

بررسی چالش‌های فنی ساختمان‌های کم‌کربن در ایران

بابک عالمی*

اکرم بقایی**

فائزه تفرشی***

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۶/۱۹

چکیده

بحران‌های زیست‌محیطی، جوامع و دولت‌ها را به‌سوی ارائه راه‌حل و چاره‌اندیشی برای کاهش انتشار کربن سوق داده است. یکی از راهکارهای اساسی مقابله با این معضل، کم کردن سهم تولید آلاینده‌ها در بخش ساختمان است. به‌رغم تلاش‌ها و فعالیت برخی کشورها، به نظر می‌رسد ایران، مسیری طولانی و پرچالش برای نهادینه شدن سازوکارهای کم‌کربن در بخش‌های مختلف از جمله صنعت ساخت‌وساز پیش روی خود دارد. مقاله حاضر به جست‌وجوی این چالش‌ها پرداخته است. روش به‌کار گرفته شده در این پژوهش، از نوع استنادی است و با بهره‌گیری از یافته‌های منابع متعدد، به موضوع چالش‌های فنی ساختمان‌های کم‌کربن در ایران پرداخته شده است. بررسی پژوهش‌های پیشین نشان داد که عمده‌ترین موانع احداث بناهای کم‌کربن بر سر راه کشورها، موانع فنی، اقتصادی، اطلاعاتی، سیاسی و فرهنگی - اجتماعی است؛ بررسی موانع فنی از حیث ارتباط بیشتر با فعالان عرصه ساختمان، به‌عنوان محور تحقیق، از میان سایر موارد برگزیده و در راستای هریک، به دیگر موانع مرتبط اشاره شد. براساس نتایج تحقیق، موانع فنی احداث ساختمان‌های کم‌کربن در ایران، شامل مواردی چون فقدان آیین‌نامه‌ها، و چالش‌های مربوط به مکان‌یابی و سایت، معماری، مصالح، بهره‌وری انرژی، انرژی‌های تجدیدپذیر، بهره‌وری آب، و کیفیت محیط داخل، مدیریت پسماندهای ساختمانی و کاربرد فناوری‌های هوشمند است. در این میان، عامل مصالح، مهم‌ترین چالش‌های فنی، و محدودیت‌های سیاستی با مسئولیت سازمان‌های ذی‌ربط، در کنار محدودیت‌های اطلاعاتی، برجسته‌ترین محدودیت‌های به‌وجودآورنده چالش‌های فنی حال حاضر ایران به شمار می‌روند.

کلیدواژه‌ها:

ساختمان‌های کم‌کربن، گازهای گلخانه‌ای، چالش‌های ساخت‌وساز، محیط‌زیست.

* دانشیار، دانشکده معماری و هنر، دانشگاه کاشان، نویسنده مسئول، Alemi@kashanu.ac.ir

** دانشجوی کارشناسی‌ارشد فناوری معماری، دانشکده معماری و هنر، دانشگاه کاشان

*** پژوهشگر دکتری معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر ایران

پرسش‌های پژوهش

۱. ساختمان کم‌کربن چیست و چه ویژگی‌هایی دارد؟
۲. موانع و چالش‌ها در راستای ساخت بناهای کم‌کربن در ایران کدام‌اند؟
۳. تأثیرگذارترین مانع مربوط به کدام شاخصه‌ها و گروه‌هاست؟

مقدمه

کنترل پیامدهای مخرب زیست‌محیطی موضوعی حائز اهمیت در جامعه جهانی است. تغییرات اقلیمی ازجمله این پیامدهاست. افزایش میانگین دمای اتمسفر منجر به گرم شدن کره زمین می‌شود که مجموعه‌ای از تغییرات را در سیستم‌های آب‌وهوایی زمین ایجاد می‌کند. این تغییرات سریع، درحالی اتفاق می‌افتد که انسان‌ها به انتشار گازهای گلخانه‌ای به اتمسفر ادامه می‌دهند (Alhorri, Eliskandarani, and Elsarrag 2014). دراین‌بین، دی‌اکسید کربن، به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین انواع گازهای گلخانه‌ای (Shi, Yu, and Zuo 2015)، به‌دلیل فراوانی و ماندگاری طولانی‌مدت در جو، یک گاز گلخانه‌ای مهم به‌شمار می‌رود. تقریباً ۴۰ درصد انتشار کربن را می‌توان به بخش ساختمان نسبت داد (Weber, Mueller, and Reinhart 2021). بنابر اهمیت این موضوع، در سال ۲۰۱۵م، توافق‌نامه پاریس مورد مذاکره قرار گرفت؛ اتحادیه اروپا هدفی برای دستیابی به کاهش کربن تا سال ۲۰۵۰ تعیین نمود (Xi and Cao 2022). ایران نیز در میان ۱۹۶ کشور دیگر متعهد شد گازهای گلخانه‌ای را تا سال ۲۰۳۰، چهار تا هشت درصد کاهش دهد (ابوالحسنی و دیگران ۱۴۰۲). در طی سال‌ها، متخصصان بسیاری به تحقیق بر روی موضوع ساختمان‌های کم‌کربن ترغیب شدند. مطالعات نشان داده‌اند که ساختمان‌ها بیشترین فرصت‌ها را برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در کوتاه‌مدت به وجود می‌آورند. ساختمان کم‌کربن، ساختمانی است که افزون بر تضمین آسایش حرارتی در فضای داخل، انتشار کربن کمتری نسبت به ساختمان‌های متداول دارد (Frank et al. 2015). این ساختمان‌ها در سطح جهان محدود بوده و بیشتر نمونه‌ها در ایالات متحده آمریکا و کشورهای توسعه‌یافته اروپایی احداث شده است. با وجود تلاش بسیاری از کشورها برای ایجاد ساختمان‌هایی با میزان انتشار کربن کم یا در حد صفر، در ایران هنوز اقدامات جدی صورت نگرفته است. با توجه به سهم ایران در نشر کربن به جو، به‌خصوص در عرصه ساختمان، همکاری همه‌جانبه تمامی نهادهای اجتماعی و دولتی، برای دستیابی به ساختمان‌های کم‌کربن لازم است. آسیب‌شناسی به‌معنای شناخت محدودیت‌ها و عوامل بازدارنده در نیل به این هدف، کمک شایانی به رفع این مشکلات خواهد نمود.

پژوهش حاضر در نظر دارد ضمن اشاره به تعریف و شاخصه‌های ساختمان کم‌کربن، به بررسی موانع و چالش‌های موجود در مسیر کاهش انتشار کربن ازطریق فضاهای مصنوع بشر با تأکید بر کشور ایران بپردازد. بدیهی است که با توجه به مشکلاتی که در این خصوص وجود دارد، برخی از چالش‌های شناسایی شده در جهان عمومیت داشته و برخی دیگر، ازجمله چالش‌های ایران در این مسئله است. فرایند دستیابی به هدف پژوهش، روندی استدلال‌محور است که ازطریق بررسی منابع کتابخانه‌ای محقق می‌گردد. در گام نخست، با مروری بر موانع سایر کشورها، به بررسی پیشینه و نوع چالش پرداخته می‌شود؛ در گام‌های بعدی، ضمن ارائه مفاهیم و شاخصه‌های ساختمان‌های کم‌کربن، برای شناسایی و تحلیل دقیق‌تر، موقعیت ایران به‌عنوان زمینه تحقیقات مورد نظر، در ابعاد مختلف بررسی می‌گردد. موارد فوق همراه با درک شاخصه‌ها و موانع ممکن، منجر به شکل‌گیری تحلیل‌هایی از انواع موانع و میزان تأثیرگذاری آن‌ها در ایجاد وضعیت موجود می‌گردد. همچنین در این مرحله، با استنتاج از منابع، میزان تأثیر سطوح و معیارهای مختلف ساختمان‌های کم‌کربن و مسئولیت گروه‌ها در ایران مورد بحث قرار می‌گیرد.

مطالعات پیشین ایران

دو فصلنامه معماری ایرانی
شماره ۲۷ - بهار و تابستان ۱۴۰۴

۱. مروری بر ادبیات موضوع

ساختمان‌های کم‌کربن موضوعی است که توسط محققان در سراسر دنیا مورد توجه قرار گرفته است. دسته‌ای از محققان با توجه به این واقعیت که ایجاد هر ساختمان در مراحل تولید مصالح، طراحی، بهره‌برداری و نگهداری باعث انتشار کربن به مقدار چشمگیری است، در حوزه‌های متفاوتی به ارائه پژوهش پرداختند. فیاض و همکاران در پژوهش خود پس از ترسیم وضعیت ایران در تعهدات ملی و بین‌المللی در کاهش انتشار کربن به ارائه شاخص‌های مؤثر بر طراحی ساختمان‌های کم‌کربن در ایران مشتمل بر ۷ حوزه و ۹۴ شاخص تأثیرگذار پرداخته‌اند که با توجه به رأی صاحب‌نظران و متخصصان استخراج شده است (ابوالحسنی و دیگران ۱۴۰۲). چانگ شی و کائو^۱ چالش‌هایی سه‌گانه در طراحی ساختمان‌های کم‌کربن را مطرح نموده و خاطرنشان می‌سازند که طراحی‌های آینده باید در جهت مقابله با این چالش‌ها وارد عمل شوند (Xi and Cao 2022). شی و همکاران، به بررسی عوامل مؤثر بر اجرای ساختمان‌های کم‌کربن پرداختند. تأسیسات کم‌کربن، سطح توسعه اقتصادی، همکاری بین‌المللی، مدیریت دولت‌ها و سازمان‌های صنعت ساخت‌وساز، توسعه تئوری‌ها و روش‌های کم‌کربن، آموزش و آگاهی و پوشش گیاهی از جمله این عوامل محسوب می‌شوند (Shi, Yu, and Zuo 2015). در یک مطالعه جامع، موانع احداث بناهای کم‌کربن براساس محدوده جغرافیایی، گونه‌شناسی ساختمان و نوع راه‌حل‌های کم‌کربن مورد شناسایی قرار گرفت. موانع اطلاعاتی، فنی، اقتصادی و رفتاری برای احداث این بناها وجود دارد. جنبه‌های اقتصادی، کلید پذیرش سیستم‌های فنی کارآمد هستند. طرح‌های حمایتی همچون یارانه و پرداخت وام، هزینه سرمایه‌گذاری، هزینه‌های عملیاتی و نگهداری و امکان سوددهی در بخش اقتصادی از دیدگاه مصرف‌کنندگان در رد یا پذیرش این فناوری مؤثر است. مسائل مربوط به عملکرد، تعمیر و نگهداری نیز در بخش فنی، قابل توجه است. صرف‌نظر از کشورهای توسعه‌یافته، در سایر نقاط جهان، نگرانی‌های فنی - اقتصادی غالب است. ازسوی دیگر، آگاهی‌بخشی و پشتیبانی‌ها نقش بسزایی در برطرف شدن چالش‌های متأثر از موانع اطلاعاتی دارند. مطابق این پژوهش، عدم درج برچسب و اطلاعات محصول، نبود مشاوره حرفه‌ای و اطلاعات ناکافی در سطح عموم، می‌تواند در دسته چالش‌های اطلاعاتی قرار بگیرد و درنهایت، دسته‌بندی رفتاری - اجتماعی که دربرگیرنده نگرش‌ها و ارزش‌هاست، می‌تواند چالش‌هایی از منظر ارزش‌های زیبایی‌شناختی، ریسک‌گریزی، و جنبه‌های جمعیت‌شناختی در بر گیرد (Weber, Mueller, and Reinhart 2021). عثمانی و اوریلی^۲ محرک‌های اصلی ساخت مسکن بدون کربن را در قوانین، فرهنگ، اقتصاد و روش‌ها دانستند (Osmani and O'Reilly 2009). شی^۳ و همکاران عوامل کلیدی نه‌گانه‌ای شامل تقاضای بازار، تعریف مفهومی واضح، انتخاب مواد، فناوری‌های ساخت‌وساز، دانش مدیریت تسهیلات، پروژه‌های نمونه، حمایت دولت، آموزش به مصرف‌کنندگان و آموزش صنعت را برشمردند (Shi et al. 2013). باک و پارک^۴ نشان دادند که آگاهی ناکافی در مصرف انرژی، کمبود بودجه و اطلاعات و نبود سیستم نظارتی، مانع بهبود عملکرد انرژی در خانه‌های موجود می‌شود (Baek and Park 2012). بای^۵ و همکاران چهار مشکل برای ساختمان‌های کم‌کربن در چین را بیان کردند که عبارت‌اند از: حس مشارکت اجتماعی، سیاست‌ها، روش‌ها و فناوری، و تأمین مالی (Bai et al. 2025). علاوه‌بر شناسایی چالش‌های کلی ایجاد ساختمان‌های کم‌کربن، گروه‌های متعددی این موضوع را به‌طور خاص در برخی کشورها دنبال نمودند (جدول ۱).

جدول ۱: دسته‌بندی کلی موانع و چالش‌های ساختمان‌های کم‌کربن (براساس مطالعه منابع)

