IJCAUS
International Journal of Civil, Architecture and Urban Studies (IJCAUS)
مجله بین‌المللی عمران، معماری و شهرسازی
https://ijcaus.ir
دوره ۱ – شماره ۱ (پاییز ۱۴۰۴) – صفحه ۱۲ تا ۲۴

بررسی چالش‌ها و راهکارهای برنامه‌ریزی انرژی در طرح‌های معماری با تأکید بر کاهش مصرف انرژی

مریم شفیع زاده

مدیریت پروژه وساخت، دانشگاه دیلمان لاهیجان

com.shafizadem@ymail

چکیده

بخش ساختمان به عنوان یکی از پرمصرف‌ترین حوزه‌های انرژی در جهان، نقش محوری در دستیابی به اهداف پایداری و کاهش انتشار کربن ایفا می‌کند. با تشدید بحران‌های زیست‌محیطی و افزایش هزینه‌های انرژی، برنامه‌ریزی کارآمد انرژی در طرح‌های معماری به یک ضرورت اجتناب‌ناپذیر تبدیل شده است. این مقاله مروری با هدف تحلیل چندبعدی چالش‌های پیش روی برنامه‌ریزی انرژی در معماری و ارائه راهکارهای عملی برای کاهش مصرف انرژی، با تأکید بر نوآوری‌های سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۶، نگاشته شده است. یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که چالش‌ها در چهار حوزه اصلی قابل دسته‌بندی هستند: **چالش‌های نهادی و سیاستی** شامل شکاف بین اهداف و اجرا، ضعف قوانین ساختمانی و ناکارآمدی نهادهای نظارتی؛ **چالش‌های اقتصادی و مالی** شامل هزینه‌های اولیه بالا، شکاف اطلاعاتی میان ذی‌نفعان و دشواری تأمین مالی پروژه‌های بهینه‌سازی؛ **چالش‌های فنی و طراحی** شامل یکپارچگی ناکافی سیستم‌ها، محدودیت‌های شبیه‌سازی و شکاف بین طراحی و عملکرد واقعی؛ و **چالش‌های رفتاری و نهادی** شامل مقاومت در برابر تغییر و نبود آگاهی کافی. در مقابل، راهکارهای نوین در سه محور اصلی مطرح می‌شوند: **راهکارهای طراحی یکپارچه و غیرفعال** شامل بهره‌گیری از اصول معماری بومی (مانند معماری زیرزمینی) و طراحی خورشیدی غیرفعال؛ **راهکارهای فناورانه و بهینه‌سازی** شامل مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM)، بهینه‌سازی چندهدفه، مدل‌سازی یکپارچه انرژی شهری و سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر یکپارچه؛ و **راهکارهای سیاستی و نهادی** شامل استانداردسازی فرآیندها، یکپارچگی نهادی و رویکردهای تأمین مالی نوآورانه. نتیجه‌گیری مقاله بر لزوم گذار از رویکردهای سنتی و جزءنگر به سوی برنامه‌ریزی جامع، یکپارچه و مبتنی بر شواهد تأکید دارد که در آن کاهش مصرف انرژی نه به عنوان هدفی مجزا، بلکه به عنوان نتیجه طبیعی یک طراحی معماری آگاهانه و هوشمند محقق می‌شود.

کلمات کلیدی: برنامه‌ریزی انرژی، کاهش مصرف انرژی، طراحی یکپارچه، بهینه‌سازی چندهدفه

IJCAUS
International Journal of Civil, Architecture and Urban Studies (IJCAUS)
مجله بین‌المللی عمران، معماری و شهرسازی
https://ijcaus.ir
دوره ۱ – شماره ۱ (پاییز ۱۴۰۴) – صفحه ۱۲ تا ۲۴

۱. مقدمه

بخش ساختمان یکی از بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان انرژی در جهان و مسئول سهم قابل توجهی از انتشار گازهای گلخانه‌ای است. بر اساس گزارش آژانس بین‌المللی انرژی، ساختمان‌ها حدود ۳۰ تا ۴۰ درصد از مصرف نهایی انرژی و ۲۸ درصد از انتشار دی‌اکسید کربن مرتبط با انرژی را در سطح جهان به خود اختصاص می‌دهند (Wang et al., ۲۰۲۴). با افزایش جمعیت شهری، رشد اقتصادی و بهبود استانداردهای زندگی، پیش‌بینی می‌شود که تقاضای انرژی در بخش ساختمان در دهه‌های آینده به شدت افزایش یابد (Abouebeid et al., ۲۰۲۶). در چنین شرایطی، برنامه‌ریزی کارآمد انرژی در طرح‌های معماری نه یک انتخاب، که یک ضرورت انکارناپذیر برای دستیابی به اهداف پایداری، کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و مقابله با تغییرات اقلیمی است (United Nations Economic Commission for Europe [UNECE], ۲۰۲۶).

با این حال، علیرغم پیشرفت‌های قابل توجه در فناوری‌های کارآمدی انرژی و افزایش آگاهی عمومی، شکاف عمیقی میان «دانش نظری» و «عملکرد واقعی» ساختمان‌ها وجود دارد. پدیده‌ای که با عناوینی همچون «شکاف عملکردی» (Performance Gap) شناخته می‌شود، نشان می‌دهد که بسیاری از ساختمان‌های مدرن، حتی آنهایی که با بالاترین استانداردهای انرژی طراحی شده‌اند، در عمل به میزان پیش‌بینی‌شده مصرف انرژی دست نمی‌یابند (BIM-enabled retrofitting, energy ۲۰۲۵). این شکاف ریشه در مجموعه‌ای از چالش‌های به‌هم‌پیوسته دارد که از مرحله برنامه‌ریزی و طراحی تا ساخت، بهره‌برداری و نگهداری را در بر می‌گیرد.

