه پژوهش

ادبیات پژوهشی موجود در زمینه توسعه، ارزیابی و شبیه‌سازی ساختمان‌های صفر انرژی در دهه‌های اخیر رشد چشمگیری داشته است که نشان‌دهنده اهمیت روزافزون این حوزه استراتژیک در میان دانشگاهیان، سیاست‌گذاران و مهندسان در سطح بین‌المللی و ملی می‌باشد. مطالعات متعددی به بررسی جنبه‌های مختلف فنی، اقتصادی و اقلیمی این نوع بناها پرداخته‌اند و تلاش کرده‌اند تا با ارائه راهکارهای عملی، مسیر گذار به سمت پایداری کامل در بخش ساخت‌وساز را در شرایط جغرافیایی متفاوت و با محدودیت‌های بودجه‌ای گوناگون هموار سازند. در پژوهش‌های انجام شده در اقلیم‌های سرد و کوهستانی، ضرورت بهره‌گیری از ترکیب سیستم‌های غیرفعال برای حفظ حرارت داخلی با تکنولوژی‌های فعال تولید انرژی مانند سامانه‌های خورشیدی و توربین‌های بادی مقاوم در برابر شرایط سخت آب و هوایی مورد تاکید جدی و تحلیل دقیق قرار گرفته است (اسماعیلی، ۱۳۹۳). همچنین، ارزیابی‌ها نشان داده است که رویکرد صفر انرژی صرفاً مختص به بناهای جدید و مسکونی نیست، بلکه کاربرد الگوهای نوین، هوشمند و سبز در ساختمان‌های اداری و تجاری موجود نیز با استفاده از راهکارهای بهسازی عمیق و یکپارچه‌سازی سیستم‌های تولید پراکنده، پتانسیل بسیار بالایی در کاهش بار شبکه توزیع و ارتقای کیفیت زیست شهری دارد (بایندور و همکاران، ۱۴۰۴). پژوهشگران همواره بر این نکته کلیدی تاکید دارند که موفقیت پروژه‌های زیست‌محیطی در مقیاس وسیع، تنها با اتکا بر راهکارهای مهندسی امکان‌پذیر نخواهد بود، بلکه بررسی دقیق میزان پذیرش اجتماعی، ارتقای آگاهی عمومی شهروندان نسبت به مزایای اقتصادی بلندمدت و درک جامع از چرخه حیات این ساختمان‌ها از ارکان بنیادین توسعه پایدار محسوب می‌گردد (اصغری و سیدالماسی، ۱۳۹۷).

تحلیل‌های تطبیقی در سطح بین‌المللی نشان‌دهنده تفاوت‌های معنادار در سیاست‌گذاری‌ها، سطح تکنولوژی‌ها و رویکردهای حمایتی دولت‌ها برای استقرار و ترویج ساختمان‌های صفر انرژی و انرژی مثبت در مناطق جغرافیایی مختلف است. بررسی تجربیات کشورهای پیشرو نظیر ژاپن و استرالیا حاکی از آن است که تدوین قوانین سخت‌گیرانه در مبحث بهینه‌سازی انرژی ساختمان‌ها، همگام با ارائه مشوق‌های مالی جذاب برای نصب سیستم‌های خورشیدی و تجهیزات هوشمند، نقشی کلیدی و محرک در سرعت بخشیدن به حرکت به سوی اهداف صفر خالص انرژی ایفا کرده است (شریعتی و مجیدی، ۱۴۰۳). از منظر کلان‌شهری و برنامه‌ریزی شهری در کشورهای در حال توسعه، امکان‌سنجی ایجاد، توسعه و یکپارچه‌سازی ساختمان‌های زیست‌محیطی در مقیاس محلات پایدار نیازمند شناسایی دقیق پتانسیل‌های بومی، ارزیابی زیرساخت‌های انتقال و توزیع انرژی محلی و تحلیل موانع اقتصادی ناشی از هزینه‌های بالای فناوری‌های وارداتی نوین می‌باشد (نامداراکبری و اصغری، ۱۳۹۷). تحقیقات نشان می‌دهد که توسعه تکنیک‌ها، راهبردها و فعالیت‌های جهانی در حوزه بناهای مسکونی دوستدار محیط زیست نیازمند تبادل دانش مستمر، همکاری‌های فناورانه بین‌المللی و استفاده از رویکردهای نوآورانه در مدیریت تقاضای انرژی به منظور ایجاد شهرهای مقاوم و پایدار در برابر چالش‌های اقلیمی آینده است (محمد و همکاران، ۲۰۲۳). در مجموع، مرور گسترده ادبیات پژوهشی اثبات می‌کند که گذار موثر و کارآمد به سوی معماری صفر انرژی

