Journal of
Engineering Sciences
Faculty of Engineering
Assiut University
JES
مجلة
العلوم الهندسية
كلية الهندسة
جامعة أسيوط
journal homepage: http://jesaun.journals.ekb.eg

# Nanotechnology and Its Effects on Construction and Building Performance
# تقنية النانو وتأثيراتها على إنشاء وأداء المباني

Received 7 March 2025; Revised 16 July 2025; Accepted 16 July 2025

**Abstract:** The study addressed the effects of nanotechnology on building construction and performance, aiming to analyze the impacts of nanotechnology on building construction processes and their functional and environmental performance. It employed a theoretical analytical methodology encompassing three main axes: **structural materials** (concrete, steel, wood), **finishing materials** (glass, paints), and **non-structural materials** (insulation, solar cells). The research relied on a comparative descriptive analysis of material properties before and after nano-treatment, supported by a study of six global application models (e.g., the Regency Church of Life - Japan and the Italian Pavilion at Expo Milan 2015). The results revealed substantial improvements in **durability**: a 30% increase in concrete strength using nanosilica, and a 40% reduction in maintenance costs for self-cleaning façades. **Sustainability efficiency**: saving 46,000 kWh annually at the California Training Center through phase-change materials (PCMs), **Nanotechnology risks**: health hazards (inhalation of 45% of nanoparticles among workers), and **environmental challenges** (accumulation of 30% non-biodegradable materials). The discussion highlighted a research gap in Arab environments, represented by the scarcity of quantitative studies on material durability under harsh climatic conditions. The study concluded with practical recommendations including: enhancing scientific research tailored to Arab conditions, establishing regulatory standards for occupational safety, and integrating nanotechnology into smart building systems, affirming that this technology represents a fundamental shift in the trajectory of sustainable architecture despite existing challenges.

**الملخص:** تناولت الدراسة تأثيرات تقنية النانو على إنشاء وأداء المباني حيث هدفت إلى تحليل تأثيرات تقنية النانو على عمليات إنشاء المباني وأدائها الوظيفي والبيئي، باستخدام منهجية تحليلية نظرية شملت ثلاثة محاور رئيسة: **المواد الإنشائية** (الخرسانة، الحديد، الأخشاب)، **مواد التشطيب** (الزجاج، الدهانات)، **المواد غير الإنشائية** (العوازل، الخلايا الشمسية). واعتمد البحث على تحليل وصفي مقارن لخصائص المواد قبل وبعد المعالجة النانوية، مدعومًا بدراسة ستة نماذج تطبيقية عالمية (مثل كنيسة حياة ريجنسي-اليابان والجناح الإيطالي في إكسبو ميلان ٢٠١٥). كشفت النتائج عن تحسينات جوهرية في خصائص المواد، **المتانة**:

**Khaled Ali Mohamed Ali Zid**[1]
**(خالد على محمد على زيد)**
**Gamal A. Abdelhamed** [2]
**(جمال أحمد عبد الحميد )**

**Keywords**:
Nanotechnology, Building Materials, Finishing Materials, Construction Techniques, Building Performance Enhancement

**الكلمات الرئيسية:**
تقنية النانو، مواد البناء، مواد التشطيبات، تقنيات البناء، تطوير أداء المباني

[1] Assistant Professor of Civil and Architectural Engineering Department, College of Engineering and Computer Science, Jazan University, Saudi Arabia. /Lecturer of Architectural Engineering Department, Faculty of Engineering, Mataria, Helwan University, Egypt. kzed@jazanu.edu.sa | kha_zed@yahoo.com
[2] Professor of Civil and Architectural Engineering Department, College of Engineering and Computer Science Jazan University, Saudi Arabia. Ghamed@jazanu.edu.sa | drgamal_soh@yahoo.com

https://doi.org/10.21608/jesaun.2025.366380.1442
This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

زيادة مقاومة الخرسانة بنسبة ٣٠٪ باستخدام النانوسليكا، وانخفاض تكاليف صيانة الواجهات الذاتية التنظيف بنسبة ٤٠.% ، **كفاءة الاستدامة**: توفير ٤٦,٠٠٠ كيلوواط ساعة سنويًا في مركز تدريب كاليفورنيا عبر مواد متغيرة الطور (PCMs)، **مخاطر تقنيات النانو**: مخاطر صحية (استنشاق ٤٥٪ من الجسيمات النانوية لدى العمال)، وتحديات بيئية (تراكم ٣٠٪ من المواد غير القابلة للتحلل). كما أبرزت المناقشة الفجوة بحثية في البيئات العربية، تتمثل في ندرة الدراسات الكمية لمتانة المواد تحت الظروف المناخية القاسية وقد وخلصت الدراسة إلى توصيات عملية تشمل: تعزيز البحث العلمي الموجه للظروف العربية، وإرساء معايير رقابية للسلامة المهنية، ودمج تقنيات النانو في أنظمة المباني الذكية، مؤكدةً أن هذه التقنية تمثل تحولاً جوهريًا في مسار العمارة المستدامة رغم التحديات القائمة.

## ١ - المقدمة (Introduction):

تشهد صناعة الإنشاءات تحولاً جوهريًا مدفوعًا بتقنيات الثورة الصناعية الرابعة، حيث تبرز **تقنية النانو** كأحد أبرز الحلول الواعدة لمواجهة تحديات الاستدامة والأداء. رغم الدراسات السابقة التي ركزت على تحسين خصائص المواد، تظل الفجوات البحثية في البيئات العربية – مثل نقص التحليل الكمي للمتانة تحت الظروف المناخية القاسية (درجات حرارة أعلى من 50° م، رطوبة أعلى من 80%) وغياب المعايير الرقابية للسلامة عائقًا أمام توطين هذه التقنية.
تتناول هذه الورقة **تأثيرات تقنية النانو على إنشاء وأداء المباني** عبر منهجية تكاملية تجمع بين:

- التحليل النظري لخصائص المواد النانوية.
- التقييم الكمي لكفاءة الطاقة والمتانة مثل خفض استهلاك التبريد ٣٠٪ باستخدام زجاج.(Aerogel)
- تحليل التحديات العملية في البيئات العربية (الصحية، البيئية، الاقتصادية).

بهدف تقديم إطار تطبيقي يُسهم في تحقيق أهداف التنمية المستدامة ٢٠٣٠، مع سد الفجوة بين النظرية والتطبيق في المنطقة العربية

## ٢- الدراسات السابقة والفجوة البحثية (Previous Studies and Research Gap):

اعتمد البحث على مراجعة نقدية للدراسات السابقة في مجال تقنية النانو وتطبيقاتها المعمارية، والتي حللت تأثير هذه التقنية في مواد التشطيب ومعايير الاستدامة، إلى جانب تقييم كفاءة مواد البناء النانوية. وقد أسفرت المراجعة عن تحديد فجوات بحثية، أبرزها:

١- **ضيق نطاق التحليل**: تركيز معظم الأبحاث على مواد محددة دون تغطية شاملة لجميع فئات مواد البناء (الإنشائية، والتشطيبية، وغير الإنشائية).
٢- **قصور في التقييم الكمي:** ندرة الدراسات التي تقيس كمياً تأثير تقنية النانو على خصائص أساسية كالمتانة والعزل الحراري/الصوتي، وانعكاس ذلك على الأداء الكلي للمباني.
٣- **إغفال الظروف المناخية العربية:** على الرغم من إسهام دراسات في تحسين خصائص المواد، إلا أنها أغفلت تقييم أداء التقنيات النانوية تحت الظروف المناخية المميزة للمنطقة العربية (كدرجات حرارة تتجاوز ٥٠°م ومستويات رطوبة نسبية تفوق ٨٥٪)، مما يحد من قابليتها للتطبيق العملي فيها.
٤- **تجاهل التحديات العملية:** ندرة الأبحاث التي تعالج التحديات العملية لتطبيق تقنية النانو في البيئات العربية، كالمخاطر الصحية (مثل استنشاق الجسيمات النانوية) والقيود التنفيذية واللوجستية. [1]

ويهدف هذا البحث إلى معالجة بعض هذه الفجوات من خلال اعتماد منهجية تحليلية، تُغطي مجموعة متنوعة من مواد البناء والتشطيب. تتضمن تطبيقات المنهجية تعزيز متانة الخرسانة وتقليل تكاليف صيانة الواجهات ذاتية التنظيف. كما يُقدِّم البحث تحليلاً عملياً للمخاطر الصحية المرتبطة باستنشاق الجسيمات النانوية في سياق الصحة والسلامة المهنية.

## ٣- أهداف البحث (Objectives):

رصد تأثير تقنية النانو على أداء المباني من خلال:

١- **توضيح التطور في خصائص مواد البناء والتشطيب**، بعد معالجتها بتقنية النانو، وتأثيرها على المتانة، العزل الحراري، كفاءة الطاقة، والتكاليف.

٢- **تحليل التفاعل بين تطبيقات النانو وتطور المفاهيم المعمارية**: (كالعمارة الذكية، الاستدامة، التصميم الديناميكي) من خلال دراسة مشروعات قائمة ونظرية، وتقييم جدواها التقنية والاقتصادية والبيئية.

٣- **استخلاص التحديات العملية والمخاطر المرتبطة بتقنية النانو**، مع التركيز على المخاطر الصحية للعمال، القيود التنفيذية، والآثار البيئية طويلة المدى.

## ٤- منهجية البحث (Research Methodology):

اعتمد البحث على منهج نظري تحليلي (Theoretical Analytical Approach) دراسة تأثيرات تقنية النانو على مواد وأساليب البناء وأداء المباني. تمثلت إجراءات المنهج في:

١- **التحليل الوصفي**: رصد التطور التاريخي لتقنية النانو وتصنيف المواد النانوية وفق خصائصها الفيزيائية والكيميائية والميكانيكية والبيولوجية.

٢- **الدراسة المقارنة**: تحليل تأثير التقنية على مواد البناء والإنشاء ومواد التشطيب والمواد غير الإنشائية، مع مقارنة أدائها قبل وبعد المعالجة النانوية.

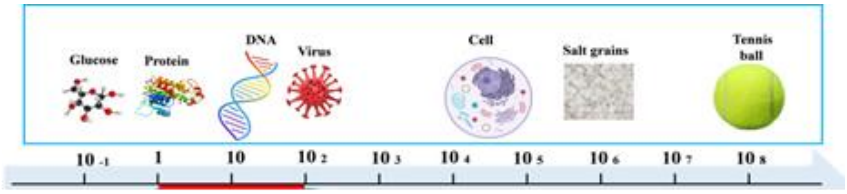
٣- **تحليل التطبيقات العملية:** دراسة ستة حالات دراسية لمشاريع معمارية قائمة (مثل كنيسة "حياة ريجنسي" اليابانية والجناح الإيطالي في إكسبو ميلان ٢٠١٥) ومشاريع طموحة (برج إنفينيتي بكوريا) ومشاريع نظرية (مدينة الشيميزو الهرمية)، مع تقييم جدواها التقنية والاقتصادية.

٤- **الاستنباط النظري**: استخلاص النتائج عبر الربط بين خصائص المواد النانوية وتطور المفاهيم المعمارية (كالعمارة الذكية والاستدامة)، مع تحديد التحديات المستقبلية.

## ٥- تقنية النانو النشأة والتطور:

### ٥-١- تعريف تقنية النانو (Nanotechnology):

هي مجال علمي وتقني يُعنى بدراسة المواد والأجهزة على مقياس **النانومتر** (نانوميتر واحد يساوى $١٠^{-٩}$ متر) والتحكم في خصائصها الفريدة التي تظهر عند هذا الحجم المتناهي الصغر. وتُعَدُّ هذه التقنية منهجًا لدراسة المادة ومراقبتها وفهم سلوكها في نطاق أبعاد يتراوح بين ١ و١٠٠ نانومتر.[2] يُوضح الشكل (١) مقاييس بعض النماذج والكائنات الدقيقة بوحدة النانومتر




**شكل (١) القياسات بالنانو لكرة التنس وبعض الكائنات كالخلايا والبكتيريا والمخلوقات الدقيقة**

https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128225226000047

### ٥-٢- أجيال تقنية النانو:

شهدت تقنية النانو تطورًا متسارعًا عبر خمسة أجيال رئيسة، وقد انعكس هذا التطور على العمارة عبر: [٣]

- تحسين خصائص مواد البناء والتشطيب.

- تمكين أنظمة التحكم الذكية في المباني.
- التكامل بين الوظائف الحيوية والتصميم المعماري (كالطاقة الحيوية).

ويوضح جدول (١) أجيال تقنية النانو والامثلة التطبيقية عليها.