کشور	موانع	عوامل	منابع
پاکستان	سیاسی	تعریف مبهم «خانه صفرکربن» و عدم وضوح در الزامات، تعدد سیاست‌های انرژی بدون هماهنگی، فقدان قوانین ساختارمند در تطابق با سازندگان، مقاومت برخی سازندگان برای پذیرش الزامات قانونی در صورت نبود پشتیبانی کافی	(Osmani, Glass, and Price 2006)
	فرهنگی	مقاومت در برابر استفاده از مصالح و سیستم‌های نوین به‌خاطر سنت‌های صنعتی موجود، کمبود تقاضای عمومی برای خانه‌های پایدار، نبود آموزش یا آگاهی کافی در سطح مشتری و کارفرما، بی‌اعتمادی به عملکرد و دوام فناوری‌های نوین	
	اقتصادی	فقدان داده‌های قابل اتکا درباره هزینه ساخت خانه صفرکربن، نبود مشوق‌های مالی مؤثر یا تسهیلات هدفمند برای سازندگان، ابهام درباره سودآوری یا مزیت تجاری چنین طرح‌هایی نسبت به روش‌های سنتی، نگرانی از افزایش هزینه‌ها	
	فنی	دشواری در ادغام فناوری‌های تجدیدپذیر در پروژه‌های کوچک، نگرانی از عملکرد فناوری‌های نوین، تمایل سازندگان بزرگ به استفاده از قالب‌های طراحی استاندارد برای کاهش هزینه و اشتباهات، عدم آمادگی زنجیره تأمین برای ارائه محصولات سبز مقرون‌به‌صرفه	
عمارتستان	اقتصادی	تقاضای بازار، هزینه‌های اولیه بالا برای فناوری‌های سبز، مدل‌های مالی ناپایدار، نگرانی از بازگشت سرمایه و ریسک اقتصادی	(Mohamed et al. 2023)
	فرهنگی	مقاومت فرهنگی در برابر سبک‌های جدید طراحی	
	اطلاعاتی	- تبلیغات ناکافی برای ساختمان‌های سبز، کمبود آگاهی عمومی	
	سیاسی	ضعف در اجرای سیاست‌ها، ناهماهنگی‌های مدیریتی	
چین	فنی	- فقدان دانش فنی و آموزش تخصصی	(Bai et al. 2025; Shi et al. 2013; Zhang, Li, and Zhou 2017)
	فرهنگی	سبک زندگی با عادات‌های مصرفی غیرپایدار، مشارکت اجتماعی پایین	
	سیاسی	کم‌کاری دولت‌های محلی در اجرای مقررات کم‌کربن، فقدان سیستم‌های نظارتی دقیق بر مصرف انرژی و انتشار کربن	
	اقتصادی	هزینه ساخت بالا، دوره بازگشت سرمایه طولانی، ریسک مالی بالا و نامشخص بودن سودآوری، ضعف بازار، سرمایه‌گذاری ناکافی در پژوهش و توسعه، نبود مشوق‌های مالی	
فنلاند	فنی	سطوح نوآوری و فناوری ناکافی	(Räihä et al. 2024)
	اطلاعاتی	- آگاهی پایین مردم درباره ساختمان‌های کم‌کربن	
	فنی	کمبود منابع انسانی و تخصص فنی در نهادهای نظارتی، پیچیدگی و فقدان دستورالعمل‌های عملیاتی و ساده در ابزارهای محاسبه ردپای کربن برای بسیاری از پروژه‌ها، پیچیدگی در تعیین حد استاندارد واحد برای ردپای کربن به‌علت تنوع زیاد در انواع ساختمان‌ها	
	سیاسی	ناهماهنگی مقررات و هم‌پوشانی با قوانین بهره‌وری انرژی	
فرانسه، سوئد، دانمارک، فنلاند، آلمان، سوئیس، ایتالیا، ژاپن، سنگاپور، کانادا، سرزمین‌های اشغالی، برزیل، کاستاریکا	اقتصادی	- هزینه‌های اضافی اجرای گزارش‌های اقلیمی، نگرانی تولیدکنندگان از افزایش هزینه‌های ساخت در پی اجرای سیاست‌های سختگیرانه	(OECD 2025)
	فرهنگی	مقاومت انجمن‌های صنعتی در برابر تغییرات سریع	
	اطلاعاتی	نبود اطلاعات کافی درباره مصالح و سامانه‌های کم‌کربن	
	فنی	پیچیدگی و طولانی شدن تدوین ارزش‌های مرجع و آستانه‌های کربن به‌علت تنوع ساختمان‌ها، استفاده محدود از ابزارهایی مانند مدل‌سازی اطلاعات ساختمان، زیرساخت دیجیتال ناکافی برای جمع‌آوری داده‌ها، بالا بودن فشار کاری بر توسعه‌دهندگان، معماران و شرکت‌های ساختمانی برای انجام ارزیابی چرخه حیات ساختمان ^۸	
فرانسه، سوئد، دانمارک، فنلاند، آلمان، سوئیس، ایتالیا، ژاپن، سنگاپور، کانادا، سرزمین‌های اشغالی، برزیل، کاستاریکا	سیاسی	ناکارآمدی شهرداری‌ها و شهرهای کوچک در اجرای مؤثر سیاست‌ها به‌دلیل کمبود منابع و تخصص، مشارکت محدود میان دولت‌ها، بخش خصوصی و دانشگاه‌ها، ضعف در فرایند اجرای سیاست‌ها نیازمند هماهنگی‌های بین دولتی	(OECD 2025)
	اطلاعاتی	نیاز به آموزش گسترده در بخش خصوصی و نهادهای اجرایی، کمبود داده‌های گواهی زیست‌محیطی محصول ^۹	
	اقتصادی	نبود انگیزه به‌دلیل عدم مزایای اقتصادی فوری در سیاست‌های کربن نهفته ^{۱۰}	

۲. مبانی نظری

۱.۲. بررسی مفهوم ساختمان کم کربن

مفهوم ساختمان کم کربن همچون سایر مفاهیم دارای تعاریف متعدد است. با این حال برخی از اصول، به عنوان عناصر بنیادی در بسیاری از تعاریف فوق مشهود است. کاهش انتشار دی اکسید کربن، مباحث مرتبط با انرژی با رویکرد به کارگیری انرژی های تجدیدپذیر و اصل بهره‌وری انرژی، و در نهایت استفاده از مواد، مصالح و رویه‌های کم کربن، از بخش‌های پرتکرار در میان تعاریف است. برای مثال کمیسیون توسعه شهری - روستایی چونگ کینگ در سال ۲۰۱۲م، مبنای عملکرد ساختمان کم کربن را بر پایه کنترل و کاهش منابع کربن و همچنین افزایش جذب و ذخیره‌سازی کربن تشریح نمود. همچنین این مفهوم در پنج سطح توصیف شد: «برنامه‌ریزی کم کربن»، «طراحی کم کربن»، «ساخت کم کربن»، «عملکرد کم کربن» و «بازافت کم کربن» (Zhang, Li, and Zhou 2017).

بنابراین یک ساختمان در چرخه عمر و حیات خود، می‌تواند در هریک از سطوح یادشده در راستای کاهش کربن، به گونه‌ای عمل نماید که در تمامی مراحل اعم از استخراج مواد اولیه، تولید، حمل‌ونقل، بهره‌برداری و تخریب، عملکرد مناسب‌تری داشته و حتی‌المقدور انرژی مورد نیاز خود را تأمین نماید (Hilderbrand 2014; Dawood et al. 2013; Hill and Bowen 1997). یک محقق بریتانیایی در توصیف فضاهای کم کربن بر کاهش تقاضای انرژی و کاربرد انرژی‌ها با قابلیت استفاده مجدد تأکید می‌کند (Jones and Xiaoxiao 2009). اهمیت انرژی در این زمینه تا بدان جاست که بهره‌وری، به عنوان یک گام مقدماتی و بسیار مهم جلوه داده می‌شود (Looman 2017). همچنین دیدگاهی دیگر در ارتباط با فراهم کردن شرایط آسایش حرارتی در عین توجه به انتشار کمتر آلاینده‌ها، به این مفهوم وسعت می‌بخشد (Frank et al. 2015).

۲.۲. تبیین شاخص‌های ساختمان کم کربن

نظر به تعاریف نقل‌شده، بناهای کم کربن با هدف کاهش انتشار کربن، بر بهبود بهره‌وری انرژی، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، و بهره‌گیری از کلیه روش‌ها و موادی که می‌تواند در کم کردن گازهای گلخانه‌ای و دی اکسید کربن تأثیرگذار باشد، تأکید دارد. علاوه بر این، کنترل کیفیت داخل نیز در این باب شایسته توجه است. آیین‌نامه‌ها می‌توانند مرجع مهمی برای شناسایی شاخصه‌های ساختمان‌های کم کربن باشند. به استناد آیین‌نامه‌های معتبر و شناخته‌شده جهانی عواملی همچون «مکان‌یابی و سایت»، «معماری ساختمان»، «مصالح و روش ساخت»، «بهره‌وری انرژی»، «انرژی‌های تجدیدپذیر»، «بهره‌وری آب» و «کیفیت محیط داخل» در شمار توصیه‌های مؤکد مراجع مذکور در زمینه بناهای کم کربن هستند (ابوالحسنی و دیگران ۱۴۰۲). همچنین با تکیه بر نتایج تحقیقات می‌توان به طیف گسترده و کامل‌تری از شاخص‌های تأثیرگذار در این حوزه دست یافت؛ آنچنان که نتایج جدیدترین تحقیقات انجام‌شده، «کاربرد فناوری‌های نوین و هوشمند» در بهینه‌سازی عملکرد انرژی، پیش‌بینی انتشار کربن، تحلیل چرخه عمر مصالح و پشتیبانی تصمیم‌گیری در پروژه‌های ساختمانی پایدار را نشان می‌دهد (Li et al. 2024)؛ مدیریت پسماند در مراحل طراحی، ساخت، بهره‌برداری و تخریب ساختمان، از جمله راهکارهای مؤثر در مسیر کاهش انتشار کربن و دستیابی به ساخت‌وساز پایدار تلقی می‌شود. به کارگیری اصول مدیریت پسماند شامل کاهش آلودگی، استفاده مجدد و بازیافت، می‌تواند بر تمامی ابعاد اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی پروژه تأثیر مثبت بگذارد (Amaral et al. 2020). تولید سالانه حدود ۸۰ میلیون تن پسماند و وضعیت نابسامان مدیریت آن‌ها سبب می‌شود این موضوع به عنوان مسئله مؤثر در زمینه انتشار کربن در چرخه حیات ساختمان در ایران قابل توجه قرار گیرد.



تصویر ۱: ابعاد ساختمان‌های کم کربن

جدول ۲: مروری بر وضعیت ایران در موضوعات مرتبط با پسماندهای ساختمانی (ر.ک: کریمی و جوادی فرد ۱۴۰۱؛ قوامی، شاهمردی، و بزرگ‌مهر ۱۴۰۴)

وضعیت پسماندهای ساختمانی در ایران	
میزان تولید	بیش از ۷۰ درصد پسماندهای تولیدشده در ایران ناشی از فعالیت‌های عمرانی و تخریب است.
نرخ بازیافت	تنها ۵ درصد پسماندها بازیافت می‌شود؛ این رقم برای کشورهای توسعه‌یافته بین ۷۰ تا ۹۵ درصد برآورد شده است.
عمر مفید ساختمان	عمر مفید بنا در ایران ۳۰ سال تخمین زده شده است؛ درحالی‌که در کشورهای صنعتی به ۱۰۰ تا ۳۰۰ سال می‌رسد.
هزینه دفع پسماند	هزینه دفع برای کشورهای توسعه‌یافته به میزان ۰/۷۶ تا ۹۰ دلار، و برای ایران ۰/۱ دلار به‌ازای هر تن برآورد شده است.

با توجه به مطالب فوق، در ادامه، شاخص‌های ساختمان‌های کم‌کربن از دیدگاه محققان ذکر می‌شود (جدول ۳).

جدول ۳: شاخص‌های ساختمان‌های کم‌کربن از دیدگاه محققان

شاخص‌ها	حوزه‌ها	شرح تحقیقات
مکان: بانی و بیان	دسترسی به حمل‌ونقل و امکانات عمومی	توسعه حمل‌ونقل مجبور، مناطق شهری متراکم و با کاربری مختلط در نزدیکی گره‌های حمل‌ونقل عمومی، تعامل بین حمل‌ونقل عمومی و الگوهای استفاده از زمین، ردپای کربن را کاهش می‌دهد (Kapoor, Saberi, and Oliver 2008; Bailey et al. 2019).
	انتخاب سایت بر مبنای حفظ محیط‌زیست و منابع طبیعی	بهینه‌سازی پتانسیل سایت از طریق توسعه زمین‌های متروکه و به حداقل رساندن اختلال در زمین، کربن موجود را به‌طور قابل توجهی کاهش می‌دهد (Hou et al. 2023).
	همسازی با اقلیم	طراحی متناسب با اقلیم که با توجه به ویژگی‌های مناطق و تأثیر آن‌ها در شکل‌گیری ساختمان‌ها تأکید دارد، ازسویی بر بالا بردن سطح کیفی آسایش فضاها و داخلی تأثیر گذاشته است و ازسوی دیگر با تکیه بر انرژی‌های غیرفسیلی، نقش قابل ملاحظه‌ای در جلوگیری از انتشار گازهای گلخانه‌ای دارد (بحریمما و سرگزی ۱۴۰۱).
	طراحی بخش‌هایی با پوشش گیاهی	توزیع فضاهای سبز و آبراه‌های اطراف ساختمان‌ها نیز بر انتشار گازهای گلخانه‌ای تأثیر می‌گذارد (Liu et al. 2022).
معماری ساختمان	طراحی پیش‌ساخته و مدولار	دقت بالا در ساخت کارخانه‌ای، عایق‌کاری بهتر، و امکان طراحی غیرفعال، و کاهش ضایعات ساختمانی ازجمله تأثیرات طراحی مدولار در کاهش انتشار کربن شناخته می‌شود (Hu, Xiang, and Shang et al. 2025).
	طراحی اقلیمی	طراحی اقلیمی و مدیریت انرژی تحت کنترل کاربران، اصول کلیدی برای طراحی معماری پایدار با هدف کاهش اثرات تغییرات اقلیمی هستند (Sijakovic and Peric 2021).
	طراحی معماری انعطاف‌پذیر برای تغییر کاربری آسان	طرح‌های ساختمانی انعطاف‌پذیر و برگشت‌پذیر با تسهیل نوسازی و استفاده مجدد از مواد، به‌طور بالقوه انتشار کربن تجسم یافته را کاهش می‌دهند (Kröhnert, Itten, and Stucki 2022).
	بهینه‌سازی فرم خارجی ساختمان	با بهینه‌سازی فرم خارجی ساختمان و استفاده از مواد و روش‌های عایق‌بندی با کارایی بالا، می‌توان عایق حرارتی را بهبود بخشید و منجر به کاهش تلفات انرژی شد (Liang et al. 2023).
مصالح و روش ساخت	در نظر گرفتن کل چرخه عمر یک ساختمان	در نظر گرفتن کل چرخه عمر یک ساختمان شامل مراحل طراحی، ساخت، استفاده، تخریب و دفع زباله، بسیار مهم است (Zhu et al. 2024).
	استفاده از مواد جایگزین	استفاده از خاکستر بادی، ^{۱۱} به‌عنوان یک افزودنی سازگار با محیط‌زیست در فرایند تولید سیمان، و سرباره کوره ^{۱۲} به‌جای مواد مورد استفاده در مخلوط‌های بتن، تا ۳۲ درصد از انتشار دی‌اکسید کربن و تا ۸۰ درصد انرژی را در فرایند تولید کاهش می‌دهد.
	استفاده از مواد طبیعی و محلی	استفاده از مواد طبیعی و محلی (Chan, Masrom, 2019; Orsini and Marrone 2019; Yasin 2022).
	استفاده از مواد قابل بازیافت	استفاده از مواد قابل بازیافت مصالح ثانویه و پسماندهای شهری، لاستیک، و شیشه بازیافتی می‌تواند جایگزین بخشی از مواد اولیه شده و کاهش گازهای گلخانه‌ای را حتی تا ۶۵ درصد در برخی موارد به دنبال داشته باشند.
مصارف و روش ساخت	نوآوری در فرایند تولید	فناوری‌های جدید مثل سامانه‌های جذب و ذخیره دی‌اکسید کربن، کوره‌های پیشرفته، یا ترکیبات نوین منجر به کاهش مستقیم گازهای گلخانه‌ای تا ۷۰ درصد خواهند شد.
	استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر	به‌کارگیری انرژی‌های سبز مثل خورشیدی، بادی، یا استفاده از سوخت‌های جایگزین از پسماندها در مراحل تولید مصالح، که می‌تواند انتشار دی‌اکسید کربن را تا ۶۰ درصد کاهش دهد.
	افزایش عملکرد مبتنی بر بهبود کارایی	طراحی مصالح با عملکرد بالا با مصرف مواد کمتر کارایی لازم را تأمین می‌کند و مصرف انرژی در مرحله کاربرد را کاهش می‌دهد (Chan, Masrom, and Yasin 2022; Orsini and Marrone 2019).
	برچسب‌گذاری مصالح	برچسب‌گذاری مصالح، ^{۱۳} گامی مهم در افزایش سطح اطلاعات جامعه درخصوص اقدامات کاهش انتشار کربن است (Liu, Wang, and Su 2016).