نیازمند یک چارچوب تحلیلی و اجرایی چندرشته‌ای است که در آن مهندسی انرژی، معماری، اقتصاد و علوم اجتماعی با یکدیگر در تعاملی پیوسته و هدفمند قرار داشته باشند.

جدول ۲. خلاصه پیشینه پژوهش و دستاوردهای کلیدی مطالعات در حوزه ساختمان‌های صفر انرژی

ردیف	پژوهشگران و سال انتشار	تمرکز اصلی پژوهش و رویکرد تحلیلی	یافته‌های کلیدی و دستاوردهای برجسته
۱	صالحی‌فر و نادری یاقوتی (۱۳۹۵)	مزایا، تاثیرات کلان زیست‌محیطی و اصول طراحی	تبیین مزایای اکولوژیک بلندمدت و نقش محوری معماری پایدار در کاهش آلاینده‌ها.
۲	وکیل‌زاده انارکی و همکاران (۱۳۹۳)	مکانیزم سیستم‌های تجدیدپذیر در ساختمان انرژی صفر	ضرورت ترکیب منطقی طراحی غیرفعال حرارتی با فناوری‌های نوین و پاک تولید نیرو.
۳	اصغری و همکاران (۱۴۰۰)	ارزیابی محلات پایدار و شاخص‌های توسعه شهری	اثبات تاثیر مثبت ساختمان‌های سبز در بهبود کیفیت زندگی و شاخص‌های پایداری کلانشهر تبریز.
۴	کاظمی و همکاران (۱۴۰۱)	اولویت‌بندی شهرهای ایران با روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه	شناسایی مناطق دارای بالاترین پتانسیل اقلیمی جهت توسعه سریع پروژه‌های انرژی صفر.
۵	عمر (۲۰۲۵)	استراتژی‌های NZEB برای سازگاری با تغییرات اقلیمی شهری	راهکارهای یکپارچه طراحی شهری برای کاهش اثرات مخرب جزایر حرارتی در کلان‌شهرها.

روش پژوهش

روش انجام این مقاله مروری به صورت کتابخانه‌ای، توصیفی-تحلیلی و مرور نظام‌مند منابع علمی و اسنادی معتبر پیرامون موضوع ساختمان‌های صفر انرژی و توسعه پایدار انتخاب شده است. در این فرآیند، با جستجو و استخراج دقیق اطلاعات از مقالات پژوهشی داخلی و خارجی، کتب مرجع، پایان‌نامه‌ها و گزارش‌های مستند بین‌المللی، ابعاد مختلف نظری، فنی، اقتصادی و اجتماعی این حوزه با دقت بالا مورد ارزیابی، طبقه‌بندی و ترکیب قرار گرفته است. تحلیل کیفی محتوای ادبیات پیشین و استنتاج منطقی از داده‌های گردآوری شده، شالوده اصلی تدوین بخش‌های یافته‌ها و نتیجه‌گیری این پژوهش را جهت ارائه چشم‌اندازی جامع از افق‌های نوین معماری پایدار تشکیل داده است.

