



Analytical Review of Nanocomposites: Integrating Multiscale Modeling, Micromechanics, and Nanoparticle Synthesis Kinetics with an Investigation into Matrix Effects on Mechanical Performance in Advanced Applications

Mohammad Khakbaz^{*1} , Mahdi Daboui¹

1. Ph.D Student, Department of Aerospace Engineering, Shahid Sattari University of Aeronautical Sciences and Technology, Tehran, Iran

Abstract

Due to their unique mechanical, electrical, and thermal properties, nanomaterials have secured a special position in materials science and advanced industrial applications. In this review article, nanomaterials are classified into four categories zero, one, two, and three-dimensional based on their structural dimensions, and their mechanical behavior in the form of nanocomposites has been investigated. The primary focus is on carbon nanomaterials, including graphene and single-walled and multi-walled carbon nanotubes, as well as ceramic and magnetic nanomaterials such as TiO_2 , Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_3O_4 , and Fe_2O_3 . Mechanical properties, including Young's modulus, shear modulus, and Poisson's ratio, along with the elastic stiffness components of the matrix, have been analyzed within the framework of analytical and micromechanical models. In particular, the rule of mixtures and the Halpin–Tsai model have been employed to predict the elastic behavior of nanocomposites, and the effects of parameters such as volume fraction, orientation, aspect ratio, and nanoparticle dispersion quality have been evaluated. Additionally, synthesis methods including sol–gel, co-precipitation, and chemical vapor deposition (CVD) have been examined regarding their impact on particle size, morphology, and uniformity. Study results indicate that optimizing the interfacial structure and the uniform distribution of nanophases leads to an increase in the Young's modulus, tensile strength, and hardness of the composite. Furthermore, accounting for nano-scale effects and modifying classical models with multi-scale approaches significantly increases the accuracy of predicting elastic behavior. Finally, industrial applications in wear-resistant coatings, magnetic sensors, electromechanical systems, and aerospace industries are reviewed, and the existing challenges in dispersion and multi-scale modeling are analyzed.

Keywords

Nanomaterials
Matrix Effects
Halpin–Tsai Model
Synthesis Methods
Mechanical Applications

Received: 02.12.2025

Revised: 27.02.2026

Accepted: 23.05.2026

*Corresponding Author

Mohammad Khakbaz

Email

Mohammadkhakbaz.eng@gmail.com

1- Introduction

In recent decades, the emergence of nanomaterials has triggered a fundamental revolution in materials science, facilitating widespread applications across various industries. Single-walled and multi-walled carbon nanotubes (CNTs), as key components of nanotechnology, have been synthesized on silver electrodes and silicon wafers using chemical vapor

deposition (CVD) and plasma-enhanced chemical vapor deposition (PECVD) methods, with growth parameters such as temperature, gas flow, and reaction time meticulously optimized. The resulting Ag-CNT electrodes, characterized by SEM and DC differential electrolytic potentiometry, demonstrated robust natural behavior and high

Cite this Article:

[1] M. Khakbaz and M. Daboui, "Analytical Review of Nanocomposites: Integrating Multiscale Modeling, Micromechanics, and Nanoparticle Synthesis Kinetics with an Investigation into Matrix Effects on Mechanical Performance in Advanced Applications," *Science and Technology in Mechanical Engineering*, Vol. 5, No. 1, pp. 327–361, 2026. [Online]. Available: <https://doi.org/10.22034/stme.2026.563281.1190> (in Persian)



©2026 the authors. Published by Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC License) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

E-ISSN: 2981-2232

sensitivity to ions, in contrast to the irregular performance of conventional silver electrodes. Computational studies and CFD simulations, utilizing gas-phase and surface models, have successfully predicted growth rates and nanotube coverage, showing strong agreement with experimental data and confirming the viability of these nanotubes as precise and stable nanosensors [1–3]. Beyond their role in nanosensors, carbon nanotubes exhibit significant potential in conductive high-strength composites, energy storage and conversion devices, displays, hydrogen storage media, and nanometric semiconductor devices. Nevertheless, challenges such as high costs, dispersion issues, and processing limitations remain obstacles to certain applications. Their exceptional mechanical properties have made them a preferred reinforcement phase in composites and polymers, leading to substantial improvements in Young's modulus, strength, and toughness [4, 5]. Nano-based materials and coatings, particularly anti-corrosion nanocoatings, provide high efficiency and durability through specific functional classifications and structural interactions. For instance, epoxy composites reinforced with ZnO nanoparticles exhibit favorable mechanical properties, high adhesion, and excellent corrosion resistance, making them suitable for a wide range of applications, including anti-corrosion coatings, UV protection, adhesives, and electronics and construction industries [6, 7]. In this context, the objective of this review is to identify and analyze existing research gaps in the field of nanomaterials and functional nanocomposites for industrial coatings. Despite extensive progress in synthesis and application, a comprehensive understanding of the relationship between structure, synthesis method, and the mechanical response of multiphase systems has not been fully established.

This study focuses on classifying nanomaterials based on structural dimensions and reinforcement phase types, providing a comparative analysis of common synthesis methods including sol-gel, co-precipitation, and CVD and evaluating their effects on microstructure, distribution, and interphase adhesion within polymer, metal, and ceramic

matrices. Additionally, by reviewing mechanical and microstructural models such as the rule of mixtures, Halpin-Tsai models, and size-dependent theories, an effort is made to establish a quantitative relationship between microstructural parameters, matrix properties, and the elastic-plastic behavior of nanocomposites. The innovation of this research lies in the integration of mechanical and synthetic perspectives, with a specific focus on interphase effects and stress transfer behavior at the nanoscale areas previously addressed only in fragmented or inconsistent manners. Consequently, this article aims to provide an analytical framework for the design of nanostructured coatings with multifunctional mechanical properties and stability. By addressing challenges such as nanoparticle dispersion, phase heterogeneity, and the limitations of multiscale modeling, it outlines future research pathways to improve the performance, durability, and industrial scalability of nanocomposites.

2- Comparative Analysis of Elastic and Mechanical Behavior

A comprehensive comparison of nanomaterials shows that the mechanical properties of composites are strongly governed by the type of nanomaterial, interfacial adhesion, and crystallographic compatibility with the matrix. Among all classes, carbon-based nanomaterials such as graphene, single-walled carbon nanotubes (SWCNTs), and multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) provide the most significant improvements in stiffness and tensile strength. Graphene, with an elastic modulus in the range of 1000–1300 GPa and tensile strength of about 130–150 GPa, exhibits some of the highest mechanical properties ever reported, and even at volume fractions below 2%, graphene or SWCNTs can increase the modulus of polymer matrices by 35 times. Graphene oxide (GO), due to functional groups and weaker bonding, shows a lower modulus of 200–300 GPa and a softer elastic response, while reduced graphene oxide (rGO) can recover modulus values up to about 800 GPa through partial restoration of its lattice structure. Similarly, SWCNTs display a modulus near 1000 GPa and tensile strength of 150–200 GPa, often showing strongly nonlinear reinforcement behavior that is

commonly described by Halpin–Tsai-type models. MWCNTs, with modulus values ranging from about 100 to 1000 GPa, provide moderate reinforcement but superior resistance to buckling. In contrast, ceramic nanomaterials such as TiO_2 , ZrO_2 , and Al_2O_3 mainly contribute to hardness and thermal stability. TiO_2 and ZrO_2 offer modulus values of about 300–400 GPa and 200–230 GPa, respectively, while Al_2O_3 , with a modulus near 350 GPa, provides a balanced combination of stiffness and stability. However, the high brittleness and very low failure strain of ceramics limit their use mainly to thermal and protective coating applications. Metallic nanomaterials such as gold and silver, with relatively low modulus values of about 78–90 GPa, generally improve toughness and ductility rather than stiffness. Iron oxides, including Fe_2O_3 and Fe_3O_4 , exhibit modulus values of around 180–300 GPa, but because of their magnetic nature and typically weak adhesion to polymer matrices, they often reduce tensile strength and increase temperature-dependent creep. Nevertheless, in hybrid systems containing graphene or rGO, Fe_3O_4 may enhance thermal stability through combined magnetic and copolymeric effects. From the standpoint of instability and time-dependent deformation, carbon nanomaterials show outstanding buckling resistance because of their very high modulus-to-density ratio, while creep in these systems is usually negligible and dominated by the matrix. By contrast, ceramics are more prone to high-temperature creep and local brittle failure, whereas metallic nanomaterials may exhibit diffusion-controlled deformation. Overall, the comparative analysis indicates that graphene and SWCNTs are the most effective nanofillers for improving longitudinal and shear moduli, ceramics act mainly as thermally stable secondary reinforcements, and Fe_3O_4 can contribute meaningfully only when strong interfacial bonding with the matrix is achieved.

3- Conclusion of Results

Nanomaterials and nanocomposites represent a transformative frontier in materials science, offering exceptional mechanical, thermal, and electrical properties for advanced functional

applications. This review demonstrates that the mechanical performance of nanocomposites is a complex function of nanoparticle characteristics, matrix properties, interfacial dynamics, and spatial distribution. While classical analytical models like the Rule of Mixtures provide preliminary estimations, they fail to account for nanoscale heterogeneities. Conversely, the Halpin–Tsai model incorporating aspect ratios and orientation alongside tri-phase micromechanical analyses, provides a superior framework for predicting elastic behavior, stress transfer, and fracture toughness. Carbon-based nanofillers (Graphene, GO, rGO, SWCNTs, MWCNTs) are identified as the most effective reinforcements for enhancing stiffness and tensile strength, provided that uniform dispersion is achieved to prevent agglomeration. In contrast, ceramic (TiO_2 , ZnO , Al_2O_3 , ZrO_2) and magnetic nanoparticles (Fe_2O_3 , Fe_3O_4) are pivotal for thermal stability, wear resistance, and multifunctional performance. The study emphasizes that interphase engineering specifically the optimization of chemical adhesion is critical for overcoming the limitations of conventional matrix-dominated behavior, such as creep and brittle failure. Synthesis techniques, including sol–gel, co-precipitation, and

CVD, are essential for controlling particle morphology and distribution, which in turn dictates the structural integrity of the final composite. Integrating experimental data with multiscale modeling offers a robust pathway for the targeted design of high-performance materials tailored for sectors such as aerospace, electromechanical systems, and advanced biomedical coatings. Future research should prioritize the development of frameworks to simulate particle agglomeration, the functionalization of interphase regions, and the design of multifunctional, scalable smart composites, thereby bridging the gap between theoretical modeling and industrial-scale implementation.

4- References

- [1] S. Iijima, "Helical microtubules of graphitic carbon," *Nature*, Vol. 354, No. 6348, pp. 56–58, 1991, DOI: [10.1038/354056a0](https://doi.org/10.1038/354056a0).

-
- [2] K. S. Novoselov et al., "Electric field effect in atomically thin carbon films," *Science*, Vol. 306, No. 5696, pp. 666–669, 2004, DOI: [10.1126/science.1102896](https://doi.org/10.1126/science.1102896).
- [3] P. M. Ajayan, "Nanotubes from carbon," *Chemical Reviews*, Vol. 99, No. 7, pp. 1787–1800, 1999, DOI: [10.1021/cr970102g](https://doi.org/10.1021/cr970102g).
- [4] R. H. Baughman, A. A. Zakhidov, and W. A. De Heer, "Carbon nanotubes--the route toward applications," *Science*, Vol. 297, No. 5582, pp. 787–792, 2002, DOI: [10.1126/science.1060928](https://doi.org/10.1126/science.1060928).
- [5] J. N. Coleman, U. Khan, W. J. Blau, and Y. K. Gun'ko, "Small but strong: A review of the mechanical properties of carbon nanotube–polymer composites," *Carbon*, Vol. 44, No. 9, pp. 1624–1652, 2006, DOI: [10.1016/j.carbon.2006.02.038](https://doi.org/10.1016/j.carbon.2006.02.038).
- [6] K. K. Ajekwene, S. Ulaeto, J. K. Pancrecious, and G. Mathew, "Advanced nanocoatings for anticorrosion," *Nanomaterials*, Series: Micro & Nano Technology Books, pp. 499–509). Elsevier, 2020, DOI: [10.1016/B978-0-12-819359-4.00025-8](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819359-4.00025-8).
- [7] Șomoghi, R., Semenescu, A., Pasăre, V., Chivu, O. R., Nițoi, D. F., Marcu, D. F., & Florea, B. The Impact of ZnO Nanofillers on the Mechanical and Anti-Corrosion Performances of Epoxy Composites. *Polymers*, 16(14), 2054, DOI: [10.3390/polym16142054](https://doi.org/10.3390/polym16142054).