**جدول (١) تطور أجيال تقنية النانو والامثلة التطبيقية عليها** [٤]

| الجيل | الفترة | الميزة الأساسية للتقنية | أمثلة تطبيقية |
|---|---|---|---|
| الأول | ~2000-2010 | مواد سلبية محسنة | أنابيب كربون، جسيمات نانوية |
| الثاني | ~2010-2020 | مواد ذكية تستجيب للمؤثرات | أدوية موجهة، أنسجة ذاتية الإصلاح |
| الثالث | 2020-الآن ~ | أنظمة متكاملة متعددة الوظائف | مختبرات على شريحة، أجهزة استشعار |
| الرابع | الحالي | تحكم جزيئي دقيق | روبوتات نانوية، آلات جزيئية |
| الخامس | المستقبل | أنظمة حيوية-اصطناعية | أعضاء ذكية، شبكات عصبية نانوية |

**٥-٣- خواص المواد النانوية:**

تُمثِّل المواد التقليدية المادة الخام الأساسية لتخليق المواد النانوية، إلا أن الأخيرة تتميز بخصائص فيزيائية وكيميائية وميكانيكية فريدة تختلف جوهريًا عن نظيرتها التقليدية. يعود هذا الاختلاف إلى الزيادة الهائلة في مساحة السطح النسبية عند المقياس النانوي، حيث توجد علاقة طردية بين تصغير حجم الجسيمات وازدياد عدد الذرات السطحية. يؤدي تكثُّف الذرات على السطح إلى تعزيز النشاط الكيميائي والفيزيائي، مما يُغيِّر الخصائص التقليدية للمواد عند وصولها إلى حيز النانومتر (١–١٠٠ نانومتر) [٥].

**٥-٣-١- الخواص الميكانيكية:** تتحسَّن الخصائص الميكانيكية للمواد النانوية بشكل ملحوظ نتيجة تصغير حجم حبيباتها وزيادة كثافة الذرات السطحية. ففي المواد **الفلزية** وسبائكها، ترتفع الصلادة، وتتعزَّز مقاومتها للإجهادات والأحمال الميكانيكية، مما يمنحها متانة عالية وقابلية مُحسَّنة للتشكيل. يُسهم ذلك في ابتكار مواد جديدة بأداء ميكانيكي فائق مقارنةً بالمواد التقليدية [٦].

**٥-٣-٢- الخواص الكيميائية:** يزداد النشاط الكيميائي للمواد النانوية بسبب ارتفاع نسبة الذرات السطحية الفعَّالة، مما يُحَوِّلها إلى محفزات كيميائية عالية الكفاءة. **تُستخدم** هذه الخاصية في تطبيقات مُتقدمة مثل خلايا الوقود منخفضة التكلفة، والحد من التلوث البيئي عبر تفكيك الملوثات، مما يجعلها ركيزةً للطاقات النظيفة والمستدامة [2] .

**٥-٣-٣- الخواص الفيزيائية:** تتغير الخصائص **الفيزيائية** للمواد عند تصغيرها إلى الحجم النانوي. على سبيل المثال، تنخفض نقطة انصهار الذهب من ١٠٦٤°م (في حالته التقليدية) إلى نحو ٥٠٠°م عند تصغير حبيباته إلى ≈١,٣٥ نانومتر، نتيجة زيادة تأثير الذرات السطحية غير المستقرة [2] .

**٥-٣-٤- الخواص البصرية:** تتغير الخصائص البصرية للمواد النانوية بشكل جذري اعتمادًا على حجم الجسيمات. فجسيمات الذهب (الحجم التقليدي: أصفر) **تُظهِر** لونًا شفافًا عند تصغيرها إلى أقل من ٢٠ نانومتر، ويتحول لونها تدريجيًا من الأخضر إلى البرتقالي فالأحمر مع زيادة التصغير. هذه الظاهرة تُساعد في صناعة شاشات عرض نانوية للواجهات المعمارية الذكية [٧].

**٥-٣-٥- الخواص المغناطيسية:** تتعزَّز **الخصائص** المغناطيسية للمواد النانوية مع تصغير حجم حبيباتها، حيث تؤدي الزيادة في عدد الذرات السطحية إلى رفع شدة المغناطيسية ونشاطها، مما يفتح آفاقًا لتطبيقات في تخزين البيانات والأجهزة الطبية [2].

**٥-٣-٦- الخواص الكهربية:** تتحسَّن **التوصيلية** الكهربائية عند تصغير مواد مثل أشباه الموصلات إلى أقل من ١٠٠ نانومتر. يُؤدى ذلك إلى تغيير آليات نقل الإلكترونات، مما يُؤهِّلها لتصنيع حساسات دقيقة وشرائح إلكترونية فائقة الأداء [7].

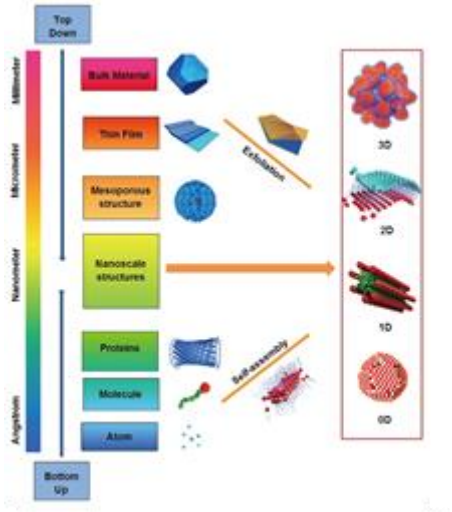
**٥-٣-٧- الخواص البيولوجية:** تكتسب المواد النانوية خصائص بيولوجية غير موجودة في حالتها التقليدية، مثل القدرة المضادة للميكروبات. فجسيمات الفضة والذهب النانوية (حجمها اقل من ٥٠ نانومتر) تُعطِّل أغشية الخلايا البكتيرية وتقضي على الفيروسات والفطريات، وذلك نتيجة تفاعل سطحها النشط كيميائيًا مع المكونات الخلوية [8].

## ٦- طرق الوصول إلى الحجم النانوي.

تُوجَدُ طريقتان رئيستان لتصنيع المواد النانوية:

- **الطريقة التنازلية: (Top-down)** تبدأ بتكسير المواد السائبة عبر طحن متتالي، حفر ضوئي، حتى الوصول إلى أحجام نانوية (قرابة ١٠٠ نانومتر) [2] .
- **الطريقة التصاعدية: (Bottom-up)** تعتمد على تجميع الوحدات الذرية أو الجزيئية عبر تفاعلات كيميائية/فيزيائية لبناء هياكل نانوية (حتى ١ نانومتر).

كلا النهجين، تَكتَسِبُ المواد الناتجة خصائص مُغَايرة لخصائصها في الحالة الطبيعية [2]، يُوضِّح الشكل (٢) الآليتين الوصول لحجم النانو بشكل مُبَسَّط .




**شكل (٢) شرح مبسط يوضح طريقتي الوصول إلى الحجم النانوى**

## ٧- مبادئ وخصائص تقنية النانو وعلاقتها بكفاءة الأداء.

أسهمت خصائص تقنية النانو الفريدة في إحداث تحوُّلات جذرية بمجال العمارة والبناء. يوضح جدول (٢) المبادئ الأساسية للتقنية وعلاقتها بكفاءة الأداء للمبنى.

**جدول (٢) مبادئ وخصائص تقنية النانو وتأثيرها على مجال البناء** [8].

| مبادئ وخصائص تقنية النانو | التاثير على كفاءة أداء مواد البناء |
|---|---|
| التحكم بتحريك الذرات منفردة بدقة وإعادة ترتيبها | تطوير واستحداث العديد من مواد البناء والتشطيب |
| الخصائص الفيزيائية والكيميائية والميكانيكية للمادة عند مقياس النانو تختلف عن خصائصها عند مقياسها الطبيعي | تحسين خصائص مواد الانشاء والتشطيب وبالتالي تطوير الفكر المعماري. |
| تعتمد تقنية النانو على مبادئ الفيزياء والكيمياء والأحياء والهندسة الكهربية والإلكترونية | ربط العلوم وتشجيع الجميع باختلاف تخصصاتهم العلمية على الدخول في مجالها والتعاون فيما بينهم. |
| إمكانية التحكم بالذرات في صنع المواد والآلات وتنقيتها من الشوائب وتخليصها من العيوب . | خصائص أفضل للمواد والآلات، فهي أصغر وأخف وأقوى وأسرع وأقل استهلاكا للطاقة . |
| تعتمد تقنية النانو على الأبحاث العلمية التي تتصف بإمكانية تطبيقها في اختراعات واستخدامات مفيدة. | تحول كثير من الافكار والنظريات غير قابلة التنفيذ الى واقع قابل للتنفيذ . |

## ٨- تأثير تقنية النانو على مواد البناء.

تُسهم تقنية النانو في إضفاء ميزاتٍ استثنائية على المباني، حيث تُحسِّن من خصائصها:

- **الإنشائية:** كزيادة تحمُّل الإجهادات، ومقاومة الانحناء، والمرونة.
- **البيئية:** مثل مقاومة درجات الحرارة المرتفعة، والإشعاعات الضارة، والوقاية من الحرائق، مع تمكين التنظيف الذاتي، وتنقية الهواء، ومقاومة البكتيريا.
- **الاستدامة:** عبر ترشيد استهلاك الطاقة.

يوضح الجدول (٣) تطبيقات تقنية النانو على مواد البناء وتأثيرها على العمارة.

**جدول (٣) تطبيقات تقنية النانو على مواد البناء وتأثيرها على العمارة [٩]**

| فئة المادة | نوع المادة | التقنية النانوية المستخدمة | التأثير الرئيسي | أمثلة تطبيقية |
|---|---|---|---|---|
| **المواد الإنشائية** | الخرسانة | إضافة نانوسليكا($SiO_2$) | زيادة المتانة، تقليل التشققات | خرسانة عالية المقاومة في الجسور |
| | الحديد | جسيمات نانوية (كالسيوم/مغنيسيوم) | تعزيز مقاومة التشققات، تحسين جودة اللحام | هياكل فولاذية في ناطحات السحاب |
| | الخشب | معالجة سطحية بجسيمات الفضة النانوية | مقاومة الرطوبة والعفن | أرضيات وأسقف خشبية في المناطق الرطبة |
| **مواد التشطيب** | الزجاج | طلاء ثاني أكسيد التيتانيوم($TiO_2$) | تنظيف ذاتي، مقاومة البكتيريا | واجهات المباني (مشروع الجناح الإيطالي) |
| | الدهانات | جسيمات نانوية بوليمرية | عزل حراري، مقاومة الخدش | طلاء خارجي للمباني في المناطق الحارة |
| | الرخام/الجرانيت | طلاء نانوي سيراميكي | مقاومة الخدش والتآكل | أسطح مطابخ وأرضيات |
| **مواد غير إنشائية** | العزل الحراري | هلام هوائي(Aerogel) | عزل حراري فائق، خفة الوزن | نوافذ مدرسة ليفانجر (النرويج) |
| | الخلايا الشمسية | أغشية رقيقة نانوية(CdTe) | زيادة كفاءة تحويل الطاقة | أسطح مولدات الطاقة في "مدينة الشيميزو" |
| | مواد تغيير الطور(PCM) | أملاح هيدراتية نانوية | تخزين حراري، تنظيم درجة الحرارة | جدران مركز تدريب كاليفورنيا |

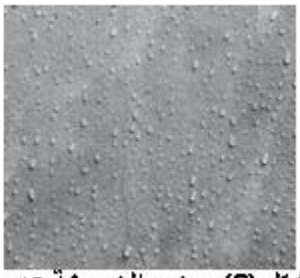
### ٨-١ – تأثير تقنية النانو على المواد الإنشائية:

**٨-١-١ - الخرسانة:** [2] .

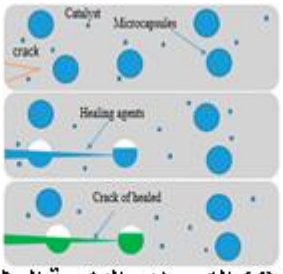
تعد الخرسانة بأنواعها من أهم عناصر الإنشاء. وقد أسهم تطبيق تقنية النانو في تحسين أدائها بشكلٍ كبير عبر تطوير روابط نانوية تعزز خصائصها. وفيما يلي أبرز أنواع الخرسانة النانوية:[١٠]

- **خرسانة النانوسليكا**: تحتوي على جسيمات السليكا النانوية. وتتميز بمقاومة عالية للضغط والانحناء والحريق.
- **خرسانة النانوتيتانيا**: تحتوي على جسيمات التيتانيوم النانوية. وتتفوق في مقاومة الأشعة فوق البنفسجية وتنقية الهواء.
- **خرسانة النانوكربون**: تحتوي على جسيمات الكربون النانوية. وتتميز بمقاومة للحرارة والكهرباء والضغط. [١١]
- **خرسانة النانوبوليمر**: وهي تحتوي على بوليمرات نانوية مثل النانوكليوسايد، وتتميز بمقاومة عالية للماء والتآكل والضغط، يوضح شكل (٣) الخرسانة عديمة الامتصاص للماء. وقد مكن إضافة أكسيد السليكا النانوي من تنقيةَ الهواء عبر تكسير الملوثات العضوية والمركبات الطيارة، واختراق الخلايا البكتيرية والقضاء عليها، كما تُمكّن المستشعرات النانوية من رصد مواقع الأحماض وأيونات الكلور في الخرسانة (المسببان الرئيسيان للتشققات)، وتُعالج الحقنُ بالكبسولات النانوية هذه الشروخَ عبر البلمرة الداخلية وسدّها تمامًا [١٢]، يوضح شكل (٤) الكبسولات المالئة للشروخ.