یافته‌ها

یافته‌های حاصل از بررسی جامع و تحلیل کیفی منابع مختلف در زمینه ساختمان‌های صفر انرژی نشان‌دهنده گستردگی ابعاد، تنوع استراتژی‌ها و پیچیدگی‌های فنی و اجرایی نهفته در این حوزه استراتژیک از مهندسی نوین ساختمان می‌باشد. این یافته‌ها را می‌توان در قالب بخش‌های مجزا و به صورت کاملا توصیفی و تحلیلی دسته‌بندی نمود تا تصویری روشن از مکانیزم‌ها، راهکارهای اجرایی، پتانسیل‌های اقلیمی، موانع اقتصادی و رویکردهای فناورانه در مسیر گذار به سوی معماری اکولوژیک مدرن و پایدار ارائه گردد. تحلیل‌های صورت گرفته مبین آن است که دستیابی به شاخص‌های قطعی و دقیق صفر انرژی، فرآیندی خطی و ساده نبوده، بلکه

مستلزم یکپارچه‌سازی هوشمندانه تمامی فرآیندهای دخیل در چرخه حیات یک بنا، از فاز صفر طراحی مفهومی گرفته تا مراحل بهره‌برداری طولانی‌مدت و هوشمندسازی کامل زیرساخت‌ها می‌باشد.

استراتژی‌های طراحی غیرفعال و بهینه‌سازی کالبدی

نخستین و مهم‌ترین رکن اساسی در طراحی و توسعه ساختمان‌های صفر انرژی، تمرکز جدی و عمیق بر استراتژی‌های طراحی غیرفعال خورشیدی، معماری همساز با اقلیم محلی و بهینه‌سازی دقیق کالبد فیزیکی ساختمان به منظور به حداقل رساندن اتلاف انرژی و نیازهای حرارتی پایه‌ای است. بهره‌گیری گسترده از عایق‌های حرارتی با دانسیته و مقاومت بالا در دیواره‌های خارجی، بام و کف بنا، نصب پنجره‌های هوشمند چندجداره با گازهای عایق حرارتی بین جداره‌ها و حذف کامل پل‌های حرارتی در ساختار اسکلت و اتصالات سازه، از جمله ابتدایی‌ترین و در عین حال اثربخش‌ترین اقدامات کالبدی و مهندسی در این زمینه محسوب می‌گردند (صالحی‌فر و نادری یاقوتی، ۱۳۹۵). همچنین، جهت‌گیری دقیق و علمی فرم ساختمان با توجه به زاویه تابش خورشید در فصول مختلف سال، طراحی سایبان‌های متحرک هوشمند برای کنترل بار سرمایشی تابستان، و تعبیه بازشوهای مهندسی شده جهت ایجاد کوران و تهویه طبیعی متقاطع، نقش بسیار حیاتی در کاهش شدید نیاز به استفاده از سیستم‌های مکانیکی انرژی‌بر ایفا می‌نماید. تحقیقات نشان داده است که انتخاب و استفاده اصولی از مصالح ساختمانی دارای ظرفیت حرارتی مناسب، می‌تواند منجر به جذب گرمای تابشی در طول روز و آزادسازی تدریجی آن در محیط داخل ساختمان در طول شب گردد که این امر به طور قابل توجهی باعث تثبیت شرایط آسایش حرارتی فضای داخلی و کاهش نوسانات دمایی آزاردهنده در اقلیم‌های سرد و خشک یا بیابانی می‌شود (همتیان و گرجی مهلبانی، ۱۴۰۲). تمامی این رویکردهای غیرفعال کالبدی که ریشه در معماری بومی مناطق مختلف دارند، به عنوان گام نخست و بنیادین در فرآیند پیچیده صفر کردن برآیند مصرف انرژی بنا عمل کرده و ظرفیت سیستم‌های فعال مورد نیاز را به شدت کاهش می‌دهند.