مرور تحلیلی نانوکامپوزیت‌ها: ادغام مدل‌سازی چندمقیاسی، میکرو-مکانیک و سینتیک سنتز نانوذرات با بررسی اثرات ماتریسی بر عملکرد مکانیکی در کاربردهای پیشرفته

محمد خاکباز^{۱*}، مهدی دابویی^۱

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده تحصیلات تکمیلی، دانشگاه هوایی شهید ستاری، تهران، ایران

چکیده

کلمات کلیدی

نانومواد

اثرات ماتریسی

مدل هالپین سای

روش‌های سنتز

کاربردهای مکانیکی

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۹/۱۱

بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۱۲/۰۸

پذیرش مقاله: ۱۴۰۵/۰۳/۰۲

*نویسنده مسئول

محمد خاکباز

ایمیل

Mohammadkhakbaz.eng@gmail.com

نانومواد به دلیل خواص مکانیکی، الکتریکی و حرارتی منحصر به فرد، جایگاه ویژه‌ای در علوم مواد و کاربردهای پیشرفته صنعتی یافته‌اند. در این مقاله مروری، نانومواد بر اساس ابعاد ساختاری به چهار دسته صفر، یک، دو و سه بعدی طبقه‌بندی شده و رفتار مکانیکی آن‌ها در قالب نانوکامپوزیت‌ها بررسی شده است. تمرکز اصلی بر نانومواد کربنی از جمله گرافن و نانولوله‌های کربنی تک‌جداره و چندجداره، و نیز نانومواد سرامیکی و مغناطیسی نظیر Fe_2O_3 ، Fe_3O_4 ، SiO_2 ، Al_2O_3 ، TiO_2 است. خواص مکانیکی شامل مدول یانگ، مدول برشی و ضریب پواسون، همراه با مؤلفه‌های ماتریس سختی الاستیک، در چارچوب مدل‌های تحلیلی و میکرومکانیکی تحلیل شده‌اند. به‌ویژه، قانون اختلاط و مدل هالپین-سای برای پیش‌بینی رفتار الاستیکی نانوکامپوزیت‌ها به کار گرفته شده و اثر پارامترهایی همچون درصد حجمی، جهت‌گیری، نسبت ابعادی و کیفیت پراکندگی نانوذرات مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین، روش‌های سنتز شامل سل-ژل، هم رسوبی و رسوب بخار شیمیایی (CVD) از نظر تأثیر بر اندازه، مورفولوژی و یکنواختی ذرات بررسی شده‌اند. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که بهینه‌سازی ساختار بین‌فازی و توزیع یکنواخت نانوفازها موجب افزایش مدول یانگ، استحکام کششی و سختی کامپوزیت می‌شود. افزون بر این، لحاظ کردن اثرات مقیاس نانو و اصلاح مدل‌های کلاسیک با رویکردهای چندمقیاسی، دقت پیش‌بینی رفتار الاستیکی را به‌طور چشم‌گیری افزایش می‌دهد. در پایان، کاربردهای صنعتی در پوشش‌های مقاوم سایشی، حسگرهای مغناطیسی، سامانه‌های الکترومکانیکی و صنایع هوافضا بررسی و چالش‌های موجود در پراکندگی و مدل‌سازی چندمقیاسی تحلیل شده‌اند.

۱- مقدمه

ویفر سیلیکونی سنتز شده‌اند، به‌گونه‌ای که پارامترهای رشد مانند دما، جریان گازها و زمان واکنش بهینه‌سازی برای آن‌ها در نظر گرفته شده است. الکترودهای Ag-CNTs حاصل با SEM و پتانسیومتری الکترولیتی تفاضلی DC مشخص شدند و نشان دادند که رفتار طبیعی و حساسیت بالایی نسبت به یون‌ها دارند، در حالی که الکترودهای نقره

در دهه‌های اخیر، ظهور نانومواد تحولی بنیادین در علم مواد ایجاد و کاربردهای گسترده‌ای در صنایع مختلف فراهم کرده است. نانولوله‌های کربنی چندجداره و تک‌بلوری، به‌عنوان اجزای کلیدی فناوری نانو، با استفاده از روش‌های رسوب بخار شیمیایی^۱ (CVD) و رسوب بخار شیمیایی تقویت شده با پلاسما^۲ (PECVD) روی الکترودهای نقره و

² Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition

¹ Chemical Vapor Deposition

Cite this Article:

[1] M. Khakbaz and M. Daboui, "Analytical Review of Nanocomposites: Integrating Multiscale Modeling, Micromechanics, and Nanoparticle Synthesis Kinetics with an Investigation into Matrix Effects on Mechanical Performance in Advanced Applications," *Science and Technology in Mechanical Engineering*, Vol. 5, No. 1, pp. 327-361, 2026. [Online]. Available: <https://doi.org/10.22034/stme.2026.563281.1190> (in Persian)



معمولی عملکرد غیرطبیعی نشان می‌دهند. مطالعات محاسباتی و شبیه‌سازی CFD با مدل‌های فاز گازی و سطحی، نرخ رشد و پوشش نانولوله‌ها را پیش‌بینی کرده و با داده‌های تجربی مطابقت دارند، که نشان‌دهنده قابلیت کاربرد این نانولوله‌ها به‌عنوان نانوحسگرهای دقیق و پایدار است [۱-۳]. نانولوله‌های کربنی علاوه بر کاربرد در نانوحسگرها، در کامپوزیت‌های رسانا و با استحکام بالا، دستگاه‌های ذخیره و تبدیل انرژی، نمایشگرها، محیط‌های ذخیره‌سازی هیدروژن و دستگاه‌های نیمه‌هادی نانومتری نیز پتانسیل دارند، هرچند چالش‌هایی نظیر هزینه، پراکندگی و محدودیت‌های پردازش موانعی برای برخی کاربردها هستند، خواص مکانیکی عالی آن‌ها موجب شده تا به‌عنوان ماده تقویتی در کامپوزیت‌ها و پلیمرها مورد استفاده قرار گیرند و مدول یانگ، استحکام و چقرمگی مواد بهبود یابد [۴ و ۵]. پس از کشف نانولوله‌های کربنی، جداسازی گرافن توسط کنستانتین نوووسلوف و همکاران در سال ۲۰۰۴ که به دریافت جایزه نوبل فیزیک انجامید، افق‌های نوینی در حوزه نانومواد دوبعدی گشود و تحولی بنیادین در علم مواد ایجاد کرد. نانومواد بر اساس ابعاد ساختاری به چهار دسته صفربعدی (نانوذرات و نقاط کوانتومی)، یک‌بعدی (نانولوله‌ها و نانوسیم‌ها)، دوبعدی (گرافن، نانوصفحات و MXenes) و سه‌بعدی (نانوکامپوزیت‌ها و ساختارهای متخلخل) تقسیم می‌شوند که هر یک ویژگی‌های عملکردی خاصی ارائه می‌کنند. به‌ویژه نانومواد کربنی به دلیل استحکام و مدول بسیار بالا مورد توجه‌اند؛ به‌گونه‌ای که نانولوله‌های کربنی مدول یانگ در حدود ۱ تراپاسکال و استحکام کششی حدود ۶۳ گیگاپاسکال دارند و گرافن با استحکام کششی نزدیک به ۱۳۰ گیگاپاسکال، هدایت الکتریکی در حدود ۱۰۶ S/m و هدایت حرارتی تا حدود ۵۰۰۰ W/m·K، ظرفیت چشم‌گیری برای کاربردهای پیشرفته مهندسی فراهم می‌کند [۶-۱۵]. نانومواد علاوه بر کاربرد در کامپوزیت‌ها و نانوحسگرها، در نانوکامپوزیت‌های پایدار نیز به کار گرفته می‌شوند، به‌طوری که افزودن تنها ۱ تا ۵ درصد وزنی این نانومواد به ماتریس‌های پلیمری، فلزی یا سرامیکی می‌تواند خواص مکانیکی، حرارتی و الکتریکی را به‌طور قابل توجهی بهبود بخشد و این مواد با پایداری بالا، مقاومت به تخریب و مزایای زیست‌محیطی، کاربردهای متنوعی در صنایع خودرو، هوافضا، الکترونیک، بسته‌بندی و زیست‌پزشکی دارند [۱۶ و ۱۷]. همچنین نانومواد دوبعدی مانند گرافن، BN، MoS₂ و MXene به پوشش‌های پلیمری ضد خوردگی معرفی شده‌اند تا مقاومت در برابر خوردگی و طول عمر عملیاتی

افزایش یابد و اصلاح سطوح با نانومواد می‌تواند خوردگی، اصطکاک و سایش را کاهش دهد؛ افزون بر این، این نانومواد امکان طراحی پوشش‌های هوشمند با حسگری بلادرنگ، کاربردهای الکترونیکی انعطاف‌پذیر و ادغام با اینترنت اشیا را فراهم می‌آورند [۱۸-۲۰]. فناوری‌های پیشرفته پوشش‌دهی، از جمله پاشش حرارتی، برای افزایش مقاومت در برابر خوردگی، سایش و محافظت الکترومغناطیسی، به‌عنوان مکملی برای نانوکامپوزیت‌ها و پوشش‌های نانوساختار مورد استفاده قرار می‌گیرند. نانولوله‌های کربنی با نسبت طول به قطر بسیار بالا و خواص مکانیکی، حرارتی و الکتریکی استثنایی، کاربردهای گسترده‌ای در نانوالکترونیک، بیوتکنولوژی، کامپوزیت‌ها و منسوجات دارند و با ادغام در ماتریس‌های پلیمری و فلزی یا به‌صورت لایه‌های نازک، موجب تقویت مکانیکی، حرارتی و محافظت الکترومغناطیسی مواد هوافضا می‌شوند؛ هرچند چالش‌هایی مانند هزینه تولید و آلودگی کاتالیزور وجود دارد، اما فناوری‌های سنتز مانند رسوب بخار شیمیایی امکان تولید CNTهای باکیفیت برای ادغام در مواد هوافضا و پوشش‌ها را فراهم کرده و همگرایی سنتز نانومواد، طراحی نانوکامپوزیت‌ها و پوشش‌های نانوساختار، افق‌های جدیدی برای تولید مواد سبک، مقاوم و هوشمند فراهم می‌کند [۲۰-۲۶]. پوشش‌های حرارتی سد^۱ (TBCs) با نانوساختار YSZ، پوشش‌های ضد یخ‌زدگی با نانوکامپوزیت‌های پلیمری، پوشش‌های جاذب رادار با نانوذرات فریت و پوشش‌های ایمپلنتی در صنایع پزشکی، نمونه‌هایی از کاربردهای کلیدی نانومواد در صنعت هستند [۲۷-۲۹]. کامپوزیت‌ها و پوشش‌های نانوساختار مبتنی بر گرافن و دیگر نانومواد، علاوه بر محافظت در برابر شرایط محیطی، خواص مکانیکی، حرارتی و الکتریکی بهبود یافته‌ای ارائه می‌دهند و کاربردهایی مانند کاهش مقطع راداری، مقاومت در برابر شوک حرارتی، فناوری‌های ذخیره انرژی و نانوحسگرها دارند، در حالی که عملکرد کامپوزیت‌های سه‌بعدی با گرافن هنوز نیازمند درک کامل رفتار در مقیاس نانو است و فناوری‌های سنتز امکان تولید مواد با عملکرد بالا و یکپارچه در مقیاس صنعتی را فراهم می‌کنند [۳۰-۳۲]. در این مکانیزم، کاهش اندازه دانه‌ها منجر به افزایش تراکم مرزهای دانه شده و حرکت نابجایی‌ها را محدود می‌کند که نتیجه آن افزایش سختی و استحکام است، در حالی که مقاومت سایشی نانوپوشش‌ها می‌تواند به‌طور قابل توجهی بیشتر از پوشش‌های میکروساختار باشد و موجب افزایش عمر مفید قطعات می‌شود [۳۳ و ۳۴]. خواص مکانیکی و ویسکوالاستیک پوشش نانوکامپوزیتی