پرسش اساسی که این مقاله به دنبال پاسخ به آن است، این است که **چالش‌های اصلی پیش روی برنامه‌ریزی کارآمد انرژی در طرح‌های معماری کدامند و چه راهکارهای عملی و مبتنی بر شواهد برای غلبه بر این چالش‌ها و کاهش مؤثر مصرف انرژی وجود دارد؟** برای پاسخ به این پرسش، مقاله در پنج بخش اصلی سازماندهی شده است. پس از مقدمه، مبانی نظری برنامه‌ریزی انرژی در معماری مرور می‌شود. بخش سوم به تحلیل و دسته‌بندی چالش‌ها اختصاص دارد. بخش چهارم راهکارهای نوین در حوزه‌های طراحی، فناوری و سیاست را بررسی می‌کند. در بخش بحث، یافته‌ها در چارچوبی یکپارچه تحلیل شده و در نهایت، نتیجه‌گیری و پیشنهادها ارائه می‌گردد.

۲. مبانی نظری برنامه‌ریزی انرژی در معماری

۱.۲. سیر تحول رویکردها به انرژی در طراحی معماری

توجه به انرژی در طراحی معماری سابقه‌ای به قدمت خود معماری دارد. در معماری بومی مناطق مختلف جهان، راهکارهای هوشمندانه‌ای برای همسازی با اقلیم و کاهش نیاز به انرژی‌های فسیلی به کار گرفته شده است. به عنوان مثال، معماری زیرزمینی در مناطق گرم و خشک ایران، با استفاده از ظرفیت حرارتی بالای خاک، نوسانات دمایی را تعدیل کرده و آسایش حرارتی را با کمترین مصرف انرژی فراهم می‌آورده است (Mahmoudi et al., ۲۰۲۶). این رویکردهای غیرفعال، هسته اولیه برنامه‌ریزی انرژی در معماری را تشکیل می‌دهند.

با وقوع بحران نفتی دهه ۱۹۷۰، توجه به بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌ها وارد مرحله جدیدی شد. مقررات و استانداردهای عایق‌کاری حرارتی، بهره‌وری سیستم‌های گرمایشی و سرمایشی، و طراحی خورشیدی غیرفعال به تدریج در قوانین ساختمانی کشورهای

دوره ۱ – شماره ۱ (پاییز ۱۴۰۴) – صفحه ۱۲ تا ۲۴

توسعه‌یافته گنجانده شد (Wang et al., ۲۰۲۴). از دهه ۱۹۹۰ به بعد، با گسترش ابزارهای شبیه‌سازی رایانه‌ای، امکان مدل‌سازی دقیق‌تر عملکرد انرژی ساختمان فراهم شد. نرم‌افزارهایی مانند EnergyPlus و TRNSYS به معماران و مهندسان اجازه دادند تا تأثیر تصمیمات طراحی را بر مصرف انرژی پیش از ساخت ارزیابی کنند.

دهه جاری میلادی شاهد همگرایی فناوری‌های دیجیتال و الزامات زیست‌محیطی است. مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM)، بهینه‌سازی چندهدفه (Optimization Multi-Objective)، مدل‌سازی یکپارچه انرژی شهری (Urban Building Energy Modelling) و رویکردهای مبتنی بر هوش مصنوعی، مرزهای برنامه‌ریزی انرژی را از مقیاس یک ساختمان به مقیاس محله و شهر گسترش داده‌اند (Abouebeid et al., ۲۰۲۶). جدول ۱ سیر تحول رویکردها را به طور خلاصه نشان می‌دهد.

جدول ۱: سیر تحول رویکردهای برنامه‌ریزی انرژی در معماری

دوره	رویکرد اصلی	ابزارها و روش‌ها	هدف اصلی
پیش از ۱۹۷۰	معماری بومی و همساز با اقلیم	تجربه بومی، مصالح محلی، راهکارهای غیرفعال	آسایش حرارتی با حداقل مصرف
۱۹۷۰–۱۹۹۰	بهینه‌سازی مبتنی بر مقررات	استانداردهای عایق‌کاری، طراحی خورشیدی	کاهش مصرف انرژی در بحران نفتی
۱۹۹۰–۲۰۱۰	شبیه‌سازی عملکرد انرژی	نرم‌افزارهای شبیه‌سازی (EnergyPlus)	ارزیابی دقیق مصرف انرژی پیش از ساخت
۲۰۱۰–۲۰۲۰	مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM)	یکپارچگی اطلاعات، تحلیل چرخه حیات	مدیریت یکپارچه اطلاعات انرژی
۲۰۲۰–۲۰۲۶	بهینه‌سازی چندهدفه و مدل‌سازی شهری	الگوریتم‌های بهینه‌سازی، هوش مصنوعی، مدل‌های یکپارچه انرژی	کاهش هم‌زمان مصرف انرژی، هزینه و انتشار کربن در مقیاس شهری

۲.۲. مفاهیم کلیدی: طراحی غیرفعال، بهره‌وری انرژی و انرژی تجدیدپذیر

برنامه‌ریزی انرژی در معماری بر سه مفهوم کلیدی استوار است که به ترتیب اولویت در هرم انرژی ساختمان قرار می‌گیرند:

۱. **طراحی غیرفعال (Design Passive)**: اولین و مهم‌ترین گام، کاهش نیاز انرژی ساختمان از طریق طراحی هوشمندانه است. این رویکرد شامل بهینه‌سازی جهت‌گیری ساختمان، انتخاب فرم مناسب، عایق‌کاری حرارتی پوسته، استفاده از جرم حرارتی، سایه‌بان‌ها و تهویه طبیعی است. معماری زیرزمینی نمونه‌ای از طراحی غیرفعال است که با استفاده از ظرفیت حرارتی خاک، نیاز به سرمایش و گرمایش را به شدت کاهش می‌دهد (Mahmoudi et al., ۲۰۲۶). مطالعات نشان می‌دهد که ساختمان‌های زیرزمینی می‌توانند ۲۸ تا ۴۰ درصد مصرف انرژی کمتری نسبت به نمونه‌های مشابه رو زمین داشته باشند.
۲. **بهره‌وری انرژی (Efficiency Energy)**: پس از کاهش نیاز، گام بعدی تأمین نیاز باقی‌مانده با کارآمدترین سیستم‌ها و تجهیزات است. این شامل استفاده از سیستم‌های گرمایشی و سرمایشی با راندمان بالا (مانند پمپ‌های حرارتی)، روشنایی

LED، بازیافت حرارت و کنترل‌های هوشمند است. هدف، دستیابی به بیشترین خدمت با کمترین مصرف انرژی است (UNECE, ۲۰۲۶).