مطالعات مرتبط ایران

دو فصلنامه معماری ایرانی
شماره ۲۷ - بهار و تابستان ۱۴۰۴

۲۴۴

بهره‌وری انرژی	بهینه‌سازی مصرف انرژی بهینه‌سازی نمای ساختمان استفاده از عایق‌های حرارتی با راندمان بالا تجهیزات و سیستم‌های صرفه‌جویی در مصرف انرژی با راندمان بالا	با مدیریت نمودن مصرف انرژی، میزان انتشار کربن نیز کاهش می‌یابد (Alawneh, Ghazali, and Sadullah 2019). بهینه‌سازی ظاهر ساختمان‌ها و استفاده از مواد و فناوری‌های عایق حرارتی با راندمان بالا می‌تواند عملکرد عایق حرارتی را افزایش داده، اتلاف انرژی را کاهش دهد. انتخاب تجهیزات و سیستم‌های صرفه‌جویی در مصرف انرژی با راندمان بالا، مانند روشنایی LED، سیستم‌های کنترل هوشمند ساختمان، سیستم‌های مدیریت هوشمند انرژی و سیستم‌های گرمایش، و تهویه مطبوع با راندمان بالا، به مصرف انرژی کمتر و خنثی‌سازی کربن کمک می‌کند (Liang et al. 2023).
	تولید برق از انرژی‌های تجدیدپذیر	یک ساختمان کم‌کربن، نیازهای خود را با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر برآورده می‌کند (Jones and Xiaoxiao 2009). از انرژی‌های تجدیدپذیر شامل انرژی خورشید، باد، آب، امواج جزرومد، زیست‌توده و زمین می‌توان به روش پاک برق تولید نمود (Bhardwaj and Singh 2025).
بهره‌وری آب	بهینه‌سازی مصرف آب	تأمین، توزیع و تصفیه آب، مقادیر قابل توجهی انرژی مصرف می‌کند، درحالی‌که استخراج و توزیع انرژی نیز مستلزم مصرف قابل توجه آب است. مصرف انرژی مرتبط با سیستم‌های آب، منبع قابل توجهی از انتشار دی‌اکسید کربن است (Zhou and Zhu 2024). ۹۶ درصد از مصرف انرژی و ۸۷ درصد از انتشار کربن مرتبط با تأمین آب شهری مربوط به مصرف داخلی است (Fidar, Memon, and Butler 2010). بنابراین، یک رویکرد جامع که هم بهره‌وری آب و هم بهره‌وری انرژی را در نظر بگیرد، برای طراحی پایدار ساختمان ضروری است.
	استفاده از تجهیزات بهینه‌سازی مصرف آب	پیاده‌سازی دستگاه‌های کارآمد آب در ساختمان‌های مسکونی می‌تواند منجر به کاهش مصرف آب، افزایش بهره‌وری انرژی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای شود (Silva-Afonso, Rodrigues, and Pimentel- 2011). راهبردهای صرفه‌جویی در مصرف آب مانند جمع‌آوری آب باران و بازیافت آب خاکستری با کاهش انرژی مصرفی در سیستم‌های آب‌رسانی، به کاهش اثرات کلی زیست‌محیطی ساختمان‌ها کمک می‌کنند (Chiu, Aghaloo, and Mohammadi 2020).
کیفیت محیط داخل	حذف یا کاهش منابع آلوده‌کننده داخل ساختمان تهویه و ارزیابی کیفیت هوا مطالعات حرارتی برودتی جلوگیری از پرت حرارتی کنترل کیفیت هوا استفاده بهینه از نور مصنوعی	بالا رفتن کیفیت محیط داخلی علاوه بر حفظ سلامت، در کاستن از نشر کربن نیز تأثیرگذار است (Alawneh, Ghazali, and Sadullah 2019). کیفیت هوای داخل ساختمان، وابسته به اندرکنش بین سایت، شرایط آب‌وهوایی، سیستم ساختمان (طراحی اولیه و تغییرات انجام‌شده در سازه و سیستم مکانیکی)، روش‌های ساخت، منابع آلاینده‌ها (مصالح، رنگ‌ها و پوشش‌های کف، نوع کاربری هر فضا) و ساکنان ساختمان است.
	پایش هوشمند انرژی	هوش مصنوعی و یادگیری ماشینی راه‌حل‌های نوآورانه‌ای برای بهینه‌سازی مصرف انرژی و افزایش سیستم‌های اتوماسیون ساختمان ارائه می‌دهند (Stern 2024).
کاربرد فناوری‌های نوین و هوشمند	بهینه‌سازی هوشمند گرمایش، و تهویه مطبوع	این سیستم‌ها داده‌های بلادرنگ در مورد پارامترهای محیطی و مصرف انرژی را جمع‌آوری می‌کنند و امکان تشخیص ناهنجاری‌ها، خرابی‌ها و افت عملکرد را فراهم می‌کنند (Cavazzini and Benato 2023; Liu et al. 2017).
	سیستم‌های بازخورد و سنجش عملکرد	سیستم اندازه‌گیری انرژی، سامانه پایش انرژی، شناسنامه انرژی ساختمان، سیستم دوقلوی دیجیتال ^{۱۴} ، سامانه ارزیابی عملکرد انرژی، ثبت‌کننده داده و سنسورهای هوشمند ازجمله این سیستم‌ها به شمار می‌آیند (مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان ۱۴۰۴).
	سیستم نمای ساختمانی هوشمند	نماهای واکنشی ^{۱۵} ، به‌عنوان یک راه‌حل پیشرفته، می‌توانند با تغییرات محیطی سازگار شوند و مصرف انرژی را در ساختمان‌های بدون کربن کاهش دهند (Yousef, El-Hinnawy, and Ahmed 2022).
	کاهش ضایعات ساختمانی	استفاده از حسگرهای اینترنت اشیا برای نظارت مستمر بر وضعیت تجهیزات، کنترل مصرف انرژی و کاهش ضایعات در ساختمان‌ها، منجر به بهره‌وری انرژی و کاهش هزینه‌ها می‌شود (Fakhabi, Hamidian, and Aliehyaei 2024).
مدیریت پسماند	بازیافت زباله‌های ساختمانی	دزمینه طراحی ساختمان‌های بدون کربن، رعایت اصل توسعه پایدار بسیار مهم است. این اصل شامل حفاظت از محیط‌زیست، بازیافت منابع و مسئولیت اجتماعی، انتخاب مصالح ساختمانی سازگار با محیط‌زیست، ترویج طبقه‌بندی و بازیافت زباله‌های ساختمانی و کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی است (Wei et al. 2023).

بنابر اصول یادشده، می‌توان معیارهای حائز اهمیت در ساختمان‌های کم‌کربن در ایران را در ۹ مورد جمع‌بندی کرد (شکل ۲).



تصویر ۲: شاخص‌های کاهش انتشار کربن در ساختمان‌ها

۳.۲. وضعیت ایران

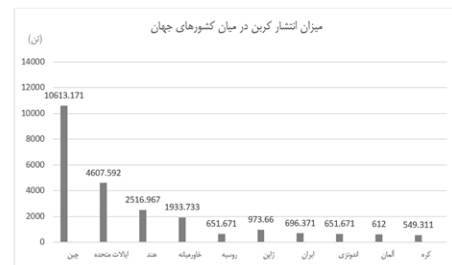
کشور ایران در جنوب غربی آسیا و در قلب خاورمیانه قرار گرفته است. اگرچه کشورهای این منطقه برخی از بهترین منابع خورشیدی جهان را در اختیار دارند، تقریباً ۹۵ درصد (بالاترین سهم در جهان) از برق تولیدشده از گاز طبیعی و نفت در خاورمیانه تأمین می‌شود (IEA 2022). ایران از نظر ذخایر گاز طبیعی در رتبه دوم جهان و از نظر ذخایر اثبات‌شده نفت خام در رتبه سوم جهان قرار دارد (وزارت نفت ۱۴۰۳). همچنین این کشور به‌علت برخورداری از تنوع توپوگرافی چشمگیر، دارای اقلیم‌های گوناگون است. مطالعات اقلیمی نشان می‌دهد که این کشور با تنوع اقلیمی چشمگیر، شامل اقلیم‌های گرم و خشک، معتدل و مرطوب، سرد و کوهستانی و گرم و مرطوب است که این دسته‌بندی‌ها مبنای شکل‌گیری الگوهای متنوع معماری و طراحی بومی در مناطق مختلف کشور شده‌اند (کاظمی‌نیا و دیگران ۱۴۰۳). تنوع اقلیمی سبب می‌شود در جهت اقدام برای کاهش انتشار کربن، ساخت‌وسازهای هر منطقه بر مبنای سازگاری با اقلیم طراحی و ساخته شود (شاعری و دیگران ۱۳۹۹). ایران در کمربند خشک جهان قرار دارد و تنها ۶/۶ درصد از آن از جنگل پوشیده شده است (Fanack Water 2025; World Bank 2022). این چالش‌ها ناشی از آب‌وهوای نیمه‌خشک کشور و کاهش بارندگی در دهه گذشته، و همچنین استفاده و مدیریت ناکارآمد منابع محدود آب است.

اقتصاد همواره عامل تعیین‌کننده‌ای در شکل‌گیری روندهای ساخت‌وساز و صنایع وابسته به آن بوده است (Finkel 2015). در این راستا، تجربه تورم ۳۲/۵ درصدی ایران در سال‌های اخیر، ضرورت توجه به راهبردهای اقتصادی در طراحی معماری به‌خصوص توسعه بناهای پایدار و کم‌کربن را دوچندان می‌کند (World Bank 2024). دولت‌ها در ایران اصلاحات عمده‌ای در برنامه یارانه‌ای خود برای برخی کالاهای اساسی مانند فرآورده‌های نفتی، آب و برق انجام داده‌اند. همچنین ایران طی سال‌های اخیر، تحت‌تأثیر تحریم‌های اقتصادی قرار داشته است. محدودیت‌های ناشی از تحریم‌ها، مانع از بهره‌مندی ایران از همکاری‌های همه‌جانبه و منابع مالی بین‌المللی شده‌اند (Madani 2021). براساس مصوبه هیئت وزیران در سال ۱۳۹۴، ایران سند مشارکت ملی خود را با اهداف کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای به میزان ۴ درصد بدون قیدوشرط و ۸ درصد مشروط به دریافت حمایت‌های بین‌المللی (شامل کمک‌های مالی، انتقال فناوری و رفع تحریم‌ها) تا سال ۲۰۳۰ تدوین نموده است (سازمان حفاظت محیط‌زیست ۱۳۹۴). به‌رغم گذشت چند سال از این مصوبه، این سند تاکنون به‌عنوان تعهد رسمی کشور در چارچوب توافق‌نامه پاریس اجرا نشده است. ازسوی دیگر، برخلاف ۷۵ کشور دارای شورای ملی ساختمان سبز، ایران فاقد یک نهاد متمرکز برای سیاست‌گذاری و صدور گواهی‌های ساخت‌وساز پایدار است. این مسئله، چالش‌هایی در همسویی با استانداردهای جهانی کاهش کربن در بخش ساختمان ایجاد کرده و این کشور را از پیوستن به جریان جهانی معماری پایدار بازمی‌دارد. شوراهای ملی ساختمان سبز نهادهایی هستند که وظیفه توسعه استانداردهای پایدار، صدور گواهینامه‌های زیست‌محیطی، و تسهیل سیاست‌گذاری‌های کم‌کربن در بخش ساخت‌وساز را بر عهده دارند (WGBC 2025). از دیدگاه زیست‌محیطی، طبق آمار آژانس بین‌المللی انرژی در سال ۲۰۲۲، سرانه انتشار دی‌اکسید کربن ۷/۲۳ تن می‌باشد. ایران با انتشار حدود ۷۰۰ میلیون تن، جایگاه هفتم جهان و اول خاورمیانه در منتشر نمودن کربن دی‌اکسید را داراست (تصویر ۳ و ۴).

مطالعات معماری ایران

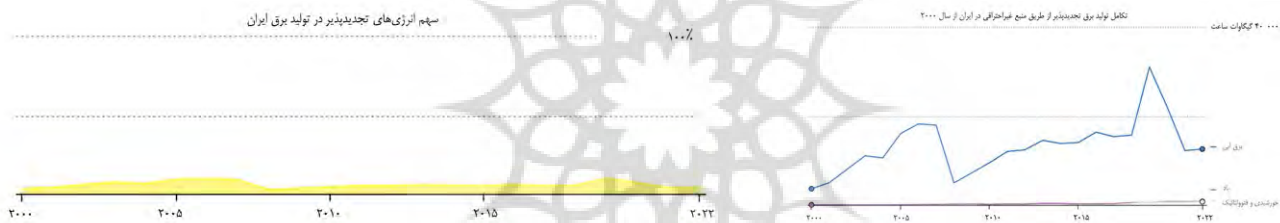
دو فصلنامه معماری ایرانی
شماره ۲۷ - بهار و تابستان ۱۴۰۴

۳۴۶



تصویر ۳ و ۴: جایگاه ایران در رتبه‌بندی میزان انتشار کربن در سطح جهان (راست) و خاورمیانه (چپ) (براساس داده‌های IEA 2022)

بیش از ۹۰ درصد انتشار دی‌اکسید کربن به بخش انرژی اختصاص دارد؛ بنابراین توسعه استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر و جایگزین (همانند برق هسته‌ای) و سوخت‌های زیستی، تولید بیوگاز و تبدیل زباله به انرژی و جمع‌آوری و ذخیره‌سازی دی‌اکسید کربن ضرورت می‌یابد. با وجود ظرفیت‌های فراوان در بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر، میزان استفاده از این گونه انرژی‌ها در تولید برق کشور، ۴ درصد برآورد شده است و بیشترین سهم تولید برق از منابع غیراشارتی، به انرژی برق‌آبی اختصاص می‌یابد (تصویر ۵ و ۶).



تصویر ۵ و ۶: تولید برق از منابع غیراشارتی ایران (راست) سهم تولید برق از انرژی‌های تجدیدپذیر در ایران (چپ) (IEA 2022)

مطالعه‌های ایران

دو فصلنامه معماری ایرانی
شماره ۲۷ - بهار و تابستان ۱۴۰۴

۲۴۷

از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۱م، مصرف انرژی ایران با افزایش چشمگیر ۴۱۵ درصدی از ۵۳ به ۳۷۷ تراوات ساعت تغییر پیدا کرده است. در صنعت ساخت‌وساز، استفاده از انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای بسیار بالاتر از میانگین جهانی است (Delavar et al. 2023). در این راستا، ارتقای ظرفیت‌های مهندسی و فناوری می‌تواند نقش مهمی در مدیریت پسماند و بهینه‌سازی مصرف آب و انرژی ایفا کند. در حوزه مهندسی و فناوری، ایران رتبه ۱۱ از نظر تولید علم، و رتبه ۶۷ از نظر شاخص‌های فناوری و نوآوری را در میان کشورهای جهان را تا سال ۲۰۲۰ کسب نموده است (پایگاه استنادی علوم جهان اسلام ۱۳۹۹؛ ۱۴۰۳). در جهت کاهش انتشار کربن، بیش از ۵۰ درصد از کشورهای آسیایی طرح‌های برچسب‌گذاری را پذیرفته‌اند. در آمریکای جنوبی ۹۰ درصد کشورها برنامه‌های برچسب‌گذاری را تصویب کرده‌اند که نشان‌دهنده پذیرش گسترده این رویکرد برای افزایش آگاهی مصرف‌کننده و شیوه‌های پایدار است. در ایران، فقدان گواهینامه‌های ساختمان سبز متناسب با هر اقلیم، چالش‌هایی را ایجاد می‌کند. در نتیجه، هیچ روش مشخصی برای سنجش مؤثر میزان موفقیت عملکرد این ساختمان‌ها وجود ندارد. در حال حاضر، تنها راه برای سنجش اثربخشی آن‌ها، مشاهده عملکرد آن‌ها در طول زمان است (Delavar et al. 2023). در بخش مدیریت پسماند، ۵۰ درصد از کل پسماندها و ۳۰ تا ۴۰ درصد از گازهای گلخانه‌ای، از پسماندهای ساختمانی به وجود می‌آید. در طی یک سال حدود ۸۰ میلیون تن پسماند ساختمانی به محل‌های دفن انتقال می‌یابند. همچنین بیش از ۹۹ درصد نخاله‌ها و ضایعات ساختمانی مستقیماً دفن می‌شوند (کریمی و جوادی‌فرد ۱۴۰۱).