^۱ Thermal Barrier Coatings

فوق آب‌گریز-PDMS سیلیکا در دمای ۲۴ تا ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد نشان‌دهنده خزش دو مرحله‌ای، کاهش سختی با زمان و رفتار پایدار حساسیت نرخ کرنش هستند. آنالیز نانودینامیکی کاهش مدول ذخیره و اوج‌گیری مدول اتلاف و تانژانت تلفات در عمق کم را نشان داد. علاوه بر این، اثرات بین‌فازی، شامل کیفیت پیوند بین نانوذرات و ماتریس و توزیع یکنواخت نانوذرات، نقش کلیدی در عملکرد نهایی و پوشش‌های ضد خوردگی، به ویژه در صنایع هوافضایی دارند [۳۵-۳۷]. سایش ساینده یکی از مشکلات مهم در کاربردهای صنعتی است که باعث کاهش عمر تجهیزات و افزایش هزینه‌ها می‌شود. مطالعات نشان می‌دهد پوشش‌های جوشکاری شده و کامپوزیت‌های نانوساختار، مانند آلیاژ Ni-W-P تقویت‌شده با TiO_2 روی فولاد API X60، می‌تواند مقاومت سایشی و سختی را به‌طور قابل توجهی افزایش دهد. ریزساختار این پوشش‌ها شامل کاربیدهای نانو و فازهای هاپریتوکتیک بوده و آزمایش‌های مختلف میکروسکوپی و تریبولوژیکی، مکانیسم‌های اصلی سایش مانند ریزشکستگی، جدا شدن کاربیدها و ریزبرش روی ماتریس را نشان داده‌اند. آنیل کردن پوشش‌ها باعث رشد دانه، تبلور Ni_3P و بهبود خواص تریبولوژیکی می‌شود. به‌طور مشابه، در نانوکامپوزیت‌های پلیمری، خواص برتر نسبت داده به ویژگی‌های فصل مشترک بین ذرات نانو و ماتریس پلیمر است. مدل‌ها و نظریه‌های مختلف، مانند مدل لویی، تسلا و پولوس و مدل چند هسته‌ای تاناکا، ساختار و خواص فیزیکی، شیمیایی و الکتریکی فصل مشترک‌ها را توضیح می‌دهند و تفاوت‌ها و شباهت‌های آن‌ها تحلیل شده است. این مطالعات نشان می‌دهند که طراحی پوشش‌ها و نانوکامپوزیت‌ها با کنترل فصل مشترک و ریزساختار می‌تواند عملکرد مکانیکی و سایشی مواد را به‌طور چشم‌گیری بهبود دهد [۳۸-۴۰]. در سال‌های اخیر، نانوکامپوزیت‌های پلیمری، شامل نانوفیلرها در ماتریس پلیمری، به دلیل خواص برجسته و بهبود یافته خود به‌عنوان مواد نوآورانه مورد توجه قرار گرفته‌اند. درک رابطه بین پرکننده و ماتریس برای توسعه مواد با خواص مطلوب و کاربردهای خاص، به ویژه در نانوکامپوزیت‌های مغناطیسی با کاربردهای زیست‌پزشکی مانند دارورسانی و ترانستیک، اهمیت ویژه‌ای دارد. این مواد از طریق کنترل ساختار و روش‌های پردازش، امکان بهبود خواص مکانیکی، حرارتی و تریبولوژیکی را فراهم می‌کنند. هم‌زمان، پیشرفت فناوری نانو، زمینه را برای استفاده از نانومواد در هوافضا باز کرده است؛ موادی که با ابعاد نانومتری خود استحکام، سبکی، مقاومت در برابر سایش و تحمل دمای بالا را ارائه

می‌دهند و می‌توانند وزن سازه‌ها را تا ۳۰ درصد کاهش دهند. نانوکامپوزیت‌ها و نانومواد مانند نانولوله‌های کربنی، نانوسرامیک‌ها و گرافن، کاربردهای گسترده‌ای در تقویت سازه‌ها، توسعه پوشش‌های مقاوم در برابر سایش، بهینه‌سازی سوخت و حسگرها دارند و مسیر نویدبخشی برای تحقیقات و توسعه فناوری‌های مدرن هوافضا و زیست‌پزشکی ارائه می‌کنند. [۴۱-۴۳]. برای محافظت در برابر تداخل الکترومغناطیسی، EMI^۱ استفاده از نانوکامپوزیت‌های مغناطیسی-سرامیکی/رسانا و نانولوله‌های کربنی CNT^2 رشد یافته روی الیاف نشان‌دهنده اثربخشی بالا است. در یک مطالعه، نانوذرات FeNi_3 - NiFe_2O_4 - SiO_2 روی نانولوله‌های کربنی پوشانده شدند تا نانوکامپوزیتی با راندمان حفاظ EMI بیش از ۹۰٪ ($\text{SET} > 20\text{dB}$) ایجاد شود؛ نانولوله‌های کربنی با بهبود رسانایی AC، محافظت بیشتری نسبت به نانوذرات منفرد ارائه دادند. هم‌زمان، رشد مستقیم CNT‌ها روی الیاف کربن و شیشه با استفاده از رسوب بخار شیمیایی و آبکاری Ni-P، باعث افزایش قابل توجه EMI SET در کامپوزیت‌های اپوکسی شد؛ الیاف کربن با CNT رشد یافته به حدود ۸۱ دسی‌بل و الیاف شیشه به حدود ۴۰ دسی‌بل رسیدند. این مطالعات نشان می‌دهند که با طراحی مناسب نانوکامپوزیت‌ها و رشد CNT‌ها روی سطوح مختلف، می‌توان مواد محافظ EMI با کارایی بالا و هزینه بهینه تولید کرد [۴۴ و ۴۵]. مواد مبتنی بر فناوری نانو که پیش‌تر در حوزه‌های هوافضا، داروسازی و الکترونیک به کار می‌رفتند، طی دهه اخیر وارد صنایع ساختمان و سامانه‌های عایق حرارتی شده‌اند. نانوپوشش‌های سرامیکی و آئروژل‌های نانومتخلخل، شامل انواع اکسیدی، آلی و کربنی، به دلیل رسانایی حرارتی بسیار پایین، وزن کم و پایداری حرارتی مناسب، گزینه‌های امیدبخشی برای عایق‌های پیشرفته ساختمانی و کاربردهای هوافضا محسوب می‌شوند. پژوهش‌ها بر بهبود دمای کاری، مقاومت مکانیکی، خواص ضدفرسایش و کاهش هزینه‌ها تمرکز داشته‌اند و هدف اصلی، توسعه عایق‌های حرارتی کارآمد و قابل اعتماد برای کاربردهای ساختمانی و هوافضا است [۴۶ و ۴۷]. در حوزه پوشش‌های عملکردی، مواد و پوشش‌های نانوپایه، به‌ویژه نانوپوشش‌های ضدخوردگی، با تعاملات ساختاری ویژه و کارایی بالا مورد توجه قرار گرفته‌اند. کامپوزیت‌های اپوکسی تقویت‌شده با نانوذرات ZnO خواص مکانیکی مناسب، چسبندگی بالا و مقاومت مطلوب در برابر خوردگی نشان داده‌اند و در پوشش‌های ضدخوردگی، محافظ UV، چسب‌ها و صنایع الکترونیک و ساختمانی کاربرد دارند [۴۸ و ۴۹].

² Carbon Nanotubes¹ Electromagnetic Interference

توسعه‌ی پوشش‌های فوق آب‌گریز با ساختارهای میکرو/نانو قابل ترمیم از طریق لیزر فمتوثانیه، پایداری و مقاومت در برابر آسیب‌های مکانیکی را بهبود داده است. این دستاوردها مسیر تازه‌ای برای طراحی مواد چندمنظوره و بادوام در نسل آینده‌ی فناوری‌های پیشرفته فراهم می‌کنند [۵۶-۶۰].

در این راستا، هدف مطالعه مروری حاضر فراتر از گردآوری مطالعات پیشین، تدوین یک چارچوب تحلیلی یکپارچه برای تبیین ارتباط ساختار-فرایند-عملکرد در نانومواد و نانو کامپوزیت‌های مورد استفاده در پوشش‌های صنعتی است. علی‌رغم پیشرفت‌های قابل توجه در توسعه روش‌های سنتز و کاربردهای مهندسی نانومواد، هنوز یک مدل مفهومی منسجم که بتواند تأثیر هم‌زمان ابعاد ساختاری، ریزساختار بین‌فازی، نوع ماتریس و مکانیزم‌های انتقال تنش را در مقیاس نانو به صورت کمی و مقایسه‌ای تحلیل کند، به طور نظام‌مند ارائه نشده است. این پژوهش با طبقه‌بندی نانومواد بر مبنای ابعاد هندسی (صفربعدی تا سه‌بعدی) و نوع فاز تقویتی، به تحلیل تطبیقی روش‌های سنتز نظیر سل-ژل، هم رسوبی و رسوب بخار شیمیایی پرداخته و اثر آن‌ها را بر پارامترهای کلیدی شامل اندازه کریستالیت، مورفولوژی، توزیع آماری ذرات، کیفیت پیوند بین‌فازی و گرادین مدول در ناحیه انتقالی بررسی می‌کند. افزون بر این، با بازخوانی انتقادی مدل‌های میکرومکانیکی کلاسیک نظیر قانون اختلاط، هالپین-سای و موری-تاناکا، و همچنین رویکردهای وابسته به اندازه و اصلاحات بین‌فازی، تلاش شده است دامنه اعتبار، فرضیات بنیادی و محدودیت‌های این مدل‌ها در مقیاس نانو به طور تطبیقی ارزیابی شود و رابطه‌ای کمی میان کسر حجمی، ناهمگنی ریزساختاری، ضخامت لایه بین‌فازی و پاسخ الاستیک-پلاستیک سیستم‌های چندفازی برقرار گردد. نوآوری اصلی این مقاله در یکپارچه‌سازی رویکردهای سنتزی و مکانیکی در قالب یک مسیر تحلیلی منظم، با تأکید بر مکانیزم‌های انتقال تنش، اثر اندازه و رفتار بین‌فازی در مقیاس نانو است؛ موضوعی که در مرورهای پیشین عمدتاً به صورت پراکنده و غیرسیستماتیک بررسی شده است. بر این اساس، مقاله حاضر ضمن شناسایی چالش‌های بنیادین از جمله پراکندگی غیرهمگن، تجمع نانوذرات، ناهمسانگردی موضعی و محدودیت مدل‌های تک‌مقیاسی، چارچوبی برای توسعه مدل‌های چندمقیاسی اصلاح‌شده و طراحی هدفمند پوشش‌های نانو ساختار با عملکرد مکانیکی پایدار، دوام تریبولوژیکی بالا و قابلیت مقیاس‌پذیری صنعتی ارائه می‌دهد و مسیرهای پژوهشی آینده را به صورت ساختاریافته ترسیم می‌نماید.

هم‌زمان، توسعه کامپوزیت‌های ماتریس پلیمری با خواص میرایی بهبود یافته از طریق ادغام الاستومرهای EPDM، الاستومرهای ترموپلاستیک مبتنی بر استایرن (VDT)، سازگار کننده‌ها و الیاف بازالت در ماتریس MABS مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج آزمون‌های DMA، DSC، FT-IR، NMR و STEM نشان می‌دهد که کنترل پراکندگی فاز الاستومری و جهت‌گیری الیاف، رفتار ویسکوالاستیک و پاسخ دینامیکی را به طور معناداری بهبود می‌دهد. همچنین مدل‌های مبتنی بر نظریه ویسکوالاستیک با داده‌های تجربی اعتبارسنجی شده و آزمایش‌های دینامیکی تیرهای کامپوزیتی تأثیر جهت‌گیری و طول لایه‌های الیاف بر فرکانس‌های طبیعی و شکل مودها را نشان داده‌اند؛ نتایجی که مسیر توسعه مواد با عملکرد میرایی بالا برای کاربردهای صنعتی و هوافضا را هموار کرده است [۵۰ و ۵۱].