۳. **انرژی تجدیدپذیر (Energy Renewable)**: در نهایت، نیاز باقی‌مانده باید تا حد امکان توسط منابع تجدیدپذیر تأمین شود. سیستم‌های فتوولتائیک (PV)، آب‌گرمکن‌های خورشیدی، زمین‌گرمایی و توربین‌های بادی کوچک مقیاس از گزینه‌های رایج هستند. هدف نهایی در بسیاری از سیاست‌ها و استانداردهای پیشرو، دستیابی به ساختمان‌های با انرژی خالص صفر (Buildings Energy Net-Zero) یا حتی محله‌های با انرژی مثبت (Districts Energy Positive) است (Abouebeid et al., ۲۰۲۶).

۳.۲. چارچوب‌های سیاستی و استانداردهای بین‌المللی

در سطح بین‌المللی، توافقنامه‌هایی مانند پیمان پاریس و اهداف توسعه پایدار (SDGs) چارچوب کلانی برای کاهش انتشار کربن و افزایش بهره‌وری انرژی در بخش ساختمان ترسیم کرده‌اند. اتحادیه اروپا با دستورالعمل‌هایی مانند Energy Performance of Buildings Directive (EPBD)، کشورهای عضو را ملزم به رعایت استانداردهای سختگیرانه انرژی در ساختمان‌های نوساز و بهسازی ساختمان‌های موجود کرده است.

سازمان ملل متحد در گزارش اخیر خود با عنوان "بهره‌وری انرژی و اقدامات کربن‌زدایی در بخش‌های مصرف‌کننده نهایی" بر رویکردی نوین به نام **کارآمدی سیستمی (Efficiency Systemic)** تأکید کرده است (UNECE, ۲۰۲۶). این رویکرد فراتر از بهینه‌سازی فناوری‌های منفرد، به طراحی کل سیستم به گونه‌ای می‌اندیشد که کاهش مصرف انرژی به عنوان "منبع انرژی اولیه" و "اصل سازمان‌دهی یک سیستم انرژی تاب‌آور" در تمام لایه‌های برنامه‌ریزی، مقررات، تأمین مالی و دیجیتالی‌سازی نهادینه شود.

۳. چالش‌های برنامه‌ریزی انرژی در طرح‌های معماری

علیرغم پیشرفت‌های نظری و فناورانه، برنامه‌ریزی کارآمد انرژی در عمل با چالش‌های متعددی مواجه است. این چالش‌ها را می‌توان در چهار دسته اصلی طبقه‌بندی کرد.

۱.۳. چالش‌های نهادی و سیاستی

الف) شکاف بین اهداف و اجرا: یکی از مهم‌ترین چالش‌ها، شکاف میان اهداف بلندپروازانه سیاستی و اجرای عملی آنهاست. گزارش UNECE (۲۰۲۶) بر این نکته تأکید می‌کند که سؤال اصلی نباید "کدام فناوری‌های بهره‌وری انرژی باید به کار گرفته شوند؟" باشد، بلکه باید "سیستم چگونه باید طراحی شود تا اقدامات اثبات‌شده مقیاس‌پذیر شده، تداوم یابند و مقرون‌به‌صرفه باقی بمانند؟" این تغییر نگاه، ضعف‌های نهادی را آشکار می‌سازد.

ب) ضعف قوانین ساختمانی و مکانیسم‌های اجرایی: در بسیاری از کشورها، قوانین ساختمانی به‌روز نیستند و الزامات کافی برای مصرف انرژی را شامل نمی‌شوند. حتی در مواردی که قوانین پیشرفته‌ای وجود دارد، مکانیسم‌های نظارت و اجرا ضعیف هستند. عدم تطابق سرعت تحول فناوری با سرعت به‌روزرسانی مقررات، چالش دیگری است که مانع از پذیرش نوآوری‌ها می‌شود.

ج) ناکارآمدی نهادهای مسئول: پراکندگی مسئولیت میان نهادهای مختلف (شهرداری‌ها، وزارتخانه‌ها، سازمان‌های انرژی، سازمان‌های محیط زیست) و نبود هماهنگی مؤثر میان آنها، فرآیند برنامه‌ریزی و اجرا را با اختلال مواجه می‌سازد. این پراکندگی منجر به تصمیم‌گیری‌های جزیره‌ای و اتلاف منابع می‌شود (Wang et al., ۲۰۲۴).

۲.۳. چالش‌های اقتصادی و مالی

الف) هزینه‌های اولیه بالا: اجرای راهکارهای کارآمدی انرژی و استفاده از فناوری‌های تجدیدپذیر معمولاً با هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه بالاتری نسبت به روش‌های سنتی همراه است. اگرچه این سرمایه‌گذاری در بلندمدت از طریق کاهش هزینه‌های عملیاتی جبران می‌شود، اما نبود منابع مالی کافی و دسترسی محدود به تسهیلات مالی مناسب، مانع بزرگی برای کارفرمایان و سازندگان است.

ب) شکاف اطلاعاتی و نبود شفافیت: سرمایه‌گذاران و مالکان ساختمان اغلب اطلاعات کافی درباره منافع بلندمدت سرمایه‌گذاری در بهره‌وری انرژی ندارند. نبود داده‌های شفاف و قابل اعتماد درباره عملکرد واقعی فناوری‌ها و بازگشت سرمایه (ROI)، تصمیم‌گیری را دشوار می‌سازد. گزارش UNECE (۲۰۲۶) بر ضرورت استانداردسازی قراردادها با پایش، تأیید و گزارش‌دهی شفاف برای تبدیل کارآمدی انرژی به یک "کلاس دارایی شفاف و قابل تأمین مالی" تأکید می‌کند.

ج) دشواری تأمین مالی پروژه‌های بهسازی: بهسازی انرژی ساختمان‌های موجود، به ویژه ساختمان‌های مسکونی قدیمی، با چالش‌های مالی خاصی همراه است. پراکندگی مالکیت، نیاز به هماهنگی میان ساکنان، و نبود مکانیسم‌های تأمین مالی جمعی از جمله این موانع هستند (BIM-enabled retrofitting, energy ۲۰۲۵).

