Urban Development Policy Making

Home Page: https://judpm.ir

Online ISSN: 3092-6564

Nanomaterials in Zero Energy Buildings: A Comprehensive Review of Achievements, Policy Making, and Urban Perspectives

Ali Yousefi Roshan[1] | Mahdi Gandomzadeh[2] | Yazdan Alvari[3] | Aslan Gholami[4] | Majid Zandi[5*]

1. PhD Student, Department of Renewable Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. Email: a_yousefiroshan@sbu.ac.ir
2. PhD Student, Department of Renewable Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. Email: m_gandomzadeh@sbu.ac.ir
3. PhD Student, Department of Mechanical Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. Email: a_alvari@sbu.ac.ir
4. Assistant Professor, Department of Renewable Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. Email: a_gholami@sbu.ac.ir
5. Corresponding Author, Associate Professor, Department of Renewable Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. Email: m_zandi@sbu.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article History:
Received 01 April 2025
Revised 01 May 2025
Accepted 01 June 2025
Published Online 11 September 2025

Keywords:
Energy,
Smart glass,
Zero energy building,
Phase change materials,
Nanomaterials.

ABSTRACT

Buildings contribute to 40% of the world's energy consumption and 30% of greenhouse gas emissions. Zero-energy buildings are used to reduce energy consumption, fossil fuel consumption and environmental impacts. In this analytical study, data was extracted from reliable databases and sources. 28,090 patents were filed between 1995 and 2024 in the field of nanotechnology applications in zero-energy buildings, with the United States, Europe, China and India leading the way in this field. The study aims to determine the effectiveness of nanotechnology in zero-energy buildings and environmental impacts. Nanomaterials in smart windows are used to regulate light levels, self-cleaning, hydrophobicity and energy consumption. Smart windows reduce cooling energy consumption by 36.9% and lighting energy consumption by 54.5%. Nanomaterials and phase-change materials contribute to thermal comfort by storing and releasing heat in building components during the day. Nanomaterials in building materials lead to a 40% increase in strength, a 35% increase in useful life, and a 20% decrease in energy consumption in the construction process, and these materials harm human health by entering the food chain and becoming toxic. Green synthesis, environmentally friendly nanoparticles, and recycling of nanomaterials play a role in reducing environmental impacts. Green nanoparticle synthesis effectively reduces energy consumption by 30%, production costs by 40%, and production efficiency by 50%. Municipalities, the government, industry, and universities contribute to sustainable urban development and confronting the energy and climate crisis in Iran through financial incentives, the development of laws and standards, and the establishment of nanotechnology observatories in construction projects.

Cite this article: Yousefi Roshan, A.; Gandomzadeh, M.; Alvari, Y.; Gholami, A. & Zandi, M. (2026). Nanomaterials in Zero Energy Buildings: A Comprehensive Review of Achievements, Policy Making, and Urban Perspectives. *Urban Development Policy Making*, 2 (4), 423-444. DOI: http//doi.org/10.22034/judpm.2025.521744.1041

© Ali Yousefi Roshan, Mahdi Gandomzadeh, Yazdan Alvari, Aslan Gholami, Majid Zandi
DOI: http//doi.org/10.22034/judpm.2025.521744.1041

1. Introduction

Buildings account for forty percent of the world's energy consumption. International agreements, coronavirus, population growth, and increasing urbanization have increased the need for zero-energy buildings. In Iran, population growth and increasing electricity demand have increased the need for zero-energy buildings. Nanomaterials have an impact on increasing energy efficiency and reducing costs. In different decades, many advances have been made in the field of nanoscience in zero-energy buildings. Environmental challenges of nanomaterials, toxicity, and soil pollution require green synthesis methods and global monitoring. This article examines the application of nanomaterials in zero-energy buildings, technology trends, environmental impacts, and the importance of sustainable development.

2. Methodology

This study has examined the application of nano in zero-energy buildings using an analytical and review method from scientific databases such as Scopus and Google Scholar. Analysis of the patenting trends of leading countries in the field of nanomaterials and zero-energy buildings from 1995 to 2024 was reviewed by Lenz. Analysis of the trends of articles and leading countries in the field of nanomaterials and zero-energy buildings from 2013 to 2024 was reviewed by Scopus. In the study of nanomaterials in zero-energy buildings, the keywords "role", "nanomaterials", "zero-energy building", "smart window" and "energy optimization in buildings" were examined in databases such as Google Scholar and ScienceDirect. Scientific studies and environmental assessment models have been used to examine the effects of nanomaterials on the environment and human health. In this study, the environmental impacts of nanomaterials were extracted from the scientific databases Scopus, Google Scholar, and ScienceDirect using the keywords "nanomaterials", "nanoparticle toxicity", and "green synthesis".

3. Result and Discussion

Nanotechnology, using smart glass, phase change materials, and nanomaterials, plays a key role in optimizing the energy consumption of zero-energy buildings. Smart windows based on nanomaterials lead to improved thermal insulation, reduced energy consumption, and light regulation. Phase change materials reduce the need for heating and ventilation systems by integrating nanomaterials. Nanoparticles contribute to the sustainability of buildings with applications such as self-cleaning and increasing the durability of materials. Nanoparticles are also effective in absorbing CO2. Along with the benefits, nanomaterials have adverse effects on human health and the environment. Green synthesis, recycling of nanomaterials, and environmentally friendly nanomaterials are essential to address the environmental impacts of nanomaterials.

4. Conclusion

Population growth, energy crisis, and climate change have increased the need for zero-energy buildings. Nanomaterials in smart windows lead to light, heat control, UV protection, and self-cleaning. Nanomaterials in buildings have an impact on increasing durability, reducing repair and maintenance costs, and increasing lifespan and strength. Along with the benefits, there are environmental challenges of nanomaterials such as toxicity, entering the food chain, and negative effects on human health. Green synthesis, recycling of nanomaterials, and production of biodegradable nanoparticles are essential in addressing this challenge. Interdisciplinary research, the establishment of regulatory laws, and public and private investment are the keys to success in this field. The use of nanomaterials with a sustainable approach makes it possible to build low-energy buildings, maintain the health of society, and protect the environment at the same time.

پیشرفت شهری
سیاستگذاری
سایت نشریه: https://judpmi.ir
شاپا الکترونیکی: ۳۰۹۲-۶۵۶۴

نانومواد در ساختمان‌های انرژی‌صفر: مروری جامع بر دستاوردها، سیاست‌گذاری‌ها و آینده‌نگری‌های شهری

علی یوسفی روشن[۱] | مهدی گندم‌زاده[۲] | یزدان الواری[۳] | اصلان غلامی[۴] | مجید زندی[۵*]

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی انرژی‌های تجدیدپذیر، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: a_yousefiroshan@sbu.ac.ir
۲. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی انرژی‌های تجدیدپذیر، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: m_gandomzadeh@sbu.ac.ir
۳. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: y_alvari@sbu.ac.ir
۴. استادیار، گروه مهندسی انرژی‌های تجدیدپذیر، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: a_gholami@sbu.ac.ir
۵. نویسندهٔ مسئول، دانشیار، گروه مهندسی انرژی‌های تجدیدپذیر، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: m_zandi@sbu.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۱۲
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۱۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۱
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۶/۲۰

کلیدواژه:
انرژی،
شیشهٔ هوشمند،
ساختمان انرژی‌صفر،
مواد تغییرفازدهنده،
نانومواد.

چکیده

ساختمان‌ها در ۴۰ درصد مصرف انرژی جهان و ۳۰ درصد انتشار گازهای گلخانه‌ای نقش دارند. ساختمان‌های انرژی‌صفر در کاهش مصرف انرژی، مصرف سوخت‌های فسیلی و اثرهای زیست‌محیطی کاربرد دارند. در این پژوهش تحلیلی، داده‌ها از پایگاه‌ها و منابع معتبر استخراج شده است. ۲۸۰۹۰ ثبت اختراع طی سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۴ میلادی در حوزهٔ کاربرد نانو در ساختمان‌های انرژی‌صفر انجام شده و آمریکا، اروپا، چین و هند در این حوزه پیشتاز هستند. هدف پژوهش پیش رو، کارایی فناوری نانو بر ساختمان‌های انرژی‌صفر و اثرهای زیست‌محیطی است. نانومواد در پنجره‌های هوشمند در تنظیم میزان نور، خودتمیزشوندگی، آب‌گریزی و مصرف انرژی کاربرد دارند. پنجره‌های هوشمند به کاهش ۳۶/۹ درصدی مصرف انرژی خنک‌کننده و ۵۴/۵ درصدی مصرف انرژی روشنایی ساختمان‌ها منجر می‌شوند. نانومواد و مواد تغییرفازدهنده طی روز در اجزای ساختمان با ذخیره‌سازی و آزادسازی حرارت به آسایش حرارتی کمک می‌کنند. نانومواد در مصالح ساختمانی به افزایش ۴۰ درصدی استحکام، ۳۵ درصدی عمر مفید و کاهش ۲۰ درصدی مصرف انرژی در فرایند ساخت منجر می‌شود و این مواد با ورود به زنجیرهٔ غذایی و سمیت به سلامتی انسان آسیب می‌زنند. سنتز سبز، نانوذرات سازگار با محیط زیست و بازیافت نانومواد در کاهش اثرهای محیط زیست نقش ایفا می‌کند. سنتز سبز نانوذرات در کاهش ۳۰ درصد مصرف انرژی، ۴۰ درصد هزینهٔ تولیدی و افزایش ۵۰ درصدی بازده تولید تأثیرگذار است. شهرداری‌ها، دولت، صنعت و دانشگاه با مشوق‌های مالی، تدوین قوانین و استانداردها و ایجاد رصدخانه‌های فناوری نانو در پروژه‌های ساختمانی به توسعهٔ پایدار شهری و مقابله با بحران انرژی و اقلیم در ایران منجر می‌شوند.

استناد: یوسفی روشن، علی؛ گندم‌زاده، مهدی؛ الواری، یزدان؛ غلامی، اصلان و زندی، مجید (۱۴۰۴). نانومواد در ساختمان‌های انرژی‌صفر: مروری جامع بر دستاوردها، سیاست‌گذاری‌ها و آینده‌نگری‌های شهری. *سیاستگذاری پیشرفت شهری*، ۲ (۴) ۴۲۳-۴۴۴.
DOI: http//doi.org/10.22034/judpm.2025.521744.1041

© علی یوسفی روشن، مهدی گندم‌زاده، یزدان الواری، اصلان غلامی، مجید زندی
DOI: http//doi.org/10.22034/judpm.2025.521744.1041

۱. مقدمه

انرژی موتور محرک زندگی مدرن است و نقش اساسی در توسعهٔ اقتصادی و رفاه اجتماعی دارد. با افزایش تقاضا و نگرانی‌های زیست‌محیطی، بهره‌وری انرژی و استفاده از منابع تجدیدپذیر اهمیت بیشتری یافته‌اند [۱ و ۲]. در این راستا، ساختمان‌های انرژی‌صفر به عنوان راهکاری پایدار مطرح شده‌اند که با تولید انرژی مورد نیاز خود از منابع تجدیدپذیر، وابستگی به شبکهٔ برق را کاهش می‌دهند [۳]. مصرف انرژی در ساختمان‌ها حدود ۴۰ درصد از مصرف کل انرژی جهان را تشکیل می‌دهد و ساختمان عامل ۳۰ درصد از انتشار گازهای گلخانه‌ای در سطح جهان است [۴]. ۳۳/۸ درصد از مصرف انرژی کشور ایران در حوزهٔ ساختمان است. ساختمان‌های آموزشی در ایران ۲/۵ برابر بیشتر از ساختمان‌های کشورهای توسعه‌یافته انرژی مصرف می‌کنند [۵]. سهام جهانی ساختمان‌ها تا سال ۲۰۷۰ میلادی ۲/۲ برابر اقتصادهای درحال‌توسعه رشد می‌کند و ساختمان‌های انرژی‌صفر یک استراتژی کلیدی در حوزهٔ ساختمان‌ها است [۶]. توافق‌های جهانی محرکی برای حرکت جامعهٔ جهانی به سمت انرژی‌های تجدیدپذیر و ساختمان‌های انرژی‌صفر است [۷ و ۸]. پروتکل کیوتو در ۱۹۹۷ میلادی و توافق‌نامهٔ پاریس در ۲۰۱۵ میلادی تمرکز بر کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای را افزایش دادند. همه‌گیری کرونا نیز در دههٔ ۲۰۲۰ میلادی با افزایش مصرف برق خانگی توجه به ساختمان‌های انرژی صفر را افزایش داد [۹ - ۱۱]. بر اساس پیش‌بینی‌های سازمان‌های معتبر بین‌المللی، جمعیت ایران تا سال ۲۰۳۰ میلادی به حدود ۹۰ میلیون نفر خواهد رسید و این روند افزایشی تا سال ۲۰۵۰ میلادی به حدود ۱۰۰ میلیون نفر ادامه خواهد یافت [۱۲]. مصرف برق ایران از سال ۲۰۱۰ میلادی سالانه ۴ درصد رشد کرده و در سال ۲۰۲۳ میلادی به ۳۰۲ تراوات ساعت رسیده است. ۹۹/۵ درصد جمعیت کشور ایران به برق دسترسی دارند [۱۳]. بخش صنعتی با ۳۴ درصد، بخش مسکونی با ۳۲ درصد، بخش کشاورزی با ۱۴ درصد، بخش عمومی ۹ درصد، بخش‌های دیگر ۷ درصد و روشنایی جاده ۲ درصد بیشترین سهم مصرف برق را به خود اختصاص داده‌اند [۱۴ - ۱۶]. رشد جمعیت و توسعهٔ شهری، مصرف انرژی در روشنایی، گرمایش، سرمایش و تجهیزات الکترونیکی را افزایش می‌دهد. با افزایش تقاضای انرژی، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر [۱۷ و ۱۸] و ساختمان‌های انرژی‌صفر اهمیت پیدا می‌کند. در ساختمان‌های انرژی‌صفر، نانومواد به عنوان راه‌حلی نوآورانه مطرح می‌شود که به کاهش مصرف انرژی، هزینه‌های انرژی و اثرهای زیست‌محیطی می‌انجامد [۱۹]. همچنین، این مواد با افزایش دوام و کاهش نیاز به تعمیر و نگهداری، نقش کلیدی در توسعهٔ پایدار شهری و امنیت انرژی ایفا می‌کند [۲۰].