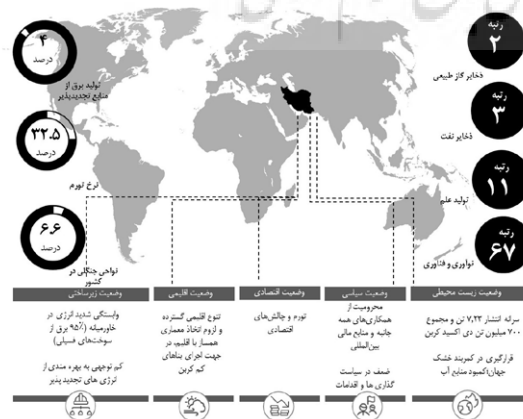
۲.۴. موانع موجود

مطابق جدول (۱) به نظر می‌رسد به‌طور کلی عمده موانع و چالش‌های مذکور، به پنج دسته کلی فنی، اقتصادی، اطلاعاتی، سیاسی و اجتماعی - فرهنگی قابل تقسیم است. بر مبنای نتیجه تحقیقات صورت گرفته، عوامل فنی به مسائل تکنیکی، فنون و تخصص لازم برای بهره‌گیری از فناوری‌ها و تجهیزات، در هر مرحله از فرایند طراحی، ساخت، بهره‌برداری و تعمیر و نگهداری ارتباط می‌یابد (Sepasgozar and Bernold 2013). عامل اقتصاد اغلب بیانگر نقش هزینه‌ها و مسائل مالی در موقعیت‌های موجود و همین‌طور آینده است؛ به‌طور مثال هزینه‌های ساخت‌وساز یا به‌کارگیری ابزار، تجهیزات، تأسیسات و تکنیک‌ها و مصالح، و وضعیت بازار نمونه‌هایی از عوامل اقتصادی اثرگذار بر تصمیم‌گیری در هنگام طراحی و ساخت یک بنا به شمار می‌روند، و مواردی مانند امکان سوددهی، بازگشت سرمایه، نیاز به پرداخت هزینه‌های مستمر جهت تعمیر یا نگهداری، بهره‌مندی از مزایا و طرح‌های تشویقی - حمایتی، ازجمله موارد آینده‌نگرانه در بعد اقتصاد محسوب می‌شوند (Pheng and Hou 2019). عامل‌های اطلاعاتی، به میزان آگاهی و اطلاعات در سطوح مختلف یک جامعه، از افراد عادی تا متخصصان، عوامل اجرایی و اشخاص تأثیرگذار اشاره دارد (Adekunle et al. 2022).

مؤلفه‌های سیاسی نیز عمدتاً بیانگر موضوعات مرتبط با سیاست‌گذاری‌ها بوده و مواردی مانند وضعیت قانون‌گذاری و نظارت دستگاه‌ها، ارائه دستورالعمل‌ها و استانداردها، مشارکت ملی و فراملی در پایبندی به تعهدات زیست‌محیطی و نیز گسترش تجربیات به‌منظور بهبود شرایط کنونی را بررسی می‌کند (Ogwu, El Malahi, and Izah 2025). مسائل اجتماعی - فرهنگی نیز به موضوعات ناشی از فرهنگ، نگرش و کنش جامعه درخصوص موضوعات گوناگون اشاره دارد (ضیا و زارع ۱۳۹۹). یکی از مسائل قابل بحث درباره چالش‌های موجود، موانع فنی است که خود بر اثر برخی محدودیت‌های دیگر همچون محدودیت‌های اقتصادی، اجتماعی، اطلاعاتی و حتی سیاسی به وقوع می‌پیوندد. مطالعه حاضر در جست‌وجوی چالش‌های فنی و محدودیت‌های تشدیدکننده در ارتباط با آن‌هاست. با توجه به اهمیت چالش‌های فنی در ارتباط با معماری و تأثیرپذیری بیشتر بر آن و عملکرد فعالان صنعت ساختمان، موضوع یادشده مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

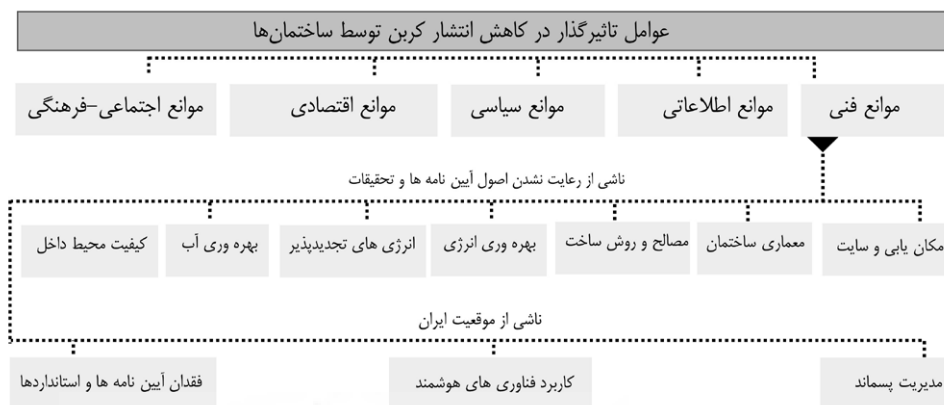
۳. یافته‌ها

در مسیر تحقق اهداف معماری کم‌کربن، نخستین گام حیاتی، شناخت بستر اجرایی و چالش‌های ساختاری موجود در کشورهاست. تحقق چنین رویکردی، مستلزم ارزیابی دقیق عوامل زیرساختی، اقلیمی، نهادی و فناورانه است؛ به‌ویژه در کشورهایی نظیر ایران که به‌رغم برخورداری از ظرفیت‌های بالقوه، با موانعی نظیر وابستگی به سوخت‌های فسیلی، ضعف در سیاست‌گذاری ساخت‌وساز پایدار، و برخی محدودیت‌های اقتصادی و بین‌المللی روبه‌رو هستند. تحلیل وضعیت موجود، امکان ترسیم مسیرهای راهبردی برای بهبود شاخص‌های طراحی، تأمین انرژی، کیفیت محیط داخلی و بهره‌برداری کم‌کربن را فراهم می‌سازد و مقدمات فراهم‌آوری زیرساخت‌ها و تسهیلات لازم را مهیا می‌کند.



تصویر ۷: موقعیت ایران

بنابراین، ۹ عامل در ایجاد بنای کم‌کربن نقشی مهم دارند. تصویر ۷ این موارد را نشان می‌دهد.



تصویر ۸: عوامل تأثیرگذار در کاهش انتشار کربن در ساختمان

۴. بحث و تحلیل

بنابر مطالعات انجام‌شده، در این بخش به تحلیل موانع فنی در رابطه با هریک از موارد شناسایی شده پرداخته می‌شود. اثر هریک از موارد فوق، با فن و تکنیک ساختمان ارتباط داشته و یا تا حد قابل توجهی، بر آن اثر دارند. بنابراین لازم است چالش‌های موجود در این زمینه شناسایی گردد. با این حال، به‌سختی می‌توان چالش‌های فنی و غیرفنی را از یکدیگر تفکیک نمود؛ زیرا اگرچه هریک از آن‌ها ذیل یک نوع دسته‌بندی خاص ترتیب می‌یابند، در درون خود با سایر محدودیت‌ها مانند مسائل اقتصادی، فقدان آگاهی و اطلاعات، نقش دولت و سیاست‌گذاران نیز ارتباط دارند. در ادامه، وجوه مختلف هریک از عامل‌های ذکرشده بررسی می‌گردد.

۴.۱. فقدان استانداردها و آیین‌نامه‌ها

وجود آیین‌نامه و استاندارد می‌تواند به‌عنوان یک راهنمای بزرگ برای طراحان و کارفرمایان پروژه‌های ساختمانی مطرح شود که در هر پنج مرحله از حوزه‌های توسعه بناهای کم‌کربن (تصویر ۱)، از برنامه‌ریزی تا بازیافت، قابل استفاده است؛ در حال حاضر تدوین ضوابط مربوطه و نظارت دستگاه‌ها بر ساخت‌وساز کم‌کربن در ایران با کم‌توجهی مواجه است. با مغفول ماندن آیین‌نامه‌ها، این مسئله به‌عنوان یک عامل مهم، زمینه‌ساز ضعف در تولید و انتخاب مصالح و فرایندهای ساخت‌وساز می‌گردد.

۴.۲. مکان‌یابی و سایت

معماران سنتی ایران، با درک دقیق از شرایط اقلیمی، به عواملی همچون جهت‌گیری بنا، مسیر باد، تابش خورشید و ویژگی‌های طبیعی سایت توجه ویژه‌ای داشتند. امروزه برخی تصمیم‌گیری‌های غلط در سطوح خرد و کلان منجر به انتشار آلاینده‌های ناشی از مکان‌یابی نامناسب می‌گردد. نمونه‌ای از این مورد در بعد کلان، مکان‌یابی برخی کارخانه‌های فولاد در مناطق کویری ایران است که با وجود محدودیت منابع آبی، منجر به بهره‌برداری گسترده از منابع آب زیرزمینی شده است. این فرایندها به دلیل نیاز به مصرف انرژی بالا برای پمپاژ، تصفیه و انتقال، خود به‌عنوان عوامل مؤثر در افزایش انتشار کربن شناخته می‌شوند (Moghaddam, Lashkaripour, and Dehghan 2014). در سطح خرد، ساخت‌وساز ویلا و مسکن شخصی به‌صورت غیرمجاز قابل بررسی است. این امر به‌ویژه در مناطق جنگلی، نه تنها موجب تخریب منابع طبیعی، اتلاف انرژی، صدور فرمان تخریب و تولید پسماند می‌شوند، بلکه با قطع درختان و کاهش پوشش گیاهی، نقش مستقیمی در افزایش انتشار کربن ایفا می‌کنند (رضایی، غلامپور ارباستان، و خواجه‌پور ۱۴۰۲). همچنین در جهت افزایش پوشش‌های گیاهی، باید در نظر داشت که گیاهان باید خارج از دیدگاه

صرفاً تزئینی به فضاها، در چارچوب تناسب با اقلیم انتخاب شوند تا باعث افزایش اثربخشی، بهبود خرداقلیم‌ها و کاهش مصرف آب شوند (Raheb 2014).

۳.۴. معماری ساختمان

در ایران، ارائه هرگونه خدمات مهندسی به‌ویژه در بخش اجرا، منحصرأ توسط اشخاص دارای صلاحیت انجام می‌شود (سازمان نظام مهندسی استان تهران ۱۴۰۰). ازطرفی، ضعف در حوزه انرژی و اقلیم، سبب می‌شود نظارت و اجرا به‌درستی انجام نگیرد (مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان ۱۴۰۴). بنابراین، نظارت بر اجرای اصول طراحی پایدار در بناها، بیش از اینکه سیستمی ساختارمند باشد، عملکردی فردمحور است. بسیاری از مواقع به دلایلی مانند عدم آگاهی کافی، کیفیات اساسی ساختمان‌ها، به‌خصوص از منظر انرژی و کارکرد اقلیمی، بازیچه اهداف جسورانه و نمایشی برخی از سازندگان و طراحان قرار می‌گیرد. با نگاهی بر آثار غفلت‌ورزی در برخی از طراحی‌های صورت‌گرفته به نظر می‌رسد نقش‌آفرینان در امر تربیت نسل جدید معماران نیز به‌نوعی در حساس نمودن طراحان آینده به ارتباط تأثیرات معماری بر محیط‌زیست، دارای مسئولیتی انکارناپذیرند. در کنار عوامل فوق، در شرایط تورم اقتصادی، کارفرمایان حتی‌الامکان به دنبال کاهش هزینه تمام‌شده بنا هستند. از این نظر، دیدگاه فوق جایگزین روش‌ها، مصالح و طرح‌های پایدار و بهینه‌تر می‌شوند. ازطرفی، تمایل به تجربیات آزموده‌شده قبلی، ریسک و نگرانی کمتری به دنبال دارد. این درحالی است که در کشورهای پیشرفته، ساختمان‌های سبز مشمول مشوق‌های اقتصادی مانند تخفیف مالیات یا امتیازهای فروش می‌شوند (Taherkhani 2024).

۴.۴. مصالح

مواردی همچون فولاد، بتن، سیمان و برخی از دیگر مصالح مصرفی، دارای اثرات نامطلوب زیست‌محیطی هستند (Mehra et al. 2021). باین‌همه، تجربه سال‌ها ساخت‌وساز ابنیه، و تدوین آیین‌نامه‌ها و مقررات ملی بر پایه استفاده از این مصالح در سیستم‌های سازه‌ای متداول بتنی و فولادی، سبب آشنایی طراحان، سازندگان، مجریان، سیستم‌های نظارتی و همچنین نیروی انسانی مستقر در پروژه‌ها شده است. این درحالی است که آموزش نیروی انسانی برای کاربرد فناوری‌ها و روش‌های نوین، در ساخت ملات‌ها با استفاده از مواد جایگزین، نکات فنی در حین اجرا، نسبت‌های اختلاط و سایر نکات، مستلزم صرف زمان و هزینه است. همچنین انجام آزمایش‌ها و مطالعات بروی مواد حاصل‌شده برای کسب اطمینان از میزان مقاومت کافی و عملکرد مناسب نسبت به نمونه‌های مشابه پیشین، ضرورت می‌یابد. استفاده از روش‌های ساخت‌وساز بر پایه مصالح سیمانی و بتنی، علاوه‌بر انتشار کربن نهفته در این مصالح، سبب افزایش نیاز به آب در فرایند ساخت و عمل‌آوری می‌شود که خود، در انتشار کربن نقش مهمی دارد. به‌کارگیری سیستم‌های خشک و بدون ملات علاوه‌بر صرفه‌جویی در آب و انرژی، منجر به کاهش ضایعات و قابلیت استفاده مجدد از قطعات می‌گردد (Macieira and Mendonça 2016). علاوه‌بر این، مواد طبیعی و محلی همچون خاک، دوستدار محیط‌زیست، ارزان‌قیمت و در دسترس است مقاومت‌سازی دارای محدودیت است (زمانیان، حسوندیان، و نورزاد ۱۴۰۲؛ Zhou and Liu 2019).

ازسوی دیگر، عوامل زیست‌محیطی کمتر مورد توجه مجریان، معماران و کارفرمایان قرار می‌گیرد. مطابق مطالعات انجام‌گرفته در ایران (مددی قله زو، دانش، و توکلی‌زاده ۱۳۹۹) و جهان (Chan, Masrom, and Yasin 2022)، اغلب، ملاحظات اقتصادی در اولویت تصمیم‌گیری‌های کارفرمایان و فعالان صنعت ساخت‌وساز قرار می‌گیرد. یکی دیگر از مشکلات درزمینه مصالح، توجه بیش از حد به جنبه‌های زیبایی‌شناسانه و یا تقلید از سبک‌های معماری سایر مناطق، به‌گونه‌ای موجب تغییر اولویت‌بندی‌ها در انتخاب مصالح نما شده است. در دهه‌های اخیر ظهور مصالح نوآورانه همچون مصالح با قابلیت جذب کربن دی‌اکسید به حمایت از ایده ساخت‌وسازهای پایدار کمک می‌کند (Kayode and Ayoade 2024). قیمت بالا و محدودیت در تولید صنعتی انبوه، از جمله موانع گسترش استفاده از آن‌ها به شمار می‌روند (Kamelniaa 2014). دغدغه‌های اقتصادی خانوارها، به‌همراه عدم شناخت کافی، مانع از کاربرد وسیع این‌گونه مصالح در ساخت‌وسازهای شخصی و کوچک می‌شوند. همچنین در مقیاس کلان، بسیاری از ساخت‌وسازهای دولتی

نیز مبتنی بر مناقصات و با اولویت کاهش هزینه‌ها منعقد می‌گردند. عنوان یک مانع مهم دیگر، بسیاری از تولیدکنندگان مصالح، آشنایی کافی در زمینه برچسب‌گذاری بر روی مصالح براساس میزان انتشار کربن را ندارند. به علاوه، ممکن است برچسب‌گذاری، باعث ایجاد هزینه‌هایی در زمینه تحقیق و توسعه، و یا تغییر فرایندهای تولید مصالح و یا جایگزین نمودن مواد، برای ساخت مصالح کم کربن شود.