نقش سیستم‌های هوشمند و فناوری‌های نوین

پس از اجرای دقیق تمهیدات کالبدی و معماری غیرفعال، بهره‌گیری همه‌جانبه از سیستم‌های کنترل هوشمند، اتوماسیون پیشرفته ساختمان و یکپارچه‌سازی شبکه‌های نظارتی مجهز به تکنولوژی اینترنت اشیاء (IoT) به عنوان گام اساسی و مکمل بعدی در راستای بهینه‌سازی مدیریت انرژی و ارتقای راندمان تاسیسات مطرح می‌گردد. استفاده از سنسورهای تشخیص حضور افراد، دتکتورهای کنترل شدت روشنایی مبتنی بر نور طبیعی، ترموستات‌های هوشمند با قابلیت یادگیری الگوهای رفتاری ساکنین، و سیستم‌های پیشرفته تهویه مطبوع مجهز به بازیاب حرارتی (HRV)، از جمله فناوری‌های نوین و حیاتی در این حوزه به شمار می‌روند که راندمان را به طرز چشمگیری بالا می‌برند (فرازمند و همکاران، ۱۳۹۵). این سیستم‌های کنترل مرکزی پیچیده با مانیتورینگ پیوسته و لحظه‌ای شرایط متغیر محیطی داخل و خارج ساختمان، به صورت خودکار و کاملا هوشمند، عملکرد تجهیزات سرمایشی، گرمایشی، روشنایی و تهویه را با بالاترین میزان بهره‌وری و کمترین سطح اتلاف انرژی تنظیم و مدیریت می‌نمایند. از سوی دیگر، بهره‌گیری از نرم‌افزارهای قدرتمند شبیه‌سازی انرژی در مراحل قبل از ساخت، امکان پیش‌بینی دقیق رفتار ترمودینامیکی ساختمان و ارزیابی تاثیر پارامترهای گوناگون بر میزان مصرف حامل‌های انرژی را به تیم طراحی مهندسی می‌دهد تا بهترین سناریوها را استخراج و پیاده‌سازی نمایند (براتی و همکاران، ۱۴۰۲). ترکیب فناوری‌های پیشرفته حوزه اطلاعات، مخابرات و سیستم‌های مدیریت یکپارچه مبتنی بر هوش مصنوعی با اصول بنیادین مهندسی ساختمان، تحولی عمیق در گذار از ساختمان‌های استاتیک سنتی به ساختارهایی پویا، یادگیرنده و به شدت واکنش‌گرا در برابر تغییرات اقلیمی ایجاد نموده است.

تحلیل سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر در اقلیم‌های مختلف

تامین انرژی باقیمانده و مورد نیاز ساختمان که پس از اعمال دقیق راهکارهای بهینه‌سازی غیرفعال و فعال به حداقل ممکن رسیده است، باید منحصراً از طریق پیاده‌سازی سیستم‌های تولید انرژی از منابع تجدیدپذیر، پایدار و محلی نظیر انرژی خورشیدی، بادی و زمین‌گرمایی با بالاترین راندمان صورت پذیرد. پنل‌های فتوولتائیک یکپارچه با نمای ساختمان و نصب شده در سطوح بام، به عنوان متداول‌ترین، دردسترس‌ترین و منعطف‌ترین سیستم فعال خورشیدی برای تولید انرژی الکتریکی بدون تولید صدای مزاحم و آلایندگی در محیط‌های پرتراکم شهری شناخته می‌شوند که کاربرد وسیعی یافته‌اند (وکیل‌زاده انارکی و همکاران، ۱۳۹۳). در مناطق کوهستانی، مرتفع و بادخیز با اقلیم‌های سرد که پتانسیل انرژی بادی بسیار مطلوبی در آن‌ها وجود دارد، استفاده ترکیبی از توربین‌های بادی محور عمودی در مقیاس کوچک شهری و پنل‌های خورشیدی، راهکاری بسیار مطمئن و پایدار برای تضمین تامین مداوم انرژی مورد نیاز و رسیدن به سطح پایداری کامل محسوب می‌گردد (اسماعیلی، ۱۳۹۳). انتخاب صحیح، طراحی ابعاد مناسب، مکان‌یابی دقیق و استقرار بهینه این سیستم‌های تولید پراکنده به شدت نیازمند مطالعات جامع و تحلیل دقیق پتانسیل‌های جغرافیایی، محدودیت‌های فضایی سایت پروژه، زاویه تابش خورشید در طول سال و استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته تصمیم‌گیری برای اولویت‌بندی است (کاظمی و همکاران، ۱۴۰۱). این انعطاف‌پذیری تکنولوژیک بالا و قابلیت سازگاری سیستم‌های تجدیدپذیر با شرایط خاص هر منطقه جغرافیایی، به طراحان محیطی و معماران این امکان را می‌دهد تا راه‌حل‌های کاملا بومی، سفارشی‌سازی شده و کارآمدی را برای مناطق اقلیمی متنوع، از مناطق سردسیر کوهستانی گرفته تا نواحی گرم و خشک طراحی و اجرا نمایند.