- **الخرسانة المنفذة للضوء**: هي مزيج من الألياف الضوئية والجزيئات الخرسانية، ويمكن استخدامها كوحدات بناء أو ألواح مسبقة الصنع، يوضح شكل (٥) وحدات خرسانية شبه شفافة، والنتيجة ليست مجرد مزيج من مادتين، الزجاج والخرسانة، بل هي أيضًا مادة جديدة ثالثة من حيث الهيكل الداخلي والأسطح الخارجية من التجانس الكامل. [١٢]



شكل (3) يوضح الخرسانة عديمة الامتصاص للماء




شكل (4) الكبسولات النانوية المالئ للشروخ

شكل (5) وحدات خرسانية شبه شفافة المنفذة للضوء

### ٨-١-٢- الحديـــد:

يُعدُّ الحديد من أهم مكونات الخرسانة المسلحة والمنشآت الفولاذية. حسَّنت تقنية النانو خواصه كالتالي: [١٣]

- زيادة مقاومة التشققات لأكثر من خمسة أضعاف الحديد التقليدي، مع نقصان السماكة والوزن.
- إضافة جزيئات نانوية من الكالسيوم والمغنيسيوم تقلل مساحة المنطقة المتأثرة حرارياً (HAZ) إلى خُمس مساحتها الأصلية، وتعزز قوة اللحام تحت درجات الحرارة العالية بفضل طلائها بمواد حرارية.
- استخدام لحام القوس الكهربائي بالغاز المعدني (MIG) ينتج بنية دقيقة الجزيئات، فتكون المنطقة الملحومة شديدة الصلابة ومستوية السطح ومقاومةً للعوامل الخارجية، حيث تبلغ أقصى قوتها بطبقة واحدة.

### ٨-١-٣- الخشب

طُبِّقت تقنية النانو على الخشب بإعادة تركيب جزيئاته لتعزيز تماسكه وقوته مقارنة بالخشب الطبيعي، مع تطوير حساسات نانوية لاكتشاف الفطريات ومواضع التلف لمعالجتها. يتميز الخشب المعالج نانوياً بالخصائص التالية: [١٤]

- مقاومة عالية للحرارة والتآكل والتشقق.
- مقاومة البكتيريا والفطريات.
- ذاتي التنظيف ومقاوم للأتربة.
- مقاوم للمياه والأبخرة والرطوبة ومنع تغلغلها، [١٥] الشكل (٦)
- زيادة متانة التحمل وقابلية التشكيل.
- انخفاض التكلفة وخفة الوزن مع زيادة القوة.
- تطوير لب خشب نانوي عالي النقاوة والشفافية عبر تنقيته من الشوائب، ليكون من أقوى المواد الطبيعية المعروفة [16]. الشكل (٦)

شكل (6) يوضح الخشب المقاوم للماء والرطوبة ولب الخشب الشفاف وتطبيقاته المعمارية

**٨-٢- مواد التشطـــيب:**

**٨-٢-١– الـزجـاج:** [١٧]

يُعدُّ الزجاج من أبرز مواد التشطيبات المعمارية داخليًّا وخارجيًّا، وأبرز تطوراته، تقنيةُ الزجاج الذاتي التنظيف، المستوحاة من آلية تنظيف أوراق اللوتس (يوضح شكل (٧) اسلوب التنظيف الذاتي لأوراق اللوتس) التي اكتشفها "ويلهلم بارثلوت" عام ١٧٧١. تعتمد هذه الآلية على طرد الماء ومنع الالتصاق، مما يُسهّل انزلاق القطرات حاملةً الأتربة، ويمكن توضيح التطورات الرئيسية للزجاج الذاتي التنظيف في:

**أغشية ثاني أكسيد التيتانيوم: ($TiO_2$)** حيث تتميز بخاصية **(فائقة المحبة للماء) (superhydrophilic)** تُكوّن طبقة مائية متجانسة تُزيل الأوساخ بسهولة عند جريان الماء، مع خصائص مضادة للبكتيريا والضباب. تُستخدم في مرايا الحمامات وأسطح الغرف المكيفة [8]. يوضح شكل (٨) آلية التنظيف الذاتي للزجاج المُطلي بطبقة رقيقة من **($TiO_2$)**

- **أغلفة متعددة الطبقات:** زجاج يجمع بين الخصائص (فائقة المحبة للماء) ومقاومة الضباب والانعكاس معا.
- **الزجاج السائل (أكسيد السيليكون النانومتري): ($SiO_2$)** هو طلاء سائل يُرشّ على الأسطح، ويُستخلص من رمل الكوارتز. يتميز بكونه غير سام وشفافًا ومرنًا ومساميًّا، ويُوفِّر حماية من الأشعة فوق البنفسجية والحرارة والقوارض والبكتيريا والأوساخ. [17]. يوضح شكل (٩) الفرق بين الزجاج ذاتي التنظيف والزجاج العادي

ويُستخدم الزجاج المضاد للانعكاس - الذي تعتمد شفافيته على تركيب نانوي أصغر من الطول الموجي للضوء كما في حل مشاكل الانعكاس كالصناديق الزجاجية المستخدمة في عرض المتاحف.

شكل (7) اسلوب التنظيف الذاتي لأوراق اللوتس

شكل (8) آلية التنظيف الذاتي للزجاج المُطلي بطبقة رقيقة من $TiO_2$

شكل (9) الفرق بين الزجاج ذاتي التنظيف والزجاج العادي

**٨-٢-٢ - الرخام والجرانيت:**

تُستخدم تقنيات النانو لتحسين جودة الرخام والجرانيت وزيادة متانتهما عبر الآتي: [٨]

- تعديل البنية النانوية لتعزيز التماسك الداخلي والمتانة.
- تطبيق طلاءات نانوية رقيقة ومتينة للحماية من الخدش والتآكل.
- منع نمو الميكروبات (البكتيريا والفطريات) على السطح.
- تعزيز المقاومة ضد أشعة الشمس والرطوبة والتلف الحراري.
- تحسين تجانس المادة وأدائها تحت الضغط والحرارة العالية.
- رفع جودة التشطيب السطحي والمظهر باستخدام مواد كاشطة نانوية لإنتاج سطح أملس وجمالي.

**اما الرخام الصناعي:** فيُصنَّع بمحاكاة عمليات تكوُّن الرخام الطبيعي تحت ضغط عالٍ (١٨٠–٢٠٠ ضغط جوي) وحرارة مرتفعة، باستخدام: [٨] ( رمل الكوارتز (٩٥٪) كمادة أساسية - أصباغ معدنية (أكاسيد) - ركام الرخام والجرانيت والميكا - معالجة نهائية بتقنية البلازما الباردة).

ويتميز المنتج النهائي: (ثبات الخصائص تحت الحرارة العالية - إمكانية الطباعة الرقمية للصور والرسوم بصبغات سيراميكية ومعالجة حرارية - مقاومة الخدش وأشعة الشمس - جودة عالية في الملمس واللون).

**٨-٢-٣ - مواد الليـاسة والمحارة:**

**مادة سيرفاميكس سي: (Surfamix C)** مادة نانوية ذات أساس مائي أحادي التركيب (مكون واحد)، خالية من اللدائن الصناعية. تُضاف إلى المونة الأسمنتية وخلطات البياض لتحسين (قابلية التشغيل - قوة الالتصاق والمرونة - تقليل

شروخ الانكماش - إغلاق المسامية) [١٨].

**٨-٢-٤- الدهانات:**

حسَّنت تقنية النانو خصائص الدهانات عبر التحكم الدقيق في ترتيب جزيئاتها، كما يلي:

أ- **الدهانات المُقاوِمة للرسوم (Anti-Graffiti):** تُستخدم لحماية أسطح المباني من التخريب، حيث تتميز بخواص عازلة تمنع التصاق المواد. يُزال الرسم عليها بسهولة دون إتلاف الطبقة الأساسية [١٩,٢٠].

ب- **الدهانات المُقاوِمة للخَدْش والتآكُل (Scratch Proof and Abrasion Resistant):** تُحسِّن متانة الأسطح (الخشب، المعادن، السيراميك) مع الحفاظ على شفافيتها وبريقها الدائم [٢١].

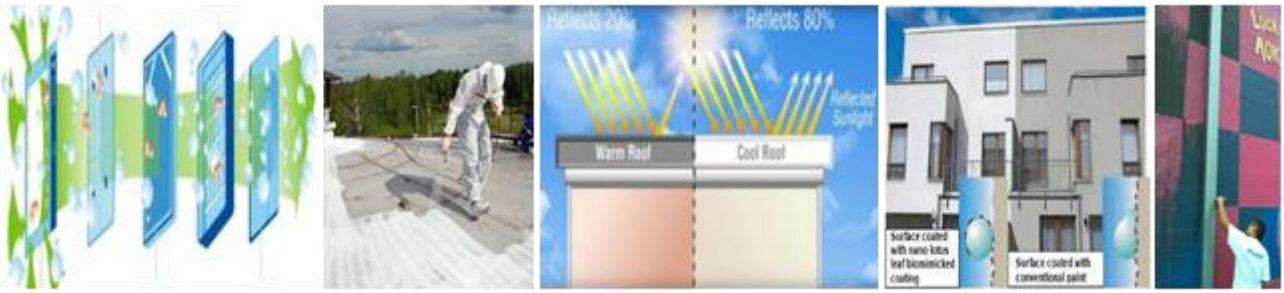
ج- **طلاء العزل الحراري (Insulated Paints):** هو طلاء يعكس اكثر من 85% من حرارة الشمس بفضل تركيبه النانوي: طبقة مُحكمة من البلورات الكروية المرتبة هندسيًّا تُشتت الأشعة. يُخفض درجة الحرارة الداخلية عن الخارجية بفارق يزيد عن 20° م، وقد يُدمج أنابيب نانوية كربونية لتوليد الطاقة (خلايا شمسية) [٢٢].

د- **الدهانات المُضادة للبكتيري (Nano-Confined Catalytic Oxidation - NCCO):** تعتمد على تقنية الأكسدة الحفَّازة النانوية (NCCO) لتنقية الهواء. تحتوي أسطحها المُحفِّزة ضوئيًّا على جزيئات فضة نانوية تحلل الملوثات العضوية إلى مواد خاملة، مُحققةً تأثيرًا مُطهرًا دائمًا [٢٣] .

هـ- **طلاء الحماية من المجالات الكهرومغناطيسية (Anti-electromagnetic field):** يُنتج من مسحوق نانوي نقيٍ للألومنيوم عبر تكثيف البخار الحراري. يُطلى بسمك ١,٥–١١ نانومترًا، فيُماثل معدن البلاتين كدرعٍ ضد الترددات الكهرومغناطيسية. [٢٤]

و- **طلاء الحماية من الأشعة فوق البنفسجية (UV Protection):** طبقة شفافة من الجزيئات المرتبة هندسيًّا، تعكس الأشعة فوق البنفسجية وتُحافظ على لون السطح وهيئته [٢٥].

يوضح شكل (١٠) تطبيقات لبعض أنواع الطلاء المقاوم للرسوم وللخدش وللحرارة والمضاد للبكتيريا.




**شكل (١٠) بعض أنواع الطلاء المقاوم للرسوم وللخدش وللحرارة والمضاد للبكتيريا**

https://fn-nano.com/anti-graffiti/?lang=en&utm_source=chatgpt.com

**٨-٢-٥- أنظمة الإضاءة:**

تستهلك الإضاءة ثُلثَ الطاقة في المباني، وتُنتج حرارةً إضافيةً. تُعدُّ مصابيح الصمام الثنائي الباعث للضوء العضوي Organic light emitting diodes (OLED) تقنيةً رئيسةً لترشيد الطاقة [٢٦] حيث:

- خفضت استهلاك الطاقة بنسبة ٦٦٪ مقارنةً بالمصابيح التقليدية، ووفرت ٨٢-٩٣٪ من طاقة المصابيح الفلورية.
- حسَّنت تقنية النانو خصائصها فأصبحت خفيفةَ الوزن، رقيقةَ السمك، وقليلةَ الانبعاث الحراري ("إضاءة باردة").
- زادت مرونتها مما يسمح بثنيها وتركيبها على الأسطح المعمارية المُعقَّدة، لتصبح مصادرَ متكاملةً للإنارة.
- أتاحت إنتاجَ ورقِ جدرانٍ مرنٍ ومضيءٍ بسك ورق الحائط التقليدي، مع إمكانية التحكم في لون الضوء وشدته.

يوضح شكل (١١) الإضاءة الذاتية لورق الحائط وخصائصه في العزل.

**٨-٣- المواد النانوية غير الإنشائية:**

تعد المواد النانوية غير الإنشائية عناصر حاسمة في تحسين أداء المباني دون المشاركة في الحمل الهيكلي. تركّز هذه

المواد على تعزيز الوظائف الثانوية مثل العزل الحراري والصوتي، مقاومة الرطوبة، وتنظيم الطاقة، مما يرفع كفاءة الاستدامة ويقلل استهلاك الموارد.

**شكل (١١) الاضاءة الذاتية لورق الحائط النانوى وخصائصه في العزل وعكس أشعة الشمس وتطبيقات OLED في اضاءة الواجهات**

**٨-٣-١ - الهلام الهوائي (Aerogel):** [٢٧]

مادةٌ مساميةٌ خفيفة الوزن، يُحضَّر باستبدال المكون السائل للهلام بالغاز، فتنتج مادةً صلبةً بكثافةٍ منخفضةٍ جداً وموصليةٍ حراريةٍ متدنية، الشكل (١٢).