در مقیاسی گسترده‌تر، آلیاژهای با آنترپپی بالا (HEA)، نانوساختارهای فلزات نجیب، فریت بیسموت (BiFeO_3) و سامانه‌های انتقال حرارت میکروکانالی از محورهای کلیدی تحقیقات نوین در حوزه نانوفناوری و انرژی محسوب می‌شوند. HEAها به دلیل پایداری حرارتی و راندمان بالا در واکنش‌های الکتروشیمیایی مانند الکترولیز و پیل‌های سوختی کاربرد دارند، در حالی که نانوذرات نقره با بهبود پایداری و حساسیت، نقش مهمی در طراحی حسگرهای بیوشیمیایی ایفا کرده‌اند؛ به گونه‌ای که جای‌دهی آن‌ها در ماتریس پلی‌وینیل الکل (PVA) موجب افزایش پایداری بلندمدت شده است. فریت بیسموت (BiFeO_3) نیز با خواص چندفروئیکی خود در کاربردهای اپتوالکترونیکی و برداشت انرژی مطرح است و پیشرفت در فناوری لایه‌های نازک، عملکرد آن را بهبود داده است. همچنین توسعه سینک‌های حرارتی میکروکانال باز، مدیریت حرارتی مؤثرتر را فراهم کرده است [۵۲-۵۵]. در مجموع، نانوذرات و نانوساختارها با قابلیت تنظیم دقیق اندازه، مورفولوژی و ترکیب شیمیایی، نیازمند روش‌های سنتزی کنترل‌پذیر مانند آسیاب و آلیاژسازی مکانیکی، رسوب فیزیکی و شیمیایی بخار، سل-ژل، پلاسما، سولووترمال و زیستی هستند. رفتار مکانیکی این ساختارها نیز با بهره‌گیری از نظریه‌های وابسته به اندازه و مدل‌های مکانیک پیوسته تحلیل می‌شود تا پدیده‌هایی مانند خمش، ارتعاش و کماتش در مقیاس نانو با دقت بیشتری تبیین گردد.

برای بهبود جذب انرژی، متامتریال‌های لانه‌زنبوری اورینگامی مبتنی بر Miura-ori با نانوذرات Fe_3O_4 هوشمند برای تولید سازه‌های پاسخگو به محرک استفاده شده است. که استحکام، بازیابی شکل و جذب انرژی را به طور چشم‌گیری افزایش داده‌اند. همچنین،

۲- انواع نانومواد

نانومواد بر اساس ابعاد هندسی خود به چهار دسته کلی طبقه‌بندی می‌شوند که شامل نانومواد صفر بعدی، نانومواد یک‌بعدی، مانند نانولوله‌ها، نانوسیم‌ها و نانوالیاف، نانومواد دوبعدی شامل گرافن و نانوصفحات، و نانومواد سه‌بعدی شامل نانوکامپوزیت‌ها و ساختارهای پیچیده هستند. با توجه به جدول ۱، تفاوت‌های اساسی در مکانیزم‌های انتقال تنش، نقش ناحیه بین‌فازی و اثرات وابسته به اندازه در میان رده‌های مختلف نانوساختارها به‌وضوح قابل مشاهده است. این تمایزها ریشه در هندسه و بعد ساختاری نانومواد دارد. بر همین اساس، نانومواد بر مبنای ابعاد هندسی به چهار دسته کلی طبقه‌بندی می‌شوند: نانومواد

صفربعدی (نانوذرات)، نانومواد یک‌بعدی شامل نانولوله‌ها، نانوسیم‌ها و نانوالیاف، نانومواد دوبعدی نظیر گرافن و نانوصفحات، و نانومواد سه‌بعدی که نانوکامپوزیت‌ها و ساختارهای شبکه‌ای یا پیچیده را دربر می‌گیرند. این دسته‌بندی هندسی مبنای تحلیل رفتار مکانیکی و مقایسه سازوکارهای تقویت در هر رده ابعادی را فراهم می‌کند.

۲-۱- نانو مواد صفر بعدی (0D)

نانومواد صفربعدی شامل ساختارهایی هستند که در هر سه بعد فضایی در مقیاس نانو محدود شده‌اند این دسته شامل نانوذرات کروی، نقاط کوانتومی، فولرن‌ها، ذراتی مانند نانوسرامیک‌ها و ذرات مگنتیتی می‌باشند خواص منحصر به فرد این مواد شامل اثرات کوانتومی، فعالیت کاتالیزوری بالا و قابلیت تنظیم خواص الکتریکی و نوری است.

جدول ۱: خلاصه‌ای از فهرست‌بندی نانومواد صفر بعدی و کاربرد آن

شماره	نانومواد	اجزا	اندازه متوسط ذره (نانومتر)	جذب	کارکردی سازی	کاربرد	مرجع
1	Quantum dots	Cdse, Zns	<10	579nm	Core/Shell-ZnS	Cd109-SPECT imaging agent incorporated for imaging	[62]
2	Quantum dots	CdTe, Cds, BSA	550	$\lambda_{ex} = 400 \text{ nm}$ $\lambda_{em} = 528 \text{ to } 650 \text{ nm}$	Protein (BSA)	QD-BSA was used for long term fluorescence observation because emission decreased by 4.06% after being irradiated at 365 nm for 1 h	[63]
3	Carbon Quantum dots	large amino acid-mimicking (LAAM), tetraminoanthraquinone (TAAQ), and citric acid	3	230nm, 280nm, 650nm	Protein (BSA)	LAT-1-mediated targeting tumour theranostics	[64]
4	Quantum dots	Mn, Zns	218	287	Chitosan biopolymer and conjugated with folic acid	Diagnosis and treatment of anticancer activity of 5-fluorouracil for breast cancer therapy	[65]
5	Quantum dots	In, P, Zn	15-20	645	Mercapto-succinic acid	This is a non-cadmium based QD used in diagnostic r	[66]

کاربردهای این دسته از نانومواد در حسگرهای زیستی و شیمیایی، سیستم‌های دارورسانی هدفمند، کاتالیزورهای صنعتی و رنگدانه‌های پیشرفته گسترده است. تولید نانوذرات معمولاً از طریق روش‌های شیمیایی مانند هم رسوبی، سل-ژل، و روش‌های فیزیکی مثل تبخیر-میعان انجام می‌شود. کنترل اندازه و توزیع اندازه نانوذرات از اهمیت

ویژه‌ای برخوردار است زیرا مستقیماً بر خواص نهایی تأثیرگذار است [۶۱]. معادله ۱، نسبت سطح به حجم نانوذرات صفر بعدی و معادله (۲) رابطه دمای-شُر را بر اساس اندازه و نوع کریستالیت نانومتری مواد صفر بعدی نشان می‌دهد.

و استحکام کششی تا ده‌ها GPa دارند که آن‌ها را سخت‌ترین و قوی‌ترین مواد روی زمین می‌سازد.

$$E = C_{11} - (C_{13}^2/C_{33}) \quad (۳)$$

$$\sigma_t = \sqrt{(E\gamma/a)} \quad (۴)$$

$$D = Et^3/[12(1 - \nu^2)] \quad (۵)$$

$$\sigma = (2e^2/h) \times (T/T_0) \times \exp(-E_a/kT) \quad (۶)$$

۲-۱-۲- نانولوله‌های کربنی

یکی از معروف‌ترین نانو مواد تک‌بعدی نانولوله‌های کربنی هستند که به سه دسته تک‌جداره، دوجداره و چند جداره تقسیم می‌شوند. نانولوله‌های کربنی اغلب به نانولوله‌های کربنی تک‌جداره^۱ SW-CNT با قطرهایی در محدوده یک نانومتر اشاره دارند. نانولوله‌های کربنی تک جداره یکی از دگرشکل‌های کربن است و واسطه‌ای بین فولرن و گرافن‌های مسطح است. می‌توان نانولوله‌های کربنی تک جداره را به‌عنوان برش‌هایی از یک شبکه شش‌ضلعی اتم‌های کربنی که در امتداد یکی از بردارهای شبکه برآوه قرار گرفته‌اند تصور کرد تا یک استوانه توخالی شکل بگیرد هرچند آن‌ها به این روش ساخته نمی‌شوند. نانولوله‌های کربنی، ساختارهای حلقوی توخالی و متشکل از اتم‌های کربن هستند که می‌توانند به شکل تک یا چندجداره آرایش یابند و دارای خواص فلزی و شبه رسانایی نیز هستند. نانولوله‌های کربنی به نانولوله‌های کربنی چندجداره^۲ MWCNT هم اشاره دارند که متشکل از نانولوله‌های کربنی تک‌جداره تو در تو هستند، که تحت اثر نیروهای ضعیف واندروالس در یک ساختار حلقه مانند درختی به هم متصل شده‌اند. این لوله‌ها بسیار شبیه لایه‌های کربن مستقیم و موازی اوپرلین، اندو و کویاما هستند که به صورت استوانه‌ای در اطراف یک لوله توخالی قرار گرفته‌اند. همچنین، نانولوله‌های کربنی چندجداره گاهی به نانولوله‌های کربنی دو دیواره و سه دیواره اشاره دارد.

نانولوله‌های کربنی همچنین می‌توانند به لوله‌هایی با ساختار دیواره کربنی نامشخص و قطر کمتر از ۱۰۰ نانومتر اشاره کنند [۶۹]. شکل ۱، شماتیک کلی نانولوله‌ها را نشان می‌دهد. همین‌طور جدول ۲، خواص مکانیکی نانولوله‌ها را با اپوکسی، چوب و فولاد مقایسه می‌کند.

$$S/V = \frac{6}{d} \quad (۱)$$

$$D = K\lambda/(\beta \cos\theta) \quad (۲)$$

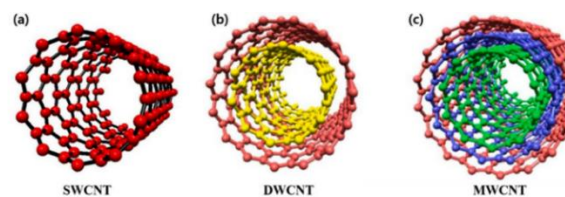
پارامتر S مساحت سطح نانوذره برحسب نانومتر مربع، V حجم ذره برحسب نانومتر مکعب و d قطر ذره برحسب نانومتر است. در معادله دمای-شُرر، D اندازه کریستالیت برحسب نانومتر، K ثابت شکل که معمولاً مقدار ۰/۹ اختیار می‌کند، λ طول موج اشعه ایکس برحسب آنگستروم، β پهنای نصف ارتفاع پیک برحسب رادیان و θ زاویه براگ برحسب درجه

۲-۲- نانو مواد یک‌بعدی (1D)

مواد نانو ساختار تک‌بعدی (1D)، شامل نانولوله‌های کربنی، نانوالیاف و نانوسیم‌ها، به دلیل خواص جالب و طیف وسیعی از کاربردهای بالقوه، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. تحقیقات قابل توجهی در مورد مسیرهای جدید برای سنتز قابل کنترل نانومواد تک‌بعدی انجام شده است. خواص منحصر به فرد نانومواد تک‌بعدی به دست آمده می‌تواند منجر به کاربردهایی در زمینه‌های مختلف مانند الکترونیک، مغناطیس، اپتیک و کاتالیز شود. بنابراین، محققانی که در نانومواد تک‌بعدی کار می‌کنند، دائماً در تلاش‌اند تا علوم بنیادی جدید و همچنین کاربردهای بالقوه را توسعه دهند. بنابراین، اهمیت بستری که به محققان فعال در این زمینه اجازه می‌دهد تا پیشرفت‌های جدید خود را به موقع و کارآمد ارائه دهند، ضروری است. معادلات (۳-۶) خواص مکانیکی نانومواد تک‌بعدی را نشان می‌دهد. جایی که، E مدول یانگ برحسب گیگاپاسکال (۲۷۰-۹۵۰) برای نانولوله‌های کربنی طبق بررسی‌های وانگ و همکاران [۶۷]، C_{11} و C_{33} ثوابت کشسانی برحسب پاسکال، و C_{13} ثابت کشسانی متقابل است. در معادله استحکام نظری، σ_t استحکام کششی نظری برحسب پاسکال، γ انرژی سطحی پیوندهای پریشماتیک گرافن (4.2 J/m^2) و a فاصله بین اتمی است. D سختی خمشی برحسب N.m^2 ، t ضخامت برحسب متر و ν ضریب پواسون است. در معادله رسانایی، σ رسانایی الکتریکی، e بار الکترون، h ثابت پلانک، T دما، T_0 دمای مرجع، E_a انرژی فعال‌سازی و k ثابت بولتزمن است. طبق یافته‌های گارگ و همکاران [۶۸]، نانومواد یک‌بعدی شامل نانولوله‌های کربنی، نانوسیم‌های فلزی و نیمه‌هادی، و نانوالیاف می‌شوند که مدول یانگ در حدود TPa (چندین برابر سخت‌تر از فولاد)