جدول ۳. حوزه‌های تخصصی، استراتژی‌ها و اهداف بنیادین در توسعه معماری انرژی صفر

حوزه تخصصی اقدام	استراتژی‌ها و فناوری‌های مورد استفاده	هدف اصلی در معماری انرژی صفر
معماری غیرفعال	عایق‌کاری، جرم حرارتی، جهت‌گیری بهینه، تهویه طبیعی	کاهش حداکثری بار پایه سرمایشی، گرمایشی و روشنایی.
فناوری‌های فعال هوشمند	سیستم‌های BMS، نورپردازی LED هوشمند، سنسورهای اقلیمی	کنترل دقیق مصرف انرژی و جلوگیری از اتلاف آنی منابع.
سیستم‌های تجدیدپذیر محلی	فتوولتائیک، آبگرمکن خورشیدی، پمپ حرارتی زمین‌گرمایی	تامین انرژی پاک مورد نیاز به منظور رساندن برآیند به صفر.

ارزیابی اقتصادی و چالش‌های توسعه در مقیاس شهری

گسترش و ترویج مفاهیم بنیادین ساختمان‌های صفر انرژی از مقیاس تک‌بناهای معماری منفرد به مقیاس بسیار وسیع‌تر محلات پایدار شهری و کلان‌شهرها، با چالش‌ها، موانع زیرساختی و پیچیدگی‌های اقتصادی و مدیریتی فراوان و چندلایه‌ای در کشورهای مختلف روبرو می‌باشد. هزینه‌های بالای سرمایه‌گذاری اولیه برای خرید تجهیزات پیشرفته نوین، واردات تکنولوژی‌های مرتبط با سیستم‌های تولید خورشیدی، باتری‌های ذخیره‌ساز ظرفیت بالا و سیستم‌های پیچیده هوشمند، به عنوان یکی از مهم‌ترین موانع

اقتصادی در مسیر توسعه سریع و فراگیر این الگوها، به ویژه در مناطق و کشورهای در حال توسعه با محدودیت‌های شدید منابع مالی و یارانه‌ای شناخته می‌شود (نامداراکبری و اصغری، ۱۳۹۷). با وجود این چالش اولیه، ارزیابی‌های جامع و تحلیل‌های مبتنی بر اقتصاد مهندسی نشان می‌دهند که در یک دوره بررسی چرخه حیات کامل ساختمان، کاهش چشمگیر هزینه‌های جاری مربوط به پرداخت قبوض انرژی شبکه‌ای و کاهش چشمگیر هزینه‌های نگهداری تاسیسات، منجر به بازگشت سریع سرمایه اولیه و ایجاد توجیه اقتصادی بسیار منطقی و قابل قبولی برای سازندگان، بهره‌برداران و سرمایه‌گذاران بلندمدت این پروژه‌های پایدار می‌گردد (رضائی و بیاتلو، ۱۴۰۴). موفقیت در توسعه کلان و مقیاس‌پذیر این بناهای زیست‌محیطی، نیازمند حمایت‌های جدی دولتی، تدوین قوانین دقیق برای تشویق سرمایه‌گذاری، ارائه وام‌های کم‌بهره و معافیت‌های مالیاتی خاص به سازندگان، و اصلاح اساسی شبکه‌های سنتی انتقال توزیع انرژی برای امکان‌پذیری تزریق دوطرفه انرژی مازاد می‌باشد. همچنین، ارتقای آگاهی اجتماعی، تغییر الگوهای مصرفی شهروندان و ایجاد بستر مناسب برای پذیرش رویکردهای زیست‌محیطی در قالب توسعه جوامع پایدار محلی، از دیگر الزامات حیاتی و غیرقابل انکار برای تحقق رویای شهر پایدار و هوشمند محسوب می‌شود (اصغری و همکاران، ۱۴۰۰). این توسعه متوازن نه تنها منجر به استقلال انرژی محلات می‌شود، بلکه به طور مستقیم در ارتقای سلامت عمومی، کاهش بیماری‌های تنفسی ناشی از آلودگی و سازگاری موثر با اثرات مخرب تغییرات آب و هوایی در فضای شهری تاثیرگذار است (عمر، ۲۰۲۵).