۵.۴. انرژی‌های تجدیدپذیر

جایگزین شدن انرژی‌های تجدیدپذیر با منابع سوخت‌های فسیلی نقش مهمی در کاهش کربن انتشار یافته به جو دارد. با وجود ظرفیت‌ها در زمینه بهره‌مندی از انرژی خورشید و باد، موانع متعددی بر سر راه توسعه این منابع در ایران وجود دارد. از دیدگاه مصرف‌کنندگان، نداشتن اطلاعات کافی، فقدان انگیزه ناشی از عدم آگاهی، اطمینان و جذابیت سیستم‌ها و نیز سبک زندگی، عواملی هستند که گسترش استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر را با چالش‌هایی مواجه می‌کنند. عواملی همچون هزینه و پیچیدگی فناوری‌ها، تحریم‌های گسترده، سطح اندک آگاهی عمومی و عدم حمایت جدی دولت‌ها، از علل عدم توفیق در کاربرد وسیع این فناوری‌هاست (کاظمی و کاظمی ۱۴۰۳؛ منظور و نیاکان ۱۳۹۱).

ذخایر غنی سوخت‌های فسیلی از یک سو و ارزان‌قیمت بودن آن از سوی دیگر باعث کاربرد گسترده این منابع در مصارف گوناگون شده است. فراوانی و سهولت دسترسی به منابع سوخت فسیلی و در نتیجه احساس عدم ضرورت در تلاش برای استحصال انرژی از سایر منابع، سبب کم‌توجهی به انرژی‌های پاک شده است. علاوه بر موارد مذکور، انگیزه برای سرمایه‌گذاری از عوامل حائز اهمیت در این زمینه است؛ برای مثال افت شدید تعرفه خرید تضمینی و عدم توجه اقتصادی، چالش‌های اساسی در زمینه جذب سرمایه‌گذاران داخلی و خارجی جهت توسعه انرژی‌های بادی ایجاد می‌کند (Mirmezami and Mohseni Cheraghloo 2022). این مشکلات در کنار فقدان استانداردهای لازم، برای استفاده از ضایعات، مدیریت منابع زیست‌توده و همچنین موانع فنی و زیرساختی، در رابطه با تولید انرژی از منابع زیستی صادق است (صفری، صفری، و موسی‌خانی ۱۴۰۲). با بالا رفتن سطح اطلاعات جامعه، محدودیت‌های اجتماعی - فرهنگی مانند پذیرش فناوری‌های نوین مرتفع می‌گردد. همچنین لازم است مجریان و عوامل ذی‌ربط، با هدف رفع پیچیدگی‌های فناورانه، توسط متخصصان تحت آموزش قرار گیرند. با وجود این، برطرف نمودن چالش‌های اطلاعاتی به‌تنهایی راهگشا نخواهد بود. بهبود شرایط راه‌اندازی این سامانه‌ها می‌تواند از سوی مسئولان ذی‌ربط مورد توجه قرار گیرد تا هزینه اولیه و هزینه‌های بالای تعمیرات، حفظ و نگهداری کنترل‌شده و متقاضیان بیشتری برای استفاده از سیستم‌های خورشیدی اقدام نمایند. با مروری بر یافته‌ها، به نظر می‌رسد دولت و سیاست‌گذاران نقش مهمی در رواج یافتن کاربرد انرژی‌های تجدیدپذیر دارند. طرح‌های حمایتی و مشوق‌های مالی در زمره مهم‌ترین ترغیب‌کننده‌ها برای سرمایه‌گذاران و کارفرمایان به شمار می‌رود.

۶.۴. بهره‌وری انرژی

موانع نشست‌گرفته از سیاست‌گذاری‌ها مهم‌ترین عاملی است که سبب می‌شود بهره‌وری انرژی آن‌طور که شایسته توجه است، در بخش ساختمان دنبال نشود. تخصیص یارانه به منابع انرژی‌های تجدیدناپذیر و اعمال قیمت‌های ارزان و غیرواقعی، سبب تقویت بی‌اعتنایی در میزان مصرف انرژی در بین مصرف‌کنندگان و همچنین سرکوب انگیزه‌های سرمایه‌گذاری در بخش فناوری‌های پایدار می‌گردد. دولت با وضع سیاست‌های حمایتی می‌تواند تا حد چشمگیری چالش‌های اقتصادی و اطلاعاتی مردم در موضوعات مربوط به انرژی را از بین ببرد. مشوق‌های مالی همچون ارائه وام، یارانه، بخشودگی یا وقفه مالیاتی در ترغیب و اقدام مصرف‌کنندگان برای خرید تجهیزات با بهره‌وری انرژی، بسیار مؤثر است (احمدی و دیگران ۱۳۹۶؛ کاظمی ۱۳۹۶). با در نظر داشتن نقش محوری دولت، ایجاد یک ساختار یکپارچه در رفع کلیه چالش‌ها از جمله محدودیت‌های اقتصادی و آگاه‌سازی اجتماعی در خصوص اقدامات مؤثر مردم و همچنین امتیازات و مشوق‌های پیش‌بینی‌شده، گامی اثربخش در ایجاد فرهنگ مصرف بهینه انرژی تلقی می‌شود. به‌رغم تأثیر سیاست‌گذاری‌ها، پرداختن به وظایف مصرف‌کنندگان و معماران نیز حائز اهمیت است. تغییر در الگوی مصرف و عادات کاربران یک اصل انکارناپذیر در صرفه‌جویی انرژی محسوب می‌شود که در نتیجه احساس مسئولیت آنان در

برابر محیط‌زیست شکل می‌گیرد. طراحی و اجرای مناسب اتصالات و جزئیات اجرایی ساختمان، و همچنین نصب صحیح پنجره‌ها، عایق‌ها و سیستم‌های تهویه نیز از وظایف معماران است که در این حیطه قابل بحث است (Schade 2013). همچنین توجه به اصول برنامه‌ریزی سایت (شامل فرم، جهت‌گیری و...)، انتخاب مصالح و طراحی هوشمندانه پوسته‌های ساختمانی، تعامل با ابزارهای شبیه‌سازی انرژی و همکاری بین رشته‌ای، از جمله عواملی است که می‌تواند عملکرد معماران در این حوزه را بهبود ببخشد (Shi et al. 2016). تحقیقات درباره اثر پوسته‌های خارجی بنا به‌منزله عمده‌ترین عامل تبادلات انرژی در ساختمان‌ها، و همچنین مهم‌ترین عامل دستیابی به بنای کم‌کربن در میان مباحث بهره‌وری انرژی، گواه دیگری بر این ادعاست (توکلی و دیگران ۱۳۹۹).

۷.۴. بهره‌وری آب

تحقق بهره‌وری آب به‌منظور کاهش انتشار کربن از طریق ساختمان‌ها تا حد زیادی وابسته به اصلاح رفتار و تصمیمات کاربران است. به‌رغم اهمیت بالای آب در ایران، همچنان نیاز به آموزش و فرهنگ‌سازی مصرف صحیح در جامعه احساس می‌شود. از طرفی، سطح پایین آگاهی عمومی در مورد کمبود آب و فناوری‌های کارآمد، تقاضا و استفاده از دستگاه‌های صرفه‌جویی در مصرف آب را در ساختمان‌های مسکونی و تجاری محدود می‌کند (Esmaeilpour, et al. 2023). در بین عوامل مرتبط با سیاست‌گذاری، ضوابط ساختمانی و دستورالعمل‌های طراحی شهری در ایران اغلب تأکید چندانی بر بهره‌وری آب ندارند. الزامات اجرایی کمی برای استفاده از فناوری‌های صرفه‌جویی در مصرف آب در ساختمان‌های جدید یا بازسازی‌شده وجود دارد (Pournaseri et al. 2024). درحالی‌که استفاده مجدد آب منجر به کاهش انتشار کربن و حفظ منابع آب شیرین می‌گردد، به‌کارگیری مجدد آب خاکستری و آب باران هنوز به‌طور سیستماتیک اجرا نشده است.

به‌علاوه، حدود ۳۲ درصد نشت آب آشامیدنی در فرایند توزیع و انتقال، گواه دیگری بر سوء مدیریت منابع آب در ایران است که در مجموع، وضعیت بهره‌وری آب را تحت‌الشعاع قرار می‌دهد (Al-Saidi and Dehnavi 2024). در صورت اصلاح تدریجی یارانه‌های آب و انرژی، همراه با اعمال سیاست‌های حمایتی و آموزش عمومی، می‌توان گامی مهم در کاهش ردپای کربن کشور برداشت. علاوه بر این در بعد فنی، بازار لوازم و فناوری‌های مدرن صرفه‌جویی در مصرف آب به‌طور کامل توسعه نیافته و تخصص فنی برای طراحی، نصب و نگهداری سیستم‌های پیشرفته (مانند بازیافت آب خاکستری، جمع‌آوری آب باران) در برخی مناطق محدود است (Pournaseri et al. 2024). برای حفاظت از منابع محدود آب و افزایش بهره‌وری، معماران نیز با راهکارهایی چون پیش‌بینی سیستم جمع‌آوری، هدایت و کاربرد مؤثر فاضلاب خاکستری و آب باران، روش‌های ساخت‌وساز و مصالح با نیاز حداقل به منابع آب و قابلیت استفاده مجدد از مصالح، نقش مؤثری در تمامی مراحل طراحی تا بازیافت بنا ایفا می‌کنند.

۸.۴. کیفیت محیط داخل

آسایش حرارتی یکی از مؤلفه‌های مهم مطرح در تأمین کیفیت محیط داخل ساختمان است. عواملی همچون نبود درزبندی اصولی، بی‌توجهی به نحوه انطباق پروژه با سایت و اقلیم حاکم، اشتباه در انتخاب سیستم حرارت و برودت و عایق‌بندی مناسب، و اشکالات طراحی و اجرا منجر به هدررفت انرژی و سلب آسایش حرارتی می‌گردد. تأمین آسایش روشنایی نیز از عوامل تأثیرگذار بر نحوه ارزیابی کیفیت محدوده درونی بناست. کاربرد سیستم‌های پایش و ارزیابی کیفیت هوای درون فضاها برای رصد میزان دی‌اکسید کربن موجود و کنترل آلاینده‌ها، پیشنهادی برای بهبود کیفیت هوا به شمار می‌رود. با این حال به‌کارگیری این فناوری‌ها در ایران فراگیر نیست. بهره‌گیری از سیستم‌های تهویه هوا برای انواع ساختمان‌ها با کاربری‌های متفاوت لازم است تا هوای موجود را که حاصل از تنفس کاربران، کارکرد وسایل احتراقی و سایر آلاینده‌های داخلی است با هوای تازه تعویض نموده و از غلظت آلاینده‌ها بکاهد. در این زمینه نباید از

نقش کاربران در تولید برخی آلاینده‌ها، صرف انرژی و کلیه مواردی که موجب حفظ کیفیت محیط می‌گردد، غافل شد. در راستای ارتباط مباحث انرژی با کیفیات محیط، مقررات ملی ساختمان ضوابطی درخصوص آسایش حرارتی و نوری بیان نموده است. الزام به کاربرد مصالح با مقاومت حرارتی مناسب، پنجره‌های دوجداره و سایه‌بان، تعیین محدوده دمای آسایش و نرخ تهویه مورد نیاز، الزام به طراحی سیستم‌های گرمایش و سرمایش با راندمان بالا، کاربرد تهویه ترکیبی و سنسورهای کیفیت هوا، از موارد مرتبط با آسایش حرارتی و تهویه مناسب‌اند؛ به‌علاوه، تعیین حداقل شدت روشنایی لازم برای هر فضا و الزامات مربوط به مسائل نور و تهویه ازجمله مباحث مورد اشاره این ضوابط محسوب می‌شوند (مبحث ۱۴ و ۱۹ مقررات ملی ساختمان ۱۴۰۴). بااین‌همه، لازم است ضعف‌ها و خلأهای موجود در ضوابط، در جهت بهبود وضعیت داخل بنا بهبود یابد.

۹.۴. مدیریت پسماندهای ساختمانی

کارشناسان معتقدند با شیوه‌های مختلف می‌توان ۴۰ تا ۱۰۰ درصد پسماندهای ساختمانی را کاهش داد (Eghbali, Azizzadeh Araee, and Boushehri et al. 2019). بااین‌حال، رها شدن نخاله‌ها و مدیریت نامناسب این مواد در ایران نشان می‌دهد که پذیرفته شدن این موضوع با مشکلاتی ازسوی طیف متنوعی از گروه‌های ذی‌ربط مواجه است. حدود یک‌سوم زباله‌های ساختمانی می‌تواند ناشی از تصمیمات طراحی باشد (Mahinkanda et al. 2023). در ایران طول عمر ساختمان‌ها ۲۵ تا ۳۰ سال در نظر گرفته می‌شود؛ این درحالی است که در کشورهای صنعتی به ۱۰۰ تا ۳۰۰ سال هم می‌رسد (کریمی و جوادفر، ۱۴۰۱)؛ درنتیجه، در میان معماران و عوامل اجرایی، بی‌توجهی و فقدان دانش و حساسیت لازم سبب می‌شود تا طراحی با رویکرد کاهش تخریب‌ها و ضایعات ناشی از آن مغفول بماند؛ به‌علاوه، استفاده از مصالح بازیافتی از منظر عدم نیاز به استخراج مجدد از منابع و صرف انرژی و سوخت‌های فسیلی بسیار مناسب‌تر است. بااین‌حال، هیچ برنامه سیستماتیکی برای کاهش منبع، استفاده مجدد یا بازیافت پسماندهای ساختمانی و تخریب در اکثر نقاط ایران وجود ندارد (Taghipour et al. 2019). همچنین، بی‌توجهی به مسئله مدیریت پسماندها ازسوی قانون‌گذاران، آن را صرفاً در سطح تخلیه و دفع ضایعات نگه می‌دارد. از دیدگاه مصرف‌کنندگان، در قبال صرف هزینه و انجام تحقیقات برای تولید ساخته‌میه‌های پایدار، نامعلوم بودن حجم تقاضا و علاقه‌مندی، این مسیر را با چالش مواجه می‌کند (Christodoulou and Cullinane f2019). حمایت دولت و قرار گرفتن مسئله کاهش کربن در اولویت‌های سیاست‌گذاری و دستگاه‌های مرتبط، می‌تواند گام مثبتی در جهت کمرنگ‌تر شدن چالش‌های موجود باشد.