نانوتکنولوژی و مواد تغییرفازدهنده با استفاده از عایق‌های پیشرفته و پوشش‌های خاص، در ساختمان‌های انرژی‌صفر باعث بهبود کارایی و کاهش مصرف انرژی می‌شود و می‌تواند به توسعهٔ شهرهای آینده و بهبود زندگی نسل‌های بعدی کمک کند. استفاده از نانومواد در بتن، دیوار و سرامیک به بهینه‌سازی مصرف انرژی، ارتقای ویژگی‌های مصالح، افزایش مقاومت مصالح و دوام سازه‌ها منجر می‌شود. ترکیب نانوذرات و مواد تغییرفازدهنده به ذخیره‌سازی حرارت و آزادسازی حرارت در پیک گرما و سرما منجر می‌شود [۲۱ و ۲۲]. استفاده از نانومواد در مدرسه موجب کاهش چشمگیر مصرف انرژی در دیوارهای خارجی با ۹/۳۹ درصد، پنجره‌ها با ۱۲/۱۵ درصد، سقف با۴/۴۰ درصد و کف با ۱/۶۴ درصد می‌شود. این بهبود نه‌تنها به حفظ منابع انرژی کمک می‌کند، بلکه آسایش حرارتی ساکنان را نیز به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد [۲۳]. همچنین، شیشه‌های اصلاح‌شده با فناوری نانو، با کاهش قابل توجه انتقال حرارت ناشی از تابش خورشید، بازده انرژی را تا ۷۵ درصد بهبود می‌بخشند و بار سیستم‌های گرمایش، تهویه و تهویهٔ مطبوع را بیش از ۲۰ درصد کاهش می‌دهند. استفاده از شیشهٔ هوشمند آغشته به نانومواد نقش کلیدی در کاهش مصرف انرژی دارد [۲۴]. پنجره‌های هوشمند آغشته به نانومواد در کاهش مصرف انرژی و افزایش آسایش انسان نقش مهمی دارند. این پنجره‌ها شامل انواع الکتروکرومیک، ترموکرومیک، فوتوکرومیک، کریستال مایع و ذرات معلق هستند [۲۵]. نانومواد مختلف اثرهای زیست‌محیطی مختلفی مانند آلودگی خاک، زنجیرهٔ غذایی، مشکل‌های تنفسی و سمی دارند [۲۶]. روش‌های سنتز سبز، افزایش اندازهٔ نانوذرات و جایگزینی با نانومواد سازگار با محیط زیست اثرهای منفی را کاهش می‌دهند [۲۷].

بررسی روند ثبت اختراع‌ها و مقاله‌های بین‌المللی در حوزهٔ کاربرد نانومواد در ساختمان‌های انرژی‌صفر نشان می‌دهد این فناوری سطح جهانی در حال توسعه است. داده‌های موجود از پایگاه‌های معتبر علمی تعداد کل ثبت اختراع در این حوزه از سال ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۴ معادل ۲۸۰۹۰ مورد بوده که ۲۱۰۴۸ مورد آن به کشورهای پیشرو مانند آمریکا مربوط است. همچنین، تعداد

مقالات علمی سال ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۴ نیز روند رو به رشد این حوزه را به‌خوبی آشکار می‌کند؛ به طوری که چین با ۲۲ مقاله در صدر لیست قرار دارد. این روند نشان‌دهندهٔ اهمیت فزایندهٔ نانومواد در توسعهٔ پایدار شهری و ضرورت تدوین سیاست‌های مناسب برای گسترش عادلانه و پایدار این فناوری در کشورهای درحال‌توسعه است [۲۸ و ۲۹]. در دههٔ ۱۹۹۰ میلادی پژوهش‌هایی در مورد بهبود اثر نانولوله‌های کربنی و نانومواد دیگر بر خواص مکانیکی و حرارتی مصالح ساختمانی انجام شد [۳۰]. در دههٔ ۲۰۰۰ میلادی تحقیق‌هایی بر پنجره‌های هوشمند با فناوری‌های مختلف برای کاهش مصرف انرژی در ساختمان انجام شد [۳۱]. در دههٔ ۲۰۱۰ میلادی کاوش‌هایی بر ادغام نانومواد با مواد تغییرفازدهنده صورت گرفت. همچنین، ادغام این مواد سبب ذخیره‌سازی بیشتر و آزادسازی انرژی حرارتی بیشتر در ساختمان‌ها شد [۳۲]. در دههٔ ۲۰۲۰ میلادی مطالعه‌هایی بر کاهش اثرهای زیست‌محیطی، سمیت و افزایش پایداری نانومواد در ساختمان‌های انرژی‌صفر صورت گرفت [۳۳]. در مرور تحقیق‌های گذشته، استفاده از نانومواد در بخش‌های مختلف ساختمان و پنجره‌های هوشمند مورد بررسی قرار گرفته است. با این‌حال، تأثیر نانومواد در کاهش هزینهٔ انرژی و مصرف انرژی، اثرهای زیست‌محیطی و نقش نانوترکیب‌های خاص بر زنجیرهٔ غذایی و سلامت انسان به طور دقیق تحلیل نشده است. بنابراین، بررسی این عوامل به توسعه و کاربرد فناوری نانومواد در حوزهٔ ساختمان‌های انرژی‌صفر موجب بهبود عملکرد انرژی ساختمان‌ها و کاهش اثرهای زیست‌محیطی ناشی از مصالح مصرفی می‌شود.

این پژوهش به دلیل پیشرفت توسعهٔ پایدار شهری و کاهش مصرف انرژی اهمیت دارد و شکاف موجود در حوزهٔ کاربرد نانومواد در ساختمان‌های انرژی‌صفر و اثرهای زیست‌محیطی را پر کرده است. این مقاله به ارزیابی کاربرد نانومواد در ساختمان‌های انرژی‌صفر در شیشه‌های هوشمند و بخش‌های مختلف ساختمان می‌پردازد. همچنین، در پژوهش پیش رو چالش‌های زیست‌محیطی مانند اثرهای سمی، سلامتی انسان و ورود به زنجیرهٔ غذایی تحلیل می‌شود. راه‌حل‌هایی مانند سنتز سبز، بازیافت نانومواد و تولید نانومواد سازگار با محیط زیست پیشنهاد می‌شود. این پژوهش در نهایت به بررسی روند ثبت اختراع‌ها و مقاله‌های بین‌المللی در این حوزه می‌پردازد و این اطلاعات مبنایی برای گسترش بیشتر پژوهش‌ها و کاربردهای نانومواد در ساخت ساختمان‌های انرژی‌صفر است.

۲. مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر یک مطالعهٔ تحلیلی ـ مروری است که با روش‌های ترکیبی کیفی و کمی انجام شده است. داده‌ها از طریق جست‌وجو در پایگاه‌های علمی معتبر و با استفاده از کلیدواژه‌های مرتبط با نانومواد و ساختمان‌های انرژی‌صفر گردآوری شدند. معیارهایی مانند دسترسی به متن کامل، داوری شدن مقاله‌ها و جدید بودن منابع برای انتخاب آن‌ها به کار رفت. داده‌ها به صورت کیفی تحلیل محتوا و به صورت کمی با استفاده از آمار ثبت اختراع‌ها و مقالات مورد تحلیل قرار گرفتند. این رویکرد سیستماتیک از الگوی PRISMA الهام گرفته شده است.

۲-۱. جمع‌آوری داده‌ها

داده‌های مرتبط با کاربرد نانو در ساختمان‌های انرژی‌صفر از پایگاه‌های علمی معتبر شامل Scopus، Google Scholar و ScienceDirect استخراج شده‌اند. برای جست‌وجوی مقاله‌ها و ثبت اختراع‌ها، از کلیدواژه‌های مرتبط با نانومواد، ساختمان‌های انرژی‌صفر، پنجره‌های هوشمند و اثرهای زیست‌محیطی نانومواد استفاده شده است. نانومواد شامل کلیدواژه‌های تیتانیوم دی‌اکسید[۱]، وانادیوم دی‌اکسید[۲]، اکسید قلع ایندیوم[۳]، نانولوله‌های کربنی[۴]، نانوالیاف کربنی[۵]، نانوالیاف گرافیت[۶]، روی اکسید[۷]،

1. Titanium dioxide
2. Vanadium dioxide
3. Indium tin oxide
4. carbon nanotubes
5. Carbon nanofibers
6. Graphite nanofibers
7. Zinc oxide

سریم اکسید[۱]، سیلیکا[۲]، آهن‌اکسید[۳]، مس[۴]، قلع‌اکسید[۵]، آلومینیوم‌اکسید، نانو ذرات خاک رس[۶] و زایکوسیل[۷] است. ساختمان‌های انرژی‌صفر شامل کلیدواژه‌های پنجره‌های هوشمند[۸]، پوشش‌های نانویی[۹]، مواد تغییرفازدهنده[۱۰]، بهینه‌سازی انرژی[۱۱]، پنجرهٔ فتوکرومیک[۱۲]، پنجرهٔ ترموکرومیک[۱۳]، پنجرهٔ الکتروکرومیک[۱۴]، پنجرهٔ گازوکرومیک[۱۵]، پنجرهٔ انتشار پایین[۱۶]، پنجرهٔ کریستال مایع[۱۷]، پنجرهٔ ذرات معلق[۱۸]، فاز مونوکلینیک[۱۹] و فاز روتایل[۲۰] است. اثرهای زیست‌محیطی شامل کلیدواژه‌های سمیت نانوذرات[۲۱]، سنتز سبز[۲۲]، بازیافت نانوذرات[۲۳] و نانوذرات زیست‌سازگار[۲۴] است.

۲-۲. تحلیل داده‌ها

داده‌های جمع‌آوری‌شده به صورت کیفی و کمی تحلیل شدند. برای تحلیل روند ثبت اختراع‌ها و مقاله‌ها از پایگاه‌های تحلیلی داده استفاده شد. این تحلیل شامل بررسی تعداد اختراع‌ها در بازهٔ زمانی ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۴ میلادی و مقاله‌ها در بازهٔ زمانی ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۴ میلادی منتشر شده است. همچنین، کشورهای پیشرو در حوزهٔ کاربرد نانو در ساختمان‌های انرژی‌صفر تعیین شد. برای تحلیل کاربرد نانومواد در ساختمان‌های انرژی‌صفر، از روش تحلیل محتوای کیفی استفاده شد. این تحلیل شامل بررسی فناوری‌های نانویی در پنجره‌های هوشمند، دیوارها و سایر بخش‌های ساختمان بود. در بخش اثرهای زیست‌محیطی، از مدل‌های ارزیابی زیست‌محیطی و مطالعه‌های موردی برای تحلیل سمیت نانوذرات و روش‌های پایدار مانند سنتز سبز و بازیافت نانوذرات استفاده شد.

۳. نتایج و بحث

نانومواد در ساختار ساختمان‌های انرژی‌صفر و پنجره‌ها می‌تواند مصرف انرژی را در ساختمان‌ها به طور محسوسی کاهش دهد. نانومواد در پنجره‌های هوشمند امکان تنظیم میزان نور، تنظیم حرارت، جلوگیری از ورود اشعه‌های مضر، تیرگی یا شفافی و ذخیرهٔ انرژی را فراهم می‌کند. استفاده از پنجره‌های هوشمند، نقش مؤثری در کاهش مصرف انرژی و ایجاد نقطهٔ آسایش حرارتی برای ساکنان در ساختمان ایفا می‌کند. این پنجره‌ها با افزایش نور عبوری خورشید زمستان و در تابستان با کاهش آن، به کاهش هزینه‌های انرژی کمک می‌کنند. همچنین، استفاده از مواد نانو و مواد تغییرفازدهنده در ساختمان‌ها به امکان ذخیره‌سازی حرارتی و آزادسازی انرژی گرمایی در پیک گرمایی و سرمایی کمک می‌کند. فناوری نانو ضمن بهبود بهره‌وری و کاهش انتشار کربن، با انتشار نانوذرات به محیط کوجب بروز آثار سمی روی زنجیرهٔ غذایی و اکوسیستم و همچنین، آثار تنفسی روی محیط