² Multi-Walled Carbon Nanotubes

¹ Single-Walled Carbon Nanotubes



شکل ۱: شماتیکی از انواع نانولوله کربنی [۶۹]

جدول ۲: مقایسه خواص مکانیکی بین نانولوله‌های کربنی تک جداره و چند جداره، با اپوکسی، فولاد و چوب [۶۹]

Material	Young Modulus	Tensile strength
Epoxy	3.500	0.005
SW CNT	1054.000	150.000
MWCNT	1200.000	150.000
Steel	208.000	0.400
Wood	16.000	0.008

۲-۳- نانومواد دوبعدی (2D)

نانومواد دوبعدی به‌عنوان تقویت‌کننده‌های عالی عمل می‌کنند زیرا دارای مدول کشسانی بالا، استحکام بالا و اصطکاک فوق کم هستند. گبرکرسستوس و همکاران [۷۰] بررسی کردند که خواص الکتریکی و مکانیکی کامپوزیت‌های ساخته شده از طریق پرینت سه‌بعدی به شدت به کسر جرمی و آرایش نانومواد دوبعدی، در ماتریس پلیمری بستگی دارد. چاکرابورتی و همکاران [۷۱] تأکید کردند که مساحت سطح ویژه بالا این مواد منجر به فصل مشترک گسترده با ماتریس و انتقال بار مؤثر می‌شود. تارافانوی و همکاران [۷۲] اشاره کردند که کامپوزیت‌های اپوکسی تقویت شده با نانوصفحات دوبعدی پتانسیل زیادی برای صنعتی‌سازی دارند، اما چالش‌هایی مانند پراکندگی یکنواخت، جهت‌گیری صفحات و جلوگیری از تجمع لایه‌ای مجدد وجود دارد. طبق نظریه خان و همکاران [۷۳]، رفتار مکانیکی این کامپوزیت‌ها به تعداد لایه‌ها، عیوب ساختاری و نوع پیوند با ماتریس حساس است. آن‌ها گزارش کردند که نانومواد دوبعدی به دلیل رفتار پیوندی کووالانسی قوی در صفحه، دارای استحکام مکانیکی قوی، انعطاف‌پذیری و شفافیت نوری هستند که خواص منحصر به فرد این مواد فوق نازک را بر اساس زیرساختارهای تنظیم‌شده بهبود می‌بخشد.

۲-۳-۱- گرافن

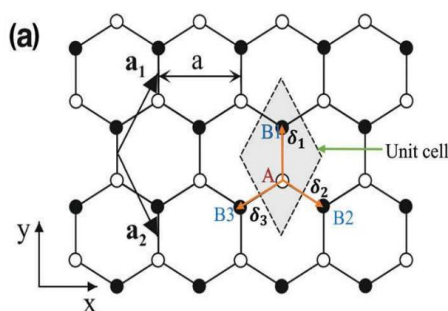
گرافن یک نانوساختار مبتنی بر کربن است که از اتم‌های کربن تک لایه تشکیل شده است. ویژگی‌های فیزیکی این ماده، شامل رسانایی حرارتی بالا، آب‌گریزی و چگالی مناسب، زمینه‌ساز رفتار الکتروشیمیایی منحصر به فرد آن هستند که برای کاربردهای حسگری

و ذخیره انرژی اهمیت دارد [۷۴]. از آنجایی که به طیف وسیعی از خواص شیمیایی و فیزیکی مجهز است، در بسیاری از زمینه‌ها کاربرد دارد. علاوه بر این، مشتقات گرافن، از جمله اکسید گرافن (GO) و گرافن اصلاح‌شده شیمیایی نیز در این زمینه مورد توجه زیادی قرار گرفته‌اند [۷۵]. گرافن حاوی گروه‌های عاملی حاوی اکسیژن بالا است که عامل‌دار کردن آن را برای مناطق خاص تسهیل می‌کند [۷۶] در نتیجه این موارد، معمولاً به جای یک نانوذره به تنهایی، به‌عنوان یک ماده ترکیبی برای تشکیل یک ساختار هیبریدی استفاده می‌شود تا خواص گرافن را به ساختار اضافه کند. این ساختار هیبریدی را می‌توان به دو روش تشکیل داد: یا نانومقیاس را می‌توان روی صفحات گرافن تزئین کرد (تشکیل یک کامپوزیت)، یا سطح نانومقیاس را می‌توان با گرافن یا مشتقات آن اصلاح کرد [۷۷]. تعداد قابل توجهی از نانوذرات فلزی معدنی با گرافن تزئین شده‌اند تا ساختاری هیبریدی ایجاد کنند که ترکیبی از خواص هر دو ماده را داشته باشد. این ویژگی در زمینه‌های مختلفی مانند حمل دارو، برچسب‌گذاری سلولی و درمان فوتوترمال مورد استفاده قرار می‌گیرد [۷۸] مساحت سطح بالا و ترکیب مولکولی گرافن، همراه با فرصت بالای عامل‌دار شدن، امکان بارگذاری مقادیر قابل توجهی دارو را فراهم می‌کند و ترجیح مواد مبتنی بر گرافن را به سطح قابل توجهی افزایش می‌دهد [۷۹] علاوه بر این، نانومواد مبتنی بر گرافن به‌طور گسترده به‌عنوان یک ماده پشتیبان در کاربردهای زیست پزشکی، به ویژه در مطالعات بافت‌های ترمیمی، مورد استفاده قرار می‌گیرند [۸۰]. ماده زیستی که قرار است در بازسازی بافت استفاده شود، باید دارای ویژگی‌های خاصی باشد، درجه اول توانایی ترویج و تعدیل پیشرفت سلولی، مانند رشد سلولی، تکثیر و سیگنال‌ها [۸۱] از آنجایی که گرافن این ویژگی‌های مورد نیاز را با زیست‌سازگاری بالا برآورده می‌کند، در حال حاضر انواع مختلفی از ساختارهای گرافن در کاربردهای مهندسی بافت نیز استفاده می‌شوند [۸۲]. گرافن را می‌توان از نظر شیمیایی و ساختاری به روش‌های مختلفی بدون از دست دادن ساختار و انعطاف‌پذیری الکترونیکی یا رسوب اتمی فلزی آن، تنظیم کرد. در جهت‌های جدید، سیستم‌های مبتنی بر گرافن با ویژگی‌های مغناطیسی و ابررسانایی ممکن است برای کنترل خواص گرافن بازسازی شوند. درک و کنترل خواص این ماده، درهای باز در الکترونیک را برای مرز جدیدی با ابعاد مدرن باز می‌کند ساختار نواری اغلب از نقطه نظر رابطه بین انرژی الکترون و تکانه در هر ماده مورد مطالعه قرار می‌گیرد. از آنجایی که نمودار حرکت الکترون‌ها را به دو بعد محدود می‌کند، ما نیز فضای تکانه خود را به

می‌شود و سه بردار نزدیک‌ترین همسایه در فضای حقیقی به صورت زیر داده می‌شوند:

$$\vec{\delta} = \left(0, \frac{a}{\sqrt{3}}\right), \vec{\delta} = \left(\frac{a}{2}, \frac{a}{2\sqrt{3}}\right) \quad (۸)$$

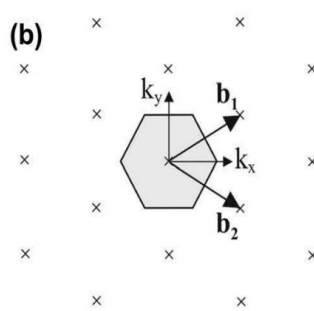
شکل ۲، شبکه‌ی متقابل گرافن تک‌لایه را نشان می‌دهد. بردارهای شبکه‌ی متقابل اولیه‌ی و شرایط را برآورده می‌کنند.



دو بعد محدود می‌کنیم. بنابراین، می‌توان یک رابطه انرژی به انرژی برای گرافن یافت و بردار اولیه از یک شبکه در مش شش ضلعی گرافن تک لایه نوشته شده است، همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است [۸۳]:

$$\vec{a}_1 = \frac{a}{2}(1, \sqrt{3}), \vec{a}_2 = \frac{a}{2}(1, -\sqrt{3}) \quad (۷)$$

جایی که و ثابت شبکه است که فاصله بین سلول‌های واحد است. بردار موقعیت اتم (۱، ۲، ۳) B نسبت به اتم Ai به صورت نشان داده

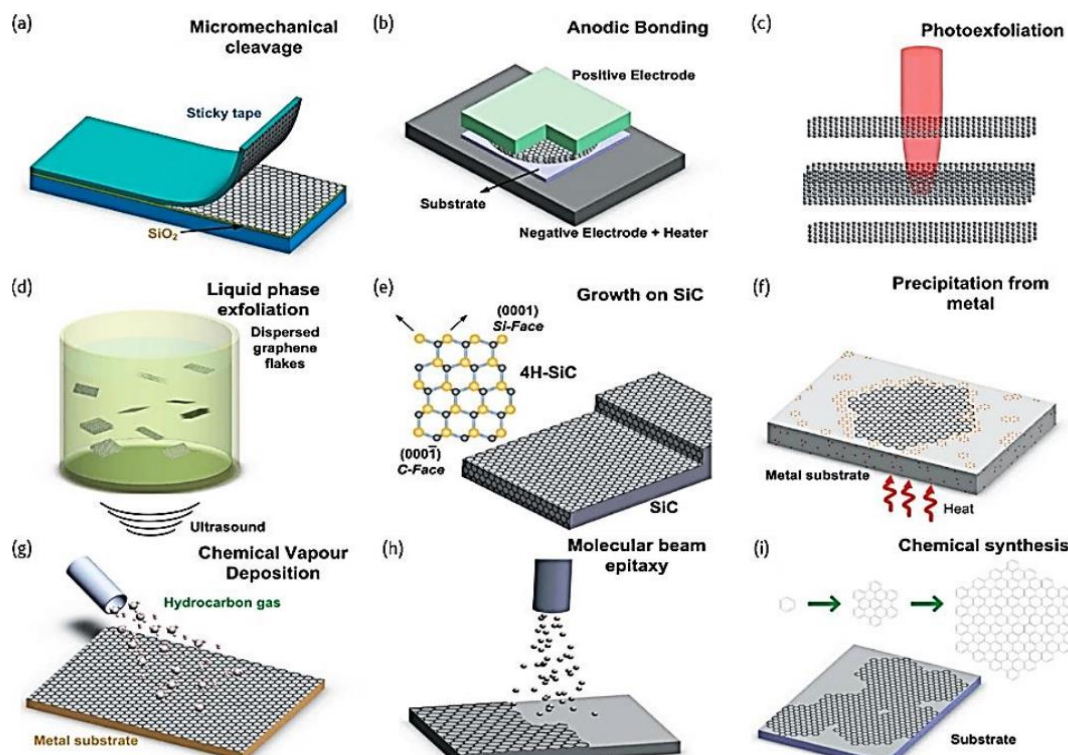


شکل ۲: الف) شبکه لانه زنبوری گرافن تک لایه با دایره‌های سفید (سیاه) که نشان‌دهنده اتم‌های کربن پایه کربنی در مکان‌های A(B) هستند و ب) یک شبکه تک لایه با هگزان سایه‌دار شده با ناحیه بریلوئن مربوطه [۸۳]

روش‌های آماده‌سازی گرافن را می‌توان به روش‌های از بالا به بالا و از پایین به پایین تقسیم کرد. در شکل ۳ نشان داده شده است که اندازه ورق کوچکتر از ۱۰ میکرومتر نیاز به توسعه رویکردهای جایگزین برای تولید گرافن در اندازه‌هایی دارد که به اندازه کافی بزرگ باشند تا کاربردهای عملی در زمینه ترانزیستور را پوشش دهند. لایه‌برداری مکانیکی تا به امروز، فرایندی برای اندازه‌گیری‌های انتقال ورق‌های Gr تک لایه و چند لایه با کیفیت بالا است. با این حال، بسیاری از روش‌های تولید، تولید Gr با کیفیت بالا را در مناطق بزرگ‌تر و با کیفیت بالاتر امکان‌پذیر می‌کنند.