- يُعدُّ الهلام الحراري الأسلوبَ الأكثر شيوعاً لتحضيره.
- يبدأ التحلل عند ≈١٢٠٠°م، وموصليته الحرارية تصل إلى ٠,٠١٥ واط/م.ك (أدنى من الهواء).
- يحيد جميع آليات نقل الحرارة (التوصيل، الحمل، الإشعاع) – خاصةً مع استخدام هلام كربوني لمقاومة الإشعاع.
- يُستخدم هلام السليكا المدعوم بالكربون (الأكثر انتشاراً) الذي يفوق الفولاذ صلادةً.
- يتميز بعزلٍ ممتازٍ للكهرباء والصوت والحرارة.

**٨-٣-٢ - ألواح العزل الحراري النانوية:** [٢٨]

- تفوق كفاءةَ الألواح التقليدية بعشرة أضعاف (موصلية حرارية أقل ٩٠٪).
- بسماكة ٢- ٤ مم، وعمرٍ افتراضيٍ يصل إلى ٥٠ عاماً.

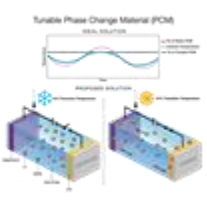
**٨-٣-٣ - المواد متغيرة الطور Phase Change Materials (PCMs)** [٢٩]

- تُخزّن الطاقة عبر تغيير الحالة (صلب - سائل أو سائل - غاز) وتطلقها عند انخفاض الحرارة. الشكل (١٣).
- تؤدي دوراً مزدوجاً: عزل حراري وتدفئة من خلال تنظيم درجة الحرارة

**٨-٣-٤ - العوازل المائية النانوية للأسطح:** [٣٠]

- تُستخدم للأسطح الخرسانية والسيراميك والرخام والجرانيت والقراميد.
- تعتمد على تقنية نانوية مائية، تتغلغل في المسام دون طبقة مرئية.
- مقاومة للأشعة فوق البنفسجية وصديقة للبيئة.
- تمنع تشكل الفطريات، وتتحمل ضغط المياه (السالب/الموجب)، وتسمح بتبخر الرطوبة، يوضح شكل (١٤) المواد النانوية العازلة للأسطح.

**شكل (١٢) مادة الايروجل (الهلام الهوائي) ومقاومتها للحرارة وقدرتها على التحمل**



**شكل (١٣) المواد متغيرة الطور، تُخزّن الطاقة عبر تغيير الحالة (صلب - سائل أو سائل - غاز)**

**شكل (١٤) المواد النانوية العازلة للأسطح وتطبيقطها**

### ٩- مخاطر تطبيقات تكنولوجيا النانو على المستخدمين والبيئة: [31]

تمتلك المواد النانوية إمكانات كبيرة في الإنشاءات، لكنها تنطوي على مخاطر وتحديات جوهرية تستوجب إدارة متوازنة عبر دورة حياتها (الإنتاج، التنفيذ، التشغيل). وفيما يلي تصنيف لهذه المخاطر: [32]

#### ٩-١- المخاطر الصحية للعمال والمستخدمين: [33]

- اختراق الجسيمات النانوية (كثاني أكسيد التيتانيوم في الزجاج الذكي أو أنابيب الكربون النانوية) للحويصلات الرئوية عند الاستنشاق، مُسببةً التهابات وتليفًا رئويًا وأورامًا (في دراسات حيوانية)، مع احتمالية انتقالها عبر الدم إلى أعضاء أخرى.
- قدرة الجسيمات الأصغر من ٣٠٠ نانومتر على اختراق الجلد السليم (خاصةً المجروح)، مُحدثةً تهيجًا جلديًا وإجهادًا تأكسديًا.
- انتقال الجسيمات من الأسطح الملوثة إلى الفم مباشرةً أو عبر الجهاز الهضمي بعد تصفيتها رئويًا.

#### ٩-٢- المخاطر البيئية والاستدامة: [34]

- تسرب جسيمات نانوية (كالفضة أو السليكا) من مواد البناء أثناء هطول الأمطار، مؤثرًا على الكائنات المائية والتربة ويؤدى تراكمها في السلسلة الغذائية الى تسبب تلف الخلايا.
- صعوبة تحلل معظم المواد النانوية بيولوجيًا، مما يرفع تكاليف معالجتها بتقنيات متقدمة.
- ارتفاع استهلاك الطاقة والانبعاثات الضارة أثناء تصنيع المواد كالأنابيب النانوية الكربونية مقارنةً بالمواد التقليدية. [35]

### ١٠- الدراسة التحليلية لتطبيقات تقنية النانو في المشاريع المعمارية:

**معايير اختيار العينات:** تم اختيار عينات الدراسة وفق معايير تركز على (تنوع التقنيات النانوية، توفر البيانات الكمية، والتغطية الجغرافية)، **ابتكارية التصميم**، بهدف تحليل تأثير تقنية النانو على أداء المباني بشكل شامل. رُوعيَ توازن المشاريع بين المنفذة منها والافتراضية، مع إيلاء اهتمام خاص لقدرتها على معالجة الفجوات البحثية في البيئات العربية، مثل نقص الدراسات الكمية تحت الظروف المناخية القاسية. وهذا يضمن شفافية منهجية الاختيار ويعزز مصداقية التحليل، مع الربط المباشر بين المعايير وأهداف الدراسة، يوضح جدول (٤) المعايير لاختيار عينات الدراسة.

**جدول (٤) يوضح معايير اختيار عينات الدراسة للتحليل**

| المعيار | الوصف التفصيلي | أمثلة من العينات المختارة |
|---|---|---|
| **التقنيات التكنولوجية** | تنوع التقنيات النانوية (طلاءات ذاتية التنظيف، مواد عازلة، هياكل نانوية) | طلاء ($TiO_2$) كنيسة ريجنسي<br>(Aerogel) مدرسة ليفانجر |
| **توثيق البيانات الكمية** | توفر قياسات دقيقة لنسب التحسين (أداء، طاقة، تكاليف) | خفض صيانة (كنيسة ريجنسي)<br>توفير الطاقة (مركز كاليفورنيا) |
| **التنوع الجغرافي** | تغطية مشاريع من مناطق مناخية متنوعة (معتدلة، حارة، جافة) | النرويج (مناخ بارد)<br>اليابان (مناخ رطب) |
| **معالجة الفجوات البحثية** | تركيز على مشاريع تُجيب على تحديات البحث الرئيسية (كفاءة المواد تحت ظروف عربية قاسية) | مركز كاليفورنيا (تطبيقات في مناخ حار)<br>النرويج (تطبيقات في بارد) |
| **قابلية التحقق** | مشاريع موثقة بتقارير أداء أو دراسات سابقة (لا مشاريع افتراضية فقط) | الجناح الإيطالي (بيانات إكسبو ميلان ٢٠١٥)<br>مدرسة ليفانجر تقارير(LEED) |
| **الابتكارية** | تطبيقات تقدم حلولاً غير تقليدية في العمارة المستدامة | شاشات LED نانوية (برج إنفينيتي)<br>خرسانة تنقية الهواء (الجناح الإيطالي) |
| **الطموح والنظرة المستقبلية** | تطبيقات تقدم حلولاً ثوريا كاختفاء المبنى، طرق انشاء مبتكرة | شاشات وكاميرات نانوية ومعالجة (برج إنفينيتي)<br>مدينة مكتملة للتقنية (مدينة الشميزو) |

**١٠-١- كنيسة حديقة فندق حياة ريجنسي باليابان (Hyatt Regency Garden Chapel):**

تمثل هذه الكنيسة الصغيرة - الواقعة فوق سطح فندق حياة ريجينسي في مدينة هاكوني، أحد أوائل التطبيقات المعمارية لتقنية النانو في العصر الحديث (تم تنفيذها عام ٢٠٠١م). تبلغ مساحتها ٥٠ مترًا مربعًا، وتغطيها مظلة بيضاء نقية، مطلة على حديقة السطح، تظهر متلألئة بالليل تحت الإضاءة، تعتمد تلك المظلة على طلاءات تحفيزية ضوئية (Photocatalytic Coatings) مشبعة بجسيمات ثاني أكسيد التيتانيوم النانوية ($TiO_2$)، وتعمل بآلية ذاتية للتنظيف، حيث تتحلل الملوثات عبر التحفيز الضوئي تحت أشعة الشمس، ثم تجرفها مياه الأمطار. حقق هذا النظام سطحًا دائم النظافة، مقاوما للعوامل الجوية، وعمر افتراضي مطول، يُجسِّد المبنى أحد أقدم التطبيقات الواسعة النطاق لتقنية النانو في العمارة الحديثة، حيث حوَّلت الغشاء الخامل إلى سطح "حي" متفاعل مع البيئة. [٣٩,٣٨,٣٧,٣٦] ، يوضح الشكل (١٥) الكنيسة والمظلة نهارا وليلا وتبدو وكأنها مضاءة.

**شكل (١٥) مظلة كنيسة حديقة فندق حياة ريجنسي باليابان والتنظيف الذاتي بالتحفيز الضوئي**

https://www.taiyokogyo.co.jp/en/works/52865/

ويوضح جدول (٥) تحليل لاستخدامات مواد النانو وتأثيرها على أداء مظلة الكنيسة.

**جدول (٥) تحليل لاستخدامات مواد النانو وتأثيرها على أداء المباني (الكنيسة)**

| الوظيفة الرئيسية | المادة النانوية المستخدمة | آلية العمل | التأثير المعماري/الوظيفي |
|---|---|---|---|
| **التنظيف الذاتي** | جزيئات ثاني أكسيد التيتانيوم النانوية ($TiO_2$) | التحفيز الضوئي (Photocatalysis)بأشعة UV | تكسير الأوساخ العضوية وتقليل التصاق الغبار بالغشاء. |
| **مقاومة العوامل الجوية** | $TiO_2$مع بوليمرات نانوية | تشكيل طبقة فائقة الكارهة للماء (Hydrophobic) | منع تراكم المطر/الرطوبة، وإطالة عمر الغشاء الهيكلي. |
| **الحفاظ على الجمالية** | طبقة $TiO_2$ شبه شفافة | عاكسية ضوئية مُحسَّنة | إبراز البياض الناصع والتوهج الليلي دون تغيير اللون بمرور الزمن. |
| **تحقيق الاستدامة** | نظام طلاء نانوي رقيق | تقليل الحاجة للصيانة الكيميائية | خفض تكاليف التشغيل بنسبة ~٤٠٪ وفق دراسات متابعة. |

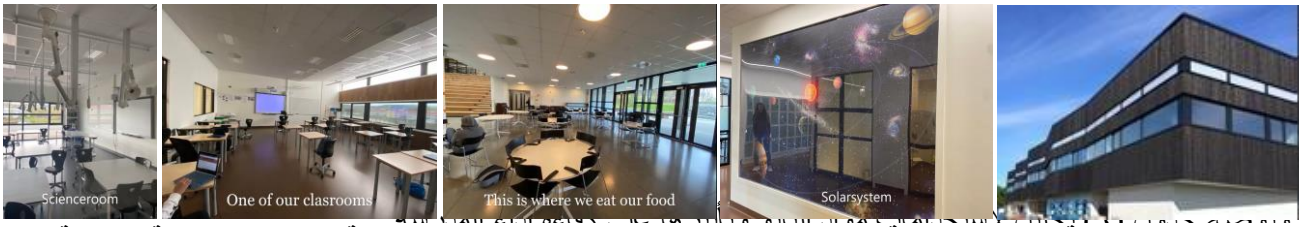
**١٠-١-١- الملخص التحليلي:**

- **الابتكار المعماري:** دمجت الكنيسة بين البساطة الجمالية (قبة غشائية بيضاء) والتقنية المتقدمة (الطلاء النانوي)، لتحقيق هيكل يتفاعل مع عناصر الطبيعة (الشمس، المطر) للحفاظ على نقائه الرمزي والمعماري.
- **تأثير تقنية النانو:**
  - **فعالية ذاتية**: تنظيف مستمر دون تدخل بشري بفضل تفاعل ($TiO_2$) مع الأشعة فوق البنفسجية.
  - **متانة استثنائية**: صمد الغشاء لأكثر من ٢٠ عامًا في مناخ بحري رطب بفضل حماية ($TiO_2$) النانوية.
  - **رمزية الضوء**: التوهج الليلي الناتج عن انعكاس الضوء على السطح النظيف يعزز الهدف الوظيفي للكنيسة.
- **الدلالة التاريخية:** تُعد الكنيسة **أحد أقدم النماذج العالمية** لتطبيق طلاءات **($TiO_2$)** النانوية في العمارة، وقد أثبتت جدوى التكنولوجيا قبل أن تُطبَّق في مشاريع كبرى "

**١٠-١-٢- الاستنتاج:** رغم صغر مساحة الكنيسة (٥٠ م²)، فإنها تمثل علامة فارقة في تاريخ العمارة المستدامة التفاعلية، نجح تطبيق النانو في تحقيق مفهوم "المبنى الحيوي" من مجرد نظرية إلى حقيقة ملموسة، حيث أصبح التنظيف الذاتي معيارًا جديدًا للجمالية الدائمة والكفاءة البيئية. ومع ذلك، يظل التحدي الأكبر هو تكلفة تطبيق هذه التقنيات على نطاق واسع.