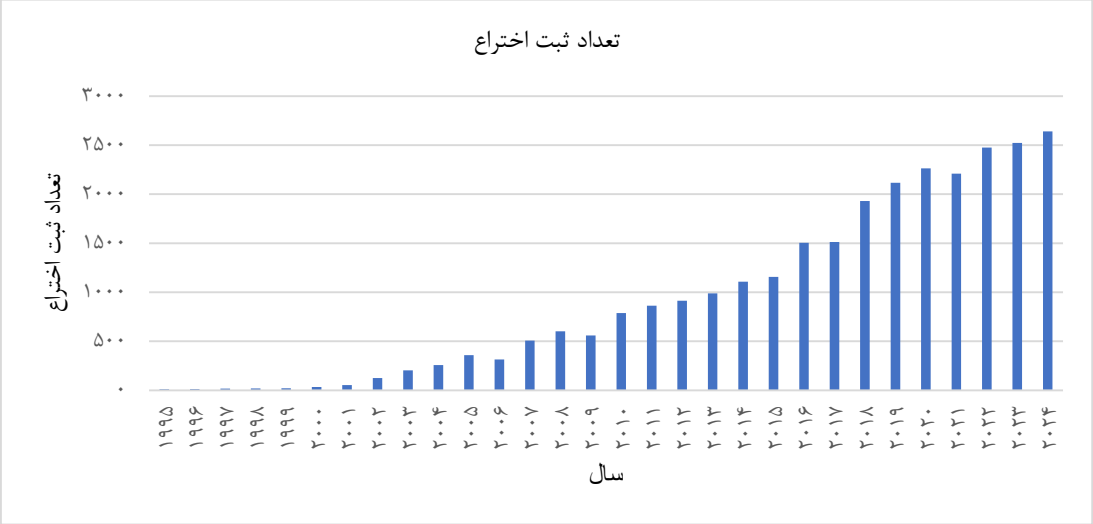
1. Cerium oxide
2. Silica
3. Iron oxide
4. Copper
5. Iron oxide
6. Clay nanoparticles
7. Zycosil
8. Smart window
9. Nano coatings
10. Phase change materials
11. Energy optimization
12. Photochromic window
13. Thermochromic window
14. Electrochromic window
15. Gasochromic window
16. Low-Emissivity Window
17. Liquid Crystal window
18. Suspended Particles window
19. Monoclinic phase
20. Rutile phase
21. Toxicity of nanoparticles
22. Green synthesis
23. Nanoparticle recycling
24. Biocompatible nanoparticles

زیست می‌شود. در این بخش روند مقاله‌ها و ثبت اختراع در حوزهٔ نقش نانو و عوامل تأثیرگذار بر آن بررسی می‌شود. همچنین، کارایی نانو در پنجره‌های هوشمند، انواع پنجرهٔ هوشمند و کاربرد نانومواد در ساختمان‌های انرژی‌صفر مورد مطالعه قرار گرفت. در کنار مزایای نانومواد در ساختمان، آثار زیست‌محیطی نانومواد در ساختمان‌ها و راه‌های رفع چالش مورد تحلیل قرار گرفت.

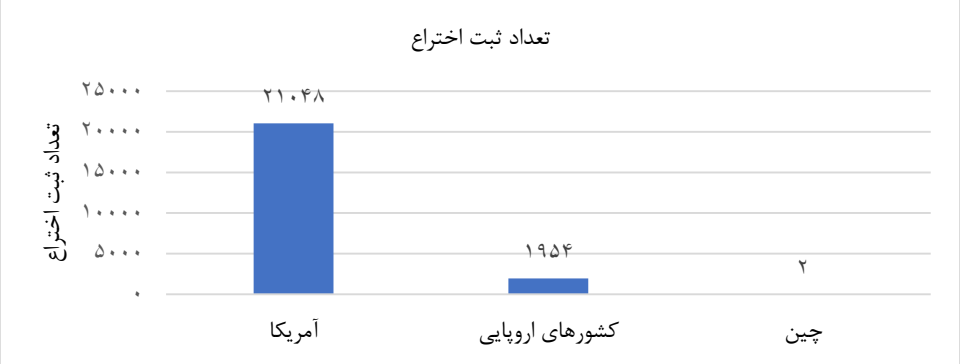
۳–۱. روند کاربرد نانو در ساختمان‌های انرژی‌صفر

نمودار ثبت اختراع در این زمینه با وارد کردن کلیدواژه‌های مشخص در مرکز داده لنز، در شکل ۱ ترسیم شده است [۲۸].

کشورهای برتری که ثبت اختراع کاربرد نانو در ساختمان‌های انرژی‌صفر در آن‌ها به ثبت رسیده، در شکل ۲ نشان داده شده است [۲۸].



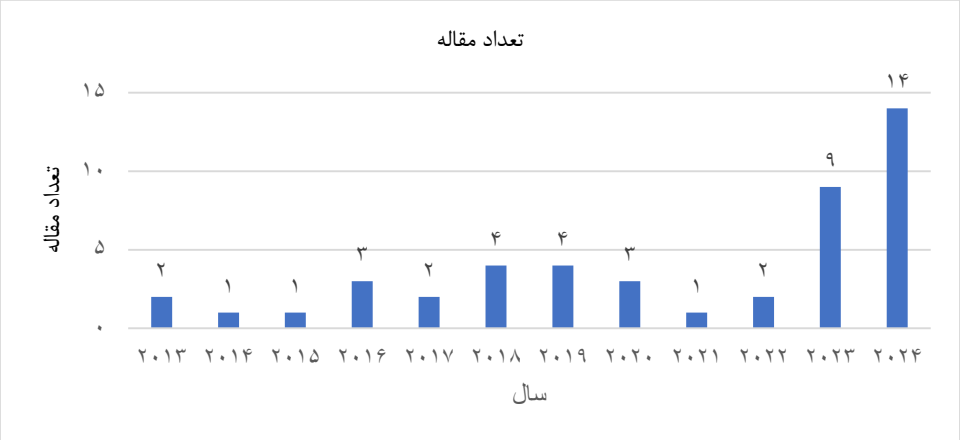
شکل ۱. نمودار ثبت اختراع کاربرد نانو در ساختمان‌های انرژی‌صفر [۲۸]



شکل ۲. تعداد ثبت اختراع کشورهای مختلف در حوزهٔ کاربرد نانو در ساختمان‌های انرژی‌صفر [۲۸]

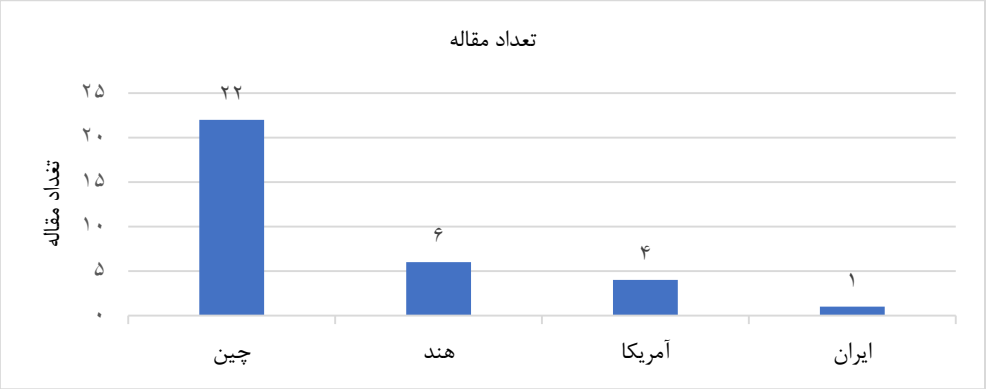
همچنین، ۲۸۰۹۰ ثبت اختراع طی سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۴ میلادی ثبت شده است [۲۸]. گرمایش جهانی در سال ۱۸۵۰ با استفاده از زغال‌سنگ شروع شد [۳۴]. میزان کربن دی‌اکسید تا سال ۲۱۰۰ میلادی به محدودهٔ ۵۴۱ تا ۹۷۰ PPM می‌رسد [۳۵]. افزایش دما تا چندین سال آینده از ۲ تا ۵ درجهٔ سانتی‌گراد متغیر است و ساختمان‌های انرژی‌صفر در کاهش این اثرها نقش ایفا می‌کنند [۳۶]. توافق پاریس در ۲۰۱۵ میلادی توافقی به منظور کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و محدود کردن افزایش دمای جهانی بود و در حرکت جامعهٔ جهانی به سوی ساختمان‌های انرژی‌صفر نقش داشت [۳۷]. ساختمان انرژی‌صفر در بهره‌وری انرژی، صرفه‌جویی انرژی و ادغام با سیستم انرژی‌های تجدیدپذیر نقش دارد [۳۸]. جنگ اوکراین و روسیه در سال ۲۰۲۲ میلادی برای محافظت از مصرف‌کنندگان در برابر افزایش قیمت انرژی به پیشرفت و سرمایه‌گذاری قابل توجهی در حوزهٔ

انرژی تجدیدپذیر منجر شده است [۳۹]. جمعیت جهان تا سال ۲۰۵۰ میلادی به ۹/۷ میلیارد نفر می‌رسد [۴۰]. تقاضای انرژی تا سال ۲۰۵۰ میلادی نسبت به سال ۲۰۲۰ میلادی، ۲۵ درصد رشد پیدا خواهد کرد [۳۴]. تقاضای انرژی به دلیل رشد جمعیت و توسعهٔ شهرنشینی در حال افزایش است. ساختمان انرژی‌صفر راه‌حلی برای کاهش مصرف انرژی برای کشورهای مطرح است [۴۱]. تغییرات اقلیمی به افزایش مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای منجر می‌شود. سرمایه‌گذاری در حوزهٔ ساختمان‌های انرژی‌صفر به عنوان اقدامی برای کاهش مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای توسط کشورهای توسعه‌یافته در نظر گرفته می‌شود [۵]. تقاضای انرژی ناشی از تغییرهای اقلیمی تا سال ۲۰۵۰ میلادی به میزان ۲۵ تا ۵۸ درصد رشد خواهد کرد [۴۲]. همچنین، کشورهای توسعه‌یافته و درحال‌توسعه به دنبال جایگزینی انرژی‌های تجدیدپذیر با سوخت‌های فسیلی هستند. این مسیر توسعه شامل توسعهٔ انرژی‌های تجدیدپذیر، بهبود بهره‌وری انرژی، افزایش صرفه‌جویی در انرژی، مالیات کربن، تعادل عادلانه‌تر رفاه انسان و مصرف سرانهٔ انرژی است. ساختمان‌های انرژی‌صفر یکی از راه‌هایی است که می‌تواند به جایگزینی و توسعهٔ این مسیر کمک شایانی بکند [۳۴]. افزایش ۱۰ دلاری مالیات کربن به ازای هر تن دی‌اکسید کربن در آمریکا به سودآوری ۲، ۷ و ۵ درصدی در مناطق سرد، معتدل و نیمه‌خشک منجر می‌شود. مالیات کربن یک مشوق قوی برای مالکان ساختمان به منظور افزایش استفاده از نانومواد در ساختمان‌های انرژی‌صفر می‌شود [۴۳]. آمریکا به عنوان پیشتاز در توسعهٔ نانوتکنولوژی در ساختمان‌های انرژی‌صفر است. کشورهای اروپایی در حال پیشرفت هستند، اگرچه فاصلهٔ قابل توجهی با آمریکا دارند. از طرفی، کشور چین به طور جدی وارد این حوزه نشده، که احتمالاً به دلیل اولویت‌های اقتصادی و محدودیت‌های تحقیق‌ها است [۲۸]. کمیسیون اقتصاد سازمان ملل متحد ۱۲ اصل را برای بازارهای پایدار املاک ارائه کرده است. اصل چهارم سبزسازی بخش املاک و مستغلات برای حمایت از کیفیت زندگی مردم و محیط زیست سالم و اصل هشتم تضمین دسترسی به منابع مالی پایدار برای قوانین وام‌دهی و سرمایه‌گذاری است. این دو اصل به پژوهش و سرمایه‌گذاری در حوزهٔ نانومواد و ساختمان‌های انرژی‌صفر در کشور آمریکا شده منجر است [۴۴]. اتحادیهٔ اروپا به دنبال تولید انرژی از طریق منابع انرژی تجدیدپذیر و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای تا سال ۲۰۵۰ میلادی است. هدف اتحادیهٔ اروپا تا سال ۲۰۳۰ میلادی، کاهش ۴۰ درصدی انتشار گازهای گلخانه‌ای و اطمینان از تولید ۳۲ درصدی انرژی از منابع تجدیدپذیر است. ساختمان‌های انرژی‌صفر پتانسیل خوبی برای کاهش اثرهای محیط زیستی و نقش اساسی در تحقق اهداف دارند [۴۵]. از ابتدای توسعهٔ ساختمان‌های انرژی‌صفر در چین پروژه‌هایی به مساحت ۲۳/۸۹ میلیون متر مربع در این حوزه انجام شده است. بیش از ۶۰ میلیارد متر مربع ساختمان موجود و ۳۵۰ میلیون متر مربع مقاوم‌سازی ساختمان‌ها در کشور چین، پتانسیل خوبی برای رشد نانومواد در ساختمان‌های انرژی‌صفر در این کشور فراهم می‌کند [۴۶]. تمام عوامل یادشده به توسعه و سرمایه‌گذاری در حوزهٔ ساختمان‌های انرژی‌صفر منجر شده است. تعداد روند مقاله‌های ثبت‌شده در این حوزه با وارد کردن کلیدواژه‌های مشخص در مرکز دادهٔ اسکوپوس از سال ۲۰۱۳ میلادی تا ۲۰۲۴ میلادی در شکل ۳ آورده شده است [۲۹].



شکل ۳. تعداد روند مقاله‌ها در حوزهٔ کاربرد نانو در ساختمان‌های انرژی‌صفر [۲۹]

کشورهای برتری که مقاله‌های کاربرد نانو در ساختمان‌های انرژی‌صفر در آن‌ها به ثبت رسیده، در شکل ۴ نشان داده شده‌اند [۲۹].