۹.۴.۱. کاربرد فناوری‌های نوین و هوشمند

مقایسه نرخ تولیدات علمی ایران در مقابل دستاوردهای اجرایی و عملیاتی‌شده در این حوزه، نشان می‌دهد که بسیاری از مباحث و طرح‌های مفید فناوری‌های هوشمند در سطوح آکادمیک باقی مانده و در عمل به دلایل سیاستی - مدیریتی و فنی، تعامل دانش با صنعت چندان مورد استقبال قرار نمی‌گیرد. کمبود قابل توجه منابع مالی و سرمایه‌گذاری معطوف به فناوری‌های ساختمان هوشمند، محدودیت‌های اقتصادی و مشوق‌های بازار، از چالش‌های مهم این موضوع به شمار می‌رود (Baharetha et al. 2024). بسیاری از پروژه‌های هوشمند در ایران، طرح‌های آزمایشی کوچک‌مقیاس هستند که در پیاده‌سازی گسترده‌تر با چالش‌هایی روبه‌رو می‌شوند. فقدان استانداردها و چارچوب‌های ملی برای فناوری‌های ساختمان هوشمند، مقیاس‌پذیری و قابلیت همکاری را مختل می‌کند. موانع مالی، کمبود زیرساخت‌ها، نبود فناوری‌های بومی و محدودیت در نصب و راه‌اندازی سیستم‌های هوشمند، در کنار اطلاعات کم افراد و مقاومت آن‌ها نسبت به تغییر، ازجمله دیگر محدودیت‌ها در این بخش است (Ugural, Aghili, and Burgan 2024). ازسوی دیگر، وابستگی شدید ایران به سوخت‌های فسیلی و قیمت‌های یارانه‌ای انرژی، انگیزه اقتصادی برای سرمایه‌گذاری در فناوری‌های هوشمند که بهره‌وری انرژی را در ساختمان‌ها بهبود می‌بخشند، کاهش می‌دهد. هزینه پایین انرژی، هم مصرف‌کنندگان و هم سرمایه‌گذاران را از اتخاذ راه‌حل‌های هوشمند صرفه‌جویی در انرژی منصرف می‌کند (Barkhordar, Fakouriyan, and Sheykha 2018).

مطالعات انجام‌شده، ضمن چالش‌های فنی مرتبط با معیارهای کلی و همچنین چالش‌های ناشی از موقعیت ایران،

به واکاوی مسائل مرتبط با هر عامل پرداخته است. در ادامه، جدول ۴ مروری بر سایر محدودیت‌های موانع فنی، در زمینه‌های اقتصادی، اطلاعاتی، سیاسی و فرهنگی - اجتماعی را ارائه می‌نماید.

جدول ۴: بررسی سایر محدودیت‌های موانع فنی ساختمان‌های کم‌کربن در ایران

موانع فنی				
موانع فنی	دارای محدودیت اقتصادی	دارای محدودیت اطلاعاتی	دارای محدودیت سیاسی	دارای محدودیت فرهنگی - اجتماعی
آیین‌نامه‌ها	مغفول ماندن تأمین بودجه برای انجام یا گسترش امور تحقیقاتی و تدوین ضوابط	فقدان اطلاعات کافی جامعه برای پیگیری و مطالبه‌گری توسعه ضوابط؛ کمبود منابع بومی‌سازی شده	عدم تدوین و نظارت الزامات از سوی سازمان‌های ذی‌ربط	غیرضروری انگاشتن تقویت و گسترش اصول ساخت‌وساز پایدار
مکان‌یابی و سایت پروژه‌ها	تأثیر قیمت زمین بر مکان‌یابی	عدم ترویج سامانه‌های مکان‌یابی هوشمند و خطا در انتخاب زمین براساس معیارهای کاهش کربن	سوء مدیریت و ضعف تصمیم‌گیری در خصوص مکان‌یابی پروژه‌های بزرگ	دخالت یافتن معیارهای شخصی و سازمانی در انتخاب زمین
معماری ساختمان	تحت فشار قرار گرفتن معمار و کارفرما در مقابل هزینه فزاینده شیوه‌های طراحی و ساخت و تجهیزات مورد نیاز در بناهای کم‌کربن	کمبود اطلاعات کارگزاران اجرایی در مورد عوامل اثرگذار در طراحی	ضعف یا فقدان برخی استانداردهای موجود؛ نظارت ناکافی	تأثیرپذیری و اقبال عمومی نسبت به به‌ظاهر معماری و بی‌توجهی به معیارهای زیست‌محیطی
مصالح	پرهزینه بودن مصالح بازیافتی و کم‌کربن در اکثر مراحل تولید تا عرضه	کمبود اطلاعات کارگزاران اجرایی در خصوص مصالح پایدار و سبز؛ کمبود اطلاعات اجرایی؛ فقدان استانداردها و تعریف جایگاه مصالح نوین	عدم توسعه طرح‌های برچسب‌گذاری مصالح کم‌کربن؛ عدم تدوین و اجرای سیاست‌های تشویقی در حوزه مصالح	ارجحیت ظاهر، یا هزینه تمام‌شده از سوی کارفرما
انرژی‌های تجدیدپذیر	هزینه‌های راه‌اندازی و تعمیر و نگهداری بالا؛ کوتاه نبودن دوره بازگشت سرمایه	کمبود اطلاعات کارگزاران اجرایی	نیازمند حمایت‌های مالی دستگاه‌های مسئول؛ یارانه‌های انرژی؛ تحریم‌های اقتصادی؛ تمرکز بر منابع تجدیدناپذیر	دیدگاه و سبک زندگی مصرف‌کنندگان
بهره‌وری انرژی	قیمت پایین انرژی و سوخت‌های فسیلی در ایران؛ هزینه بالای تجهیزات حامی بهره‌وری انرژی در ساختمان	کمبود اطلاعات برخی معماران از اصول مؤثر در بهره‌وری انرژی؛ خلأ در حوزه آموزش معماری؛ محدود بودن زیرساخت‌های دیجیتال برای پایش یا مدل‌سازی انرژی	نیازمند حمایت‌های مالی دستگاه‌های مسئول؛ یارانه‌های انرژی؛ تمرکز بر منابع تجدیدناپذیر؛	تمایلات و انتظارات غلط کارفرما؛ بی‌تفاوتی کاربران در اصلاح الگوی مصرف
بهره‌وری آب	عامل هزینه برای تهیه و نصب سیستم‌های پایش مصرف، جمع‌آوری پساب خاکستری و...؛ بازار محدود	مغفول ماندن استفاده مجدد از آب باران و آب خاکستری در طراحی؛ بی‌توجهی به شیوه‌های ساخت‌وساز خشک	سوء مدیریت و فقدان طرح‌های مشوق برای افزایش بهره‌وری آب در ساختمان‌ها	بی‌تفاوتی مصرف‌کنندگان در اصلاح الگوی مصرف
کیفیت محیط داخل	هزینه خرید، تعمیر و نگهداری سیستم‌های تهویه و تصفیه هوا و تجهیزات بهره‌وری انرژی	کمبود اطلاعات معمار در روش‌های طراحی بهینه؛ ضعف در دانش اجرایی	ضعف در آیین‌نامه‌ها؛ کمبود مشوق‌ها در گسترش سامانه‌های کاربردی	بی‌تفاوتی مصرف‌کنندگان در اصلاح الگوی مصرف
مدیریت پسماندهای ساختمانی	ارجحیت دفن پسماندها از نظر هزینه؛ محدودیت کارفرما در انتخاب شیوه‌های ساخت غیرسنتی با تولید پسماند کمتر	انتخاب غلط مصالح، فرم و سایر مؤلفه‌ها در افزایش عمر ساختمان و کاهش زباله مغفول ماندن مدولاریته، انعطاف‌پذیری	فقدان سیاست‌گذاری جامع و کاربردی در خصوص کنترل و مدیریت پسماندها	طرز فکر غلط نسبت به پسماندها و متصور نبودن امکان کاربرد مجدد و ایمن در ساخت‌وساز بناها؛
کاربرد فناوری‌های هوشمند و نوین	هزینه‌های بالا؛ بازار محدود	کمبود اطلاعات کارگزاران از فناوری‌ها و به‌کارگیری آن‌ها در بخش‌های مختلف	فقدان مشوق‌های مالی برای توسعه کاربرد فناوری‌ها در ساختمان	استقبال محدود از فناوری‌های هوشمند کارآمد در زمینه کنترل پسماندها، بهره‌وری آب، انرژی و...

۵. جمع‌بندی

تصویر ۹، میزان تأثیرگذاری چالش‌های موجود در هریک از عوامل فنی را نشان می‌دهد؛ برای مثال در بخش «مکان‌یابی و سایت» عوامل مدیریتی نقش بسزایی در مانع‌زدایی در زمینه کاهش انتشار کربن دارند، زیرا طرح‌های جامع شهری، تصمیمات در جهت توسعه و گسترش شهر، تراکم انواع کاربری‌ها و زیرساخت‌ها و احداث آن‌ها از سوی ارگان‌های دولتی صادر می‌شود. در مراتب بعدی، می‌توان انفعال مراجع ذی‌ربط در امتیازدهی و توسعه طرح افزایش پوشش گیاهی و کاهش جزیره حرارتی با روش‌هایی چون ساختمان‌های سبز، بام سبز و... را یک انتقاد سیاسی - اقتصادی تلقی کرد. در بخش «معماری ساختمان»، مباحث فنی و تخصصی در چندین لایه مطرح است. وظایف معمار در طراحی، آموزش نسل جدید، هدایت فکری جامعه، مطالبه‌گری برای تدوین استانداردها و نظارت، به‌صورت نقشی حیاتی در کاهش انتشار کربن شناخته می‌شود. با وجود این، نبود هماهنگی بین سیاست‌های زیست‌محیطی، آموزش دانشگاهی و نیازهای صنعت و فاصله میان اهداف معماری پایدار و واقعیت‌های اجرایی نیز در این زمینه مؤثرند. فشارهای اقتصادی پروژه، نگاه سنتی کارفرمایان، و خلأهای قانونی در آیین‌نامه‌های ساخت‌وساز، دامنه اختیارات معمار را محدود کرده است. از طرفی با در نظر گرفتن وضع اقتصادی حاکم، ممکن است معمار و کارفرما ناگزیر به حذف راهبردهای پایدار، مصالح و فناوری‌های هزینه‌بر شوند.

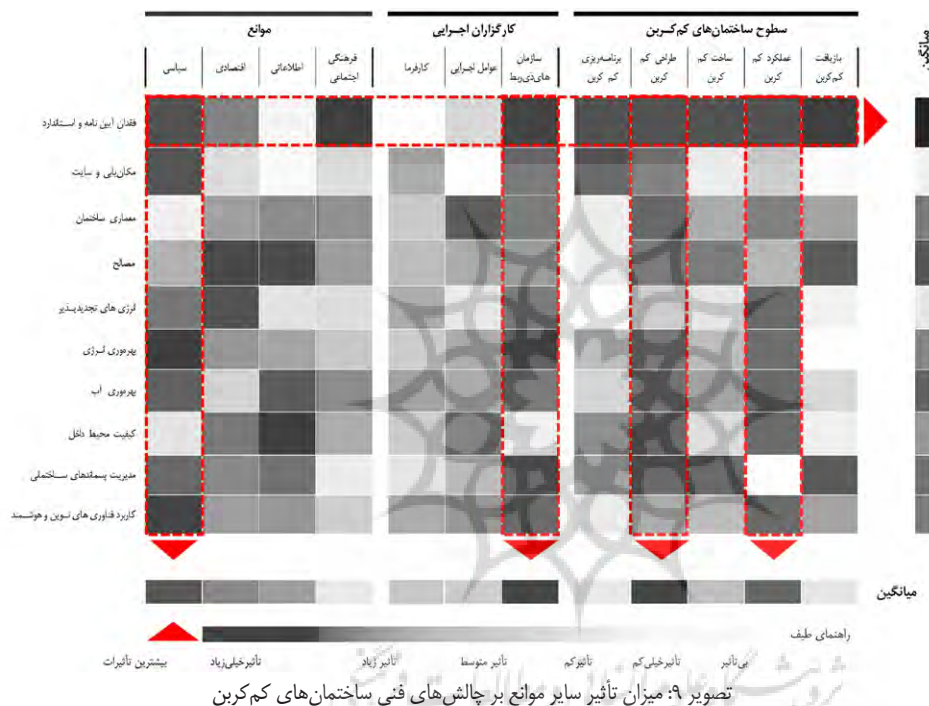
در بخش آیین‌نامه‌ها، اصلی‌ترین مانع برای تدوین ضوابط که رهنمودهایی در سطوح مختلف بناهای کم‌کربن ارائه می‌دهد، تحت عنوان موانع سیاسی شناخته می‌شود. موانع مربوط به کم‌توجهی نسبت به طرح مجموعه قوانین و مقررات و حتی تشکیل سیستم‌های نظارتی، بیش از آنکه ماهیت اقتصادی یا اطلاعاتی داشته باشد، یک چالش سیاسی محسوب می‌شود، زیرا حتی در صورت نیاز به تأمین منابع مالی بیشتر برای گسترش تحقیقات و تدوین استانداردها، محدودیت‌های اقتصادی نیز از رویکردهای سیاسی نشئت می‌گیرند. بنابراین، تغییر اولویت‌های توسعه‌ای دولت، به‌گونه‌ای که مسائل زیست‌محیطی بیش از پیش مورد توجه قرار گیرند، نقش بسزایی در این امر دارد.

در بخش مصالح، نظر به گستردگی موضوع، طیف وسیعی از چالش‌ها ظهور می‌یابند که هریک دارای درجات متفاوتی از تأثیرند. ضعف اطلاعاتی درخصوص شناخت مصالح کم‌کربن، بر عملکرد و انتخاب‌های مهندسين و کارفرمایان سایه افکنده است. اجرای طرح برچسب‌گذاری مصالح کم‌کربن، و تلاش برای گسترش کاربرد مصالح پایدار از وظایف مدیریتی مثبت در این حوزه به شمار می‌رود. ازسوی دیگر، تجربه ثابت کرده است که هزینه به نفع محیط‌زیست، معمولاً در اولویت آخر کارفرمایان در تصمیم‌گیری‌های آنان قرار دارد. در بخش بهره‌وری انرژی، مطالعات پیشین ثابت می‌کند که عوامل قانونی و اداری (سیاسی)، مهم‌ترین مانع بهره‌وری انرژی در ساختمان‌های ایران است. کمبود مشوق‌های اقتصادی و بی‌رونقی بازار کارایی انرژی در درجه دوم، این مسئله را با چالش روبه‌رو می‌کند. ازسوی دیگر، با توجه به تأثیر معماری بر تعاملات بنا و محیط خارجی، و اثر مستقیم بر مصرف انرژی، می‌توان نقش معمار را هم به‌عنوان خالق فضا و هم به جهت عامل انتقال تجربیات و دانش طراحی به نسل‌های آتی، پررنگ تلقی نمود.

در بخش کیفیت محیط داخل، معمار در به وجود آوردن شرایط آسایش حرارتی و بهبود دادن کیفیات داخلی بنا دارای نقشی انکارناپذیر است، زیرا عواملی مانند جلوگیری از پرت حرارتی، و بهره‌گیری از نور و منظر بر عهده وی می‌باشد. در نظر گرفتن این نکته در کنار رایج نبودن سیستم‌های پایش کیفی هوا درون ساختمان‌ها بر وزن موانع اطلاعاتی نسبت به سایر موارد می‌افزاید. بنابراین چالش‌های اطلاعاتی به‌عنوان یک مسئله چندمحوره در رأس سایر موارد قرار دارد. چالش‌های اجتماعی - فرهنگی اغلب از رفتارهای انسانی در محیط ریشه می‌گیرند. مادامی که انسان در یک فضا زندگی می‌کند، امور بسیاری، از فعالیت‌های روزمره تا ابزار و تجهیزاتی که از آن استفاده می‌کند و حتی ساخت‌مایه‌های تشکیل‌دهنده سرپناه وی، باعث تولید آلاینده‌هایی می‌شوند. به‌علاوه، آسایش حرارتی و روشنایی، به الگوهای مصرف کاربران نیز وابسته است؛ لذا به‌علت اثرپذیری دائمی محیط مصنوع از رفتارها، فعالیت‌ها و سبک زندگی انسان، موضوعات اجتماعی - فرهنگی نیز پراهمیت تلقی می‌گردد. عامل اقتصادی می‌تواند دربردارنده هزینه

خرید، و تعمیر و نگهداری تجهیزات بهره‌وری انرژی و تصفیه و تهویه هوا باشد و در بعد سیاسی فقدان یا ضعف برخی استانداردها و دستورالعمل‌ها مؤثرند.