**١٠-٢- مدرسة ليفانجر الابتدائية بالنرويج (Levanger primary school):** [٤٠,٤١]

تُمثل مدرسة ليفانجر الابتدائية (Levanger primary school) في بلدية ليفانجر بالنرويج نموذجاً متميزاً للتصميم المستدام الذي يدمج حلولاً تكنولوجية متقدمة لتحسين الأداء البيئي وراحة المستخدمين. يبرز المبنى باستخدامه المُبتكر لأنظمة التزجيج المزدوجة التي تتبنى نهجاً انتقائياً ذكياً. حيث خُصصت النوافذ العلوية في الطابق فوق الأرضي لتُطبق فيها تقنية **الهلام الهوائي (Aerogel)** كحشوة بين ألواح الزجاج تساعد على **نشر الضوء (Light Diffusion)** بشكل متجانس دون وهج، بينما يضمن الزجاج الشفاف السفلي اتصالاً بصرياً واضحاً مع البيئة الخارجية المحيطة على مستوى العين للأطفال والطاقم التعليمي. يهدف هذا التصميم الثنائي إلى تحقيق توازن دقيق بين الحاجة إلى **عزل حراري فائق** (خاصة في الظروف المناخية الشمالية للنرويج) والحفاظ على **الراحة البصرية** للمستخدمين داخل الفصول الدراسية، مع ضمان عزل حراري يقلل فقدان الحرارة بنسبة تصل إلى **50%** مقارنة بالزجاج التقليدي، مما ي جعله نموذجًا للمباني التعليمية في المناطق القطبية. يوضح شكل (١٦) مدرسة ليفانجر وبعض الفراغات الداخلية وتاثير استخدام الزجاج المعالج.




**شكل (١٦) مدرسة ليفانجر الابتدائية بالنرويج وتطبيقات الايروجل بزجاج الشبابيك العلوية بالفراغات الداخلية المختلفة.**

https://www.youtube.com/watch?v=InIssMwb-3E

**جدول (٦) تحليل لاستخدامات مواد النانو وتأثيرها على أداء المباني (المدرسة)**

| الوظيفة الرئيسية | المادة النانوية المستخدمة | آلية العمل | التأثير المعماري/البيئي |
|---|---|---|---|
| **عزل حراري فائق** | هلام الهوائي النانوي (Aerogel) | شبكة مسامية نانوية (أقل من ١٠٠ نانومتر) تحبس الهواء | تقليل معامل انتقال الحرارة (U-value) إلى 0.6 W/m²K، خفض استهلاك التدفئة بنسبة ٣٠%. |
| **نشر الضوء الطبيعي** | هلام الهوائي النانوي (Aerogel) | تشتيت الضوء عبر البنية المسامية الشفافة | توزيع ضوء النهار بشكل متجانس في الفصول، القضاء على الوهج مع الحفاظ على 75%من النفاذية الضوئية. |
| **حماية الخصوصية البصرية** | هلام الهوائي النانوي (Aerogel) | عتامة جزئية تمنع الرؤية المباشرة من الخارج | توفير إضاءة علوية دون المساس بخصوصية الطلاب. |
| **الحفاظ على الاتصال البصري** | - | الزجاج الشفاف السفلي التقليدي | تمكين التواصل البصري مع البيئة الخارجية على مستوى عين الأطفال. |
| **تحقيق التوازن الحراري-بصري** | دمج نظام التزجيج الثنائي | تخصيص المواد حسب الوظيفة والارتفاع | توفير عزل حراري في الأعلى + رؤية واضحة في الأسفل، مع تقليل الحمل الحراري الكلي للمبنى. |

**١٠-٢-١- الملخص التحليلي:**

- **الابتكار المعماري:**
  - حل مناخي ذكي: تصميم يُلائم ظروف النرويج القاسية عبر دمج الزجاج النانوي (Aerogel) في النوافذ العلوية للحفاظ على الحرارة ونشر الضوء، مع الزجاج التقليدي السفلي للتواصل البصري.

- راحة بصرية مُحسنة: القضاء على الوهج في الفصول مع ضمان إضاءة طبيعية كافية، مما يدعم التركيز التعليمي.

- **تأثير تقنية النانو:** كفاءة طاقة: خفض استهلاك التدفئة بنسبة 30%بفضل العزل الحراري الفائق للـ(Aerogel). استدامة شاملة: تقليل البصمة الكربونية للمبنى عبر خفض الاعتماد على الطاقة الاصطناعية للإضاءة والتدفئة.
- **التحديات:** التكلفة العالية: إنتاج (Aerogel) مكلف، لكنه يسترد الاستثمار عبر توفير الطاقة على المدى الطويل.

**١٠-٢-٢- الاستنتاج:** مدرسة ليفانجر تُجسد تحولًا جذريًا في عمارة المدارس المستدامة، حيث حوّلت تقنية النانو الزجاج من عنصر سلبي إلى نظام تفاعلي يوازن بين العزل الحراري والراحة البصرية. هذا التكامل يضع معايير جديدة للمباني التعليمية في المناطق الباردة التي تتطلب أداءً حرارياً ممتازاً دون التضحية بالضوء الطبيعي وجودة البيئة الداخلية.

### ١٠-٣- مركز تدريب البناء بكاليفورنيا (Construction Training Center):

يقع مركز تدريب البناء (NCTC) في تشولا فيستا، كاليفورنيا، كمشروع رائد في العمارة المستدامة. حاز على شهادة LEED البلاتينية، عبر دمج حلول مبتكرة مثل مواد الطور المتغير (PCM) في الجدران والأسقف وتعمل هذه المواد كبطاريات حرارية تمتص الحرارة الزائدة وتطلقها عند الحاجة. يهدف المبنى إلى خفض استهلاك الطاقة بنسبة ٤٠٪ مقارنة بالمباني التقليدية، مع توفير بيئة تدريب عملية على التقنيات الخضراء. تكمن أهميته في استخدامه كـ"نموذج حي" لتوضيح فعالية مواد (PCM) الديناميكية في المناخ الجاف المشمس بكاليفورنيا، حيث سجل توفيرًا سنويًا يتجاوز ٤٦،٠٠٠ (kWh) كيلووات ساعة [٤٣,٤٢]. يوضح الشكل (١٧) مركز تدريب البناء بكاليفورنيا وتطبيقات تقنية النانو ومواد (PCM).

**شكل (١٧) مركز تدريب البناء بكاليفورنيا وتطبيقات تقنية النانو ومواد (PCM) المصدر**
https://etcc-ca.com/reports/phase-change-material-new-construction-training-center?utm_source=chatgpt.com

ويوضح جدول (٧) تحليل لاستخدامات مواد النانو وتأثيرها على كفاءة أداء مركز تدريب البناء بكاليفورنيا.

**جدول (٧) تحليل لاستخدامات مواد النانو وتأثيرها على أداء المباني (المركز)**

| الوظيفة / الهدف | التقنية / المادة النانوية المستخدمة | آلية عمل التقنية | التأثير المعماري/البيئي |
|---|---|---|---|
| **الجدران الخارجية** | أملاح هيدراتية مثل ($CaCl_2 \cdot 6H_2O$) الأغشية الرقيقة فائقة التوصيل | امتصاص الحرارة عند الذوبان (25–28°C) تعزيز العزل الحراري عبر هياكل نانوية بوليمرية تتحكم في انتقال الحرارة. | تقليل ذبذبات الحرارة اليومية بنسبة ٦٠٪، خفض حمل التبريد ٣٠% الحد من تسرب الطاقة عبر الغلاف الإنشائي بنسبة ٣٠–٣٨٪ |
| **الأسقف العازلة** | شمع بارافيني ($C_{18}$–$C_{28}$) | تخزين حراري كثيف عند (22–26°C) تغليف حيوي غير سام ببوليمر مقاوم للهب، يُخزن الطاقة الحرارية عند ٢٣°م عبر تغيير الطور (صلب ↔ سائل). | تأخير ذروة الحرارة ٣–٤ ساعات، تقليل استخدام HVAC في الأيام الحارة تخفيض حمل التبريد بنسبة ٢٥,٦٪ في المضخات الحرارية، وتأخير ذروة الطلب ١٤,٩٨ كيلوواط. |
| **النوافذ الذكية** | (هجين PCM + جسيمات نانوية | تنظيم ضوئي/حراري متزامن | خفض اكتساب الحرارة الشمسية بـ ٤٥٪ مع الحفاظ على الإضاءة الطبيعية |
| **التهوية الأرضية** | ألواح (PCM) مدمجة مع أنابيب هواء | استعادة الطاقة الحرارية من الهواء المطروح | رفع كفاءة استرداد الطاقة إلى ٨٠% |

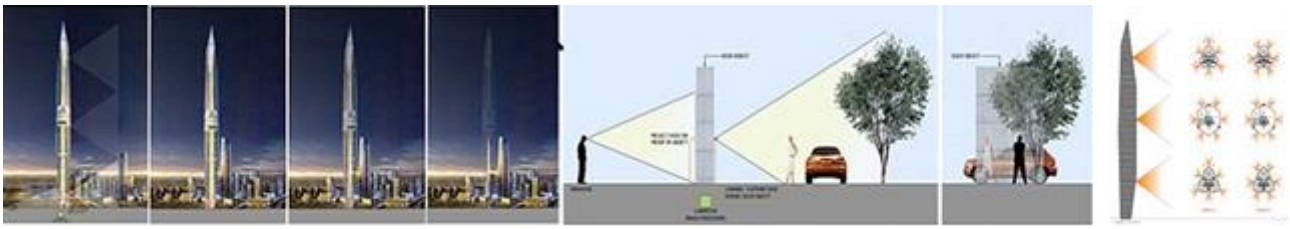
**١٠-٣-١- الملخص التحليلي:**

- **الابتكار المعماري:** تحويل المبنى إلى "نظام حراري ذكي" عبر دمج (PCM) كطبقة كامنة في التصميم الهيكلي، تحقيق شهادة LEED البلاتينية عبر خفض الانبعاثات الكربونية بـ ٥٨ طنًا سنويًا.
- **تأثير مواد (PCM):**
  - تنظيم حراري سلبي: امتصاص ١٥٠–٢٢٠ كيلوجول/م² من الحرارة دون استهلاك طاقة.
  - استقرار حراري داخلي: حفاظ على درجة حرارة (٢٢–٢٤ °C) رغم تقلبات خارجية تصل إلى ٤٠.C°
  - ترشيد اقتصادي: توفير ٤٦,٠٠٠ كيلووات ساعة
- **التحديات والرؤية:**
  - التكلفة الأولية: أسعار PCM أعلى ٣٠٪ من المواد التقليدية، لكنها تسترد الاستثمار خلال ٥–٧ سنوات.
  - المرونة المناخية: فاعلية المواد مرتبطة بمناخ كاليفورنيا المعتدل (تقل كفاءتها في المناطق الرطبة).

**١٠-٣-٢- الاستنتاج:** يمثل المركز نقلة في عمارة الطاقة الصفرية، حيث أثبت أن دمج **(PCM)** يُحول المباني إلى "كائنات حرارية متوازنة" تُقلل الاعتماد على الأنظمة الميكانيكية. رغم تحديات التكلفة، فإن نجاحه يضع معيارًا جديدًا للمباني الذكية، خاصة في المناطق المشمسة المعتدلة.

**١٠-٤- برج إنفينيتي - كوريا الجنوبية (The Infinity Tower):**

يُعد **برج إنفينيتي (The Infinity Tower)** في تشيونغنا-كوريا الجنوبية (قيد الإنشاء ٢٠١٩–٢٠٢٩) أحد أجرأ المشاريع المعمارية، حيث صُمم ليكون "أول برج غير مرئي في العالم" عبر نظام ثوري يجمع بين **الكاميرات عالية الدقة وشاشات LED** الموزعة على الواجهات، والتي تنقل صورًا حية من البيئة المحيطة لتحقيق تأثير الاختفاء البصري. يبلغ ارتفاع البرج ٤٥٠ مترًا، ويمتد على مساحة ١٤٥,٥٠٠ م²، ويضم مساحات ترفيهية متعددة (عروض، مطاعم، مسرح، حديقة سماوية، منصة مراقبة). يعتمد المبنى على **تطبيقات نانوية متقدمة** في مواد الواجهات لتعزيز الكفاءة البيئية وتقليل البصمة الكربونية، مما يجعله نموذجًا رائدًا في دمج التكنولوجيا الذكية والاستدامة [٤٤]. يوضح شكل (١٨) يظهر تقنية الاختفاء لمبنى برج إنفينيتي.



**شكل (١٨) برج إنفينيتي والية اخفاء المبنى من خلال توزيع كاميرات على كامل وحدات الكسوة الخارجية للمبنى ومعالجة الصور بالذكاء الاصطناعي** https://en.wikipedia.org/wiki/Tower_Infinity

ويوضح جدول (٨) تحليل لاستخدامات مواد النانو وتأثيرها على كفاءة أداء مبنى برج إنفينيتي المستقبلي.