۱-۳-۲ آماده‌سازی ذرات نانو گرافن

سنتز گرافن فرایندی برای تولید یا استخراج بر اساس اندازه، خلوص و شکوفایی مطلوب محصول است. تکنیک‌های مختلفی برای تولید فیلم‌های گرافیکی کوچک در مراحل اولیه یافت شد. کربن تا اواخر دهه ۱۹۷۰ به شکل لایه‌های نازک گرافیت روی سطوح فلزی رسوب داده می‌شد. گرافن به بهترین شکل به‌عنوان یک لایه نازک و ظریف گرافیت، ماده نرم و پوسته پوسته مورد استفاده در مغز مداد، توضیح داده می‌شود. گرافیت یک آلوتروپ عنصر کربن است، به این معنی که اتم‌های یکسانی دارد، اما به‌طور متفاوتی چیده شده و به ماده ویژگی‌های متنوعی می‌دهد.

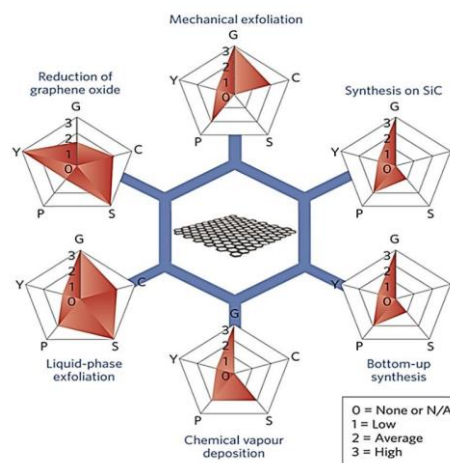


شکل ۳: فرایند گام به گام تولید گرافن. (الف) شکافت میکرومکانیکی. (ب) پیوند آندی. (ج) لایه‌برداری نوری. (د) لایه‌برداری فاز مایع. (ه) رشد روی SiC. کره‌های طلائی و خاکستری به ترتیب نمایانگر اتم‌های Si و C هستند. در دمای بالا T، اتم‌های Si تبخیر می‌شوند (فلش‌ها).

شبکه‌ی کربنی متصل‌اند، که این امر نظم پیوندهای π را تا حدی مختل می‌کند. گرافن اکسید معمولاً به صورت تک‌لایه^۱ یا چندلایه^۲ وجود دارد. هنگامی که تعداد لایه‌ها افزایش می‌یابد، ساختار به سمت اکسید گرافیت^۳ میل می‌کند [۸۴ و ۸۵]. یکی از روش‌های پرکاربرد در تولید GO، روش Hummers است که در آن گرافیت در حضور مخلوطی از اسید سولفوریک (H_2SO_4)، نیترات سدیم ($NaNO_3$) و پرمنگنات پتاسیم ($KMnO_4$) اکسید می‌شود. محصول اولیه، گرافیت اکسید است که با فرایند لایه‌لایه شدن^۴ به صفحات گرافن اکسید تبدیل می‌شود [۸۶].

۲-۳-۲- گرافن اکسید احیاشده (rGO)

گرافن اکسید احیاشده rGO^۵ ماده‌ای دوبعدی است که از فرایند کاهش گرافن اکسید (GO) به دست می‌آید و ساختاری میان گرافن خالص و گرافن اکسید دارد. در این فرایند، گروه‌های عاملی اکسیژنی مانند هیدروکسیل، اپوکسی و کربوکسیل تا حد زیادی حذف شده و پیوندهای مزدوج π - π در شبکه‌ی کربنی دوباره برقرار می‌شوند؛ در نتیجه، رسانایی الکتریکی و حرارتی ماده به‌طور قابل توجهی افزایش



شکل ۴: تکنیک‌های مختلف ساخت و سنتز گرافن [۸۳] گرافن اکسید (RGO)

گرافن اکسید (GO) یک ماده‌ی دوبعدی لایه‌ای است که از اکسید کردن گرافیت طبیعی حاصل می‌شود (شکل ۴). در ساختار آن گروه‌های عاملی اکسیژنی مانند هیدروکسیل (OH -)، اپوکسی (O -)، کربونیل ($O=$) و کربوکسیل ($COOH$ -) به سطوح و لبه‌های

³ Graphite-oxide

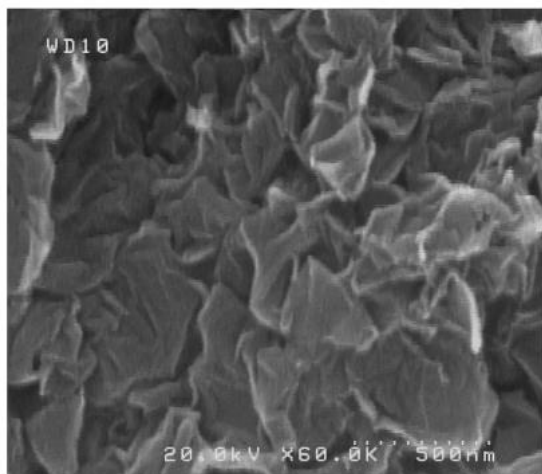
⁴ Exfoliation

⁵ Reduced Graphene Oxide

¹ Single-Layer

² Few-Layer

کنترل درجه‌ی احیا است؛ به‌طوری که میزان حذف اکسیژن، نوع عامل کاهنده و شرایط فرایند مستقیماً بر هدایت الکتریکی و پایداری شیمیایی آن تأثیر می‌گذارند. به‌طور خلاصه، rGO را می‌توان ماده‌ای نیمه میانجی میان گرافن و GO دانست که با حفظ ساختار دوبعدی و بازگرداندن جزئی شبکه‌ی sp^2 ، تعادل مطلوبی میان رسانایی و واکنش‌پذیری ایجاد می‌کند [۸۷ و ۸۸]. شکل ۵، تصاویر موفولوژی از میکروسکوپ الکترونی رویشی برای گرافن و گرافن اکسید را نشان می‌دهد.



می‌یابد. کاهش گرافن اکسید می‌تواند به روش‌های شیمیایی (با عوامل کاهنده‌ای مانند هیدرازین، اسید آسکوربیک یا سدیم بوروهیدرید)، حرارتی (در دماهای ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد) یا نوری و پلاسمایی انجام شود. از دید ساختاری، rGO برخلاف گرافن خالص هنوز حاوی مقدار کمی اکسیژن و نقص‌های ساختاری است، اما به دلیل حفظ نسبی سطح بزرگ و قابلیت تنظیم خواص سطحی، در حوزه‌هایی مانند ابر خازن‌ها، الکترودهای باتری، حسگرهای زیستی و نانوکامپوزیت‌ها کاربرد فراوان دارد. ویژگی مهم دیگر rGO، قابلیت



شکل ۵: تصاویر SEM از گرافن (سمت چپ) و گرافن اکسید (سمت راست) [۸۸]

خواص تقویت‌کننده، کسر حجمی و هندسه ذرات را به صورت زیر بیان می‌کند [۹۱]:

$$E_{eff} = E_m \times \left[\frac{(1 + \xi\eta\phi)}{(1 - \eta\phi)} \right] \quad (9)$$

که در آن پارامتر η از رابطه ۱۰ محاسبه می‌شود:

$$\eta = \frac{\left(\frac{E_f}{E_m} - 1 \right)}{\left(\frac{E_f}{E_m} + \xi \right)} \quad (10)$$

در این روابط، E_m مدول یانگ ماتریس (گیگاپاسکال)، E_f مدول یانگ فاز تقویت‌کننده (گیگاپاسکال)، ϕ کسر حجمی فیلر (بدون بعد و بین ۰ تا ۱) و ξ ضریب هندسی وابسته به شکل و نسبت ابعادی ذرات است. برای ذرات کروی مقدار ξ معمولاً ۲ و برای الیاف بلند می‌تواند تا ۱۰۰۰ یا بیشتر باشد [۹۱]. در مواردی که اثر برهم‌کنش بین ذرات و توزیع تنش در ماتریس اهمیت بیشتری دارد، مدل Tanaka-Mori دقت بهتری ارائه می‌دهد. این مدل با در نظر گرفتن میدان تنش میانگین در ماتریس و تعامل بین ذرات، مدول مؤثر را به صورت زیر محاسبه می‌کند:

۲-۴- نانومواد سه‌بعدی (3D)

نانومواد سه‌بعدی به موادی گفته می‌شود که ساختار نانومقیاس آن‌ها در هر سه راستای فضایی به‌طور پیوسته گسترش یافته است. نانوکامپوزیت‌ها یکی از مهم‌ترین زیرگروه‌های این خانواده محسوب می‌شوند که در آن یک‌فاز ماتریس (پلیمر، فلز یا سرامیک) با ذرات یا ساختارهای نانویی تقویت می‌شود. این مواد با فراهم آوردن سطح ویژه بالا و پیوستگی ساختاری در هر سه بعد، می‌توانند انتقال حرارت، استحکام و پایداری مکانیکی را به شکل چشم‌گیری بهبود دهند [۸۹]. نکته قابل توجه این است که حتی مقادیر بسیار کم نانوفیلرها (کمتر از ۲ تا ۳ درصد حجمی) مانند نانولوله‌های کربنی یا صفحات گرافنی که خود دارای مدول یانگ در محدوده صدها گیگاپاسکال هستند [۹۰]، می‌توانند باعث جهش محسوس در مدول مؤثر کامپوزیت شوند. پیش‌بینی کمی این تغییرات در خواص مکانیکی معمولاً با استفاده از مدل‌های میکرومکانیکی انجام می‌شود. یکی از رایج‌ترین این مدل‌ها، مدل کلاسیک Halpin-Tsai است که برای محاسبه مدول یانگ مؤثر نانوکامپوزیت به کار می‌رود. این مدل رابطه بین خواص ماتریس،

تعریف می‌شوند. ثابت‌های لامه λ و μ به صورت معادله ۱۶ و ۱۷، از مدول یانگ و نسبت پواسون محاسبه می‌شوند:

$$\lambda = \frac{Ev}{[(1+v)(1-2v)]} \quad (16)$$

$$\mu = \frac{E}{[2(1+v)]} = G \quad (17)$$

که در آن λ (ثابت لامه اول، به گیگاپاسکال) مرتبط با تغییر حجم و μ (ثابت لامه دوم یا مدول برشی، به گیگاپاسکال) مرتبط با تغییر شکل برشی است. ماتریس سفتی برای ماده همسانگرد به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$[C] = \begin{bmatrix} \lambda + 2\mu & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda + 2\mu & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & \lambda + 2\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu \end{bmatrix} \quad (18)$$

این ماتریس نشان می‌دهد که در مواد همسانگرد، پاسخ مکانیکی تنها به دو ثابت مستقل λ و μ یا معادل آن‌ها E و ν بستگی دارد، در حالی که در مواد ناهمسانگرد ممکن است تا ۲۱ ثابت مستقل الاستیک نیاز باشد.

۲-۴-۴- قانون مخلوط‌ها

برای تخمین اولیه و سریع خواص مکانیکی، قانون ساده مخلوط‌ها نیز طبق رابطه ۱۹، قابل استفاده است [۹۱ و ۹۲]:

$$E_{eff} \approx E_m(1-\varphi) + E_f \times \varphi \quad (19)$$

این رابطه یک تقریب خطی است و معمولاً کران بالای مدول یانگ مؤثر را ارائه می‌دهد مدل Voigt کران پایین مدل Reuss نیز به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{1}{E_{eff}} \approx \frac{1-\varphi}{E_m} + \frac{\varphi}{E_f} \quad (20)$$

مدول مؤثر واقعی معمولاً بین این دو کران قرار می‌گیرد و مدل‌های پیچیده‌تر مانند Halpin-Tsai و Mori-Tanaka پیش‌بینی دقیق‌تری در این محدوده ارائه می‌دهند.

$$E_{eff} = E_m \times \left[1 + \frac{\varphi(E_f - E_m)}{(E_m + A(1-\varphi))} \right] \quad (11)$$

در این رابطه، A پارامتری است که تابع شکل هندسی ذرات، نسبت سختی تقویت‌کننده به ماتریس و همچنین نسبت پواسون مواد است [۹۲]. برای ذرات کروی، A معمولاً برابر با $3.4G_m$ است که G_m مدول برشی ماتریس می‌باشد.