شکل ۴. تعداد مقالهٔ کشورها در حوزهٔ کاربرد نانو در ساختمان‌های انرژی‌صفر [۲۹]

رشد جمعیت ارتباط زیادی با مصرف سرانهٔ انرژی دارد. ساختمان‌های انرژی‌صفر راهی برای کاهش اثرهای رشد جمعیت انسان هستند و بهره‌وری انرژی را در بخش‌های مسکونی و تجاری ارتقا می‌دهند [۴۷]. رشد جمعیت، افزایش شهرنشینی، آلودگی‌های محیط زیستی و تقاضای انرژی سبب سرمایه‌گذاری کشورهای چین، هند و آمریکا در ساختمان‌های انرژی‌صفر شده، اما رویکرد هریک در حوزهٔ ساختمان انرژی صفر متفاوت است. فناوری‌های به‌کاررفته در ساختمان‌های کربن‌صفر در ایالات متحده در مقایسه با چین و هند پیشرفته‌تر هستند [۴۸]. در دههٔ گذشته آمریکا، چین و کشورهای اروپایی جزء سه اقتصاد برتر در جهان در حوزهٔ انتشار کربن بودند. این کشورها با توسعهٔ ساختمان‌های انرژی‌صفر در راستای کاهش انتشار کربن و گازهای گلخانه‌ای برداشته‌اند [۴۶ و ۴۹]. مالیات کربن و مالیات بر سوخت‌های فسیلی یکی از راه‌ها و قوانینی است که برای کاهش کربن در نظر گرفته می‌شود. این مالیات می‌تواند مشوقی برای سرمایه‌گذاری کشورها در حوزهٔ ساختمان انرژی‌صفر باشد. در ۳۰ سال آینده بهبود بهره‌وری انرژی، مصرف سرانهٔ برق را در کشورهای توسعه‌یافته ۵۰ درصد کاهش می‌دهد. کاهش اتلاف انرژی در روشنایی، گرمایش و سرمایش ساختمان نه‌تنها به بهبود بازده انرژی منجر می‌شود، بلکه می‌تواند تأثیر مثبتی بر تولید ناخالص داخلی داشته باشد، که از سال ۲۰۰۰ میلادی به طور میانگین ۱/۵ درصد کاهش یافته است. ابزار اولیه بر جلوگیری از مصرف انرژی مالیات است، اما برای جلوگیری از افزایش مالیات، این مالیات بر مصرف می‌تواند با کاهش مالیات بر درآمد جبران شود [۳۴]. بعد از توافق پاریس در سال ۲۰۱۵ میلادی کشورها سرمایه‌گذاری بیشتری بعد از توافق در حوزهٔ نانو و ساختمان‌های انرژی‌صفر برای کاهش گازهای گلخانه‌ای انجام دادند [۵۰]. در سال ۲۰۱۵ میلادی توافق پاریس به یک مشارکت جهانی برای کاهش ۱/۵ درجهٔ سانتی‌گراد تا سال ۲۰۵۰ میلادی منجر شد [۳۴]. دورهٔ کرونا به کاهش سرمایه‌گذاری در حوزهٔ انرژی‌های تجدیدپذیر منجر شد [۵۱]. در سال ۲۰۲۱ میلادی قارهٔ اروپا یک بازنگری در عملکرد ساختمان‌های انرژی‌صفر انجام داد که هدف آن، قرار دادن اتحادیهٔ اروپا در مسیر صفر خالص انتشار گازهای گلخانه‌ای تا سال ۲۰۵۰ بود. کشورهای عضو باید اطمینان حاصل کنند که میانگین انرژی اولیه در ساختمان‌های مسکونی تا سال ۲۰۳۰ میلادی حداقل ۱۶ درصد و تا سال ۲۰۳۵ میلادی در محدوده‌ای بین ۲۰ تا ۲۲درصد کاهش یابد [۵۲]. بر اساس نمودار شکل ۴، چین با ۲۲ مقاله بیشترین سهم را دارد، در حالی که هند و آمریکا به‌ترتیب با ۶ و ۴ مقاله در رتبه‌های بعدی قرار دارند. این توزیع نشان‌دهندهٔ تمرکز قابل توجه چین بر پژوهش‌ها در این حوزه است [۲۹].

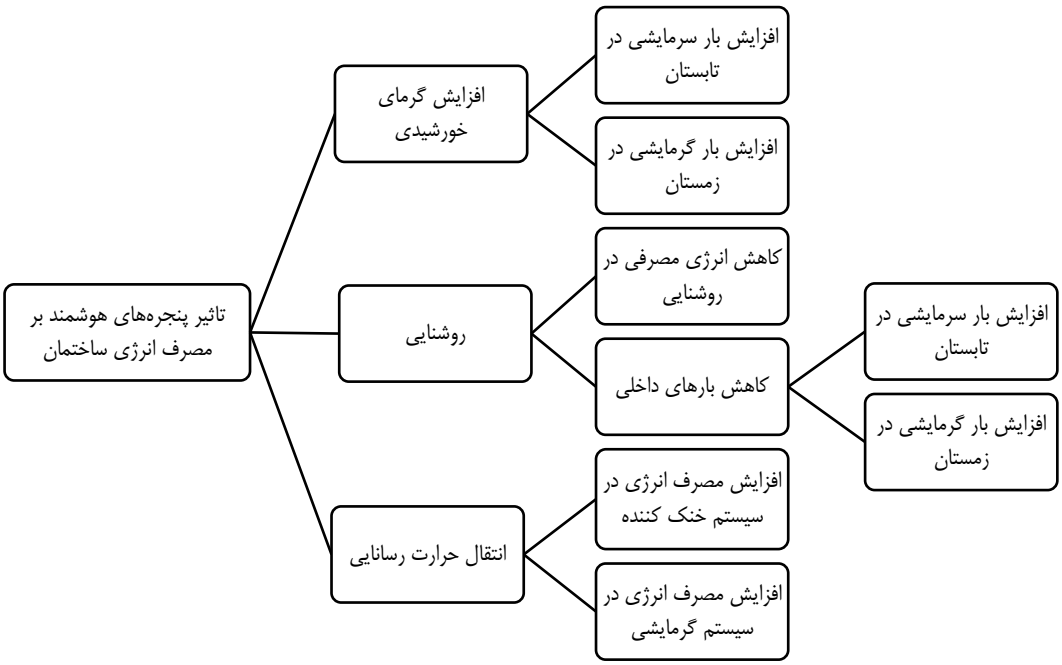
۳-۲. نقش نانوتکنولوژی در ساختمان‌های انرژی‌صفر

کاربردهای متعدد نانوتکنولوژی در ساختمان‌های انرژی‌صفر به پایداری و امنیت انرژی و آسایش حرارتی کمک می‌کنند. همچنین، حفظ دمای زیر ۲۹/۵ درجهٔ سانتی‌گراد و رطوبت زیر ۵۰ درصد برای آسایش ضروری است. راحتی بصری به کیفیت نورپردازی، استفاده از نور طبیعی و تمیزی دیوارها بستگی دارد. نور طبیعی علاوه بر کاهش مصرف انرژی، سلامت را بهبود

می‌بخشد [۵۳]. همچنین، در پژوهش حاضر استفاده از نانومواد در شیشه و پنجره‌های هوشمند و قسمت‌های مختلف ساختمان بررسی شد.

۳-۲-۱. شیشه و پنجرهٔ هوشمند در ساختمان انرژی‌صفر

پنجره‌های هوشمند نوعی از پنجره‌های نوین هستند که خواص نوری و حرارتی خود را دارند که با فناوری‌هایی مانند نانومواد یا مواد تغییرفازدهنده قادر به کنترل عبور نور، گرما و انرژی هستند. پنجرهٔ هوشمند با استفاده از فناوری‌های نوین مانند نانومواد یا مواد تغییرفازدهنده، قادر به تنظیم شفافیت، عبور نور و گرماست. این ویژگی‌ها به کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌ها، ایجاد راحتی بصری و آسایش داخلی کمک می‌کنند. تأثیر پنجره‌های هوشمند بر مصرف انرژی ساختمان در شکل ۵ آمده است [۵۴].



شکل ۵. تأثیر پنجره‌های هوشمند بر مصرف انرژی ساختمان [۵۴]

نانوشیشه‌ها با بهینه‌سازی عبور نور، امکان بهره‌برداری حداکثری از نور طبیعی را فراهم می‌کنند. پوشش نانوی خودتمیزشونده به کاهش نیاز به نگهداری و تمیزکاری کمک می‌کند. شیشهٔ تنظیم دما به پراکندگی ۸۰ درصد اشعهٔ خورشید و کاهش ۲۰ درجه‌ای دمای محیط داخلی منجر می‌شود. شیشهٔ محافظ خورشیدی هنگام تابش زیاد خورشید دچار تغییر رنگ از شفاف به مات می‌شود [۵۵]. نانوپوشش‌ها تیتانیوم دی‌اکسید و اکسید ایندیم قلع روی قسمت ساختاری ساختمان و شیشه‌های هوشمند به بهینه‌سازی مدیریت انرژی و کاهش توان اوج بار مورد نیاز منجر شده است [۵۶]. پنجره‌های شیشه‌ای کم‌مصرف با استفاده از تکنیک‌های شیشه‌کاری ترموکرومیک مبتنی بر اکسید وانادیوم توسعه یافته‌اند که ویژگی‌های صرفه‌جویی در انرژی دارند. پنجره‌های هوشمند با استفاده از تکنیک‌های مختلف ازجمله رسوب‌دهی بخار شیمیایی، رسوب لیزری پالسی، رسوب کندوپاش و فرایند سل ـ ژل تهیه می‌شوند. چنین پنجره‌هایی می‌توانند به سازگاری خودکار با شرایط محیطی و افزایش راحتی کاربران دست یابند. کریستال‌های مایع در پنجره‌های هوشمند به کنترل پویای نور و حرارت، کاهش مصرف انرژی، ایجاد حریم خصوصی بدون نیاز به پرده و بهبود کارایی ساختمان‌ها کمک می‌کنند. این فناوری قابل استفاده در ساختمان‌های مسکونی، تجاری و خودروها است [۵۷]. مقایسهٔ انواع پنجره‌های هوشمند از نظر نوع فعال‌سازی، رنگ، عملکرد نوری و حرارتی در جدول ۱ آمده است [۵۸].

جدول ۱. مقایسهٔ انواع پنجره‌های هوشمند از نظر نوع فعال‌سازی، رنگ، عملکرد نوری و حرارتی [۵۸]

پنجرهٔ هوشمند	فعال‌سازی	رنگ	عملکرد نوری	عملکرد حرارتی
فتوکرومیک	نور	سفیدکننده	محافظ اشعهٔ ماوراء بنفش، در نور خورشید و غروب تاریک و روشن می‌شود	_
ترموکرومیک	حرارت	رنگی	انعکاس نور مادون قرمز	بازتاب افزایش گرما
الکتروکرومیک	ولتاژ/جریان	رنگی	با تغییر رنگ برگشت‌پذیر هنگام اعمال یک بار شارژ، میزان نور را کنترل کنید	میزان گرما را کنترل کنید
کریستال مایع	ولتاژ	سفیدکننده	نور تابشی را انتقال دهد	افزایش حرارت زیاد
ذرات معلق	جریان	سفیدکننده	محافظ اشعهٔ فرابنفش، کاهش نور مادون قرمز	ذخیرهٔ انرژی

پنجره‌های الکتروکرومیک کنترل ولتاژ، بیشترین انعطاف را در تنظیم نور و حرارت دارند. پنجره‌های ترموکرومیک نیز به تغییر دمای محیطی واکنش نشان می‌دهند و با بازتاب حرارت خورشیدی در کاهش بار حرارتی مؤثر هستند. پنجره‌های فتوکرومیک و ذرات معلق برای محافظت در برابر اشعهٔ فرابنفش و بهبود آسایش بصری کاربرد دارند، اما کنترل دقیق حرارتی در آن‌ها محدودتر است. بسته به اقلیم و نوع کاربری ساختمان، انتخاب نوع پنجره نقش مهمی در بهینه‌سازی مصرف انرژی ایفا می‌کند. پنجرهٔ فتوکرومیک در واکنش به تغییر نور خورشید، شفافیت خود را تغییر می‌دهد و به بهبود بهره‌وری انرژی ساختمان کمک می‌کند [۵۹]. پنجرهٔ الکترومیک راهکاری مطمئن در ساختمان‌ها است که امکان بهینه‌سازی افزایش گرمای تابشی و آسایش حرارتی را فراهم می‌کند [۶۰]. پنجره‌های ترموکرومیک به طور غیرفعال انتقال نور را در پاسخ به دمای محیط تنظیم می‌کنند و مواد ترموکرومیک شامل اکسیدهای فلزی، هیدروژل‌ها، پروسکایت‌ها و مایع‌های یونی است [۶۱]. پنجره ذرات معلق هنگام اعمال سیگنال الکتریکی AC، از نظر نوری از ظاهر تیره به ظاهر شفاف تغییر کنند. این پنجره‌ها به مدیریت گرما، صرفه‌جویی در انرژی و ایجاد خصوصیت کمک می‌کنند [۶۲]. کریستال مایع در بهره‌وری انرژی و راحتی گزینهٔ مناسبی در پنجرهٔ هوشمند کنترل‌شدهٔ الکتریکی است [۶۳]. مقایسهٔ ویژگی‌های نوری و حرارتی انواع پنجره‌های هوشمند در جدول ۲ آمده است [۶۴].