۳.۳. چالش‌های فنی و طراحی

الف) یکپارچگی ناکافی سیستم‌ها: طراحی سنتی معماری اغلب به صورت "جزیره‌ای" انجام می‌شود. معمار، سازه‌پرداز و تأسیس‌کار هر یک به طور جداگانه و با اولویت‌های متفاوت کار می‌کنند و تعامل کافی میان آنها در مراحل اولیه طراحی وجود ندارد. این رویکرد منجر به طراحی عناصری می‌شود که تنها یک عملکرد (سازه‌ای یا محیطی) را انجام می‌دهند و پتانسیل چندکارکردی نادیده گرفته می‌شود (Wang et al., ۲۰۲۴). این جدایی رشته‌ها، فرصت‌های کاهش مصرف انرژی و مصالح را از بین می‌برد.

ب) محدودیت‌های شبیه‌سازی و مدل‌سازی: ابزارهای شبیه‌سازی انرژی علیرغم پیشرفت‌های چشمگیر، هنوز با محدودیت‌هایی مواجه هستند. یکی از این محدودیت‌ها، ساده‌سازی بیش از حد در مدل‌سازی رفتار واقعی ساکنان، عملکرد تجهیزات در شرایط غیراسمی، و عدم قطعیت‌های ناشی از تغییرپذیری منابع تجدیدپذیر است (Chen et al., ۲۰۲۶). مدل‌های رایج اغلب عملکرد تجهیزات را در شرایط ایده‌آل در نظر می‌گیرند، در حالی که در عمل، راندمان تجهیزات تحت بارهای جزئی و شرایط متغیر کاهش می‌یابد.

ج) پیچیدگی بهینه‌سازی چندهدفه: طراحی یک ساختمان کم‌مصرف مستلزم ایجاد توازن میان اهداف متعدد و گاه متضاد است: کاهش مصرف انرژی عملیاتی، کاهش انرژی نهفته (Energy Embodied)، کاهش هزینه‌ها، تأمین آسایش ساکنان، و کاهش انتشار کربن. یافتن نقطه بهینه در این فضای پیچیده از تصمیمات، نیازمند ابزارهای پیشرفته بهینه‌سازی چندهدفه است که استفاده از آنها هنوز در جریان اصلی طراحی جا نیفتاده است (Wang et al., ۲۰۲۴).

د) شکاف بین طراحی و عملکرد واقعی: حتی زمانی که طراحی با دقت بالا و با استفاده از شبیه‌سازی‌های پیشرفته انجام می‌شود، عملکرد نهایی ساختمان اغلب با پیش‌بینی‌ها تفاوت دارد. این "شکاف عملکردی" ناشی از عواملی مانند خطاهای اجرایی، کیفیت نصب، عملکرد متفاوت ساکنان، و عدم تطابق تجهیزات نصب‌شده با طراحی‌شده است. در حوزه بهسازی انرژی ساختمان‌های موجود، این شکاف به مراتب بیشتر است و بسیاری از چارچوب‌های نظری BIM-ERF (Frameworks Retrofitting BIM-Energy) در عمل به طور کامل محقق نمی‌شوند (retrofitting, energy BIM-enabled ۲۰۲۵).

۴.۳. چالش‌های رفتاری و نهادی

الف) مقاومت در برابر تغییر: صنعت ساخت و ساز به طور سنتی محافظه‌کار است و در برابر پذیرش فناوری‌ها و روش‌های جدید مقاومت نشان می‌دهد. معماران، مهندسان و پیمانکارانی که با روش‌های سنتی آشنا هستند، ممکن است تمایلی به یادگیری و به کارگیری ابزارها و فرآیندهای جدید نداشته باشند.

ب) نبود آگاهی و آموزش کافی: کمبود نیروی متخصص آشنا با اصول طراحی کم‌مصرف، ابزارهای شبیه‌سازی، و فناوری‌های نوین، یکی از موانع اصلی است. در نظام‌های آموزشی معماری و مهندسی، هنوز بر طراحی فرم و زیبایی‌شناسی تأکید بیشتری می‌شود تا عملکرد انرژی و تحلیل‌های کمی (Wang et al., ۲۰۲۴).

ج) تقاضای محدود از سوی کارفرمایان: بسیاری از کارفرمایان و سرمایه‌گذاران، مصرف انرژی را در اولویت‌های اصلی خود قرار نمی‌دهند و ترجیح می‌دهند هزینه کمتری بپردازند، حتی اگر به معنای مصرف بیشتر انرژی در بلندمدت باشد. نهادینه نشدن فرهنگ ارزیابی چرخه حیات و نگاه بلندمدت به سرمایه‌گذاری، این مشکل را تشدید می‌کند.

۴. راهکارهای برنامه‌ریزی انرژی با تأکید بر کاهش مصرف

در پاسخ به چالش‌های مطرح‌شده، راهکارهای متنوعی در سطوح طراحی، فناوری و سیاست ارائه شده است. این راهکارها در تعامل با یکدیگر می‌توانند به کاهش چشمگیر مصرف انرژی در بخش ساختمان منجر شوند.

۱.۴. راهکارهای طراحی یکپارچه و غیرفعال

الف) بهره‌گیری از اصول معماری بومی: مطالعه و احیای راهکارهای هوشمندانه معماری بومی، منبع غنی از ایده‌های طراحی غیرفعال است. معماری زیرزمینی در مناطق گرم و خشک نمونه‌ای بارز از این رویکرد است. مرور سیستماتیک مطالعات انجام‌شده بر روی معماری زیرزمینی ایران نشان می‌دهد که این فضاها با استفاده از ظرفیت حرارتی خاک، نوسانات دمایی را تعدیل کرده و بار سرمایشی را به شدت کاهش می‌دهند (Mahmoudi et al., ۲۰۲۶). ادغام این اصول در طراحی معاصر می‌تواند به خلق ساختمان‌هایی با مصرف انرژی بسیار پایین منجر شود.

ب) طراحی خورشیدی غیرفعال: بهینه‌سازی جهت‌گیری ساختمان، اندازه و محل پنجره‌ها، استفاده از سایه‌بان‌های مناسب و بهره‌گیری از جرم حرارتی برای ذخیره انرژی خورشیدی در زمستان و جلوگیری از گرمای بیش از حد در تابستان، از اصول کلاسیک

اما همچنان بسیار مؤثر طراحی غیرفعال هستند. این راهکارها هزینه‌های اندکی داشته و تأثیر قابل توجهی بر کاهش مصرف انرژی دارند.