بحث و نتیجه‌گیری

گسترش بی‌رویه شهرنشینی، افزایش تقاضا برای مصرف سوخت‌های فسیلی و بروز بحران‌های جدی زیست‌محیطی نظیر گرمایش جهانی و تغییرات شدید اقلیمی، ضرورت ایجاد یک تحول بنیادین در الگوهای سنتی معماری و مهندسی ساخت‌وساز را در سطح بین‌المللی اجتناب‌ناپذیر ساخته است. در این گذار پارادایمی و حیاتی، ساختمان‌های صفر انرژی تنها به عنوان یک رویکرد فنی صرف برای کاهش مقطعی هزینه‌های انرژی مطرح نیستند، بلکه نمایانگر یک فلسفه طراحی کل‌نگر، مسئولانه و کاملا منطبق بر اصول توسعه پایدار می‌باشند که تعامل ارگانیک و سازنده‌ای با محیط زیست پیرامون خود برقرار می‌کنند. نتایج حاصل از تحلیل جامع مبانی نظری، بررسی انتقادی پیشینه‌های پژوهشی و ارزیابی دقیق فناوری‌های نوین در این مقاله مروری نشان می‌دهد که دستیابی به اهداف آرمانی صفر انرژی، نیازمند اتخاذ یک رویکرد چندوجهی، یکپارچه و به شدت بین‌رشته‌ای در تمامی مراحل طراحی، اجرا، مدیریت، بهره‌برداری و حتی پایان عمر مفید بنا می‌باشد. موفقیت در پیاده‌سازی این سیستم‌های پیچیده مستلزم آن است که در گام نخست، با استفاده از استراتژی‌های پیشرفته طراحی غیرفعال خورشیدی، بهینه‌سازی فرم هندسی، عایق‌بندی حداکثری پوسته کالبدی و بهره‌گیری هوشمندانه از پتانسیل‌های اقلیمی بستر طرح، نیاز پایه ساختمان به انرژی‌های حرارتی و برودتی به کمترین میزان ممکن در طول سال کاهش یابد. پس از اعمال این رویکردهای مهندسی غیرفعال، ورود تکنولوژی‌های فعال هوشمند، سیستم‌های مدیریت یکپارچه اطلاعات ساختمان و شبکه‌های پیشرفته مبتنی بر اینترنت اشیاء، امکان مانیتورینگ، کنترل خودکار و بهینه‌سازی لحظه‌ای تاسیسات مکانیکی و الکتریکی را با بالاترین راندمان ممکن فراهم می‌آورد. در نهایت، تامین انرژی بسیار اندک باقیمانده از طریق ادغام سیستم‌های تولید برق پایدار نظیر پنل‌های فتوولتائیک یکپارچه با نما، توربین‌های بادی کوچک‌مقیاس متناسب با بادهای محلی و پمپ‌های حرارتی زمین‌گرمایی، چرخه پایداری انرژی در مقیاس پروژه را تکمیل نموده و امکان ایجاد تراز مثبت انرژی و حتی تزریق نیروی پاک به شبکه توزیع شهری را به شکل عملیاتی محقق می‌سازد.