جدول ۲. مقایسهٔ ویژگی‌های نوری و حرارتی انواع پنجره‌های هوشمند [۶۴]

نوع شیشه	ضریب انتقال حرارت[1] (وات بر مترمربع کلوین)	ضریب افزایش حرارت خورشیدی[2]	نسبت مقدار نور مرئی[3] (درصد)	ضریب سایه[4]	عبور نور مرئی[5] (درصد)	انتقال نور خورشیدی[6] (درصد)	انتقال نور بصری[7] (درصد)	بازتاب (درصد)
فتوکرومیک	۵/۹ –۵/۷	۰/۷۱ –۰/۲۶	۱/۷۹	۰/۸۱ –۰/۳۱	۰/۸۳ –۰/۴۸	۰/۸۳ –۰/۴۸	۰/۷۹	۰/۱۲
ترموکرومیک	۲/۷۶ –۱/۳۱	۰/۳۱ –۰/۱۲	_	۰/۵۴۲ –۰/۲۵۵	۰/۶ –۰/۴۳	۰/۴۹ –۰/۰۲	۰/۵۴۵ –۰/۰۲۳	۰/۷۸
الکتروکرومیک	۲/۲	۰/۶۴ –۰/۱۵	۱/۳۲ –۰/۲۲	۰/۷۴ –۰/۱۶	۰/۷۵ –۰/۰۱	۰/۵۲ –۰/۰۱	۰/۷۳ –۰/۱۴	۰/۱۶۸
گازوکرومیک	۱/۰۳ –۰/۰۹	۰/۷۵ –۰/۱۴	_	_	۰/۵۴	۰/۴۶	۰/۰۱ –۰/۷۵ ۰/۵۴ –۰/۱۵	۰/۱۶۱
انتشار پایین	۳/۵۸	۰/۲۶	۱/۴ –۱/۳	۰/۳۱	۰/۸ –۰/۴۷۸	۰/۵۷ –۰/۲۱۲	۰/۵۵	۰/۵۷۶ –۰/۰۴
شفاف تک‌لایه	۵/۴۱	۱/۰۲ –۰/۸۲	۲/۷۳ –۱/۴۲	۰/۹۴	۰/۷۴	۰/۷۴	۰/۸۸	۰/۱۲

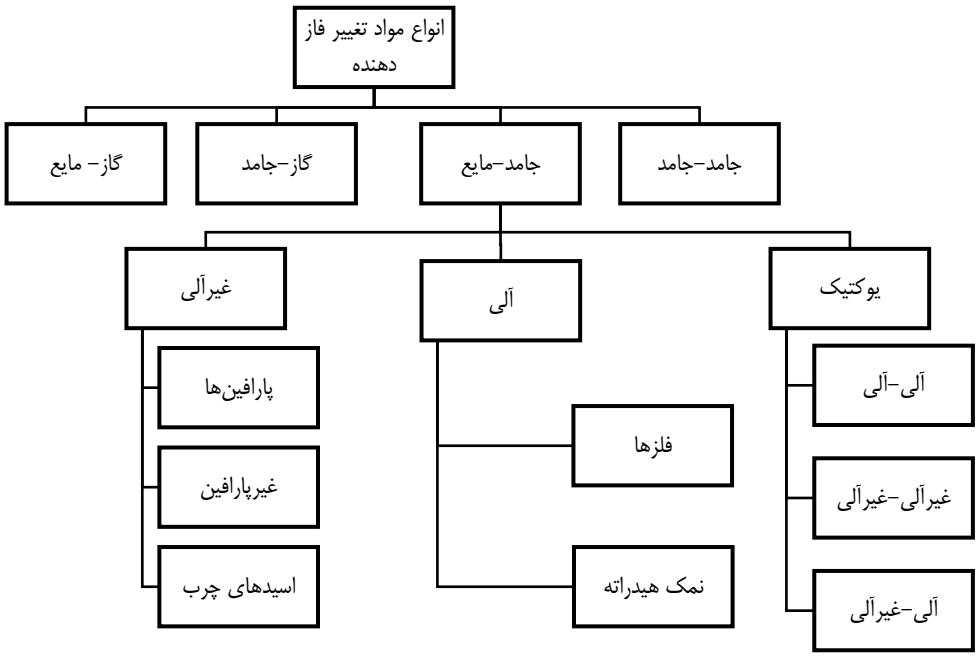
1. U-Value
2. Solar Heat Gain Coefficient (SHGC)
3. Light-to-Solar Gain (LSG)
4. Shading Coefficient (SC)
5. Transmittance of visible light (T_Vis)
6. solar Transmittance (T_Sol)
7. Visual Light Transmittance (VT)

جدول ۲ ویژگی‌های حرارتی و نوری پنجره‌های هوشمند را نشان داده است. پنجره‌های الکتروکرومیک ضریب انتقال حرارت پایین و توانایی کنترل میزان نور و گرما از طریق اعمال ولتاژ، کارایی حرارتی و نوری دارد. همچنین، تنظیم‌پذیری بازتاب و عبور نور به آسایش حرارتی و بصری ساکنان ساختمان منجر می‌شود. بنابراین، الکتروکرومیک‌ها به دلیل قابلیت تنظیم پویا و بهره‌وری انرژی بالا، مناسب‌ترین انتخاب برای ساختمان‌های انرژی‌صفر و پایدار شهری هستند. ویژگی‌های اصلی شامل میزان انتقال حرارت، ضریب بهره‌وری حرارتی خورشیدی، نسبت انتقال نور به بهره‌وری حرارتی، ضریب سایه‌زنی، درصد عبور نور مرئی، درصد عبور تابش خورشیدی و درصد بازتابش نور هستند. پنجره‌های الکتروکرومیک ضریب انتقال حرارت پایینی دارند و به دلیل ضریب بهره‌وری مناسب، در کنترل حرارت و استفاده از انرژی خورشیدی مؤثرند. پنجره‌های ترومیک و فتوکرومیک کارایی نوری و حرارتی مطلوبی دارند. پنجره‌های گازوکرومیک برای کنترل حرارت خورشید ضریب بهره‌وری حرارتی و ضریب انتقال حرارت خورشیدی مناسبی دارند. پنجره‌های هوشمند با شیشهٔ نمایشگر ذرات معلق و شیشهٔ هدایت نور، به تغییرات محیط پاسخ می‌دهند و عبور نور و بازتاب خورشید را کنترل می‌کنند. نتایج تجربی نشان داد این پنجره‌ها مصرف انرژی خنک‌کننده را تا ۳۶/۹ درصد و مصرف انرژی روشنایی را تا ۵۴/۵ درصد کاهش می‌دهند. در پنجره‌های هوشمند، فاز روتایل دی‌اکسید تیتانیوم به دلیل خواص نوری بهتر مانند انعکاس و جذب نور، عملکرد بهتری در بهبود جذب و تبدیل نور خورشید دارد، که در نتیجه موجب افزایش راندمان فتوولتائیکی می‌شود [۶۵]. ترکیب فاز مونوکلینیک و روتایل در پنجره‌های هوشمند به بهینه‌سازی استفاده از انرژی خورشیدی کمک می‌کند. انتخاب بین این دو فاز به نیازهای خاص سیستم پنجره بستگی دارد؛ روتایل به دلیل پاسخ سریع‌تر به میدان‌های الکتریکی معمولاً برای پنجره‌های با تغییرهای سریع شفافیت مناسب‌تر است، در حالی که مونوکلینیک به دلیل پایداری در دماهای پایین‌تر، برای شرایط محیطی خاص مفیدتر است. هیبریداسیون عناصر با وانادیوم دی‌اکسید در طرح‌های ساختاری روی عبور نور، توانایی مدولاسیون انرژی خورشیدی و چندمنظوره بودن مرتبط با ساختمان مفید است [۶۶]. شیشه‌های با پوشش تیتانیوم دی‌اکسید، با ویژگی فوتوکاتالیستی خود در واکنش به نور فرابنفش، آلودگی‌ها و گرد و غبار را تجزیه می‌کنند و سطح شیشه را بدون نیاز به نگه‌داری دستی تمیز نگه می‌دارند [۶۷]. نانو ذرات سیلیکا به بهبود عایق‌بندی حرارتی، کاهش انتقال حرارت و حفظ دمای مطلوب داخلی کمک می‌کنند [۶۸]. اکسید قلع ایندیوم به عنوان لایه‌ای شفاف و رسانا، برای کنترل حرارتی و الکتریکی به کار می‌رود [۶۹]. نانولوله‌های کربنی، نانو الیاف کربنی و نانو الیاف گرافیت در پنجره‌های هوشمند به بهبود مدولاسیون نوری، پایداری مکانیکی و هدایت حرارتی کمک می‌کنند [۷۰]. این مواد با افزایش عملکرد انرژی و دوام پنجره‌ها نقش مهمی در ارتقای کارایی ساختمان‌ها دارند. ویژگی آب‌گریزی آن باعث می‌شود که قطره‌های آب به‌راحتی از سطح شیشه بلغزند و لکه ایجاد نکنند. این شیشه‌ها دوام بالایی دارند و تحت شرایط مختلف آب و هوایی عملکرد خوبی از خود نشان می‌دهند. همچنین، در کاهش هزینه‌های تمیزکاری و نیاز به مواد شویندهٔ شیمیایی مؤثر هستند [۷۱]. پوشش نانومواد روی شیشه‌ها مقاومت بالایی در برابر سایش نشان می‌دهد؛ پس از ۱۰ هزار چرخهٔ سایش، شیشه همچنان ویژگی‌های خود را حفظ می‌کند. این پوشش با شیارهای میکروسکوپی که باعث جذب بهتر مواد دی‌اکسید تیتانیوم می‌شوند، به بهبود عملکرد خودتمیزشوندگی کمک می‌کند. فاصله‌های شیارها بر استحکام، بازتاب و عبور نور تأثیر می‌گذارند و با کاهش اثر سایش قطره‌های آب، عملکرد شیشه در برابر آلودگی و سایش را بهبود می‌بخشند. زاویهٔ تماس قطره‌های آب پس از ۱۰ هزار چرخه همچنان بالای ۹۰ درجه بوده، نشان‌دهندهٔ آب‌گریزی بالاست [۷۲]. این پنجره‌ها نقش مهمی در طراحی ساختمان‌های پایدار و انرژی صفر ایفا می‌کنند. پنجره‌های هوشمند به صرفه‌جویی در انرژی، افزایش آسایش داخلی ساختمان و کاهش نیاز به نگه‌داری کمک می‌کنند. نانومواد در پنجره‌های هوشمند در تنظیم نور و حرارت مؤثر بوده است. برای درک بهتر نقش نانومواد در مقیاس بزرگ‌تر، یعنی کل ساختمان بررسی می‌شود تا کارایی این مواد در ساختمان مورد بررسی قرار گیرد.

۳-۲-۲. نانومواد و مواد تغییرفازدهنده در ساختمان

ساختمان انرژی‌صفر طی یک سال، مقدار انرژی تولیدشده از منابع تجدیدپذیر برابر یا بیشتر از مقدار انرژی مصرفی آن است [۷۳]. مواد تغییرفازدهنده در ذخیرهٔ انرژی در ساختمان‌های انرژی صفر نقش مهمی دارد. این مواد قابلیت ذخیره و آزادسازی انرژی حرارتی برای رسیدن به نقطهٔ آسایش حرارتی را دارند. مواد تغییرفازدهنده به افزایش کارایی انرژی و کاهش مصرف اضافی

در سیستم‌های تهویه و گرمایش منجر می‌شود [۲۲]. طبقه‌بندی انواع مواد تغییرفازدهنده مورد استفاده در ذخیرهٔ انرژی حرارتی در ساختمان‌های انرژی‌صفر در شکل ۶ آمده است [۷۴].



شکل ۶. طبقه‌بندی انواع مواد تغییرفازدهنده مورد استفاده در ذخیرهٔ انرژی حرارتی در ساختمان‌های انرژی‌صفر [۷۴]

مواد تغییرفازدهنده برای عملیات حرارتی برای خنک شدن در روز و گرم کردن فضای داخلی در شب، مصرف انرژی را کاهش می‌دهد. این مواد در داخل آجر، دیوار، سقف، کف و سرتاسر ساختمان مورد استفاده قرار می‌گیرد [۵۵]. برای افزایش عملکرد سیستم، از مواد تغییر فاز نانو در ضخامت‌های مختلف با پر کردن حفره‌های اطراف لولهٔ گرمایش استفاده شد که نانوذرات مس با کسر حجمی جامد ۱ درصد منجر به بهبود بسیار جزئی استفاده از نانو پودرها در مواد تغییرفازدهنده برای این سیستم انرژی است [۷۵]. ادغام نانومواد به مواد تغییرفازدهنده سطح را نسبت به حجم بیشتر می‌کند و سطح تماس مواد تغییرفازدهنده را با محیط بیشتر می‌کند. این افزایش سطح سبب تبادل حرارت کارآمد طی انتقال فاز می‌شود. نانومواد هدایت حرارتی مواد تغییرفازدهنده را بیشتر می‌کند [۷۶]. کاربرد نانومواد در صنعت ساختمان در جدول ۳ آمده است [۷۷].