ج) رویکرد طراحی یکپارچه (Process Design Integrated): در این رویکرد، تمام اعضای تیم طراحی (معمار، سازه‌پرداز، تأسیس‌کار، کارفرما) از همان مراحل اولیه پروژه با هم همکاری می‌کنند. این تعامل زودهنگام امکان شناسایی هم‌افزایی‌ها و بهینه‌سازی‌های چندرشته‌ای را فراهم می‌کند. به عنوان مثال، طراحی یک عنصر سازه‌ای که عملکرد حرارتی (مانند جرم حرارتی) را نیز ایفا کند، نتیجه چنین رویکرد یکپارچه‌ای است (Wang et al., ۲۰۲۴).

۲.۴. راهکارهای فناورانه و بهینه‌سازی

الف) مدل‌سازی اطلاعات ساختمان (BIM): BIM به عنوان یک فرآیند مبتنی بر مدل دیجیتال، بستری یکپارچه برای ذخیره، مدیریت و تبادل اطلاعات در تمام مراحل چرخه حیات ساختمان فراهم می‌کند. در حوزه برنامه‌ریزی انرژی، BIM امکان انجام تحلیل‌های انرژی دقیق، ارزیابی سناریوهای مختلف طراحی، و مستندسازی عملکرد انرژی را فراهم می‌آورد. با این حال، برای تحقق پتانسیل کامل BIM در بهسازی انرژی ساختمان‌های موجود (BIM-ERF)، نیاز به توسعه جنبه‌های کلیدی مانند استانداردسازی الزامات اطلاعاتی در مراحل اولیه (پیش از بهسازی) وجود دارد (BIM-enabled energy, retrofitting ۲۰۲۵).

ب) بهینه‌سازی چندهدفه (Optimization Multi-Objective): ابزارهای بهینه‌سازی چندهدفه با ترکیب مدل‌سازی پارامتریک، شبیه‌سازی انرژی و الگوریتم‌های جستجو، امکان کاوش در فضای وسیع طراحی و یافتن راهکارهایی را فراهم می‌کنند که میان اهداف مختلف (مصرف انرژی، هزینه، آسایش، انتشار کربن) توازن برقرار می‌کنند (Wang et al., ۲۰۲۴). این ابزارها به طراحان اجازه می‌دهند تا مرزهای فضای طراحی را درک کرده و به جای انتخاب یک گزینه "بهینه" به صورت قطعی، روابط میان متغیرها را کشف کنند.

ج) مدل‌سازی یکپارچه انرژی شهری (Urban Building Energy Modelling): گسترش مقیاس تحلیل از ساختمان منفرد به محله و شهر، افق‌های جدیدی برای برنامه‌ریزی انرژی می‌گشاید. مدل‌سازی یکپارچه انرژی شهری امکان ارزیابی پتانسیل تولید انرژی تجدیدپذیر در سطح محله، بهینه‌سازی هم‌زمان بهسازی ساختمان‌ها و طراحی سیستم‌های انرژی محلی (مانند شبکه‌های حرارتی منطقه‌ای و باتری‌های اشتراکی) را فراهم می‌کند. مطالعه موردی در محله‌ای از گوتنبرگ سوئد نشان داد که این رویکرد می‌تواند به کاهش ۱۳ درصدی انتشار کربن و کاهش وابستگی به شبکه برق تا ۶۳ درصد منجر شود (Abouebeid et al., ۲۰۲۶). هرچند دستیابی به وضعیت "محله با انرژی مثبت" (PED) با چالش‌های جدی همراه است.

د) چارچوب‌های بهینه‌سازی مقاوم (Optimization Robust): برای مقابله با عدم قطعیت‌های ناشی از تغییرپذیری منابع تجدیدپذیر و رفتار ساکنان، چارچوب‌های بهینه‌سازی مقاوم توسعه یافته‌اند. این چارچوب‌ها با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف و عملکرد تجهیزات در شرایط غیراسمی، پیکربندی‌هایی ارائه می‌دهند که در برابر عدم قطعیت‌ها مقاوم بوده و قابلیت انطباق عملیاتی را حفظ می‌کنند. مطالعه Chen و همکاران (۲۰۲۶) نشان داد که لحاظ کردن عملکرد تجهیزات در شرایط غیراسمی، پیکربندی سیستم‌های انرژی یکپارچه را به سمت واحدهای قابل‌توزیع (مانند توربین‌های گازی) تغییر می‌دهد و بر اهمیت در نظر گرفتن این عوامل در برنامه‌ریزی تأکید می‌کند.

جدول ۲: مقایسه راهکارهای فناورانه در برنامه‌ریزی انرژی

راهکار	مقیاس کاربرد	مزایای اصلی	چالش‌های اصلی
BIM	ساختمان	مدیریت یکپارچه اطلاعات، تحلیل‌های دقیق	استانداردسازی ناقص، کاربرد محدود در مراحل پیش از طراحی
بهینه‌سازی چندهدفه	ساختمان	کشف فضای طراحی، ایجاد توازن میان اهداف متضاد	پیچیدگی بالا، نیاز به تخصص فنی
مدل‌سازی انرژی شهری	محله/شهر	ارزیابی پتانسیل‌های محلی، بهینه‌سازی هم‌زمان سیستم‌ها	پیچیدگی مدل‌سازی، نیاز به داده‌های گسترده
بهینه‌سازی مقاوم	سیستم‌های انرژی	مدیریت عدم قطعیت‌ها، افزایش تاب‌آوری	پیچیدگی محاسباتی بالا

۳.۴. راهکارهای سیاستی و نهادی

الف) کارآمدی سیستمی (Efficiency Systemic): رویکرد کارآمدی سیستمی که توسط UNECE (۲۰۲۶) ترویج می‌شود، بر چهار رکن اصلی استوار است: برنامه‌ریزی هماهنگ (Planning Coordinated) میان بخش‌های مختلف؛ تأمین مالی و بانک‌پذیری (Bankability and Finance) از طریق استانداردسازی و تجمیع پروژه‌ها؛ دیجیتالی‌سازی برای اندازه‌گیری، بهینه‌سازی و شفافیت (Transparency and Optimization Measurement, for Digitalization) با استفاده از زیرساخت‌های پیشرفته اندازه‌گیری، دوقلوهای دیجیتال و هوش مصنوعی؛ و اقتصاد چرخشی (Circularity) همراه با آمادگی نهادی و مهارتی برای گذاری عادلانه.