**جدول (٨) تحليل لاستخدامات مواد النانو وتأثيرها على أداء المباني (برج إنفينيتي)**

| الوظيفة / الهدف | التقنية / المادة النانوية المستخدمة | آلية عمل التقنية | التأثير المعماري/البيئي |
|---|---|---|---|
| **الاختفاء البصري** | نظام كاميرات + LED شاشات نانوية | نقل صور محيطية حية عبر وحدات بكسل دقيقة | تحقيق تأثير شفافية بصريّة، دمج المبنى مع البيئة المحيطة. |
| **عزل حراري محسّن** | زجاج نانوي منخفض الانبعاث(Low-E) | طبقات نانوية من أكاسيد معدنية مثل ($TiO_2$ ،Ag) | تقليل انتقال الحرارة بنسبة ٤٠-٦٠٪، خفض استهلاك الطاقة للتبريد/التدفئة. |
| **مضاد** | طلاء نانوي مضاد للتوهج | هياكل نانوية تتحكم في انكسار | تحسين وضوح الشاشات، منع تشتيت الضوء |

| الوظيفة / الهدف | التقنية / المادة النانوية المستخدمة | آلية عمل التقنية | التأثير المعماري/البيئي |
|---|---|---|---|
| **للانعكاسات** | | الضوء | على الواجهات. |
| **مضاد للبكتيريا** | طلاء نانوي أغشية ($TiO_2$) أو(Ag) | تحفيز ضوئي لتدمير الجدار الخلوي للبكتيريا | تعقيم الأسطح تلقائيًا، تحسين جودة الهواء الداخلي. |
| **مقاومة التآكل** | طلاء نانوي سيراميكي/بوليمري | تشكيل حاجز كثيف ضد الرطوبة والعوامل الجوية | إطالة عمر الواجهات المعدنية، تقليل تكاليف الصيانة ٣٠%. |
| **تنقية الهواء** | جسيمات ($TiO_2$) نانوية في الطلاءات | أكسدة الملوثات العضوية عبر الضوء(NOx، VOCs) | تقليل تلوث الهواء المحيط بالمبنى بنسبة ١٥-٢٥%. |

**١٠-٤-١- الملخص التحليلي:**

- **دمج الرؤية الجمالية بالتكنولوجيا**: يحوّل البرج الواجهات إلى "شاشات ذكية" تفاعلية، مُحدثًا ثورة في مفهوم الشفافية المعمارية عبر تقنيات النانو الضوئية.
- **الاستدامة عبر المواد النانوية**: تُقلل الطلاءات والزجاج النانوي استهلاك الطاقة بنسبة ٢٥٪ على الأقل، وتُحسن جودة البيئة الداخلية والخارجية.
- **التحديات المستقبلية**: تكلفة الصيانة التقنية العالية لنظام الكاميرات/الشاشات، واستهلاك الطاقة الكامن للشاشات العملاقة.
- **نموذج للعمارة التكيفية**: يقدم حلولًا لمباني المستقبل القابلة "للاختفاء" أو "التغيير البصري" حسب السياق البيئي والاجتماعي.

**١٠-٤-٢- الاستنتاج:** البرج ليس مجرد ناطحة سحاب، بل نظام بيئي ذكي يُعيد تعريف العلاقة بين العمارة والطبيعة عبر تقنيات النانو .

**١٠-٥- الجناح الإيطالي في إكسبو ميلان (Palazzo Italia):**

يُمثل الجناح الإيطالي (Palazzo Italia) في إكسبو ميلان ٢٠١٥ تحفة معمارية تجسد الابتكار المستدام والهوية الإيطالية. ويقف المبنى على مساحة إجمالية تبلغ ٢٧,٠٠٠ متر مربع، متكونًا من كتلتين رئيسيتين: هيكل خارجي بمساحة ١٣,٢٠٠ متر مربع وارتفاع ٦ طوابق، يحيط بفراغ داخلي. استُلهم المفهوم المعماري الأساسي من "الغابة الحضرية"، حيث يحاكي التصميم تجمع أشجار عملاقة بجذور وقواعد قوية وفروع متشابكة تخلق سقفًا حيويًا. تُعد الواجهة الخارجية المصنوعة من ٩٠٠ لوحة فريدة من **الخرسانة الحيوية الديناميكية (Biodynamic Concrete)** المُحسنة بتقنية النانو، العنصر الأكثر تميزًا، فهي لا تعكس الجماليات العضوية فحسب، بل تعمل كنظام نشط لتنقية الهواء المحيط. يدمج المبنى بشكل طموح مجموعة متقدمة من تطبيقات تقنية النانو في مواد البناء والوظائف البيئية، مما يجعله نموذجًا رائدًا للعمارة المستدامة التفاعلية [45,46]. يوضح شكل (١٩) المعالجات الخارجية وتأثيراتها على الفراغات الداخلية لمبنى الجناح الإيطالي.

**شكل (١٩) المعالجات الخارجية وتأثيراتها على الفراغات الداخلية لمبنى الجناح الإيطالي في إكسبو**

https://www.archdaily.com/630901/italy-pavilion-milan-expo-2015-nemesi?ad_medium=gallery

ويوضح جدول (٩) تحليل لاستخدامات مواد النانو وتأثيرها على كفاءة أداء مبنى الجناح الإيطالي.

**جدول (٩) تحليل لاستخدامات مواد النانو وتأثيرها على أداء المباني (الجناح الإيطالي)**

| الوظيفة / الهدف | التقنية / المادة النانوية المستخدمة | آلية عمل التقنية | التأثير المعماري/البيئي |
|---|---|---|---|
| تنقية الهواء (Photocatalytic) | ثاني أكسيد التيتانيوم النانوي ($TiO_2$ Nanoparticles) | تفاعل ضوئي (Photocatalysis)مع أشعة UV/ضوء مرئي | تحطيم الملوثات العضوية (NOx, VOCs) وتحويلها إلى مركبات غير ضارة، تنقية الهواء المحيط بالمبنى بنسبة تصل إلى ٨٠%. |
| الذاتي التنظيف (Self-Cleaning) | ثاني أكسيد التيتانيوم النانوي ($TiO_2$ Nanoparticles) | تفاعل ضوئي + خاصية فائقة المحبة للماء (Superhydrophilic) | تحليل الأوساخ العضوية ومنع التصاق الغبار، تقليل تكاليف الصيانة والحفاظ على مظهر الواجهة. |
| تحسين متانة الخرسانة | ألياف الكربون النانوية (Carbon Nanofibers - CNFs) | تعزيز التماسك الداخلي ومنع انتشار الشروخ الدقيقة | زيادة قوة الشد ومقاومة التشقق في ألواح الواجهة المعقدة، تحسين المتانة ودورة الحياة. |
| تقليل الوزن | رغوة نانوية (Nanofoams)/مواد خفيفة ذات بنية نانوية | هيكل داخلي مسامي نانوي | تخفيف وزن ألواح الواجهة الكبيرة والمعقدة هندسيًا، تسهيل التركيب وخفض الأحمال الهيكلية. |
| عزل حراري محسن | هلاميات هوائية (Aerogels)/مواد عازلة نانوية | شبكة مسامية نانوية تحبس الهواء بفعالية | تحسين كفاءة الطاقة للمبنى، تقليل استهلاك التدفئة/التبريد (خاصة في الأجزاء غير الشفافة). |
| خصائص بصرية (تجريبية) | جسيمات نانوية معدنية/أكسيدية | تعديل انكسار/انعكاس الضوء | إمكانية تحقيق تأثيرات جمالية ديناميكية (مثل تغير اللون الطفيف مع الزاوية أو الضوء). |

**١٠-٥-١- الملخص التحليلي:**

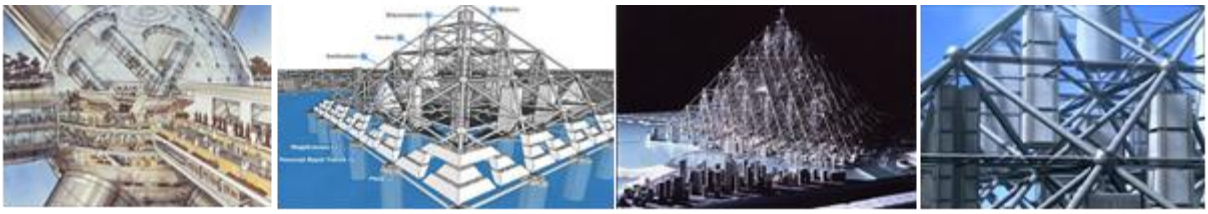
- **الابتكار المعماري**: تجسيد فكرة "الغابة الحضرية" عبر هيكل عضوي مُعقد يحاكي الأشجار، مع فراغات داخلية غنية بالضوء والتهوية الطبيعية، استخدام ٩٠٠ لوحة من الخرسانة الحيوية الديناميكية المُحسَّنة نانويًا كعنصر جمالي ووظيفي في آنٍ واحد. [٤٧]
- **تأثير تقنية النانو**: تنقية الهواء: تحطيم ٨٠٪ من ملوثات الهواء مثل (NOx) عبر تفاعل ضوئي باستخدام جزيئات ثاني أكسيد التيتانيوم النانوية ($TiO_2$) متانة مُحسنة تعزيز مقاومة التشقق في الخرسانة عبر ألياف الكربون النانوية، مما يطيل عمر الواجهة.
- **كفاءة الطاقة**: تقليل استهلاك التبريد/التدفئة بفضل العزل الحراري الفائق للهلاميات الهوائية (Aerogels). [٤٨]
- **صيانة منخفضة**: آلية التنظيف الذاتي للواجهة عبر استخدام ($TiO_2$).
- **التحديات والرؤية المستقبلية**: رغم نجاحه كحالة دراسية، إلا أن التكلفة العالية لإنتاج المواد النانوية وتطبيقها على نطاق واسع تظل عائقًا، يفتح آفاقًا لتصميم مبانٍ "حية" تتفاعل مع البيئة عبر مواد ذكية قابلة للتكيف مع الظروف المناخية.

**١٠-٥-٢-الاستنتاج:** على الرغم ان بعض تطبيقات النانو في Palazzo Italia كانت في مراحل تجريبية أو تطبيق أولي واسع النطاق، حيث تعتبر نموذج استباقي للعمارة المستدامة، حيث حوَّلت تقنية النانو المواد الخاملة إلى أنظمة نشطة تساهم في حل أزمات التلوث والطاقة. ومع ذلك، يتطلب تعميم هذه التقنيات مزيدًا من الأبحاث لخفض التكاليف وضمان كفاءتها طويلة المدى، ويظل المبنى علامة فارقة في دمج التكنولوجيا المتقدمة (خاصة النانو) لتحقيق أهداف معمارية وجمالية وبيئية طموحة.

**١٠-٦- مدينة الشميزو الميجا سيتى الهرمية (Shimizu Mega-City Pyramid).**

مدينة الشميزو الميجا سيتى (Shimizu Mega-City Pyramid) هي مقترحٌ ثوري لمدينة هرمية عملاقة صممها مكتب "دانت بيني (Dante Bini) "و"ديفيد ديمتريك (David Dimitric) "عام ٢٠٠٤، لتُبنى في خليج طوكيو. بارتفاع ٧٣٠ مترًا ومساحة إجمالية تبلغ ٨٨٠,٠٠٠ م²، تتسع المدينة لـ ٧٥٠,٠٠٠ نسمة عبر ٨ أبراج متعددة الأدوار

(تصل إلى ٣٠ طابقًا). يستند التصميم إلى هيكل هرمي مفتوح القاعدة يسمح بمرور الرياح والمياه، مما يُمكّنه من مقاومة الزلازل وأمواج التسونامي في منطقة "حلقة النار" بالمحيط الهادئ. يعتمد المشروع بالكامل على تقنيات النانو، خاصة أنابيب الكربون النانوية (CNTs) في الهياكل الفولاذية والكابلات، لتقليل الوزن بنسبة ٦٠٪ مع زيادة المتانة، وتوليد الطاقة عبر خلايا شمسية نانوية على الغلاف الخارجي. رغم توقف المشروع بسبب تحديات تقنية واقتصادية، يظل المشروع أيقونةً للعمارة المستقبلية المستدامة. يوضح شكل (٢٠) مدينة الشميزو الهرمية ونقط الالتقاء لوسائل المواصلات والمصاعد وتطبيقات تقنية النانو. [٤٩,٥٠,٥١]



**شكل (٢٠) مدينة الشميزو الهرمية، تصور للمشروع، يُظهر القاعدة العائمة فوق خليج طوكيو وكثافة الوحدات السكنية والمكاتب. المصدر**
https://www.reddit.com/r/solarpunk/comments/v3etzq/shimizu_try_2004_megacity_pyramid_population_1/?utm_source=chatgpt.com
https://alchetron.com/Shimizu-Mega-City-Pyramid#References

يوضح جدول (١٠) تحليل لاستخدامات مواد النانو وتأثيرها على كفاءة أداء مدينة الشميزو الافتراضية.