جدول ۳. کاربرد نانومواد در صنعت ساختمان [۷۷]

نانومواد	مصالح ساختمانی	کاربردها
نانولوله‌های کربنی	بتن، سرامیک	نظارت بر سلامت سازه جلوگیری از ترک، افزایش دوام خواص مکانیکی و حرارتی را بهبود می‌بخشد
تیتانیوم دی‌اکسید	بتن، پوشش	آبرسانی سریع، خودتمیزشوندگی و افزایش دوام آب دوستی فوق‌العاده، مقاوم در برابر رسوب و ضد مه خودتمیزشوندگی، خواص آب‌گریز
سیلیکا	بتن، سرامیک	تثبیت مقاومت مکانیکی خنک‌کننده، مقاومت در برابر آتش و انتقال نور ضد شعله، خودتمیزشونده و ضد انعکاس
اکسید آهن	بتن	افزایش مقاومت فشاری و مقاومت در برابر سایش در بتن
مس	فلز	ناهمواری سطح را کاهش می‌دهد، جوش‌پذیری، شکل‌پذیری و مقاومت در برابر خوردگی را بهبود می‌بخشد
اکسید آلومنیوم	الوار بتن آسفالت، بتن، ملات آجر	افزایش قابلیت سرویس‌دهی مدول الاستیسیته افزایش می‌یابد افزایش مقاومت فشاری و مقاومت در برابر سایش
نانو ذرات خاک رس	بتن	افزایش مقاومت در برابر نفوذ کلرید، بهبود خواص خود تراکم و عملکرد مکانیکی، کاهش نفوذپذیری و جمع‌شدگی
زایکوسویل	بتن، آسفالت	فشردگی بیشتر و افزایش عمر خستگی

نانومواد در بتن سبب عملکرد بسیار بالا، خودتمیزشوندگی، خودگرمایشی، حفاظت از آتش، افزایش استحکام و می‌شود. مواد نانو رس سطح سنگ و چوب از نفوذ مواد به داخل آن جلوگیری کرده و رنگ و ساختار اصلی آن را حفظ می‌کند. ساختمان‌های ساخته‌شده با سیمان الیافی در نما ساختمان به کار می‌رود و نور خورشید را جذب می‌کند. همچنین، از نفوذ آلودگی و باکتری جلوگیری می‌کند [۷۸]. نانومواد ۲۰ درصد مصرف انرژی در تولید مواد ساختمانی را کاهش می‌دهد. نانومواد در مصالح ساختمانی ۳۵ درصد عمرمفید ساختمان و نانوساختارها استحکام و پایداری ساختمان را ۴۰ درصد افزایش می‌دهد [۷۹]. کاربردهای نانوتکنولوژی بر قسمت‌های مختلف ساختمان در جدول ۴ تحلیل شده است [۷۸، ۸۰ـ ۸۷].

جدول ۴. کاربردهای نانوتکنولوژی بر قسمت‌های مختلف ساختمان [۷۸، ۸۰ـ ۸۷]

کاربرد نانو	نتیجه‌ها
عایق	پانل عایق خلأ ✓ عملکرد عایق حرارتی بالا ✓ کارآمد انرژی ✓ کاهش انتشار دی‌اکسید کربن ✓ مورد استفاده در سازه‌های موجود یا جدید ✓ نیاز نداشتن به نگه‌داری منظم
	مواد تغییرفازدهنده ✓ کنترل و تنظیم عملکرد حرارتی در داخل خلأ ✓ کاهش مصرف انرژی
	✓ عایق‌های صوتی نانو سرعت امواج صوتی را کاهش می‌دهند. ✓ عایق‌های با مقاومت حرارتی بالاتر، انتقال حرارت را کمتر می‌کند و موجب صرفه‌جویی انرژی می‌شود. ✓ نانوصفحات سفالی و الیاف سلولزی به عنوان پوشش‌های مؤثر و مقاوم در برابر رطوبت استفاده می‌شود
پوشش	پتوهای هواژل ✓ عایق حرارتی و صوتی ✓ مقاومت در برابر رطوبت ✓ کاهش مصرف انرژی و انتشار دی‌اکسید کربن
	ضد باکتری ✓ این پوشش به دلیل وجود دی‌اکسید تیتانیوم و ذرات نقره در اندازهٔ نانو در برابر باکتری‌ها و میکروب‌ها مقاوم است.
نانو پوشش سنگ و چوب	✓ نانو پوشش ضد باکتری و مقاوم در برابر آب و هوا ✓ پوشش‌ها معمولاً از ذرات الماس، نقره، شیشه و سرامیک تشکیل شده‌اند می‌توانند تا دمای ۳۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد را تحمل کنند. ✓ تمیزی راحت لکه‌ها ✓ جلوگیری از کپک، جلبک و عوامل محیطی دیگر ✓ محافظت در برابر کثیفی
الیاف سیمان	✓ لکه‌ها و کثیفی‌ها طی زمان جمع می‌شوند. ✓ سیمان به‌کاررفته در نمای ساختمان نور خورشید را جذب می‌کند. ✓ با استفاده از نانوپوشش‌های سنگ و چوب از نفوذ آلودگی و باکتری جلوگیری می‌شود.
آجر و سرامیک	✓ جلوگیری از کثیف شدن سطح بیرونی و درونی ساختمان ✓ جلوگیری از ایجاد لکه
ماسه سنگ و بتن هوادهی	✓ معمولاً مستعد جذب کثیفی هستند. استفاده از نانوپوشش سنگ و چوب روی بتن هوادهی و ماسه سنگ از ایجاد کثیفی روی آن‌ها جلوگیری می‌کند.
بتن	✓ کنترل و جلوگیری از ترک‌ها و خودترمیم‌شوندگی ✓ سیلیکا و نانوذرات آهن باعث افزایش مقاومت مکانیکی بتن می‌شود. ✓ سیلیکا و نانو ذرات رس از نفوذ آب به بتن جلوگیری می‌کند. ✓ نانولوله‌های کربنی موجب افزایش دوام بتن می‌شوند. نانولوله کربنی یک‌ششم چگالی فولاد را دارند و هشت برابر فولاد استحکام دارند. ✓ تیتانیوم دی‌اکسید خاصیت ضد عفونی دارد.
فولاد	✓ افزودن نانوذرات مس به فولاد، زبری سطح و عوامل تنش‌زا را کاهش می‌دهد.
رنگ ساختمان	✓ افزایش دوام و کاهش هزینه‌ها ✓ جلوگیری از رشد قارچ و کپک ✓ خاصیت ضد خش روی سطح اجزای ساختمان

جدول ارائه‌شده به بررسی کاربردهای نانومواد در صنعت ساختمان می‌پردازد. نانوذرات به بهبود خواص مکانیکی و عایق‌های حرارتی با کارایی بالا نقش مهمی در کاهش مصرف انرژی دارند. همچنین، استفاده از نانومواد می‌تواند به افزایش عمر مفید ساختمان‌ها و بهبود کیفیت هوای داخلی، کاهش مصرف انرژی، افزایش طول عمر ساختمان، توسعهٔ ساختمان‌های پایدار و محیط زیست کمک می‌کند. با توجه به کاربردهای گستردهٔ نانومواد در صنعت ساختمان لازم است که اثرات زیست‌محیطی نانوذرات و راه‌های رفع چالش آن ارزیابی شود. بنابراین، آثار زیست‌محیطی نانومواد در ساختمان‌های انرژی‌صفر بررسی می‌شود.

۳-۳. اثرهای زیست‌محیطی و چالش‌های نانومواد در ساختمان

نانومواد خواص مصالح ساختمانی را بهبود می‌بخشند، اما تأثیر و چالش‌های زیست‌محیطی شامل سمیت، نگرانی‌های ارزیابی چرخهٔ عمر و نیاز به منابع پایدار دارد که باید برای تضمین پایداری کلی زیست‌محیطی در ساخت‌وساز مورد توجه قرار گیرد [۸۹].

روش سنتز سبز در کاهش مصرف انرژی در تولید نانوذرات انرژی کم‌تری استفاده می‌کند. فرایندهای بیولوژیکی سنتز سبز، به دلیل ایمنی، سازگاری با محیط زیست، عدم سمیت و به‌صرفه بودن، برای توسعهٔ نانوذرات از ۱ تا ۱۰۰ نانومتر در مقایسه با دیگر روش‌ها، مناسب‌تر است [۹۰]. نانومواد سبز تأثیرهای منفی بر محیط زیست را در کل چرخهٔ عمر خود، از جمله تولید، ساخت، استفادهٔ مجدد و دفع، کاهش می‌دهند و اهداف پایداری را ارتقا می‌دهند. این کاهش مصرف انرژی در تولید نانوذرات ساختمان‌های انرژی‌صفر در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای مفید است [۲۷]. نانوذرات در ساختمان‌ها اثرهای زیست‌محیطی مانند سمیت، ورود به چرخهٔ زنجیرهٔ غذایی، کثیف کردن آب، کثیف کردن هوا و انتشار نانومواد به محیط زیست را دارد. [۲۶]. سنتز سبز نانوذرات با استفاده از منابع زیستی مانند گیاهان و پسماند کشاورزی، مصرف انرژی را تا ۳۰ درصد و هزینه‌ها را تا ۴۰ درصد کاهش داده و بازده تولید را تا ۵۰ درصد افزایش می‌دهد [۹۱].

این نانومواد هنگام تخریب، تولید و نصب وارد محیط زیست می‌شوند و آب، خاک و هوا را آلوده می‌کنند. برخی از این نانومواد مانند نانو نقره و تیتانیوم دی‌اکسید اثرهای سمی بر اکوسیستم دارند. بازیافت نانومواد، جداسازی نانومواد از پسماندهای ساختمانی و نانوذرات سبز راه‌حل رفع این مشکل است [۹۲]. نانوذرات سبز یک روش سازگار با محیط زیست است که در ساختمان‌های انرژی‌صفر کاربرد دارد. این مواد به کاهش انتشار آلاینده‌ها، سمیت و اثرهای زیست‌محیطی کمک می‌کند. نانوذرات سبز روشی پایدار برای سنتز نانوذرات با استفاده از موجودات زنده است که به جای مواد شیمیایی سمی، از آنزیم‌ها و عصاره‌های گیاهی بهره می‌برد. این روش به نانوذرات با سمیت کمتر و تجزیه‌پذیری بالا منجر می‌شود و جایگزینی امن‌تر برای روش‌های سنتی است. عصاره‌های گیاهی به دلیل داشتن عوامل کاهندهٔ طبیعی، برای تولید نانوذرات پایدارتر از میکروارگانیسم‌ها استفاده می‌شوند [۹۳]. پسماندهای حاوی نانومواد در ساختمان‌های انرژی صفر به دلیل تجزیه‌ناپذیری در طبیعت، آب‌های زیرزمینی و خاک انباشته می‌شوند. برای رفع این چالش نانوذرات سازگار با محیط زیست در پسماند ساختمان‌های انرژی صفر در طبیعت تجزیه می‌شوند. اثرهای منفی نانوذرات نیاز به استراتژی‌های بازیافت نوآورانه و کارآمد را ضروری می‌سازند [۹۴].

نانوفیلتراسیون سطحی و جذب سطحی در کاهش اثرهای منفی نانوذرات در پسماندهای ساختمان بسیار اثرگذار است. نانوفیلتراسیون سطحی با غشاهای نانومتری در فیلتر کردن نانوذرات استفاده می‌شود [۹۵]. زباله‌های ساختمانی و تخریب ۳۰ تا ۴۰ درصد از زباله‌های جامد تولیدشده در سطح جهان را تشکیل می‌دهند. جذب سطحی فرایندی است که نانوذرات بر سطح ماده جذب می‌شوند. این دو روش از انتشار نانوذرات ساختمان‌های انرژی صفر در محیط زیست جلوگیری می‌کند [۹۶]. نانولوله‌ها کربنی از طریق خوردن، نوشیدن، یا تماس مستقیم با پوست ممکن است به آسیب‌های ریوی، عفونت‌های سلولی یا حتی ایجاد تومور منجر شود [۹۷]. نانوذرات سیلیکا از طریق تنفس، بلع یا تماس پوستی وارد بدن می‌شود و التهاب‌های تنفسی را در انسان ایجاد می‌کند [۹۸]. نانوذرات مبتنی بر کربن، مانند فولرن‌ها، نانولوله‌ها، اکسیدهای فلزاتی مانند آهن و تیتانیوم و ترکیبات معدنی طبیعی، از جمله آزبست و کوارتز، اثرهای بیولوژیکی بر محیط زیست و سلامت انسان دارند. نانوذرات از طریق سیستم‌های مختلف مانند تنفسی، گوارشی یا پوست وارد بدن موجودات می‌شوند. این ذرات پس از ورود می‌توانند به ارگان‌ها و اجزای سلولی

آسیب برسانند و تولید گونه‌های رادیکال اکسیژن[1] را تحریک کنند که موجب سمیت می‌شود [۹۹]. گیاهان به عنوان مسیر اصلی انتقال نانوذرات به سایر سطوح زنجیرهٔ غذایی شناخته می‌شوند. نانوذرات مانند تیتانیوم دی‌اکسید، روی اکسید و نقره می‌توانند تأثیرهای سمی بر رشد، جوانه‌زنی و عملکرد فتوسنتز گیاهان داشته باشند. نانوذرات کوچک‌تر معمولاً سمی‌تر هستند و به‌راحتی وارد سلول‌های گیاهی می‌شوند [۱۰۰]. اثرهای بیولوژیکی نانومواد مورد استفاده در ساختمان بر اندام‌های بدن انسان در جدول ۵ آمده است [۱۰۱].

جدول ۵. اثرهای بیولوژیکی نانومواد مورد استفاده در ساختمان بر اندام‌های بدن انسان [۱۰۱]

نانومواد	آسیب
نانوذرات نقره	سیستم ایمنی ریه‌ها کبد مغز سرطان‌زایی سیستم عروقی اندام‌های تناسلی فیبروبلاست
تیتانیوم دی‌اکسید	التهاب در ریه آسیب به دی‌ان‌ای تغییرات متابولیک سرطان‌زایی مرگ سلولی
اکسید روی، اکسید آهن	تکثیر سلولی آسیب اکسیداتیو دی‌ان‌ای
مس روی	آسیب دی‌ان‌ای آسیب اکسیداتیو دی‌ان‌ای
نانوتیوب کربن	آسیب دی‌ان‌ای استرس اکسیداتیو التهاب
مس‌اکسید	آسیب دی‌ان‌ای آسیب اکسیداتیو دی‌ان‌ای

استفاده از نانوذرات سازگار، نانومواد‌سبز و روش‌های دیگر در کاهش اثرهای نانومواد ساختمانی هنگام تولید یا تخریب ساختمان یک ضرورت است. آگاهی‌های اجتماعی و ایجاد و رعایت قانون‌ها در حوزهٔ ساختمان یک امر ضروری است.