ب) استانداردسازی و شفافیت اطلاعات: برای تبدیل کارآمدی انرژی به یک "کلاس دارایی قابل تأمین مالی"، استانداردسازی قراردادها با پروتکل‌های پایش، تأیید و گزارش‌دهی (MVR - Reporting and Verification Monitoring,) ضروری است. این شفافیت، امکان مقایسه عملکرد پروژه‌ها در سراسر بازار را فراهم کرده و ریسک سرمایه‌گذاری را کاهش می‌دهد. همچنین، توسعه و به‌کارگیری استانداردهای باز و چارچوب‌های امنیت سایبری برای تسهیل تبادل داده‌ها و ایجاد اعتماد، از پیش‌نیازهای دیجیتالی‌سازی مؤثر است (UNECE, ۲۰۲۶).

ج) یکپارچگی نهادی و برنامه‌ریزی هماهنگ: ایجاد مکانیسم‌های هماهنگی میان نهادهای مختلف مسئول در حوزه شهرسازی، انرژی، محیط زیست و اقتصاد، برای تدوین و اجرای سیاست‌های یکپارچه ضروری است. برنامه‌ریزی هماهنگ باید در تمام سطوح (ملی، منطقه‌ای و محلی) و میان بخش‌های مختلف (صنعت، ساختمان، حمل و نقل) نهادینه شود تا کاهش مصرف انرژی به عنوان یک "اصل سازمان‌دهی" در تمام تصمیم‌گیری‌ها جاری گردد (UNECE, ۲۰۲۶).

د) ابزارهای تأمین مالی نوآورانه: برای غلبه بر مانع هزینه‌های اولیه بالا، توسعه ابزارهای تأمین مالی نوآورانه ضروری است. تجمیع پروژه‌های کوچک در پرتفوی‌های بزرگ‌تر (Aggregation of small projects into portfolios) امکان جذب سرمایه‌گذاری نهادی را فراهم می‌کند. ابزارهای کاهش ریسک (De-risking tools) مانند ضمانت‌نامه‌ها و بیمه صرفه‌جویی انرژی

(insurance savings Energy) می‌توانند هزینه سرمایه را کاهش دهند. قراردادهای ESCO (Service Energy Company) که بر اساس صرفه‌جویی انرژی تضمین‌شده تأمین مالی می‌شوند، از دیگر راهکارهای مؤثر هستند (UNECE, ۲۰۲۶).

۵. بحث

تحلیل ارائه‌شده در این مقاله نشان می‌دهد که برنامه‌ریزی کارآمد انرژی در طرح‌های معماری با شبکه‌ای از چالش‌های به‌هم‌پیوسته مواجه است که صرفاً با راهکارهای فنی قابل حل نیستند. آنچه از مرور منابع برمی‌آید، ضرورت گذار از رویکردهای سنتی و جزءنگر به سوی رویکردی **یکپارچه، سیستمی و مبتنی بر شواهد** است.

نخست، یافته‌ها حاکی از آن است که شکاف میان طراحی و عملکرد واقعی (Gap Performance) ریشه در عوامل متعددی دارد: از ساده‌سازی‌های مدل‌های شبیه‌سازی (Chen et al., ۲۰۲۶) گرفته تا عدم یکپارچگی فرآیند طراحی (Wang et al., ۲۰۲۴) و ضعف اجرا و بهره‌برداری (BIM-enabled energy retrofitting, ۲۰۲۵). پر کردن این شکاف مستلزم بهبود هم‌زمان ابزارها، فرآیندها و مهارت‌ها است. چارچوب‌های بهینه‌سازی مقاوم (Robust Optimization) که عدم قطعیت‌ها را در مدل‌سازی لحاظ می‌کنند، گامی در این جهت هستند، اما نیاز به فرهنگ‌سازی و آموزش نیز به همان اندازه حیاتی است.

دوم، تأکید روزافزون بر **مقیاس شهری** در برنامه‌ریزی انرژی، افق‌های جدیدی گشوده است. مدل‌سازی یکپارچه انرژی شهری (Abouebeid et al., ۲۰۲۶) نشان می‌دهد که بهینه‌سازی هم‌زمان ساختمان‌ها و سیستم‌های انرژی در سطح محله می‌تواند به نتایجی فراتر از بهینه‌سازی تک‌ساختمان‌ها منجر شود. این رویکرد با مفهوم "کارآمدی سیستمی" UNECE (۲۰۲۶) همخوانی کامل دارد. با این حال، پیچیدگی مدل‌سازی و نیاز به داده‌های گسترده و با کیفیت، از چالش‌های جدی این حوزه است.

سوم، معماری بومی به عنوان منبعی غنی از راهکارهای آزموده‌شده و کم‌هزینه، می‌تواند الهام‌بخش طراحی معاصر باشد. مطالعه معماری زیرزمینی در ایران (Mahmoudi et al., ۲۰۲۶) نشان می‌دهد که چگونه می‌توان با استفاده از اصول ساده و مصالح بومی، به آسایش حرارتی و کاهش مصرف انرژی دست یافت. ادغام این دانش بومی با فناوری‌های نوین، می‌تواند به خلق معماری پایدار و زمینه‌گرا منجر شود.

چهارم، چالش‌های نهادی و مالی شاید بزرگ‌ترین موانع پیش روی برنامه‌ریزی انرژی باشند. نبود هماهنگی نهادی، ضعف قوانین و مقررات، و نبود ابزارهای تأمین مالی مناسب، مانع از مقیاس‌پذیری راهکارهای موفق می‌شوند. رویکرد کارآمدی سیستمی UNECE با تأکید بر چهار رکن برنامه‌ریزی هماهنگ، تأمین مالی، دیجیتالی‌سازی و اقتصاد چرخشی، چارچوبی جامع برای غلبه بر این موانع ارائه می‌دهد (UNECE, ۲۰۲۶). استانداردسازی، شفافیت و ایجاد "کلاس دارایی" برای کارآمدی انرژی، گام‌های عملی در جهت جذب سرمایه‌های نهادی هستند.