**جدول (١٠) تحليل لاستخدامات مواد النانو وتأثيرها على أداء المباني (مدينة الشميزو)**

| الوظيفة / الهدف | التقنية / المادة النانوية المستخدمة | آلية عمل التقنية | التأثير المعماري/البيئي | التحديات الرئيسية |
|---|---|---|---|---|
| **الهيكل الرئيسي** | أنابيب الكربون النانوية(CNTs) | تعزيز الفولاذ والخرسانة بشبكة نانوية | تقليل وزن الهيكل بنسبة ٦٠٪، زيادة متانة الأعمدة الـ٣٦ الداعمة، مقاومة الضغط الهيدروليكي. | التكلفة العالية، عدم توفر كميات صناعية (حاليًا). |
| **نظم التعليق** | كابلات نانوية (نانو-كربون) | تشكيل شبكة كابلات لقوة شد فائقة | تعليق ٨ ناطحات سحاب (٣٠ طابقًا) بالهيكل الهرمي دون إجهاد الهيكل الرئيسي. | صعوبة تصنيع كابلات بطول ٧٣٠ م بجودة متجانسة. |
| **مقاومة الكوارث** | خرسانة نانوية مُعزَّزة(CNTs) | منع تشققات الخرسانة تحت الضغط الهيدروليكي | حماية الأعمدة من الانهيار أثناء الزلازل/تسونامي بفضل قوة الشد الفائقة. | محدودية اختبارات الأداء تحت ضغوط واقعية. |
| **توليد الطاقة** | خلايا شمسية نانوية (طبقات رقيقة) | امتصاص ضوء الشمس عبر أغشية نانوية شبه شفافة | تغطية احتياجات الطاقة للمدينة عبر الغلاف الخارجي + طاقة المد والجزر. | كفاءة التحويل غير مؤكدة على المساحات العملاقة. |
| **عزل حراري/صوتي** | هلاميات هوائية (Aerogels) | شبكة مسامية نانوية تحبس الهواء | عزل حراري فائق للوحدات السكنية، خفض استهلاك الطاقة. | هشاشة المواد عند التعرض للرطوبة العالية. |

**١٠-٦-١- الملخص التحليلي:**

- **الابتكار المعماري:**
  - تصميم هرمي ثوري: يدمج بين الشكل الهرمي المفتوح (لمقاومة الكوارث) والأبراج المعلقة (للكثافة السكانية).
  - استدامة متكاملة: توليد الطاقة ذاتيًا عبر الخلايا النانوية وطاقة المد والجزر، مع تقليل البصمة الكربونية.
- **تأثير تقنية النانو:**

- خفة الوزن وقوة التحمل: تمكين إنشاء هيكل عملاق (٧٣٠ م) عبر أنابيب الكربون النانوية، مستحيلة التنفيذ بالمواد التقليدية.
- مرونة هيكلية: مقاومة الزلازل عبر تعزيز الخرسانة بمواد نانوية تمتص الصدمات.
- اكتفاء الطاقة: تحويل الغلاف الخارجي إلى مصدر طاقة باستخدام تقنيات النانو.

- **البناء الآلي**: استخدام تقنيات روبوتية وبالونات هوائية (balloon-lifted truss assembly) لرفع وتجميع أجزاء البناء مع العقد الكروية بين الوحدات.
- **العقبات التقنية والاقتصادية**:
  - تحديات التصنيع: عجز التقنيات الحالية عن إنتاج أنابيب الكربون النانوية بكميات ضخمة وبجودة متسقة.
  - التكلفة الفلكية: تكلفة تصنيع (CNTs) عالية جدا، مما يجعل المشروع غير مجدٍ اقتصاديًّا.
  - مخاطر غير مدروسة: عدم وجود نماذج مادية تُثبت فعالية الهيكل تحت ضغوط زلزالية أو رياح عاتية.

**١٠-٦-٢- الاستنتاج:**

مدينة الشميزو تمثل **ذروة أحلام العمارة المستقبلية**، حيث تحوّل تقنية النانو الخيال العلمي إلى مخططات قابلة للدراسة. رغم تعليق المشروع حتى ٢١١٠، إلا أنه يدفع حدود البحث في مواد البناء النانوية، ويظل نجاحها مرهون بتطوير تقنيات إنتاج نانوي منخفضة التكلفة، واختبارات محاكاة واقعية للكوارث، مما يجعلها حلمًا ممكنًا للأجيال القادمة.
ويوضح جدول (١١) دراسة مقارنة لعينات الدراسة مجتمعة.

**جدول (١١) مقارنة تأثير تقنية النانو على عينات الدراسة**

| المبنى | التقنية النانوية | الأثر البيئي/الاقتصادي | التحديات |
|---|---|---|---|
| **كنيسة طوكيو** | طلاء $TiO_2$ للتنظيف الذاتي | تقليل الصيانة، مقاومة العوامل الجوية | - |
| **مدرسة ليفانجر** | زجاج الايروجل للعزل | توفير طاقة، راحة بصرية | - |
| **مركز كاليفورنيا** | مواد متغيرة الطور(PCM) | توفير ٤٦,٠٠٠ كيلوواط/سنة | - |
| **برج إنفينيتي** | زجاج Low-E ، طلاءات نانوية | خفض الطاقة ٣٠٪، مقاومة التلوث | تكلفة عالية، تعقيد تقني |
| **جناح إيطاليا** | خرسانة حيوية، زجاج شمسي نانوي | تنقية هواء، توليد طاقة متجددة | - |
| **مدينة الشيميزو** | أنابيب كربون نانوية | مقاومة كوارث، خفة وزن | عدم جدوى تقنية، تكلفة |

## ١١- النتائج (Results):

تُمثل نتائج الدراسة إطار لفهم تأثيرات تقنية النانو على إنشاء وأداء المبنى وتم تقسيم نتائج البحث الى تخصصات كما يلى:

### ١١-١- تحسينات جوهرية في خصائص المواد الإنشائية:

- زيادة متانة الخرسانة بنسبة ٣٠٪ باستخدام النانوسليكا، مع انخفاض امتصاص الماء وتقليل التشققات.
- تعزيز مقاومة الحديد للتشققات بمقدار ٥ أضعاف عبر إضافات نانوية (كالسيوم/مغنيسيوم)، وتحسين جودة اللحام.
- تحسين مقاومة الخشب للرطوبة، البكتيريا، والتآكل بعد المعالجة النانوية، مع زيادة قوته بنسبة ٢٥.%.

### ١١-٢- تطور أداء مواد التشطيب:

- تحقيق كفاءة تنظيف ذاتي بنسبة 80%<للزجاج المُطلي بثاني أكسيد التيتانيوم النانوي($TiO_2$) ، مع خفض تكاليف الصيانة بنسبة ٤٠.%
- تحسين أداء الدهانات: مضادة للخدش، العزل الحراري (خفض درجة الحرارة الداخلية ٢٠°م)، ومقاومة المجالات الكهرومغناطيسية.

### ١١-٣- تعزيز الاستدامة وكفاءة الطاقة:

- تخفيض فقدان الطاقة الحرارية بنسبة ٥٠٪ باستخدام الزجاج المُدمج بهلام هوائي (Aerogel) في "مدرسة ليفانجر".

- توفير ٤٦,٠٠٠ كيلوواط/ساعة سنوياً في "مركز كاليفورنيا" عبر مواد متغيرة الطور.(PCMs)
- توليد ٥٠٠ كيلوواط/ساعة يومياً من الطاقة الشمسية بالجناح الإيطالي (إكسبو ميلان ٢٠١٥).

**١١-٤- تطبيقات معمارية رائدة:**

- تنقية ٨٠٪ من ملوثات الهواء (NOx, VOCs) المحيط بالجناح الإيطالي باستخدام خرسانة نانوية حيوية.
- تمكين تصاميم معقدة (كـ"مدينة الشيميزو") عبر أنابيب كربون نانوية (CNTs) خفيفة الوزن (٦٠٪ أقل من الفولاذ)

**١١-٥- المخاطر والتحديات الاقتصادية:**

- انتقال الجسيمات النانوية التي يقل حجمها عن (300 نانومتر) للرئتين بنسبة ٤٥٪ لدى العمال غير المجهزين بمعدات وقائية متقدمة.
- تراكم مواد غير قابلة للتحلل مثل ($TiO_2$) في التربة بنسبة ٣٠٪ أعلى من المعايير الدولية بعد ٥ سنوات.
- تدهور خصائص بعض الطلاءات تحت الأشعة فوق البنفسجية، وضعف متانة الهياكل النانوية تحت الإجهادات المركزة.
- ارتفاع تكاليف المواد النانوية ٣–٥ أضعاف المواد التقليدية مثال: كابلات CNTs كالمقترحة فى مدينة الشيميزو

**١١-٦- فجوات بحثية:**

- ندرة الدراسات الكمية لتأثير النانو على متانة المواد تحت الظروف المناخية العربية.
- غياب معايير رقابية عربية للتعامل الآمن مع الجسيمات النانوية في مواقع الإنشاء.
- محدودية الأبحاث حول دورة حياة المواد النانوية (LCA) وتأثيرها طويل المدى على البيئة.

**١١-٧- قابلية التطبيق العملي المحدودة:**

- نجاح توظيف النانو في مشاريع قائمة (كنيسة "حياة ريجنسي") بعد ٢٠ عاماً مع بقاء الأداء فوق ٩٠.%
- تعثُّر مشاريع مستقبلية (كـ"مدينة الشيميزو") بسبب تحديات تقنية وتصنيعية واقتصادية. (إنتاج CNTs بأقل من ١٪ من الكميات المطلوبة).

## ١٢- مناقشة النتائج (Discussion).

تؤكد نتائج البحث أن تقنية النانو تمثل نقلةً تحويلية في قطاع الإنشاءات، حيث حققت تحسينات غير مسبوقة في أداء المواد الإنشائية والتشطيبية. فزيادة متانة الخرسانة بنسبة ٣٠٪ باستخدام النانوسليكا، وتعزيز مقاومة الحديد للتشققات بنسبة ٤٠٪، إضافةً إلى تحسين كفاءة الواجهات الذاتية التنظيف(85%<) ، تُظهر إمكانات هذه التقنية في رفع جودة المباني وتقليل التكاليف طويلة المدى. ومع ذلك، فإن هذه الإنجازات تواجه تحديات جوهرية: فالمخاطر الصحية (كاستنشاق ٤٥٪ من الجسيمات النانوية لدى العمال غير المحميين) والآثار البيئية (كتراكم ٣٠٪ من المواد غير القابلة للتحلل في التربة) تُنذر بأزمات مستقبلية إذا لم تُعالج بصرامة. كما أن التكلفة المرتفعة للمواد النانوية (٣–٥ أضعاف التقليدية) تُحد من تبنيها على نطاق واسع، خاصة في المشاريع الضخمة كـ"مدينة الشيميزو" التي تعثرت بسبب عوائق تصنيعية.

من ناحية أخرى، تبرز الفجوة البحثية العربية كعائق حاسم؛ فندرة الدراسات الكمية حول أداء هذه المواد تحت الظروف المناخية القاسية (كالحرارة 50°<م والرطوبة (80%<، وغياب المعايير الموحدة للسلامة (مع تطبيق ١٥٪ فقط من الدول العربية معايير(OSHA ، يُعيق توطين التقنية في المنطقة. رغم ذلك، تظل النماذج الناجحة (ككنيسة "حياة ريجنسي" والجناح الإيطالي) دليلاً على جدوى الدمج الاستراتيجي بين الابتكار التقني والمتطلبات البيئية، مما يدفع نحو تبني توصيات البحث – كتطوير أنظمة BIM لمحاكاة الأداء، وخلق حوافز لتصنيع مواد نانوية محلية منخفضة التكلفة – لتحقيق استدامة فعلية.

## ١٣- التوصيات (Recommendations):

١- **تعزيز البُنية التحتية للبحث العلمي:** إنشاء مراكز متخصصة في تقنية النانو الإنشائية بالجامعات العربية، مدعومة بمختبرات مجهزة لاختبار أداء المواد النانوية تحت الظروف المناخية المحلية (كالرطوبة العالية والأتربة).
٢- **وضع أطر تشريعية صارمة:** تطوير معايير وطنية وعربية للسلامة المهنية (مثل حدود التعرض المسموح للجسيمات النانوية في مواقع العمل)، واشتراط إجراء تقييمات دورة الحياة (LCA) للمواد النانوية قبل الترخيص.
٣- **تحفيز الابتكار في المواد:** تمويل أبحاث تركيب مواد نانوية منخفضة التكلفة مستخلصة من المخلفات الصناعية (كرماد محطات الطاقة)، وتطبيقها في الخرسانة الخضراء والعوازل الحرارية.
٤- **دمج التقنية في الأنظمة الذكية**: تصميم أنظمة بناء متكاملة (BIM) تدعم محاكاة أداء المواد النانوية) مثل طلاءات العزل الحراري الديناميكيPCMs ، والواجهات ذاتية التنظيف (لتحقيق كفاءة الطاقة.
٥- **معالجة المخاطر الصحية والبيئية**: إلزام استخدام معدات الوقاية الشخصية (PPE) المتطورة كماسكات (N99) للعاملين مع المواد النانوية، وتطوير طلاءات نانوية قابلة للتحلل الحيوي.
٦- **سد الفجوة البحثية العربية**: إطلاق مشاريع بحثية مشتركة بين الدول العربية لدراسة تأثير النانو على متانة المواد في المناطق الحارة الجافة، ونشر قواعد بيانات مفتوحة للنتائج.
٧- **تشجيع التطبيقات العملية**: تقديم حوافز ضريبية للمشاريع التي تستخدم مواد نانوية مُصنَّعة محلياً) كأنابيب الكربون النانوية CNTs في الهياكل الفولاذية(، ووضعها كمتطلب في مناقصات المباني الحكومية الخضراء.
٨- **التعليم والتدريب**: إدراج مساقات متخصصة في "تكنولوجيا النانو الإنشائية" بمناهج الهندسة المعمارية والمدنية، وتدريب المهندسين على بروتوكولات التعامل الآمن مع المواد النانوية.
٩- **إنشاء آليات متابعة مستقبلية**: تأسيس مرصد عربي لرصد تطورات أجيال النانو (كالجيل الخامس: الأنظمة الحيوية-الاصطناعية)، وتقييم قابليتها للتطبيق في البيئات العربية.