۴. نتیجه‌گیری

بررسی روند ثبت اختراع‌ها و مقاله‌های بین‌المللی در حوزهٔ کاربرد نانومواد در ساختمان‌های انرژی‌صفر نشان‌دهندهٔ پیشرفت و سرمایه‌گذاری در این حوزه و یک گزینهٔ مناسب در سیاست‌های توسعهٔ شهری پایدار است. تحلیل داده‌ها از پایگاه‌های لنز و اسکوپوس نشان می‌دهد بین سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۴ میلادی، ۲۸۰۹۰ اختراع در این حوزه ثبت شده که سهم کشورهای پیشرو آمریکا ۲۱۰۴۸ ثبت اختراع، کشورهای اروپایی ۱۹۵۴ ثبت اختراع و چین ۲ ثبت اختراع است. تحلیل مقاله‌های علمی از سال ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۴ میلادی حاکی از رشد این حوزه است که چین با ۲۲ مقاله، هند با ۶ مقاله و آمریکا با ۴ مقاله در رتبه‌های برتر قرار دارند. این آمار نشان‌دهندهٔ تمرکز کشورهای صنعتی و در حال پیشرفت در توسعهٔ این فناوری است که نیاز به

1. Radical Oxygen Species

سیاست‌گذاری‌های بین‌المللی برای تمام کشورهای جهان است. همچنین فاصلهٔ زیادی بین کشورهای توسعه‌یافته و درحال‌توسعه در این حوزه وجود دارد.

ساختمان‌های انرژی‌صفر با بهره‌گیری از نانومواد و مواد تغییرفازدهنده در اجزای ساختمان به چالش‌های محیط زیستی، اقلیمی و انرژی کمک می‌کنند. همچنین، ساختمان‌ها در۴۰ درصد مصرف انرژی و ۳۰ درصد در انتشار گازهای گلخانه‌ای نقش دارند. افزایش جمعیت، بحران انرژی، آلودگی‌های زیست‌محیطی و تغییرهای اقلیمی نیاز جهان را به ساختمان‌های انرژی‌صفر دوچندان کرده است. نانومواد در پنجره‌های هوشمند به تنظیم میزان نور عبوری، کاهش اشعهٔ فرابنفش، تیرگی و شفافیت و کنترل حرارت منجر می‌شوند. همچنین، شیشه‌های خودتمیزشونده با خاصیت آب‌گریزی و فوتوکاتالیستی باعث کاهش هزینه‌های نگه‌داری، کاهش مصرف آب و کاهش مواد شوینده می‌شوند. پنجره‌های هوشمند ۳۶/۹ درصد و تا ۵۴/۵ درصد مصرف انرژی خنک‌کننده و مصرف انرژی روشنایی را کاهش می‌دهند. نانومواد در بتن، رنگ، سقف، کف و اجزای مختلف ساختمان در بهره‌وری انرژی، کاهش هزینه‌های نگه‌داری، افزایش دوام، کاهش رشد باکتری، مقاومت در برابر آتش و عایق حرارتی تأثیر دارد. استفاده از نانومواد در بافت شهری آسیب‌های ناشی از خوردگی، رطوبت، زلزله و آتش‌سوزی را کاهش داده و به افزایش طول عمر ساختمان، کاهش هزینه‌های نگه‌داری و کاهش نیاز به بازسازی منجر می‌شود. استفاده از نانومواد در ساختمان‌ها ۳۵ درصد عمر مفید ساختمان و ۴۰ درصد استحکام و پایداری ساختمان را افزایش می‌دهد. این مواد در کاهش ۲۰ درصدی مصرف انرژی در تولید مواد ساختمان مفید است.

نانومواد در کنار دستاوردها، چالش‌های زیست‌محیطی مانند سمیت، ورود به زنجیرهٔ غذایی و اثرهای نامطلوب بر سلامت انسان دارد. سنتز سبز، بازیافت نانومواد و تولید نانوذرات تجدیدپذیر برای رفع این چالش‌ها ضروری است. با اتخاذ رویکردها می‌توان به بهبود عملکرد انرژی و کاهش هزینه‌های نگه‌داری کمک کرد. این دستاوردها راهی برای آینده در حوزهٔ مهندسی انرژی و توسعهٔ پایدار مطرح می‌شوند که هم‌زمان با بهره‌برداری بهینه از منابع طبیعی، سلامت جامعه و محیط زیست را نیز در اولویت قرار می‌دهند. سنتز سبز نانوذرات ساختمانی ۳۰ درصد مصرف انرژی و ۴۰ درصد هزینه‌ها را کاهش می‌دهد و ۵۰ درصد در افزایش بازده تولید تأثیرگذار است.

این پژوهش با دستاوردهای فناوری نانومواد در صنعت ساختمان و چالش‌های زیست‌محیطی و سیاستی را مورد تحلیل قرار داده و مسیرهای عملی برای توسعهٔ سیاست‌گذاری مناسب در کشورهای درحال‌توسعه ایران ارائه می‌دهد. این تحقیق با تحلیل داده‌های ثبت اختراع و مقاله‌های علمی، عاملی برای برنامه‌ریزی، جذب سرمایه و تدوین استانداردهای ملی و محلی فراهم کرده است.

پژوهش‌های آینده می‌تواند به اثرهای بلندمدت نانومواد بر محیط زیست و سلامت انسان، توسعهٔ نانومواد تجدیدپذیر، بهبود روش‌های سبز تولید و بازیافت و کاهش هزینه‌ها در کاربرد نانومواد در ساختمان‌های انرژی صفر متمرکز شوند. همچنین دولت، دانشگاه، صنعت و سایر ارگان‌ها با توسعهٔ قوانین، استانداردها و حمایت‌های مالی و سیاسی در سطح ملی و بین‌المللی در پیشرفت این فناوری‌ها نقش دارند. در ایران، تدوین سیاست‌های شهری مبتنی بر حمایت از پروژه‌های انرژی صفر، ایجاد مشوق‌های مالی، استقرار رصدخانه‌ها و تقویت ارتباط دانشگاه، شهرداری‌ها و صنعت ضروری و دولت با حمایت مالی و مشوق‌ها در گسترش این حوزه کارایی دارد. با توجه به اهمیت فناور نانومواد در ساختمان‌ها و توسعهٔ شهری، لازم است ارتباط هماهنگی بین سیاست‌گذاران، پژوهشگران و فعالان صنعتی برای پیشرفت در این حوزه به وجود بیاید. آیندهٔ پایدار، عدالت در توسعهٔ شهری و زیست‌محیطی و حمایت از فناوری‌ها در این حوزه نیاز به یک تصمیم، هماهنگی و آینده‌نگری در حوزهٔ نانومواد در ساختمان‌های انرژی‌صفر است.

منابع

1. Yaghoubi AA, Gandomzadeh M, Gholami A, Gavagsaz-Ghoachani R, Zandi M, Phattanasak M. Harnessing Machine Learning with Advanced Linear Regression Models to Forecast PV System. In: 2024 International Conference on Materials and Energy: Energy in Electrical Engineering (ICOME 2024) [Internet]. IEEE; 2024. p. 1–4. Available from: https://ieeexplore.ieee.org/document/10845673/
2. Parsay A, Gandomzadeh M, Yaghoubi AA, Hoorsun A, Gholami A, Zandi M, et al. Enhancing photovoltaic efficiency: An in-depth systematic review and critical analysis of dust monitoring, mitigation, and cleaning techniques. Appl Energy [Internet]. 2025 Jun;388:125668. Available from: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261925003988
3. Piryaei Z, Gholami A, Zandi M. 4E performance evaluation of renewable microgrids : Comparing hydrogen and battery storage for nearly net zero energy buildings. Energy Convers Manag [Internet]. 2025;332(March):119711. Available from: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2025.119711
4. Zhai ZJ, Helman JM. Implications of climate changes to building energy and design. Sustain Cities Soc. 2019;44:511–9.
5. Aram K, Taherkhani R, Šimelytė A. Multistage optimization toward a nearly net zero energy building due to climate change. Energies. 2022;15(3):983.
6. Nam K, Ahn HW, Lee SG, Kim J, Jeong SG. Net zero proximity index and techno-economic analysis of BIPV for zero energy and zero emission buildings. J Build Eng. 2025;103:112188.
7. Gandomzadeh M, Gholami A, Zandi M. Modeling Environmental Parameters Affecting the Performance of Solar Photovoltaic Systems Using Machine Learning. In: 2025 10th International Conference on Technology and Energy Management (ICTEM2025). Tabriz; 2025.
8. Gandomzadeh M, Yaghoubi AA, Hoorsun A, Parsay A, Gholami A, Zandi M, et al. Dust mitigation methods and multi-criteria decision-making cleaning strategies for photovoltaic systems: Advances, challenges, and future directions. Energy Strateg Rev. 2025;57:101629.
9. Cai S, Gou Z. Impact of COVID-19 on the energy consumption of commercial buildings: A case study in Singapore. Energy Built Environ. 2024;5(3):364–73.
10. Nguyen TH, Take K, Take K. Reviewing of the net-zero energy buildings and housings in Japan. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing; 2024. p. 12004.
11. Weerasinghe LNK, Darko A, Chan APC, Blay KB, Edwards DJ. Measures, benefits, and challenges to retrofitting existing buildings to net zero carbon: A comprehensive review. J Build Eng. 2024;109998.
12. Wilberforce T, Olabi AG, Sayed ET, Elsaid K, Maghrabie HM, Abdelkareem MA. A review on zero energy buildings–pros and cons. Energy and Built Environment. 2021.
13. Iran Energy Information. 2023.
14. Kalantar SV, Saifoddin AA, Hajinezhad A, Ahmadi MH. A solution to prevent a blackout crisis: Determining the behavioral potential and capacity of solar power. Int J Photoenergy. 2021;2021(1):2092842.
15. Gandomzadeh M, Kabiri-Sedeh M, Gavagsaz-Ghoachani R, Zandi M. Practical reliability study of a photovoltaic system for the supply of home load profile; Case study: Tehran city. In: 2019 Iranian Conference on Renewable Energy & Distributed Generation (ICREDG2019). Tehran; 2019. p. 1–6.
16. Yaghoubi AA, Gandomzadeh M, Gholami A, Gavagsaz Ghoachani R, Zandi M, A. Kazem H. Optimize photovoltaic panels cleaning scheduling framework based on variations of hourly-based active electricity pricing in the market. Sol Energy. 2024 Jun;275(May):112633.
17. Jami M, Parsay A, Gandomzadeh M, Mosayyebi A, Gavagsaz-Ghoachani R, Zandi M. Future Energy Modeling Pathway in Iran: Scenario Analysis Using Cross-Impact Balance Method. J Sustain Energy Syst. 2024;3(2):193–208.
18. Gandomzadeh M, Mahmoudian Younesi S, Mosayyebi A, Zandi M. Development scenarios for electrical energy storage in Iran with Cross-Impact Balance method. J Sustain Energy Syst [Internet]. 2022;1(4):373–96. Available from: https://ses.ut.ac.ir/article_91815.html?lang=en

19. Gholami A, Deghan Banadaky M, Gholami A. Advancing Sustainability in Dairy Farming: Integrating Renewable Energy and Dietary Innovations. In: 2025 10th International Conference on Technology and Energy Management (ICTEM). 2025.
20. Zhang S, Xu W, Wang K, Feng W, Athienitis A, Hua G, et al. Scenarios of energy reduction potential of zero energy building promotion in the Asia-Pacific region to year 2050. Energy. 2020;213:118792.
21. Ahmadizadeh M, Heidari M, Thangavel S, Khashehchi M, Rahmanivahid P, Singh VP, et al. Development of new materials for sustainable buildings. In: Sustainable Technologies for Energy Efficient Buildings. CRC Press; 2024. p. 30–48.
22. Boobalakrishnan P, Kumar PM, Balaji G, Jenaris DS, Kaarthik S, Babu MJP, et al. Thermal management of metal roof building using phase change material (PCM). Mater Today Proc. 2021;47:5052–8.
23. Soleymani M, Amrollahi R, Taghdir S, Barzegar Z. Nanotechnology for thermal comfort and energy efficiency in educational buildings with a simulation and measurement approach in BSh climate. Sci Rep. 2024;14(1):21502.
24. Abdin AR, El Bakery AR, Mohamed MA. The role of nanotechnology in improving the efficiency of energy use with a special reference to glass treated with nanotechnology in office buildings. Ain Shams Eng J. 2018;9(4):2671–82.
25. Mustafa MN, Abdah MAAM, Numan A, Moreno-Rangel A, Radwan A, Khalid M. Smart window technology and its potential for net-zero buildings: A review. Renew Sustain Energy Rev. 2023;181:113355.
26. Gupta AD, Patil SZ. Potential Environmental Impacts of Nanoparticles Used in Construction Industry. Ecol Heal Eff Build Mater. 2022;159–83.
27. Konbr U, Mamdouh H. A proposed strategy to evaluate nanomaterials in construction to boost sustainable architecture. Civ Eng Archit. 2022;10(7):3206–26.
28. Application of nanotechnology in zero-energy buildings. 2025.
29. The number of articles on the application of nano in zero energy buildings.
30. Ruoff RS, Lorents DC. Mechanical and thermal properties of carbon nanotubes. Carbon N Y. 1995;33(7):925–30.
31. Lampert CM. Progress in switching windows. In: Solar and Switching Materials. SPIE; 2001. p. 95–103.
32. Sanusi O, Warzoha R, Fleischer AS. Energy storage and solidification of paraffin phase change material embedded with graphite nanofibers. Int J Heat Mass Transf. 2011;54(19–20):4429–36.
33. García-Quintero A, Palencia M. A critical analysis of environmental sustainability metrics applied to green synthesis of nanomaterials and the assessment of environmental risks associated with the nanotechnology. Sci Total Environ. 2021;793:148524.
34. Holechek JL, Geli HME, Sawalhah MN, Valdez R. A global assessment: can renewable energy replace fossil fuels by 2050? Sustainability. 2022;14(8):4792.
35. Hansen J, Sato M, Kharecha P, Von Schuckmann K, Beerling DJ, Cao J, et al. Young people's burden: requirement of negative CO 2 emissions. Earth Syst Dyn. 2017;8(3):577–616.
36. Xu Y, Ramanathan V. Well below 2 C: Mitigation strategies for avoiding dangerous to catastrophic climate changes. Proc Natl Acad Sci. 2017;114(39):10315–23.
37. Moghaddasi H, Culp C, Vanegas J, Ehsani M. Net zero energy buildings: Variations, clarifications, and requirements in response to the Paris Agreement. Energies. 2021;14(13):3760.
38. Bourdeau M, qiang Zhai X, Nefzaoui E, Guo X, Chatellier P. Modeling and forecasting building energy consumption: A review of data-driven techniques. Sustain Cities Soc. 2019;48:101533.
39. Trunina I, Pryakhina K, Yakymets S. Research on the development of renewable energy sources in the world due to the war in ukraine. In: 2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES). IEEE; 2022. p. 1–5.
40. Gu D, Andreev K, Dupre ME. Major trends in population growth around the world. China CDC Wkly. 2021;3(28):604.
41. Ma Z, Arıcı M, Sun Y, Singh S, Shahsavar A. Towards net-zero energy/emission buildings for sustainable development. Energy Sustain Dev. 2024;80:101448.