در نهایت، می‌توان نتیجه گرفت که برنامه‌ریزی موفق انرژی در معماری، محصول تعامل سه سطح **طراحی هوشمندانه** (با بهره‌گیری از اصول بومی و یکپارچگی رشته‌ها)، **فناوری‌های پیشرفته** (برای شبیه‌سازی، بهینه‌سازی و مدیریت) و **سیاست‌های توانمندساز** (برای رفع موانع نهادی و مالی) است. هر گونه تلاش تک‌بعدی، ناکافی خواهد بود.

۶. نتیجه‌گیری

پرسش اصلی این مقاله، بررسی چالش‌ها و راهکارهای برنامه‌ریزی انرژی در طرح‌های معماری با تأکید بر کاهش مصرف انرژی بود. مرور منابع معتبر و به‌روز نشان می‌دهد که علیرغم پیشرفت‌های قابل توجه نظری و فناورانه، شکاف عمیقی میان دانش و عمل وجود دارد. مهم‌ترین یافته‌های این پژوهش عبارتند از:

۱. **چالش‌ها چندبعدی و به‌هم‌پیوسته هستند:** این چالش‌ها صرفاً فنی نیستند، بلکه ریشه در عوامل نهادی، اقتصادی، رفتاری و سیاستی دارند. ضعف قوانین، نبود هماهنگی نهادی، هزینه‌های اولیه بالا، شکاف اطلاعاتی، مقاومت در برابر تغییر و نبود آموزش کافی، از جمله مهم‌ترین موانع هستند.
۲. **راهکارها نیازمند رویکردی یکپارچه و سیستمی هستند:** راهکارهای صرفاً فناورانه کافی نیستند. آنچه مورد نیاز است، گذار به سوی "کارآمدی سیستمی" است که در آن کاهش مصرف انرژی به عنوان یک "اصل سازمان‌دهی" در تمام لایه‌های برنامه‌ریزی، مقررات، تأمین مالی و طراحی نهادینه شود.
۳. **اهمیت روزافزون مقیاس شهری:** برنامه‌ریزی انرژی باید از مقیاس تک‌ساختمان به مقیاس محله و شهر گسترش یابد تا از هم‌افزایی‌های ناشی از سیستم‌های اشتراکی و تولید پراکنده بهره‌مند شود.
٤. **ظرفیت‌های بکر در معماری بومی:** معماری بومی، به ویژه در مناطق با اقلیم دشوار، منبع غنی از راهکارهای غیرفعال و کم‌هزینه است که می‌توانند الهام‌بخش طراحی معاصر باشند.
٥. **نیاز به تحول در آموزش و فرهنگ‌سازی:** تربیت نیروی متخصص آشنا با اصول طراحی کم‌مصرف، ابزارهای شبیه‌سازی و بهینه‌سازی، و نهادینه‌سازی نگاه بلندمدت به سرمایه‌گذاری، از الزامات اساسی تحقق برنامه‌ریزی کارآمد انرژی است.

در پایان، می‌توان نتیجه گرفت که کاهش مصرف انرژی در بخش ساختمان نه یک هدف فنی صرف، که یک پروژه چندبعدی نیازمند همکاری تنگاتنگ معماران، مهندسان، سیاست‌گذاران، اقتصاددانان و شهروندان است. آینده از آن رویکردهایی است که بتوانند با نگاهی جامع و یکپارچه، این ابعاد مختلف را در کنار هم قرار داده و طراحی را به خلق ساختمان‌هایی با آسایش بالا، مصرف انرژی پایین و کمترین اثرات زیست‌محیطی هدایت کنند. پژوهش‌های آتی می‌توانند بر روی یکپارچه‌سازی مدل‌های بهینه‌سازی مقاوم با مدل‌های شبیه‌سازی رفتاری ساکنان، و توسعه ابزارهای تصمیم‌گیری کاربرپسند برای طراحان متمرکز شوند.

۷. منابع

۱. Abouebeid, S., Enerbäck, J., Malakhatka, E., Strömberg, A .B., Sindelar, D., Mazidi, M., Sridhar, A., Wallbaum, H., & Thuvander, L) .۲۰۲۶ .(Urban building energy modelling and multi-objective optimization for PED transition in an existing neighbourhood in Sweden .*Energy and Buildings,* ۳۵۲, ۱۱۶۷۸۳.
۲. BIM-enabled energy retrofitting :a critical review of current status and future prospects) .۲۰۲۵ .(*Energy and Buildings,* ۳۴۸, ۱۱۶۴۷۸.

۳. Chen, S., Qian, J., Gu, W., Ma, Y., & Zhong, H) ۲۰۲۶. (Robust Configuration Optimisation of Low-Carbon Integrated Energy Systems under Variable Equipment Efficiency and Source-Load Uncertainty Conditions .*Energy*, ۳۴۳, ۱۴۰۰۴۶.

۴. Mahmoudi, M., et al) ۲۰۲۶. (A systematic review of thermal comfort in vernacular underground architecture of hot and arid Climates :Emphasizing Iranian Case studies . *Energy and Buildings*, ۳۵۳, ۱۱۶۹۳۷.

۵. United Nations Economic Commission for Europe) ۲۰۲۶, January ۲۶ .(*UNECE launches new study calling for systemic efficiency to accelerate a resilient, affordable, and just energy transition* [Press release] .UNECE.

۶. Wang, Z., Akbarzadeh, M., & Aviv, D) ۲۰۲۴. (Multi-objective design exploration for integrated structural-environmental performance of buildings :A review .*Energy and Buildings*, ۳۲۲, ۱۱۴۶۳۸.