۲-۴-۱- مدول برشی و نسبت پواسون

علاوه بر مدول یانگ، مدول برشی مؤثر نیز یکی از پارامترهای کلیدی در طراحی نانوکامپوزیت‌ها است. این پارامتر از طریق رابطه الاستیک کلاسیک زیر با مدول یانگ و نسبت پواسون مرتبط است:

$$G_{eff} = \frac{E_{eff}}{[2(1+\nu_{eff})]} \quad (12)$$

که در آن ν_{eff} نسبت پواسون مؤثر کامپوزیت است (بدون بعد و معمولاً بین ۰.۲ تا ۰.۴ برای اکثر مواد مهندسی) [۹۱]. نسبت پواسون خود را می‌توان از قانون مخلوط‌ها تخمین زد:

$$\nu_{eff} = \nu_m(1-\varphi) + \nu_f \times \varphi \quad (13)$$

که در آن ν_m نسبت پواسون ماتریس و ν_f نسبت پواسون فاز تقویت‌کننده است.

۲-۴-۲- مدول حجمی

یکی دیگر از پارامترهای مهم در توصیف رفتار الاستیک نانوکامپوزیت‌ها، مدول حجمی است که طبق معادله ۱۲، مقاومت ماده در برابر فشار همه‌جانبه را نشان می‌دهد.

$$K_{eff} = \left[\frac{E_{eff}}{3(1-2\nu_{eff})} \right] \quad (14)$$

مدول حجمی مؤثر (K_{eff}) به گیگاپاسکال برای پیش‌بینی رفتار ماده تحت بارگذاری هیدرواستاتیک و در کاربردهایی مانند پوشش‌های مقاوم به فشار ضروری است.

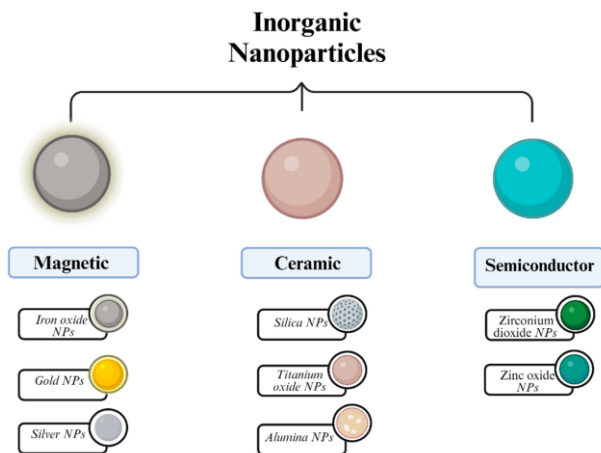
۲-۴-۳- ماتریس سفتی و روابط تنش کرنش

توصیف کامل پاسخ مکانیکی نانوکامپوزیت‌ها نیازمند استفاده از ماتریس سفتی است. این ماتریس بر اساس قانون هوک رابطه خطی بین بردار تنش و بردار کرنش را به صورت زیر بیان می‌کند:

$$\{\sigma\} = [C]\{\epsilon\} \quad (15)$$

در این رابطه، $\{\sigma\}$ بردار تنش شامل شش مؤلفه $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}$ ، $\{\epsilon\}$ بردار کرنش شامل شش مؤلفه $\epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}, \epsilon_{zz}, \gamma_{yz}, \tau_{xz}, \tau_{xy}$ ، γ_{xz}, γ_{xy} و $[C]$ ماتریس سفتی است. در یک ماده همسانگرد سه‌بعدی، $[C]$ یک ماتریس 6×6 است که اجزای اصلی آن برحسب ثابت‌های لامه

کارایی بیشتری دارند [۹۴]. شکل ۶، دسته‌بندی نانوساختارهای معدنی را نشان می‌دهد.



شکل ۶: دسته‌بندی نانوساختارهای معدنی [۹۴]

۲-۵-۱- نانومواد مغناطیسی

نانوذرات مغناطیسی به‌عنوان نانوذرات معدنی توصیف می‌شوند که به میدان مغناطیسی اعمال شده واکنش نشان می‌دهند. آن‌ها عموماً از مواد مغناطیسی، به تنهایی یا ترکیبی، از جمله نیکل، آهن، کبالت و اکسیدهای آن‌ها تشکیل شده‌اند. نانوذرات مغناطیسی بر اساس تفاوت اندازه به دو دسته تک دامنه‌ای و چند دامنه‌ای تقسیم می‌شوند. به‌طور خاص، نانوذرات مغناطیسی معمولاً حدود ۱۰ تا ۲۰ نانومتر در بین نانوذرات تک دامنه مغناطیسی در نظر گرفته می‌شوند. نانوذرات مغناطیسی دارای خواص مختلفی از جمله ناهمسانگردی مغناطیسی، دمای کوری پایین، وادارندگی مغناطیسی و راندمان گرمایش بالا هستند. این خواص در درجه اول تحت تأثیر اثرات اندازه محدود ناشی از محدودیت کوانتومی الکترون‌ها، ساختارهای کریستالی مختلف و اثرات سطحی مربوط به شکست تقارن ساختار کریستالی در سطح ذره قرار دارند. علاوه بر این، نانوذرات مغناطیسی تک دامنه‌ای (MNPs) در دماهای بهینه رفتار سوپر پارامغناطیسی از خود نشان می‌دهند. رفتار سوپر پارامغناطیسی را می‌توان به‌عنوان تغییر در مغناطش نانوذرات مغناطیسی از طریق انرژی حرارتی به دلیل حجم کم آن‌ها تعریف کرد. نانوذرات مغناطیسی که رفتار سوپر پارامغناطیسی از خود نشان می‌دهند، معمولاً دارای سطح یکنواخت و اندازه‌های کوچک‌تر از ۲۰ نانومتر هستند. این نانوذرات مغناطیسی می‌توانند در صورت قرار گرفتن در معرض میدان مغناطیسی خارجی به‌طور دائم مغناطیسی شوند. به عبارت دیگر، در غیاب میدان الکترومغناطیسی، گشتاور

در قانون مخلوط‌ها، قانون مخلوط معکوس^۱ (IROM) برای پیش‌بینی خواص عرضی کامپوزیت‌ها استفاده می‌شود، جایی که مقاومت در مسیر انتقال بار کم‌ترین مقدار را کنترل می‌کند و ماتریس نقش غالب دارد. برخلاف مدل خطی ساده (ROM) که میانگین وزنی مدول طولی را بر اساس کسر حجمی محاسبه می‌کند و اثرات جهت‌گیری و ناهمگنی بین‌فازی را در نظر نمی‌گیرد، قانون معکوس توجه ویژه‌ای به مدول عرضی و انتقال تنش عمود بر جهت الیاف دارد. مدل Halpin-Tsai با در نظر گرفتن نسبت طول به قطر ذرات و جهت‌گیری، دقت بالاتری در پیش‌بینی مدول‌های طولی و سختی ارائه می‌دهد، اما تحلیل‌های عرضی را به صورت تقریبی پوشش می‌دهد. مدل Mori-Tanaka نیز برای توزیع سه‌بعدی و اثرات بین‌فازی مناسب است، اما فرض اتصال کامل و رفتار خطی-الاستیک آن باعث محدودیت در مقیاس نانو می‌شود. بنابراین، قانون مخلوط معکوس مکمل این مدل‌ها است و به‌ویژه در تحلیل خواص عرضی کامپوزیت‌ها اهمیت دارد، در حالی که مدل‌های دیگر بیشتر برای پیش‌بینی رفتار طولی و انتقال تنش چندبعدی کاربرد دارند.

۲-۵-۲- نانوذرات معدنی

نانوذرات معدنی^۲ iNPs از اتم‌های معدنی متصل به پیوندهای کووالانسی یا فلزی تشکیل شده‌اند. آن‌ها را می‌توان از نیمه‌رساناها، سرامیک‌ها یا فلزات مغناطیسی سنتز کرد. هسته اصلی iNP با تبلور نمک‌های معدنی تشکیل می‌شود که به صورت سه‌بعدی با اتم‌های متصل آرایش یافته‌اند. در نتیجه، ذرات بسیار سازمان‌یافته و منظم قرار می‌گیرند که مقاومت آن‌ها را در برابر عوامل بی‌ثبات‌کننده افزایش می‌دهد. اندازه سطح یک عامل حیاتی در ظرفیت فعالیت iNP است که به پتانسیل سمیت آن‌ها نیز مربوط می‌شود. چنین نسبت‌هایی عامل اصلی توزیع گسترده کاربردهای نانوذرات معدنی هستند. به‌عنوان مثال، نوع لیگاندی که برای سطح نانوذرات انتخاب می‌شود، به‌طور قابل توجهی بر کاربرد آن تأثیر می‌گذارد. لیگاندهای سطحی می‌توانند عملکرد نانوذرات را تغییر دهند، حتی آن را تغییر دهند و در نتیجه بر حوزه کاربرد ترجیحی تأثیر بگذارند. از آنجایی که نانوذرات معدنی می‌توانند به‌طور مؤثر به‌عنوان عوامل درمانی مورد استفاده قرار گیرند، یکی از ترجیحی‌ترین انواع نانوذرات در مقیاس تجاری هستند. این نانوذرات معدنی به‌طور گسترده برای کاربردهای عمدتاً ضد سرطان، آنتی‌اکسیدان و ضد باکتری تولید می‌شوند. بسته به ساختار iNP، زیرگروه‌های خاصی از iNP به‌عنوان عامل ترجیح داده می‌شوند و

² Inorganic Nanoparticles

¹ Inverse Rules of Mixtures

مغناطیسی خالص یک سیستم حاوی نانوذرات مغناطیسی در دماهای به اندازه کافی بالا صفر خواهد بود. برعکس، در حضور میدان مغناطیسی، یک هم‌ترازی آماری خالص از گشتاورهای مغناطیسی در نانوذرات مغناطیسی وجود خواهد داشت [۹۴].

۲-۵-۲- سرامیک‌ها

سرامیک‌ها موادی هستند که با اعمال فشار و یا گرما جامد شده‌اند. آن‌ها از ترکیبی از فلزات و غیرفلزات، از جمله یک یا چند فلز مخلوط با یک غیرفلز، یا اجزای غیرفلزی متعدد ترکیب‌شده با یک غیرفلز تشکیل شده‌اند. کاربردهای مواد سرامیکی شامل شیشه، سیمان، کانی‌های رسی و سایر مواد است. علاوه بر این، در کاربردهای پزشکی متنوعی از سرامیک‌های ساخته‌شده از فسفات کلسیم، سیلیس، آلومینا، زیرکونیوم، اکسیدهای آهن، کربنات‌ها و دی‌اکسید تیتانیوم به دلیل برهمکنش‌های مطلوب آن‌ها با بافت‌های انسانی استفاده می‌شود. به‌عنوان مثال، در صنعت دندانپزشکی، آلیاژهای فلز-سرامیک برای روکش‌ها استفاده می‌شوند و ترکیبات مبتنی بر هیدروکسید کلسیم و فسفات به‌عنوان مواد پرکننده اندودنتیک استفاده می‌شوند. به‌طور کلی، آن‌ها در برابر مواد شیمیایی قوی بهتر از فلزات و پلیمرها مقاومت می‌کنند و به‌عنوان عایق‌های حرارتی و الکتریکی عمل می‌کنند. از نظر مکانیکی، آن‌ها شکننده و سخت هستند. آن‌ها سختی عالی، مقاومت برتر در برابر گرما و خوردگی و ویژگی‌های عایق الکتریکی خود را در مقیاس نانو حفظ می‌کنند. مواد معدنی مانند آلومینا یا سیلیس، اکثریت نانوذرات سرامیکی را تشکیل می‌دهند. از همه فلزات، اکسیدهای فلزی و سولفیدهای فلزی می‌توان برای ایجاد نانوسیستم‌هایی با ابعاد، شکل‌ها و تخلخل‌های مختلف استفاده کرد، بنابراین هسته نانوذرات فقط به این دو ماده محدود نمی‌شود [۹۴].