براساس مبانی نظری، وجوه ساختمان‌های کم‌کربن تحت‌تأثیر عواملی است که به نظر می‌رسد می‌توان آن‌ها را تقسیم‌بندی کرد و در قالب سه دسته یا جدول که معیارهای مهم در ارتباط با مفهوم ساختمان‌های کم‌کربن را مورد سنجش قرار می‌دهد، قرار داد: دسته اول موانعی هستند که در تشکیل یا تشدید موانع فنی مؤثرند؛ دسته دوم شامل کارگزاران اجرایی اثرگذار در موانع هستند، و دسته سوم نشان‌دهنده ارتباط و تأثیر موانع در هریک از سطوح بناهای کم‌کربن است. با توجه به منابع موجود میزان اثر در هر مورد ارزیابی می‌گردد.



نتیجه

حرکت به‌سوی بناهای کم‌کربن در ساخت‌وسازهای جدید، ازجمله ایده‌های مطرح در جهت کاهش اثرات معضلات زیست‌محیطی به شمار می‌رود. یک ساختمان کم‌کربن، بنایی است که انتشار گازهای گلخانه‌ای به‌ویژه دی‌اکسید کربن از آن، با بهره‌گیری از راهبردهای گوناگون به حداقل می‌رسد. این راهبردها از برنامه‌ریزی و طراحی کم‌کربن آغاز شده و پس از رعایت ساخت‌وساز و عملکرد کم‌کربن در طول حیات بنا، به نقطه باز یافت کم‌کربن منتهی می‌گردد. در ارتباط با راهکارهای متعدد کاهش انتشار کربن در ساختمان‌ها، موانع مختلفی برای این هدف شناسایی شده‌اند. عمده این موارد در ایران، در دسته‌بندی پنج‌گانه‌ای ازجمله چالش‌های فنی، اقتصادی، اطلاعاتی، سیاسی و فرهنگی - اجتماعی جای می‌گیرند. عللی همچون فقدان آیین‌نامه‌ها، و چالش‌های مربوط به مکان‌یابی و سایت، معماری، مصالح، بهره‌وری انرژی، انرژی‌های تجدیدپذیر، بهره‌وری آب، و کیفیت محیط داخلی، مدیریت پسماندهای ساختمانی و کاربرد فناوری‌های هوشمند، از موارد شناسایی شده در بعد فنی به شمار می‌روند. بررسی‌ها نشان داد در زمینه عوامل فنی، چالش‌های مرتبط با سیاست‌گذاری بیشترین محدودیت‌ها را در مسیر کم‌کربن شدن ساختمان‌ها در ایران ایجاد می‌کند. همچنین به نظر می‌رسد بیشترین مسئولیت بر عهده سازمان‌های ذی‌ربط باشد؛ اگرچه تمامی گروه‌ها به نوبه

خود، در این امر مسئول شناخته می‌شوند. از میان شاخصه‌های فنی، فقدان آیین‌نامه‌ها دارای بالاترین تأثیر، و از بین سطوح ساختمان‌های کم‌کربن، سطوح طراحی و عملکرد به‌ترتیب زمینه بیشترین چالش‌ها و ناکارآمدی‌ها در اجرای این مفهوم در ایران هستند.

پی‌نوشت‌ها

1. Chang Xi and Cao
2. Osmani and O'Reilly
3. Shi
4. Baek and Park
5. Bai

۶. ردپای کربن محصول (Carbon Footprint)، نوعی از برچسب کربن است که مقدار کل انتشار گازهای گلخانه‌ای در کل چرخه عمر از تولید تا حمل‌ونقل، توزیع، مصرف نهایی و دفع زباله یک محصول یا خدمت تعریف می‌شود.

7. Building Information Modeling (BIM)
8. Life Cycle Assessment of Buildings
9. Environmental Product Declaration
10. Embodied Carbon

۱۱. محصول جانبی احتراق زغال‌سنگ در نیروگاه‌های ترموالکتریک.

۱۲. محصول جانبی فرایند تولید آهن.

13. Carbon Labeling

۱۴. دوقلوی دیجیتال (Digital Twin)، مدلی از یک سیستم یا فرایند واقعی است که رفتار آن سامانه را مورد شبیه‌سازی و تحلیل قرار می‌دهد.

15. Responsive Facades

منابع

- ابوالحسنی، نوشین، ریما فیاض، علیرضا مستغنی، و ستار قصاب‌ستاری. ۱۴۰۲. ارزیابی شاخص‌های مؤثر بر طراحی ساختمان کم‌کربن در ایران. *نامه معماری و شهرسازی* ۱۶ (۴۰): ۲۵-۵.
- احمدی، معین، عباس ملکی، سعید ودادی کلانتر، و محمدصادق کریمی. ۱۳۹۶. بررسی اسناد بالادستی و موانع بهره‌وری انرژی در بخش ساختمان ایران. *مطالعات راهبردی سیاست‌گذاری عمومی* ۷ (۲۲): ۱۳۱-۱۴۲.
- بحرپیما، عبدالحمید، و محمدعلی سرگزی. ۱۴۰۱. طراحی اقلیمی؛ نمودی از همسازی با محیط نمونه موردی: اقلیم گرم و خشک ایران. *فصلنامه علمی پژوهشی پژوهش و برنامه‌ریزی شهر* ۱۳ (۴۹): ۲۸۲-۲۹۲.
- پایگاه استنادی علوم جهان اسلام. ۱۴۰۳. جایگاه فناوری و نوآوری جمهوری اسلامی ایران براساس گزارش سازمان جهانی مالکیت فکری در سال ۲۰۲۴. <https://isc.ac/fa/news/2394> (دسترسی در ۲۵ مرداد ۱۴۰۴).
- پایگاه استنادی علوم جهان اسلام. ۱۳۹۹. جمهوری اسلامی ایران پیش‌تاز رشد تولید علم حوزه فنی و مهندسی دنیا شد؛ کسب رتبه ۱۱ تولید علم و رتبه ۴ کیفیت علم فنی و مهندسی دنیا. <https://isc.ac/fa/news/1520> (دسترسی در ۲۵ مرداد ۱۴۰۴).
- توکلی، الهه، زهرا سادات زمردیان، محمد تحصیلدوست، و محمدرضا حافظی. ۱۳۹۹. ارزیابی نحوه رفتار بر مقدار مصرف انرژی: نمونه موردی مجموعه مسکونی شهید پاکدل در شهر اصفهان. *نشریه انرژی/ایران* ۳ (۷۱): ۲۹۰-۷.
- دفتر امور مقررات ملی ساختمان. ۱۴۰۴. *مبحث ۱۴ مقررات ملی ساختمان/ایران*. تهران: معاونت امور ساختمان و مسکن، وزارت راه، مسکن و شهرسازی. قابل دسترس در: <http://www.bhrc.ac.ir>

- دفتر امور مقررات ملی ساختمان. ۱۴۰۴. مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان/ ایران. تهران: معاونت امور ساختمان و مسکن، وزارت راه، مسکن و شهرسازی. قابل دسترس در: <http://www.bhrc.ac.ir>
- رضایی، مسعود، هومن غلامپور ارباستان، و حسین خواجه‌پور. ۱۴۰۲. بررسی فرصت‌های اجرایی برنامه مدیریت کربن در کشور. تهران: مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی، دفتر مطالعات زیربنایی (گروه محیط‌زیست). شماره پیاپی: ۱۹۸۵۳، کد موضوعی: ۲۵۰.
- زمانیان، مصطفی، مرضیه حسنوندیان، و علی نورزاد. ۱۴۰۲. تثبیت خاک کوبیده‌شده به‌عنوان یک روش ساخت پایدار با استفاده از مصالح دوستدار محیط‌زیست: مطالعه موردی. نشریه مهندسی سازه و ساخت ۹(۱۰): ۱۲۲-۱۳۵.
- سازمان حفاظت محیط‌زیست. ۱۳۹۴. تصویب نامه درخصوص اقدامات مربوط به برنامه مشارکت ملی در زمینه کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای. تهران: هیئت وزیران. مصوب ۱۳۹۱/۷/۱۵. <https://rc.majlis.ir/fa/law/show/946142>. (دسترسی در ۲۶ تیر ۱۴۰۴).
- سازمان نظام مهندسی ساختمان استان تهران. ۱۴۰۰. بلاغیه شماره ۱: کلیه ناظران حقیقی و حقوقی سازمان نظام مهندسی ساختمان استان تهران. <https://tceo.ir/portal/home/?NEWS/235223/255404/25611>. (دسترسی در ۱۰ مرداد ۱۴۰۴).
- شاعری، جلیل، رزا و کیلی‌نژاد، محمود یعقوبی. ۱۳۹۹. تأثیر جهت‌گیری ساختمان اداری بر بهره‌خوردگی، انرژی مصرفی و کربن تولیدی در اقلیم‌های گرم و مرطوب، گرم و خشک و سرد، ایران. نشریه مهندسی مکانیک ایران ۲۲ (۲): ۴۹-۷۳.
- صفری، غلامحسین، محمد صفری، نسیم موسی‌خانی. ۱۴۰۳. مروری بر منابع تولید، مزایا و معایب سوخت‌های زیستی به‌عنوان یک منبع انرژی تجدیدپذیر. مطالعات علوم محیط‌زیست ۹ (۱): ۸۰۷۱-۸۰۵۴.
- ضیاء، محمدرضا، و سحر زارع. ۱۳۹۹. مروری بر چند تعریف از فرهنگ. فصلنامه علمی پژوهشی رهیافت فرهنگ دینی ۱۰ و ۱۱ (۳): ۶۰-۶۹.
- کریمی، فریبرز، و سمانه جوادی‌فرد. ۱۴۰۱. برنامه‌ریزی راهبردی فضایی برای مدیریت بهینه پسماندهای ساختمانی با رویکرد بازیافت و استفاده مجدد در ایران. مهندسی و مدیریت ساخت ۷ (۱): ۳۴-۴۰.
- قوامی عبدالله، بهزاد شاهمرادی، و هیمین بزرگمهر. ۱۴۰۴. مدیریت پسماندهای ساخت و تخریب ساختمان در ایران مبتنی بر استراتژی 3R. سلامت و بهداشت ۱۶ (۱): ۷۴-۵۸.
- کاظمی، محمد. ۱۳۹۶. راهکارهای افزایش بهره‌وری انرژی ساختمان. صفحه ۲۷ (۷۹): ۴۵-۳۷.
- کاظمی، محمد، و عالییه کاظمی. ۱۴۰۳. دیدگاه مصرف‌کنندگان انرژی در مورد موانع استفاده از صفحات فتوولتائیک و آبگرمکن‌های خورشیدی در ساختمان‌ها. مجله پژوهش‌های برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری انرژی، ش. ۱۰: ۱-۳۱.
- کاظمی‌نیا، نفیسه، روشا اسکندری، پرنیان احمدی، نگین فتح‌الهی. ۱۴۰۳. بازتعریف معماری اقلیم چهارگانه ایران با رویکرد کالبدی (یک اثر شاخص از هر اقلیم). مطالعات طراحی شهری و پژوهش‌های شهری ۱۰ (۵): ۵۷-۶۶.
- مددی قله زو، هادی، شهناز دانش، و حمیدرضا توکلی‌زاده. ۱۳۹۹. ارزیابی زیست‌محیطی، اقتصادی، فنی و اجرایی انواع سیستم‌های رایج دیوارچینی در ایران، با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی. نشریه مهندسی عمران/امیرکبیر ۵۲ (۵): ۱۳۱۳-۱۳۳۰.
- منظور، داود، و لیلی نیاکان. ۱۳۹۱. توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر در کشور: موانع و راهبردها. نشریه انرژی ایران ۱۵ (۳): ۱۵-۱.
- وزارت نفت جمهوری اسلامی ایران. ۱۴۰۳. ذخایر درجای نفت و گاز (آمار و اطلاعات). <https://www.mop.ir/fa-IR/>. Portal/4924/news/view/14616/6859/Staging/ (دسترسی در ۲۱ مرداد ۱۴۰۴)
- Adekunle, Peter, Clinton Aigabvboa, Wellington Thwala, Opeoluwa Akinradewo, and Ayodeji Oke. 2022. Challenges confronting construction information management. *Frontiers in Built Environment*, no. 8: 1075674.
- Alawneh, Rami, Farid Ghazali, Hikmat Ali, Ahmad Farhan Sadullah. 2019. A Novel framework for

integrating United Nations Sustainable Development Goals into sustainable non-residential building assessment and management in Jordan. *Sustainable Cities and Society*, no. 49: 101612.

- Alhorr, Yousef, Eiman Eliskandarani, Esam Elsarrag. 2014. Approaches to reducing carbon dioxide emissions in the built environment: Low carbon cities. *International Journal of Sustainable Built Environment*, no. 3: 167-187.
- Al-Saidi, Mohammad, and Sudeh Dehnavi. 2024. Growing the portfolio: circular economy through water reuse in Iran. *Frontiers in Water*, no. 6: 1341715.
- Amaral, Rosaria.E.C., Joel Brito, Matt Buckman, Elicia Drake, Ešther Ilatova, Paige Rice, Carlos Sabbagh, Sergei Voronkin, and Yewande. S. Abraham. 2020. Waste management and operational energy for sustainable buildings: A review. *Sustainability* 12(13), 5337. <https://doi.org/10.3390/su12135337>
- Baek, Cheong-Hoon, and Sang-Hoon Park. 2012. Changes in renovation policies in the era of sustainability. *Energy and Buildings* no. 47: 485-496.
- Baharetha, Saleh, Ashraf M. Soliman, Mohammad A. Hassanain, Adel Alshibani, and Mohamed S. Ezz. 2024. Assessment of the Challenges Influencing the Adoption of Smart Building Technologies. *Frontiers in Built Environment*, no. 9: 1334005.
- Bai, Lei, Longji Wang, Zhe Song, Yunxiao Wang, and Song Wang. 2025. Toward a zero-carbon building future: innovations and challenges for sustainable development in China. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, no. 20: 531-544.
- Bailey, Linda, Patricia L. Mokhtarian and Andrew Little. (2008). The broader connection between public transportation, energy conservation and greenhouse gas reduction. Fairfax, VA: *ICF International*, 1-29.
- Barkhordar, Zahra, A. Samaneh Fakouriyan, and Siamak Sheykha. 2018. The Role of Energy Subsidy Reform in Energy Efficiency Enhancement: Lessons Learnt and Future Potential for Iranian Industries. *Journal of Cleaner Production*, no. 197: 542-550.
- Bhardwaj, Ankur, and Vivek Kumar Singh. 2025. Renewable Energy Insights: Sources and Technological Advancements. In: *Renewable Energy Development: Technology, Material and Sustainability*, 25-42. Singapore: Springer Nature Singapore
- Cavazzini, Giovanna, and Alberto Benato. 2023. Residential Buildings Heating and Cooling Systems: The key role of monitoring systems and real-time analysis in the detection of failures and management strategy optimization. *Processes* (11)5: 1365.
- Chan, Melissa, Md Asrul Nasid Masrom, and Suleiman Said Yasin. 2022. Selection of Low-Carbon Building Materials in Construction Projects: Construction Professionals' Perspectives. *Buildings* 12(4): 486.
- Chiu, Yie-Ru., Kamaledin Aghaloo, and Babak Mohammadi. 2020. Incorporating rainwater harvesting systems in Iran's potable water-saving scheme by using a GIS-simulation based decision support system. *Water* 12: 752.
- Christodoulou, Anastasia, and Kevin Cullinane. 2019. Identifying the main opportunities and