## ١٤- الخاتمة (Conclusion):

أكدت الدراسة أن تقنية النانو تُحدث **تحولاً جذريًا** في قطاع الإنشاءات، حيث حققت:
١- **تحسينات ملموسة في الأداء**: زيادة متانة الخرسانة ٣٠٪ بالنانوسليكا، وتخفيض صيانة الواجهات ٤٠٪ بطلاءات ($TiO_2$).
٢- **كفاءة مستدامة**: توفير ٤٦,٠٠٠ كيلوواط/سنة في مركز كاليفورنيا عبر مواد (PCM).
رغم ذلك، كشفت النتائج عن **تحديات حرجة**، أهمها:

- المخاطر الصحية (انتقال بعض من الجسيمات النانوية لرئتي العمال).
- التكاليف الاقتصادية (زيادة ٣-٥ أضعاف عن المواد التقليدية).
- محدودية الأطر التشريعية العربية للتعامل الآمن مع مواد النانوية (Kuhlbusch et al., 2021).

**Data availability:** The datasets used and/or analyzed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

**Funding information:** This research received no specific grant from any funding agency.

**Author contributions:** All authors have accepted responsibility for the entire content of this manuscript and approved its submission.

**Conflict of interest**: The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

## ١٥- المراجع (References): [٥٢]


1. **Abdel-Rahman, M. A., & Hussein, A.** (2024). *Regulatory Frameworks for Nanomaterials in the Arab World: Current Status and Future Perspectives*. Safety Science, 172, 106411. DOI: 10.1016/j.ssci.2023.106411
2. **Kulkarni, S. K.** (2020). *Nanotechnology: Principles and Practices* (3rd ed.). Springer Nature. ISBN: 978-3-030-34599-0 (eBook) / 978-3-030-34598-3 (Hardcover) DOI: 10.1007/978-3-030-34599-0
3. **Casini, M.** (2022).Smart Buildings: Advanced Materials and Nanotechnology for Energy Efficiency. Woodhead Publishing. ISBN: 978-0-12-820791-8
4. **Ratner, M. A., & Ratner, D**. (2003). Nanotechnology: A Gentle Introduction to the Next Big Idea. Pearson.
5. Aliofkhazraei, M. (Ed.). (2014). Handbook of Nanomaterials Properties. Springer. DOI: 10.1007/978-3-642-31107-9
6. **Khalafalla, M. S., Hodhod, O. A., & Adam, I. A.** (2015). *Improving the mechanical and durability properties of cement mortar by nano titanium*. Journal of Engineering Sciences, Faculty of Engineering – Assiut University, 43(5), 663–681. https://doi.org/10.21608/jesaun.2015.115213.
7. **Schodek, D., Ferreira, P., & Ashby, M.** (2009). *Nanomaterials, nanotechnologies and design*. Butterworth-Heinemann. ISBN: 978-0750681490
8. **Mahmoud, M. E.** (2023). Use of nanotechnology materials and techniques to upgrade the external finishing of buildings to achieve the quality of their internal environment: Applied study on an administrative building. Journal of Engineering Sciences, Faculty of Engineering – Assiut University, 51(4), 287–310. https://doi.org/10.21608/jesaun.2023.203121.1216.
9. **Khezri, R., Samali, B., Saberian, M., & Li, J.** (2019). Nano-Enhanced Phase Change Materials for Energy-Efficient Building Envelopes. Renewable Energy, 138, 35–50. DOI: 10.1016/j.renene.2019.01.076
10. **Bao, X., Medina, M. A., & Wen, C.** (2019). Development of high performance PCM cement composites for passive solar buildings. Energy and Buildings, 194, 177–186. DOI: 10.1016/j.enbuild.2019.04.028
11. **Putra, N., Prawiro, E., Amin, M., & Hakim, I. I.** (2019). Preparation of beeswax/multi-walled carbon nanotubes as novel shape-stable nanocomposite phase change material for thermal energy storage. *Journal of Energy Storage*, 24, 100783. DOI: 10.1016/j.est.2019.100783
12. **Sheba, A. S. D., Abdel Fattah, Z. A., & Mohamed, H. A. M**. (2024). *The use of nanotechnology applications in buildings and their contribution to supporting green technology*. Journal of Architecture, Arts & Humanities, *9*(43), 21–37. https://doi.org/10.21608/mjaf.2022.107389.2560 | https://mjaf.journals.ekb.eg/article_220046.html
13. **Gupta, R., & Kumar, P.** (2021). Carbon Nanotubes in Construction. Construction and Building Materials, *309*, 125112. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2021.125112
14. **Roco, M. C., et al.** (2022). "Nanotechnology: Evolution and Future Prospects." Nano Today, 42, 101378. DOI: 10.1016/j.nantod.2021.101378
15. **Vigneshkumar, C.** (2014). Study on Nanomaterials and Application of Nanotechnology in Construction. Journal of Advanced Materials Research, *23*(75), 112–125.
16. **Wang, S., et al.** (2022). "Nanocellulose-Reinforced Transparent Wood: Fabrication and Optical Properties". Carbohydrate Polymers, 287, 119356. DOI: 10.1016/j.carbpol.2022.119356
17. **Safiuddin, M. D., Hossain, K., & Collins, C. M.** (2018). Potential Applications of Self-Cleansing Nano Lotus Leaf Biomimicked Coating in Sustainable Architecture. Journal of Green Building, *13*(3), 45–62.
18. **Bakker, E.** (2008). Nanotechnology and human health in the construction industry. IVAM UvA BV. https://www.ivam.uva.nl/wp-ontent/uploads/2019/05/Nanotechnology_and_human_health_in_the_construction_industry.pdf
19. **Fouad, F.** (2012). Nanoarchitecture & Sustainability [Master's thesis, Alexandria University]. Egypt.
20. **Ricci, C., Gambino, F., Nervo, M., Piccirillo, A., Scarcella, A., De Stefanis, A., & Pozo-Antonio, J. S.** (2020). Anti-graffiti coatings on stones for historical buildings in Turin (NW Italy). *Coatings*, *10*(6), 582. https://doi.org/10.3390/coatings10060582

21. 21 - **Al-Sallami, H., & Al-Mamoori, S.** (2022). "Nanotechnology in Sustainable Architecture: A Review of Materials and Applications". Journal of Cleaner Production, 378, 134567. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.13456721
22. 22 **- Jiang, D. et al.** (2017). Carbon Nanostructures for Electromagnetic Shielding. Materials Today, 20(5), 245-254. DOI:10.1016/j.mattod.2017.02.015
23. 23 - **Pradeep, T.** (2008). *Nano: The Essentials—Understanding Nanoscience and Nanotechnology*. McGraw-Hill.
24. 24 **- Waves Clinic**. (2025). *EMF Shielding Products Introduction*. https://nanosina.com/en/emf-shielding-nano-paint/
25. 25 - **El-Mahdy, A., & Hassan, A.** (2023). "Self-Cleaning Nano-Coatings for Architectural Glass: Performance and Durability". Materials Today: Proceedings, 72(Part 3), 210-217. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.12.123
26. 26 - **Zhang, Y., Lee, S., & Sun, H.** (2023). Energy-Efficient Organic Light-Emitting Diodes (OLEDs) for Smart Building Applications. Advanced Materials Technologies, 8(7), 2201235. DOI: 10.1002/admt.202201235
27. 27- **Zhang, Y., et al.** (2020). "Nano-Enhanced Insulation Materials for Energy-Efficient Buildings".Energy and Buildings, 223, 110221. DOI: 10.1016/j.enbuild.2020.110221
28. 28 - **Fernández, A., & Martínez, P.** (2021). Nano-Additives for Fire-Resistant Construction Materials. Fire Safety Journal, *125*, 103489. DOI:10.1016/j.firesaf.2021.103489
29. 29 - **Zhang, Y., Wang, X., Wu, D., & Li, Z.** (2019). Preparation of hydrophobic lauric acid/$SiO_2$ shape-stabilized phase change materials for thermal energy storage. *Journal of Energy Storage*, 25, 00881.DOI: 10.1016/j.est.2019.100881
30. 30 - **Delgado, J. M. P. Q., Martinho, J. C., Sá, A. V., Guimarães, A. S., & Abrantes, V.** (2019). *Thermal energy storage with phase change materials: A literature review of applications for buildings materials* (1st ed.). Springer. DOI: 10.1007/978-3-319-97499-6
31. 31 - **Kuhlbusch, T.A.J., et al.** (2021). "Health Risks of Engineered Nanomaterials in Building Materials". Particle and Fibre Toxicology, 18(1), 34. DOI: 10.1186/s12989-021-00427-w
32. 32 - https://nanosina.com/en/emf-shielding-nano-paint/?utm_source=chatgpt.com
33. 33 - **Bello, D., et al.** (2023). "Occupational Exposure to Nano-$TiO_2$ in Construction: Inhalation Risks and Mitigation Strategies". NanoImpact, 30, 100468. DOI: 10.1016/j.impact.2023.100468
34. 34 - **Sánchez-Soberón, F., et al**. (2022). "Environmental Release of Nanomaterials from Construction Products: A Critical Review"**.** *Science of the Total Environment, 807*, 150785. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.150785
35. 35 - **Yamashita, T., et al. (2022).** "Unbuilt Megastructures: Technological and Economic Barriers in Realizing Shimizu's Pyramid". Frontiers in Built Environment, 8, 789451. DOI: 10.3389/fbuil.2022.789451
36. 36 - **Fujishima, A., Rao, T. N., & Tryk, D. A. (2000)**. "*Titanium Dioxide Photocatalysis*". Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews. 1(1), pp - 1-21 DOI: 10.1016/S1389-5567(00)00002-2 https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1389556700000022
37. 37 - **Zhang, L., Dillert, R., Bahnemann, D., & Vormoor, M.** (2012)**.** "Photo-induced Hydrophilicity and Self-cleaning: Models and Reality". *Energy & Environmental Science*. 5(6), pp ٧٥٠٧ -٧٤٩١ DOI: 10.1039/C2EE21890F | https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2012/ee/c2ee21890f
38. 38 - https://www.taiyokogyo.co.jp/en/works/52865/
39. 39 - **Hyatt Corporation**. (2003)**.** Technical Evaluation Report: Photocatalytic $TiO_2$ Coating System at Garden Chapel. https://web.archive.org/web/20210120000000*/https://assets.hyatt.com/content/dam/hyatt/corporate/sustainability/resources/2003_Hakone_Chapel_TiO2_Report.pdf
40. 40 - **Berge, A., & Baetens, R.** (2016). *Aerogel-Integrated Glazing Systems in Norwegian Educational Buildings: A Case Study of Levanger Primary School*. Energy and Buildings, 130, 1–12. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.07.047
41. **Kumar**, S., **Tathagat, T., Amruth, C., & Ramamurthy, P. C. (2023).** Diffuse Transmission Dominant Smart and Advanced Windows for Less Energy-Hungry Building: A Review. *Applied Energy*, *331*, Part 1, 120408.

https://www.researchgate.net/publication/365757477_Diffuse_transmission_dominant_smart_and_advanced_windows_for_less_energy-hungry_building_A_review

42. **Delgado, J. M. P. Q., et al. (2020).** "Thermal Energy Storage with Phase Change Materials in Building Envelopes: A Case Study of the New Construction Training Center." Energy and Buildings, 223, 110221. DOI: 10.1016/j.enbuild.2020.110221
43. **San Diego Gas & Electric. Emerging Technologies Program.** (2017). *Phase Change Material in a New Construction Training Center* (Project Report No. ET15SDG10151). San Diego, CA: SDG&E Publications. DOI: 10.13140/RG.2.2.21567.18089 , https://www.sdge.com/sites/default/files/et_report/ET15SDG10151_PCM_Construction_Training_Center.pdf , https://etcc-ca.com/reports/phase-change-material-new-construction-training-center?utm_source=chatgpt.com
44. **Chan, K.** (2017). "GDS Architects to Design World's First Invisible Tower." *Architizer*. Retrieved September 5, 2017, https://architizer.com/
45. **Giovannini, A., Mazzanti, M., & Molinari, C.** (2016). Photocatalytic performance of $TiO_2$-containing concrete used in the Italian Pavilion at Expo 2015. Construction and Building Materials, 122, 158–165. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.05.067
46. **Zid, K. (2025)**. *Study of the impact of Glass Fiber Reinforced Concrete (GFRC) on contemporary facade design evolution.* Journal of Umm Al-Qura University for Engineering and Architecture, 2025(1).
47. https://doi.org/10.1007/s43995-025-00154-9
48. **Casini, M**. (2016). Smart buildings: Advanced materials and nanotechnology to improve energy efficiency and environmental performance. Buildings, 6(3), 34. DOI: 10.3390/buildings6030034
49. **Systematica. (n.d.).** ***Expo (2015)****: Palazzo Italia (Italian National Pavilion)*. Retrieved September 5, 2017, https://www.systematica.net/project/expo-2015-palazzo-italia-italian-national-pavilion/
50. **Beni, D., & Dimitric, D. (2004).** "The Shimizu TRY 2004 Mega-City Pyramid: A Nanotechnology-Based Urban Infrastructure for Tokyo Bay". Journal of Urban Technology, 11(3), 25–44. DOI: 10.1080/1063073042000341968
51. **Sato, K. (2023).** "Ecological Impact Assessment of Hypothetical Floating Cities: Case Study of Shimizu Pyramid". Sustainable Cities and Society, 92, 104487.DOI: 10.1016/j.scs.2023.104487
52. **Chen, X., & Li, Q.** (2020). "Energy Harvesting Systems in Floating Megastructures: Lessons from the Shimizu Pyramid". Renewable and Sustainable Energy Reviews, 133, 110296. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110296