42. Van Ruijven BJ, De Cian E, Sue Wing I. Amplification of future energy demand growth due to climate change. Nat Commun. 2019;10(1):2762.
43. Elaouzy Y, El Fadar A. Role of carbon tax in the widespread integration of sustainable strategies in buildings. Build Environ. 2023;234:110182.
44. Joof F, Samour A, Ali M, Rehman MA, Tursoy T. Economic complexity, renewable energy and ecological footprint: The role of the housing market in the USA. Energy Build. 2024;311:114131.
45. Chatterjee S, Molnár G, Kiss B, Topál D, Ürge-Vorsatz D. Navigating the transition: Modelling the path for net-zero European building sector. Renew Sustain Energy Rev. 2024;114827.
46. Yu Z, Gao C, Yang J, Wu J, Zhang H. Overview of research and development of nearly zero energy buildings in China. Natl Sci Open. 2024;3(3):20230083.
47. Tao Y, Rayegan R, Hasib A, Xiong G, Hasib N, TALELE S. A Review on International Research in Zero-Energy Buildings. Anal Build Sustain Ecosyst. 2016;
48. Li J, Gou Z. Addressing the development gap in net-zero energy buildings: A comparative study of China, India, and the United States. Energy Sustain Dev. 2024;79:101418.
49. Bravo-Hidalgo D, Baez-Hernandez A. Technologies of zero energies buildings. A review. Ing y Compet. 2019;21(2).
50. Saheb Y, Shnapp S, Johnson C. The Zero Energy concept: Making the whole greater than the sum of the parts to meet the Paris Climate Agreement's objectives. Curr Opin Environ Sustain. 2018;30:138–50.
51. Hosseini SE. An outlook on the global development of renewable and sustainable energy at the time of COVID-19. Energy Res Soc Sci. 2020;68:101633.
52. Dulian M. Revision of the Energy Performance of Buildings Directive–Fit for 55 package. EU Legis Prog. 2024;19(01):2024.
53. Kamel AS, Khamees EA elwahab, Abdallah Mahmoud Ahmed Alomari. Analytical study of the quality of the internal environment in the house according to the standards of the Jordanian Green Building. J Archit art, Hum Sci. 2021;0(0):0–0.
54. Sayadi S, Hayati A, Salmanzadeh M. Optimization of window-to-wall ratio for buildings located in different climates: An IDA-indoor climate and energy simulation study. Energies. 2021;14(7):1974.
55. Azmy NY, Azm ETAEL, Rizk AA, Mehanna WAEH. Using Nanotechnology to Achieve Sustainability in interior residential spaces. 2024;
56. Ashraf Ali N, Sadek S, Abdin A. A Review on Innovative Nanomaterials for Enhancing Energy Performance of the Building Envelope. Curr Nanomater. 2024;9(4):287–302.
57. Aburas M, Soebarto V, Williamson T, Liang R, Ebendorff-Heidepriem H, Wu Y. Thermochromic smart window technologies for building application: A review. Appl Energy. 2019;255:113522.
58. Kamalisarvestani M, Saidur R, Mekhilef S, Javadi FS. Performance, materials and coating technologies of thermochromic thin films on smart windows. Renew Sustain Energy Rev. 2013;26:353–64.
59. Meng W, Kragt AJJ, Hu X, van der Burgt JS, Schenning APHJ, Yue Y, et al. Photochromic Thermoelectric Smart Window for Season-Adaptive Solar Heat and Daylight Management. Adv Funct Mater. 2024;34(38):2402494.
60. Shao Z, Huang A, Cao C, Ji X, Hu W, Luo H, et al. Tri-band electrochromic smart window for energy savings in buildings. Nat Sustain. 2024;7(6):796–803.
61. Wang D, Chen G, Fu J. Multifunctional thermochromic smart windows for building energy saving. J Mater Chem A. 2024;12(22):12960–82.
62. Nundy S, Ghosh A. Thermal and visual comfort analysis of adaptive vacuum integrated switchable suspended particle device window for temperate climate. Renew Energy. 2020;156:1361–72.
63. Zhang Z, Zhang L, Xu J, He X, Yuan B, Chen C, et al. A novel dual-functional flexible dimming film for smart window applications: Energy saving and self-cleaning performance. Chem Eng J. 2024;488:150601.
64. Rashidzadeh Z, Heidari Matin N. A comparative study on smart windows focusing on climate-based energy performance and users' comfort attributes. Sustainability. 2023;15(3):2294.
65. Khan A, Sapakal S, Kadam A. In-Depth Study of Annealing Effect on Electrodeposited Titanium Dioxide (TiO2) For Smart Windows Application. 2024;

66. Jiang C, He L, Xuan Q, Liao Y, Dai JG, Lei D. Phase-change VO2-based thermochromic smart windows. Light Sci Appl. 2024;13(1):255.
67. De Matteis V, Cannavale A, Ayr U. Titanium dioxide in chromogenic devices: Synthesis, toxicological issues, and fabrication methods. Appl Sci. 2020;10(24):8896.
68. Yu P, He Z, Zhao Y, Song W, Miao Z. Flexible smart window with controllable visible transmittance and high near-infrared shielding properties doped by CsxWO3/SiO2-SH nanoparticles. Sol Energy Mater Sol Cells. 2025;282:113433.
69. Laurenti M, Bianco S, Castellino M, Garino N, Virga A, Pirri CF, et al. Toward plastic smart windows: optimization of indium tin oxide electrodes for the synthesis of electrochromic devices on polycarbonate substrates. ACS Appl Mater Interfaces. 2016;8(12):8032–42.
70. Kang I, Heung YY, Kim JH, Lee JW, Gollapudi R, Subramaniam S, et al. Introduction to carbon nanotube and nanofiber smart materials. Compos Part B Eng. 2006;37(6):382–94.
71. Qiao Y, Tang Z, Wu Z, Wang J, Sun X, Yu F, et al. VO2-based colorful smart windows with self-cleaning function. Sol Energy Mater Sol Cells. 2024;274:113004.
72. Maharjan S, Liao KS, Wang AJ, Barton K, Haldar A, Alley NJ, et al. Self-cleaning hydrophobic nanocoating on glass: A scalable manufacturing process. Mater Chem Phys. 2020;239:122000.
73. Taherahmadi J, Noorollahi Y, Panahi M. Toward comprehensive zero energy building definitions: a literature review and recommendations. Int J Sustain Energy. 2021;40(2):120–48.
74. Sivanathan A, Dou Q, Wang Y, Li Y, Corker J, Zhou Y, et al. Phase change materials for building construction: An overview of nano-/micro-encapsulation. Nanotechnol Rev. 2020;9(1):896–921.
75. Gür M, Öztop HF, Selimefendigil F. Analysis of solar underfloor heating system assisted with nano enhanced phase change material for nearly zero energy buildings approach. Renew Energy. 2023;218:119265.
76. Said Z, Pandey AK, Tiwari AK, Kalidasan B, Jamil F, Thakur AK, et al. Nano-enhanced phase change materials: Fundamentals and applications. Prog Energy Combust Sci.
77. Thammadi SPD, Pisini SK. Nanotechnology and building construction: Towards effective stakeholder engagement. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing; 2022. p. 12074.
78. Feizbahr M. Nanotechnology in Construction : Innovations , Applications , and Impacts. 2024;6(1):35–41.
79. Yaseen AH, Ghazi A, Al-Hatem AI, Rajab AB, Bodnar N, Jasim WA, et al. Nanostructured Materials in Sustainable Construction: A Comprehensive Review of Durability, Thermal Efficiency, and Environmental Impact. J Nanostructures. 2024;14(4):1082–96.
80. Hosny I, Anous I. Nanomaterials and their applications in interior design. Am Int Res Humanit Arts Soc Sci. 2014;16–27.
81. Basauony M, A. EL Kattan A, S. Atwa M. Applications of Nanotechnology in Architecture. J Al-Azhar Univ Eng Sect. 2019;14(53):1729–39.
82. Hu X, Zhu X, Sun Z. Fireproof performance of the intumescent fire retardant coatings with layered double hydroxides additives. Constr Build Mater. 2020;256:119445.
83. Krystek M, Górski M. Nanomaterials in structural engineering. New uses micro Nanomater. 2018;
84. Meliță L, Calotă R, Amăreanu M. Silica Aerogel-Incorporated Cement and Lime Plasters for Building Insulation: An Experimental Study. Buildings. 2024;14(8):2300.
85. Onyelowe KC, Ebid AM, Riofrio A, Baykara H, Soleymani A, Mahdi HA, et al. Multi-objective prediction of the mechanical properties and environmental impact appraisals of self-healing concrete for sustainable structures. s Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published …; 2022.
86. Safavigerdini K, Surya R, Reinhard A, Quinlan Z, Bunyak F, Maschmann MR, et al. Creating semi-Quanta multi-layer synthetic CNT images using CycleGAN. In: 2023 IEEE Applied Imagery Pattern Recognition Workshop (AIPR). IEEE; 2023. p. 1–6.
87. Seifan M, Sarmah AK, Ebrahiminezhad A, Ghasemi Y, Samani AK, Berenjian A. Bio-reinforced self-healing concrete using magnetic iron oxide nanoparticles. Appl Microbiol Biotechnol. 2018;102:2167–78.
88. Manal R, Ahmed M. Nanomaterials and its Impact on the Quality of the Internal Environment for Sustainable Interior Design Abstract : Keywords : Introduction : 2022;328–42.

89. Trejo-Arroyo DL, Pech-Núñez D, Cruz JC, Arriaga LG, Vega-Azamar RE, Gurrolal MP. Nanomaterials Applied in the Construction Industry. In: Nanochemistry. CRC Press; 2023. p. 396–412.
90. Vijayaram S, Razafindralambo H, Sun YZ, Vasantharaj S, Ghafarifarsani H, Hoseinifar SH, et al. Applications of green synthesized metal nanoparticles—a review. Biol Trace Elem Res. 2024;202(1):360–86.
91. De A. Nanomaterial Synthesis from End-of-Cycle Products: A Sustainable Way of Waste Valorisation. ChemBioEng Rev. 2022;9(4):337–50.
92. Sourkouni G, Argirusis C, Argirusis N. Recycling of Surface-Functionalized Nanoparticles—A Short Review. Processes. 2024;12(11):2354.
93. Ainomugisha S, Matovu M, Manga M. Application of green agro-based nanoparticles in cement-based construction materials: a systematic review. J Build Eng. 2024;108955.
94. Liu Z, Chen Z, Wang Z, Zhang D, Ni BJ. Recycling and repurposing of waste carbon nanofiber polymers: a critical review. Environ Sci Nano. 2024;
95. Abedi F, Dubé MA, Kruczek B. Adsorption of heavy metals on the surface of nanofiltration membranes:"A curse or blessing"? J Memb Sci. 2023;685:121988.
96. Pallewatta S, Weerasooriyagedara M, Bordoloi S, Sarmah AK, Vithanage M. Reprocessed construction and demolition waste as an adsorbent: An appraisal. Sci Total Environ. 2023;882:163340.
97. Kim M, Goerzen D, Jena P V, Zeng E, Pasquali M, Meidl RA, et al. Human and environmental safety of carbon nanotubes across their life cycle. Nat Rev Mater. 2024;9(1):63–81.
98. Liu JY, Sayes CM. A toxicological profile of silica nanoparticles. Toxicol Res (Camb). 2022;11(4):565–82.
99. Taghavi SM, Momenpour M, Azarian M, Ahmadian M, Souri F, Taghavi SA, et al. Effects of nanoparticles on the environment and outdoor workplaces. Electron physician. 2013;5(4):706.
100. Mart G, Merinero M, Mar E, Ortiz T, Villamor E, Alcudia A. Environmental Impact of Nanoparticles ' Application as an Emerging Technology : A Review. 2021;1–26.
101. Mohajerani A, Burnett L, Smith J V, Kurmus H, Milas J, Arulrajah A, et al. Nanoparticles in construction materials and other applications, and implications of nanoparticle use. Materials (Basel). 2019;12(19):3052.