با این وجود، ارزیابی‌های گسترده صورت گرفته در این پژوهش حاکی از آن است که مسیر توسعه فراگیر و مقیاس‌پذیر این رویکرد زیست‌محیطی در سطح کلان‌شهرها، به ویژه در بستر کشورهای در حال توسعه، همچنان با چالش‌ها و موانع متعددی در حوزه‌های اقتصادی، قانونی، فنی و فرهنگی مواجه است. هزینه‌های بالای سرمایه‌گذاری اولیه برای تهیه و نصب تجهیزات پیشرفته نوین وارداتی، عدم وجود زیرساخت‌های حقوقی و شبکه‌های هوشمند توزیع با قابلیت انتقال دوطرفه برق، فقدان نیروی کار متخصص و تکنیسین‌های ماهر در زمینه نگهداری تجهیزات حساس تجدیدپذیر، و از همه مهم‌تر سطح پایین آگاهی عمومی جوامع نسبت به ارزش‌های اقتصادی و زیست‌محیطی بلندمدت این بناها، از جمله جدی‌ترین موانع در مسیر توسعه شتابان الگوهای مسکن پایدار محسوب می‌شوند. با این حال، تحلیل‌های مبتنی بر ارزیابی چرخه حیات کامل ساختمان به روشنی اثبات می‌کنند که منافع بلندمدت اقتصادی ناشی از کاهش چشمگیر هزینه‌های جاری تامین انرژی، تقلیل هزینه‌های پنهان مرتبط با آسیب‌های زیست‌محیطی، و افزایش چشمگیر ارزش افزوده املاک دوستدار محیط زیست، توجیه بسیار منطقی و قدرتمندی برای عبور از این چالش‌های اولیه سرمایه‌گذاری فراهم می‌آورد. از این رو، تدوین سیاست‌های حمایتی جامع، ارائه مشوق‌های مالی هدفمند، اصلاح مقررات ملی ساخت‌وساز، الزام سازندگان به رعایت شاخص‌های کلیدی پایداری انرژی، و سرمایه‌گذاری کلان در بخش تحقیق، توسعه و بومی‌سازی فناوری‌های مرتبط با انرژی‌های پاک، از ضروری‌ترین گام‌های راهبردی برای تسریع این گذار حیاتی در سطح ملی و منطقه‌ای به شمار می‌آید. در پایان باید تاکید نمود که ساختمان‌های صفر انرژی نه تنها یک آرمان دور از دسترس زیست‌محیطی نیستند، بلکه به عنوان افق‌های نوین، روشن و کاملا عملیاتی معماری پایدار شناخته می‌شوند که در صورت همراهی، مشارکت فعال و همگرایی تمامی ذی‌نفعان اعم از طراحان، سیاست‌گذاران کلان شهری و عموم شهروندان، قابلیت بسیار بالایی برای ارتقای کیفیت زندگی، ساخت شهرهای مقاوم در برابر تغییرات اقلیمی و تضمین آینده‌ای پایدار برای نسل‌های متمادی در سراسر کره خاکی خواهند داشت.

منابع

- اسماعیلی، ا. (۱۳۹۳). استفاده از انرژی تجدیدپذیر خورشید و باد در ساختمان‌های صفر انرژی به منظور نیل به اهداف معماری پایدار در مناطق سرد و کوهستانی. در *چهارمین کنفرانس بین‌المللی رویکردهای نوین در نگهداشت انرژی*.
- اصغری، ع.، ابراهیمی اصل، ح.، ملکی گاوگانی، آ.، و ستاری ساربانقلی، ح. (۱۴۰۰). ارزیابی محله پایدار شهری با ساختمان‌های صفر انرژی در محله ولی‌عصر تبریز. *نشریه شهر پایدار*، ۴(۲).
- اصغری، ع.، و سیدالماسی، م. (۱۳۹۷). میزان آگاهی اجتماعی نسبت به ساختمان‌های صفر انرژی. در *کنفرانس عمران، معماری و شهرسازی کشورهای جهان اسلام*.
- بایندور، ف.، ابراهیمی اصل، ح.، و حیدری، ب. (۱۴۰۴). تحلیلی بر الگوی ساختمان‌های صفر انرژی در اقلیم سرد و خشک شهر تبریز (مورد مطالعه: ساختمان اداری پسماند شهری). *نشریه علوم و تکنولوژی محیط زیست*، ۲۷(۴).
- شریعتی، ک. ا.، و مجیدی، ف. ا. (۱۴۰۳). بررسی و تحلیل ساختمان‌های صفر انرژی در راستای کاهش مصرف و تولید انرژی (نمونه موردی: بررسی دو ساختمان صفر انرژی در استرالیا و ژاپن). *نشریه پژوهش‌های پایداری مکان*، ۱(۲).