- challenges from the implementation of a port energy management system: A SWOT/PESTLE analysis. *Sustainability* 11(21): f6046.
- Dawood, Saad, Tracey Crosbie, Nashwan Dawood, and Richard Lord. 2013. Designing low carbon buildings. A framework to reduce energy consumption and embed the use of renewables. *Sustainable Cities and Society*, no. 8: 63-71.
 - Delavar, Taraneh, Ali Amiri, Erika Borgentorp, and Seppo Junnila. 2023. The prioritization of sustainability features of buildings from the viewpoint of experts. *Buildings*, no. 13: 3021.
 - Eghbali, Seyed Rahman, Ravanbakhsh Azizzadeh Araee, and Aliasghar Mofrad Boushehri, A. 2019. Construction waste generation in the Iranian building industry. *Civil Engineering Infrastructures Journal*, no. 52: 1-10.
 - Esmaeilpour, Ali, SeyedYahya Islami and Farzin Ghadami. 2025. *Water Lost: Revisiting the Significance of Water in Iranian Architecture*. Preprint. Available at: <https://doi.org/10.20944/preprints202503.0698.v1>
 - Fakhabi, Mona Masroor, Seyed Mohammad Hamidian, and Mehdi Aliehyaei. 2024. Exploring the Role of the Internet of Things in Green Buildings. *Energy Science & Engineering*, no. 12: 3779-3822.
 - Fanack Water. 2025. *Water challenges in Iran*. Available at: <https://water.fanack.com/iran/water-challenges-in-iran/> (30 july 2025).
 - Fidar, A., F. A. Memon, and D. Butler. 2010. Environmental implications of water efficient microcomponents in residential buildings. *Science of The Total Environment*, no. 408: 5828-5835. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.08.006>
 - Finkel, Gerald. 2015. *The economics of the construction industry*. Routledge.
 - Frank, O. L., S. A. Omer, S. B. Riffat, and B. Mempo. 2015. The indispensability of good operation & maintenance (O&M) manuals in the operation and maintenance of low carbon buildings. *Sustainable Cities and Society*, no. 14: e-e9.
 - Hilderbrand, Linda. 2014. Strategic investment of embodied energy during the architectural planning process. TU Delft
 - Hill, Richard C., and Paul A. Bowen. 1997. Sustainable construction: principles and a framework for attainment. *Construction Management and Economics* 15(3): 223-239.
 - Hou, Deyi, Abir Al-Tabbaa, David O'Connor, Qing. Hu, Yong-Guan Zhu, Liuwei Wang, Niall Kirkwood, Yong Sik Ok, Daniel C. W. Tsang, and Nanthi S. Bolan. 2023. Sustainable remediation and redevelopment of brownfield sites. *Nature Reviews Earth & Environment* 4(4): 271-286.
 - Hu, Yupei, Luyao Xiang, and Kai Shang. 2025. The Research Review on Life Cycle Carbon Emissions in the Operational Process of Modular Buildings. *Buildings* 15(12): 2085.
 - International Energy Agency (IEA). 2022. *Middle East – CO₂ emissions*. IEA Official Website. Available at: <https://www.iea.org/regions/middle-east/emissions/> (16 june 2025).
 - Jones, Phil, and Li Xiaoxiao. 2009. Low Carbon Building Design. European Experience [J]. *Architecture Technique*, 12: 25.
 - Kamelnia, Hamed. 2017. Challenges to design GREEN high-rise building in Iran: Assessing

and analyzing usage of green building technology (case study: Residential Green Towers, Iran). *Nagshejahan* 6(4): 039-055.

- Kapoor, Prashant, Ommid Saberi, and Neil Oliver. 2019. *Green Urban Development: A methodology to calculate site and infrastructure related GHG emissions*. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing: 012004.
- Kayode, Olaleye R., and Shakiru A. Ayoade. 2024. Enhancing Sustainability in Construction: A Systematic Review of Carbon-Absorbing Concrete Technologies and Applications. *European Journal of Applied Science, Engineering and Technology* 2(6): 113-121.
- Kröhnert, Hanna, René Itten, and Matthias Stucki. 2022. Comparing flexible and conventional monolithic building design: Life cycle environmental impact and potential for material circulation. *Building and environment* f222, 109409.
- Li, Yangxue, Maxwell Fordjour Antwi-Afari, Shahnawaz Anwer, Imran Mehmood, Waleed Umer, Saeed Reza Mohandes, Ibrahim Yahaya Wuni, Mohammed Abdul-Rahman, and Heng Li. 2024. Artificial intelligence in net-zero carbon emissions for sustainable building projects: A systematic literature and science mapping review. *Buildings* 14(9): 2752.
- Liang, Rui, Xichuan Zheng, Po-Hsun Wang, Jia Liang, and Linhui Hu. 2023. Research progress of carbon-neutral design for buildings. *Energies* 16(16): 5929.
- Liu, Gu, Yang Xu, Ding Dawei, Zhang Lei, Cui Jiarui, Chen Zhiwen, and Tong Chaonan. 2017. *Energy consumption optimization of air conditioning based on building monitoring system*. In: Proceedings of the 29th Chinese Control and Decision Conference (CCDC), 4114-4119. IEEE.
- Liu, Tiantian, Qunwei Wang, and Bin Su. 2016. A review of carbon labeling: Standards, implementation, and impact. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, no. 53: 68-79.
- Liu, Wanlin, Binhao Zuo, Chunli Qu, Li Ge, and Qiong Shen. 2022. A reasonable distribution of natural landscape: Utilizing green space and water bodies to reduce residential building carbon emissions. *Energy and Buildings*, no. 267: 112150.
- Looman, Remco. 2017. Climate-responsive design. A framework for an energy concept design- decision support tool for architects using principles of climate- responsive design. PhD dissertation. TU Delft, Architecture and the Built Environment.
- Macieira, Mónica, and Paulo Mendonça. 2016. *Building rehabilitation with dry and wet systems—embodied water comparison*, in: MATEC Web of Conferences. Vol. 68. EDP Sciences, 13009.
- Madani, Kaveh. 2021. Have international sanctions impacted Iran's environment?. *World* 2(2): 231-255.
- Mahinkanda, Magalage Madhavee Paradeepika Mahinkanda, Jose Jorge Ochoa Paniagua, Rameez Rameezdeen, Nicholas Chileshe, and Ning Gu. 2023. Design decision-making for construction waste minimisation: A systematic literature review. *Buildings*, no. 13: 2763.
- Mehra, Sukanya, Mandeep Singh, Geetika Sharma, Shiv Kumar, Navishi and Pooja Chadha. 2021. *Impact of construction material on environment*. In: Ecological and Health Effects of Building Materials. Springer international publishing: f427-442.

- Mirnezami, Seyed Reza, and Amin Mohseni Cheraghlou. 2022. Wind power in Iran: Technical, policy, and financial aspects for better energy resource management. *Energies* 15(9): 3230.
- Moghaddam, Mona Hosseinpour, Gholam Reza Lashkaripour, and Pooria Dehghan. 2014. Environmental pollution evaluation of steel plants for achieving sustainable development; case study: khorasan steel complex of Iran. *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences* 4(6): 131-140.
- Mohamed, Mohamed Ahmed Said, Ahmad Osman Ibrahim, Faizah Mohammed Bashir, Abdeljelil Chammam, Hela Gnaba, Sokaina Issa Kadhim, and Nima Khalilpoor. 2023. An assessment of the barriers to the adoption of green building technologies in Saudi Arabia. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, no. 18: 872–880
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). 2025. *Zero-Carbon Buildings in Cities: A Whole Life-Cycle Approach*. OECD Urban Studies. Available at: https://www.oecd.org/en/publications/zero-carbon-buildings-in-cities_daae8779-en.html (30 July 2024).
- Ogwu, Matthew Chidozie, Soumia El Malahi, and Sylvester. 2025. *Policy and Regulatory Frameworks for Sustainable Environmental Practices*. In: Evaluating Environmental Processes and Technologies. Cham: Springer Nature Switzerland: 513-544
- Orsini, Federico, and Paola Marrone. 2019. Approaches for a low-carbon production of building materials: A review. *Journal of Cleaner Production*, no. 241: 118380.
- Osmani, Mohamed, and Alistair O'Reilly. 2009. Feasibility of zero carbon homes in England by 2016: a house builder's perspective. *Building and Environment* 44(9): 1917-1924.
- Pheng, Low Sui., and Lau Shing Hou. 2019. *The economy and the construction industry*. In: Construction quality and the economy: A study at the firm level. Singapore: Springer Singapore: 21-54.
- Pournaseri, Shahnaz, Bahram Saleh Sedghpour, Yaganeh Mohammadzadeh, Zahra Mohammadifard. 2024. Modeling the effective factors of water consumption efficiency in schools using the LEED sustainability assessment system. *Journal of Iranian Architecture & Urbanism (JIAU)*, no. 15, 291-301.
- Rahaei, Zohreh, Mohammad Taghi Ghaneian, Fatemeh Hasanzadeh Mohammadi, Mohammad Hassan Ehrampoush, Sara Jambarsang, and Seyyed Vahid Ghelmani. 2023. Public acceptance of water reuse: barriers and facilitators in Yazd, Iran, in 2020. *Journal of Environmental Health and Sustainable Development* 8(4): 2139-2148.
- Raheb, Ghazal. 2014. Recommending an Appropriate Type of Green Roof Taking into Account Urban Typology and Climatic Zoning in Iran. *Environmental Sciences*, no. 11, 89-104.
- Rähä, Jouni, Selina Clarke, Paula Sankelo, Enni Ruokamo, and Hanna-Lisa Kangas. 2024. The importance of organization type: Construction sector perceptions of low-carbon policies and measures. *Environmental Science & Policy*, no. 151: .103602.
- Schade, Jutta. 2013. A design process perspective on the energy performance of buildings. PhD diss., Luleå University of Technology.
- Sepasgozar, Samad M. E., and Leonhard E. Bernold. 2013. *Factors influencing the decision of technology adoption in construction*. In: ICSDEC 2012: Developing the Frontier of Sustainable

Design, Engineering, and Construction. 654-661.

- Shi, Qian, Tao Yu, and Jian Zuo. 2015. What leads to low-carbon buildings? A China study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, no. 50: 726-734
- Shi, Qian, Jian Zuo, Rui Huang, Jiang Huang, and Stephen Pullen. 2013. Identifying the critical factors for green construction—an empirical study in China. *Habitat International*, no. 40: 1-8.
- Shi, Xing, Zhichao Tian, Wenqiang Chen, Binghui Si, and Xing Jin. 2016. A review on building energy efficient design optimization from the perspective of architects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, no. 65: 872-884.
- Sijakovic, Milan., and Ana Peric. 2021. Sustainable architectural design: Towards climate change mitigation. *Archnet-IJAR: International Journal of Architectural Research* 15(2): 385-400.
- Silva Afonso, Armando, Maria Fernanda Rodrigues, and Carla Pimentel-Rodrigues. 2011. *Water efficiency in buildings: Assessment of its impact on energy efficiency and reducing GHG emissions*. In: Proceedings of the 6th IASME/WSEAS International Conference on Energy & Environment—EE, Vol. 11.
- Stern, Dani. 2024. How AI and ML can help reduce energy usage and carbon emissions in buildings. *Corporate Real Estate Journal* 14(1): 66-74
- Taghipour, Hassan, Reza Taghizadeh Jazadani, Reza Dehghanzadeh, Mohamad Asghari Jafarabadi, Mohsen Mir Mohammadi, and Mehdi Ghayebzadeh. 2019. Construction and demolition waste and its management challenges in Iran: A case study in Tabriz city. *Health Scope*, no. 8: e62313.
- Taherkhani, Roohollah. 2024. Barriers to green building implementation in developing countries: the case of Iran. *Environment, Development and Sustainability*, no. 26: 28389-28421.
- Ugural, Mehmet Nurettin, Seyed arash Aghili, and Halil Ibrahim Burgan. 2024. Adoption of lean construction and AI/IoT technologies in iran's public construction sector: A mixed-methods approach using fuzzy logic. *Buildings* 14(10): 3317.
- Weber, Ramon, Caitlin Mueller, and Christoph Reinhart. 2021. *Building for zero: The grand challenge of architecture without carbon*. SSRN. Available at: <https://ssrn.com/abstract=3939009> (30 July 2024).
- Wei, Jia, Jiang Li, Jiafan Zhao, and Xiaoyang Wang. 2023. Hot topics and trends in zero-energy building research—A bibliometrical analysis based on CiteSpace. *Buildings*, no. 13: 479.
- World Bank. 2022. *Iran, Islamic Republic – Country Profile and Development Indicators*. Available at: <https://data.worldbank.org/country/iran-islamic-rep> (16 june 2025).
- World Bank. 2024. *Iran, Islamic Republic – Country Profile and Development Indicators*. Available at: <https://data.worldbank.org/country/iran-islamic-rep> (16 june 2025).
- World Green Building Council. 2025. *Official website of the World Green Building Council*. Available at: <https://worldgbc.org/> (16 june 2025).
- Xi, Chang, and Shi-Jie Cao. 2022. Challenges and future development paths of low carbon building design: a review. *Buildings*, no. 12: 163.
- Yousef, Heba Abd Elslam, Tarek Saad El-Hinnawy, and Mahmoud Fathy Ahmed. 2022. The role of responsive facades as a high-tech in zero carbon buildings. *Journal of Al-Azhar University Engineering*

Sector, no. 17: 765-774.

- Zhang, Lianying., Qing Li, and Jinli Zhou. 2017. Critical factors of low-carbon building development in China's urban area. *Journal of Cleaner Production*, no. 142: 3075-3082.
- Zhou, Jianyu, and Tingju Zhu, T. 2024. Optimization of the Water-Energy-Carbon Nexus in the Residential Water Uses of Shanghai, China. *Sustainability* 16(9): 3529.
- Zhou, Tiegang, and Bo Liu. 2019. Experimental study on the shaking table tests of a modern inner-reinforced rammed earth structure. *Construction and Building Materials*, no. 203: 567-578.
- Zhu, Hui, Shuenn-Ren Liou, Pi-Cheng Chen, Xia-Yun He, and Meng-Lin Sui. 2024. Carbon emissions reduction of a circular architectural practice: A study on a reversible design pavilion using recycled materials. *Sustainability* 16(5): 1729.



■ Examining the Technical Challenges of Low-Carbon Buildings in Iran

Babak Alemi

Associate Professor, Faculty of Architecture and Art, University of Kashan

Akram Baqaei

M.Sc. Student, Faculty of Architecture and Art, University of Kashan

Faezeh Tafreshi

PhD Candidate, Faculty of Architecture and Urban Planning, Iran University of Art

Environmental crises have driven societies and governments towards finding solutions and strategies to reduce carbon emissions. One fundamental approach to addressing this issue is to reduce the share of pollutant production in the building sector. Despite efforts by some countries, Iran appears to have a long and challenging path ahead to institutionalize low-carbon mechanisms across sectors, including the construction industry. This article aims to explore these challenges. The method employed in this research is a citation-based approach that draws on findings from multiple sources to address the technical challenges of low-carbon buildings in Iran. Previous research has shown that the main barriers to constructing low-carbon buildings in countries are technical, economic, informational, political, and socio-cultural barriers. Given greater connections with building industry stakeholders, this research focuses on technical barriers, with related obstacles noted for each. Based on the research findings, the technical barriers to constructing low-carbon buildings in Iran include the lack of regulations, challenges related to materials, material labeling, renewable energy, energy efficiency, and indoor environmental quality. Among these, the factor of renewable energy poses the most significant technical challenge, while policy-related and informational limitations are among the contributing factors to the present technical challenges in Iran.

Keywords: Low-carbon Buildings, Greenhouse Gases, Construction Challenges, Environment.