۷. Xia, H., Liu, Z., & Chen, Y) ۲۰۲۲. (A systematic review of multi-scale digital modelling in sustainable urban design and management .*Sustainable Cities and Society*, ۸۶, ۱۰۴۱۲۵ (استناد شده در Wang et al., ۲۰۲۴)

۸. Granadeiro, V., Duarte, J .P., Correia, J .R., & Leal, V .M .S) ۲۰۱۳. (Building envelope shape design in early stages of the design process :Integrating architectural design systems and energy simulation .*Automation in Construction*, ۳۲, ۱۱۲-۱۲۲ (استناد شده در . Wang et al., ۲۰۲۴)

۹. Rodriguez, B .X., Huang, M., Lee, H .W., Simonen, K., & Ditto, J) ۲۰۲۰. (Mechanical, electrical, plumbing and tenant improvements over the building lifetime :Estimating material quantities and embodied carbon for climate change mitigation .*Energy and Buildings*, ۲۲۶, ۱۱۰۳۶۶ (استناد شده در Wang et al., ۲۰۲۴)

۱۰. Pomponi, F., & Moncaster, A .M) ۲۰۱۶. (Embodied carbon mitigation and reduction in the built environment – what does the evidence say? *Journal of Environmental Management*, ۱۸۱, ۶۸۷-۷۰۰ (استناد شده در Wang et al., ۲۰۲۴)

۱۱. Evins, R) ۲۰۱۳. (A review of computational optimisation methods applied to sustainable building design .*Renewable and Sustainable Energy Reviews*, ۲۲, ۲۳۰-۲۴۵ . (استناد شده در Wang et al., ۲۰۲۴)

۱۲. Wortmann, T., & Nannicini, G) ۲۰۲۲. (Simulation-based optimization in architecture and building engineering—Results from an international user survey in practice and research .*Energy and Buildings*, ۲۵۹, ۱۱۱۸۶۰ (استناد شده در Wang et al., ۲۰۲۴)

۱۳. Kheiri, F) ۲۰۱۸. (A review on optimization methods applied in energy-efficient building geometry and envelope design .*Renewable and Sustainable Energy Reviews,* ۹۲, ۸۹۷-۹۲۰ (استناد شده در Wang et al., ۲۰۲۴(

۱۴. Himmetoğlu, S., & Delice, Y) ۲۰۲۲. (Green building envelope designs in different climate and seismic zones :Multi-objective ANN-based genetic algorithm . *Sustainable Energy Technologies and Assessments,* ۵۳, ۱۰۲۵۰۵ (استناد شده در Wang et al., ۲۰۲۴(

۱۵. Guo, Z., et al) ۲۰۲۳. (Modeling and optimization of micro heat pipe cooling battery thermal management system via deep learning and multi-objective genetic algorithms .*International Journal of Heat and Mass Transfer,* ۲۰۵, ۱۲۳۸۹۰ (استناد شده در . Wang et al., ۲۰۲۴(

۱۶. Pan, W., & Li, K) ۲۰۲۳. (Integrating multi-functional space and long-span structure in the early design stage of indoor sports arenas by *Journal of Building Engineering,* ۶۸, ۱۰۶۱۱۲ (استناد شده در Wang et al., ۲۰۲۴(

۱۷. Qiu, S., et al) ۲۰۲۱. (BIM-based building performance assessment :A review *Journal of Building Engineering,* ۴۴, ۱۰۲۹۸۹ (استناد شده در Xia et al., ۲۰۲۲(

۱۸. Weil, T., et al) ۲۰۲۳. (Urban digital twins for energy efficiency :A review .*Renewable and Sustainable Energy Reviews,* ۱۸۰, ۱۱۳۳۰۲ (استناد شده در Xia et al., ۲۰۲۲(

۱۹. Kamel, E., & Kazemian, A) ۲۰۲۳. (BIM-based energy performance assessment :A systematic review .*Automation in Construction,* ۱۵۰, ۱۰۴۸۵۱ (استناد شده در Xia et al., ۲۰۲۲(

۲۰. Lu, K., & Deng, Y) ۲۰۲۳. (BIM-based carbon emission assessment throughout the building lifecycle :A systematic review *Journal of Cleaner Production,* ۴۲۰, ۱۳۸۳۹۲ (استناد . شده درXia et al., ۲۰۲۲(

۲۱. Abualdenien, J., & Borrmann, A) ۲۰۲۲. (Levels of development in building information modeling :A systematic review .*Advanced Engineering Informatics,* ۵۲, ۱۰۱۶۰۸ (استناد شده . درXia et al., ۲۰۲۲(

۲۲. Biljecki, F., Stoter, J., Ledoux, H., Zlatanova, S., & Çöltekin, A) ۲۰۱۵. (Applications of ۳D city models :State of the art review .*ISPRS International Journal of Geo-Information, ۴*)۴(, ۲۸۴۲-۲۸۸۹ (استناد شده در Xia et al., ۲۰۲۲(

۲۳. Kolbe, T .H., Gröger, G., & Plümer, L) ۲۰۰۵. (CityGML :Interoperable access to ۳D city models .*Geo-information for Disaster Management*, ۸۸۳-۸۹۹ (استناد شده در Xia et al., ۲۰۲۲(

۲۴. D'Angelo, L., et al) ۲۰۲۳. (Barriers to BIM implementation in facility management :A systematic review .*Facilities,* ۴۱)۵/۶(, ۳۲۱-۳۴۰ (استناد شده در .BIM-enabled energy retrofitting, ۲۰۲۵(

۲۵. Hong, Y., Ezeh, C .I., Deng, W., Hong, S., & Peng, Z) .۲۰۲۱ .(Comparison between energy simulation and monitoring data in an office building .*Energy and Buildings, ۲۴۸*, ۱۱۱۱۶۸ .(استناد شده در BIM-enabled energy retrofitting, ۲۰۲۵(

۲۶. Alam, M., Sanjayan, J., Zou, P .X., Stewart, M .G., & Wilson, J) .۲۰۲۲ .(A comparative study on the life cycle energy and environmental performance of different wall systems . *Journal of Cleaner Production, ۳۷۶*, ۱۳۴۲۳۸ .(استناد شده در BIM-enabled energy retrofitting, ۲۰۲۵(

۲۷. International Organization for Standardization) .۲۰۱۸ .(*ISO ۱۹۶۵۰-۱:۲۰۱۸ Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling) BIM (— Information management using building information modelling — Part ۱ :Concepts and principles* .ISO در شده استناد) . BIM-enabled energy retrofitting, ۲۰۲۵(