- صالحی‌فر، م.، و نادری یاقوتی، م. (۱۳۹۵). مزایای ساخت ساختمان‌های صفر انرژی و تأثیرات آن بر معماری پایدار. در *سومین کنفرانس بین‌المللی پژوهش در مهندسی، علوم و تکنولوژی*.
- فرازمند، آ.، سعیدزاده، ف.، و پنجستونی، ع. (۱۳۹۵). تحولی در ساختمان‌سازی با استفاده از سیستم‌های هوشمند. در *کنفرانس بین‌المللی پژوهش در علوم و تکنولوژی*.
- نامداراکبری، ش.، و اصغری، ع. (۱۳۹۷). امکان‌سنجی ایجاد و توسعه ساختمان‌های صفر انرژی در کلانشهرهای ایران مطالعه موردی: کلانشهر تبریز. در *کنفرانس عمران، معماری و شهرسازی کشورهای جهان اسلام*.
- وکیل‌زاده انارکی، م.، شعاعی، ح.، و بهمن‌پور، ه. (۱۳۹۳). نقش انرژی‌های تجدیدپذیر در سازوکار ساختمان‌های صفر انرژی. در *چهارمین کنفرانس بین‌المللی توسعه پایدار و عمران شهری*.
- همتیان، ه.، و گرجی مهلبانی، ی. (۱۴۰۲). گزینه‌ها و استراتژی‌های فناورانه به سوی ساختمان‌های صفر انرژی. در *نهمین همایش علمی پژوهشی توسعه و ترویج علوم معماری و شهرسازی ایران*.
- براتی، ا.، تشکر، س.، و شمس‌نیا، ا. (۱۴۰۲). طراحی ساختمان انرژی صفر با استفاده از نرم افزار PVsyst و Energy Plus. *پژوهش‌های سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی انرژی*، (۳۰)، ۹۴-۶۵.
- حصاری، پ.، و حافظی، س. (۱۴۰۱). بررسی ساختار فضایی مسکن کوچ‌نشینان با قابلیت حمل و سازگاری با محیط (مطالعه موردی: عشایر طایفه بریوانلو در خراسان). *مطالعات برنامه‌ریزی قلمرو کوچ‌نشینان*، ۲(۲)، ۱۰۳-۷۷.
- خرازی صنعت شتربان، م. (۱۴۰۱). ساختمان‌های انرژی صفر یا صفر کربن حرکتی در راستای معماری اکولوژیکی. *معماری‌شناسی*، (۲۳)، ۳۱-۱۸.
- رضائی، ج.، و بیاتلو، ط. (۱۴۰۴). تحلیل سلسله مراتبی پارامترهای موثر بر مصرف انرژی در ساختمان با رویکرد طراحی پایدار. *مطالعات جغرافیا، عمران و مدیریت شهری*، ۱۱(۱)، ۲۹۹-۲۷۶.
- کاظمی، ع.، نوری، پ.، و آریایی، س. (۱۴۰۱). شناسایی و اولویت‌بندی شهرهای مناسب برای ساخت خانه‌های انرژی صفر با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه (مورد مطالعه: ایران). *برنامه‌ریزی توسعه شهری و منطقه‌ای*، (۲۱)، ۶۰- ۸۶.
- Omar, O. (۲۰۲۵). Navigating Nearly Zero-Energy Strategies for Urban Climate Change Adaptation and Mitigation. In *Urban Climate and Urban Design* (pp. ۱۰۱-۱۱۶). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Mohammed, G. A., Mabrouk, M., He, G., & Abdrabo, K. I. (۲۰۲۳). Towards sustainable cities: A review of zero energy buildings techniques and global activities in residential buildings. *Energies*, *16*(۹), ۳۷۷۵.
- Duraković, B. (۲۰۲۶). *Advancing Zero Energy Buildings: Pathways to Sustainable Development and Global Impact*. Springer Nature.
- Li, M., Duan, H., Wang, Y., Lin, Z., Yu, X., & Zhao, H. (۲۰۲۶). From Brundtland to net-zero buildings: Governing sustainable development in the built environment. *Buildings*, *16*(٤), ۷۸۹.

- Kolokotsa, D., Pignatta, G., & Ulpiani, G. (۲۰۲۲). Nearly Zero-Energy and Positive-Energy Buildings: Status and Trends. *Technologies for Integrated Energy Systems and Networks*, ۲۳۹-۲۷۳.
- Barrutieta, X., Gainza, J., Irulegi, O., & Hernández, R. (۲۰۲۳). The zero building: an exemplary nearly zero energy office building (NZEB) and its potential to become a positive energy building (PEB). *Architectural Science Review*, *66*(۳), ۲۱٤-۲۲٥.