۲-۵-۳- نانومواد نیمه هادی

نیمه‌هادی‌ها مواد جامدی هستند که دارای ساختار کریستالی هستند. همان‌طور که از نام آن‌ها پیداست، نیمه‌هادی‌ها دارای رسانایی و شکاف‌های انرژی الکترونی هستند که بین رساناها و عایق‌ها قرار دارند. نیمه‌هادی‌های خاصی مانند دی‌اکسید زیرکونیوم (ZrO_2) و اکسید روی (ZnO) معمولاً در سنتز نانوذرات نیمه‌هادی (sNPs) استفاده می‌شوند. کاربرد sNPs به‌طور گسترده در زمینه‌های خاصی مانند کاتالیز، حسگرها، پوشش‌های نوری و به ویژه سرامیک و دندانپزشکی مورد بحث قرار گرفته است. دی‌اکسید زیرکونیوم (ZrO_2) یک ماده

کریستالی نیمه‌هادی است که به‌طور گسترده برای توسعه نانوذرات ترجیح داده می‌شود ZrO_2 . به دلیل زیست‌سازگاری، عدم سمیت، مقاومت فشاری بالا و استحکام شکست در چندین زمینه تحقیقاتی مورد توجه قرار گرفته است. به لطف ویژگی مقاومتی آن، ZrO_2 تا حد زیادی در ایمپلنت‌های دندان‌پزشکی و برخی مواد زیستی برای افزایش مقاومت مواد استفاده می‌شود. این خواص به استفاده از ZrO_2 و مواد مبتنی بر ZrO_2 در زمینه‌های متمایزی مانند پوشش حرارتی، ذخیره‌سازی انرژی و بسیاری از کاربردهای زیست‌پزشکی، که بسیار شبیه به کاربردهای عمومی sNP هستند، گسترش یافته است. در کاربردهای زیست‌پزشکی، نانوذرات ZrO_2 همچنین می‌توانند از طریق برهمکنش مبتنی بر بار با سلول‌های باکتریایی، فعالیت ضد میکروبی از خود نشان دهند. یکی دیگر از مواد نیمه‌هادی رایج که در سنتز نانوذرات استفاده می‌شود، ZnO است. این ماده به‌عنوان یک ماده نیمه‌هادی برجسته، دارای چندین ویژگی منحصر به فرد است، از جمله «پایداری شیمیایی بالا، جذب تابش و پایداری نوری این ماده طیف وسیعی از زمینه‌های کاربردی، از جمله اما نه محدود به صنایع الکترونیک، لاستیک و نساجی، و داروسازی را دارد. نانوذرات ZnO پایداری حرارتی و مکانیکی قابل توجهی را همراه با انرژی اتصال و شکاف بالا نشان می‌دهند [۹۴]. جدول ۳ خلاصه‌ای از کاربردهای نانومواد معدنی را با تمرکز بر صنایع پزشکی و دارویی نشان می‌دهد.

جدول ۳: خلاصه‌ای از کاربردهای نانومواد معدنی در صنایع مختلف [۹۴]

نام ماده	کاربرد	بخشی از نتایج
اکسید آهن	دارورسانی	رهایش موفق داروهای ضدسرطان سورافنیب، دوکسوروبیسین و ایبوپروفن همراه با افزایش اثربخشی. نانوذرات اصلاح‌شده Fe_3O_4 دارای پاسخ مغناطیسی مناسب، آب‌گریزی مطلوب، توانایی اتصال دارو و جذب مناسب برای درمان هایپرترمیا بودند.
اکسید آهن	تصویربرداری زیستی	افزایش کارایی و هدفمندی در تشخیص تومور به‌عنوان عامل کنتراست در تصویربرداری MRI (درون کشتگاهی و درون تنی). استفاده از نانوذرات عامل‌دار شده Fe_3O_4 در تصویربرداری فلورسانس NIR همراه با MRI نانوذره هیبریدی طلا Fe_3O_4 -به‌عنوان عامل کنتراست در تصویربرداری تشدید مغناطیسی.
اکسید آهن	درمان سرطان	سنتز نانوکامپوزیت‌های مبتنی بر Fe_3O_4 برای دارورسانی مؤثر و پیشگیری از سرطان پستان. کپسوله‌سازی کورکومین در نانوذرات Fe_3O_4 پوشش داده شده با کیتوزان موجب افزایش اثربخشی درمانی شد. نانوذرات پلی‌پیرول Fe_3O_4 -مهار متاستاز و رشد تومور سرطان ریه را با قابلیت MRI نشان دادند.
اکسید آهن	ضدباکتری	نانوذرات سنتز شده از منابع سبز دارای فعالیت ضدباکتری قابل توجه بودند. همچنین نانوذرات اصلاح‌شده از تشکیل بیوفیلم جلوگیری کرده و پایداری بالا و عدم سمیت سلولی نشان دادند.
اکسید آهن	دارورسانی	نانوذرات حامل سورافنیب دارای خواص مغناطیسی مناسب و افزایش فعالیت ضدسرطان بودند. همچنین نانوذرات اصلاح‌شده با بارگذاری کورکومین ظرفیت بارگذاری دارویی بالاتری نشان دادند.
نقره	فعالیت ضدباکتری	نانوذرات نقره سنتز شده از منابع مختلف دارای فعالیت باکتری‌کشی قوی علیه باکتری‌های گرم مثبت و گرم منفی بودند. ساختار ترکیبی نقره-مس فعالیت ضدباکتری بیشتری نسبت به هر کدام به‌تنهایی نشان داد.
نقره	دارورسانی	نانوذرات نقره در نانوکامپوزیت $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ سیستم دارورسانی مؤثری ایجاد کردند. همچنین رهایش مؤثر فنیندیون و افزایش فعالیت ضدانعقادی آن مشاهده شد.
نقره	ضدالتهاب	نانوذرات نقره مشتق شده از منابع مختلف موجب مهار سایتوکاین‌های پیش التهابی در شرایط درون کشتگاهی و درون تنی شدند.
نقره	ضدسرطان	نانوذرات نقره سنتز شده به روش سبز فعالیت ضدسرطانی قابل توجهی علیه سلول‌های HepG2 و MCF-7 نشان دادند.
طلا (Au)	ضدباکتری	نانوذرات هیبریدی طلا-کیتوزان علیه باکتری‌های مقاوم مؤثر بوده و رهایش دارویی کنترل شده نشان دادند.
طلا (Au)	دارورسانی	بهبود زیست توزیع و هدفمندسازی داروهای ضدسرطان و افزایش اثربخشی آن‌ها.
SiO_2	صنعتی	نانوذرات هیبریدی SiO_2 نانوالماس موجب افزایش پایداری حرارتی و خواص مکانیکی در تایر شدند SiO_2/ZnO تا ۹۸٪/۶٪. گزارش شد. خوردگی کلرید اسیدی فولاد جلوگیری کرد. حذف یون‌های روی از پساب با راندمان ۶۶/۵۸٪ گزارش شد.
ZrO_2	کاربردهای دندان پزشکی	افزایش استئواینTEGRیشن و بهبود خواص مکانیکی رزین‌های چاپ سه‌بعدی؛ مناسب برای ترمیم و پروتز موقت.
ZrO_2	ضدباکتری	فعالیت ضدباکتری و جلوگیری از تشکیل بیوفیلم بدون عوارض جانبی؛ استفاده همراه با آنتی‌بیوتیک‌ها در ترمیم زخم.
ZnO	بسته‌بندی مواد غذایی	بهبود خواص مکانیکی و سدکنندگی بخار آب فیلم‌های کیتوزانی؛ افزایش ماندگاری گوشت مرغ و ایجاد خاصیت ضدباکتری و آنتی‌اکسیدانی.
ZnO	ضدباکتری	فعالیت ضدباکتری قابل توجه در نانوذرات سنتز شده از منابع گیاهی و میکروبی.
ZnO	آرایشی	استفاده به‌عنوان فیلتر UV در کرم ضدآفتاب؛ کاهش فعالیت فوتوکاتالیستی و افزایش خاصیت آنتی‌اکسیدانی.
ZnO	ضدسرطان	افزایش ROS و القای آپوپتوز در سلول‌های MCF-7، HeLa و سایر رده‌های سرطانی (کولورکتال و کبدی).

۳- روش‌های سنتز

۳-۱- روش سل ژل

سل-ژل روشی است که به‌طور گسترده برای تهیه نانوذرات استفاده می‌شود. واکنش‌های تراکم و هیدرولیز در تهیه نانوذرات دخیل

هستند. عملیات حرارتی در سنتز میانی اعمال می‌شود و برای اطمینان از بلورینگی نانوذرات مورد نیاز است. آلکوکسیدها به‌عنوان پیش‌ساز برای تهیه نانوذرات اکسیدی عمل می‌کنند که از طریق نیروهای مولکولی (به‌عنوان مثال، نیروهای واندروالس یا پیوند هیدروژنی) با هم واکنش می‌دهند و از طریق تبخیر یا تراکم در یک سل پراکنده

شناسایی می‌شوند. نانوذرات الماس را می‌توان با استفاده از طیف‌سنجی رامان که دارای پیک تیز در حدود 1332 cm^{-1} می‌باشد، توصیف کرد. مزایای فرایند CVD تولید لایه‌های نازک با خلوص بالا و ساخت اتصالات ناگهانی است. معایب فرایند CVD محصول مبتنی بر خواص پیش‌ساز و یکنواختی ضعیف است [۹۵].

۳-۳- روش هم‌رسوبی شیمیایی

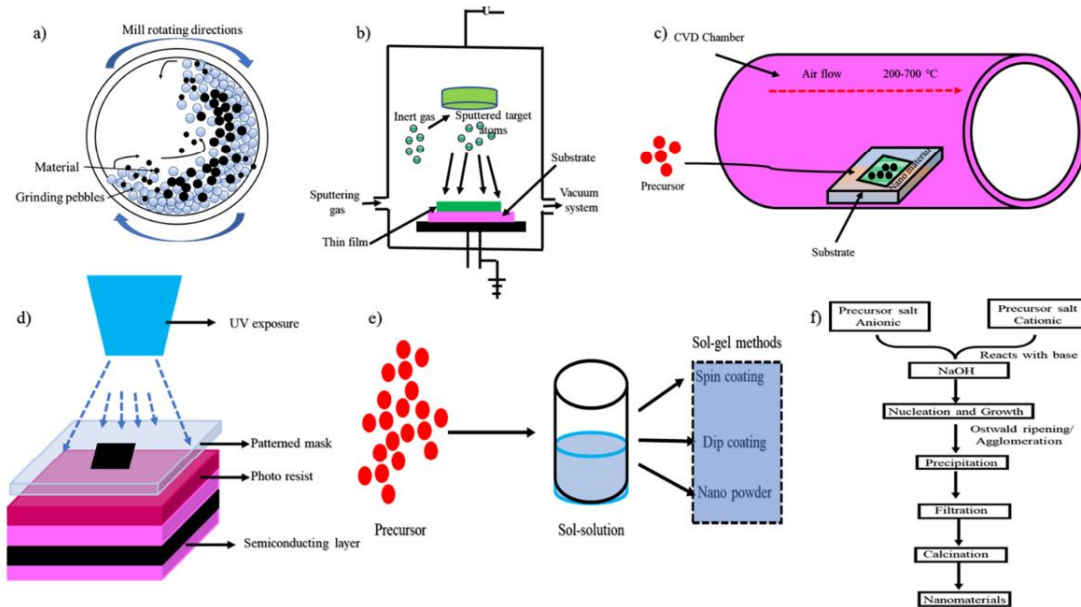
روش هم‌رسوبی شیمیایی شامل مخلوط کردن دو نمک مختلف است که در نهایت در یک حلال آبی، به‌ویژه در محیط قلیایی، رسوب می‌کنند. به‌عنوان مثال، تهیه کلاسیک نانوذرات مغناطیسی (MNPs) از طریق روش هم‌رسوبی شیمیایی انجام می‌شود. در این فرایند، نمک‌های Fe^{2+} و Fe^{3+} در حضور باز NaOH مخلوط شده و با افزایش pH، هسته‌زایی و رشد هم‌زمان ذرات اکسید آهن آغاز می‌شود. پارامترهایی مانند مورفولوژی، اندازه و ترکیب با تغییر pH، نوع لیگاند، نمک پیش‌ساز و نسبت‌های شیمیایی قابل کنترل هستند. نانوذرات با افزودن سورفکتانت مناسب (به‌عنوان مثال، اسید اولئیک)، لیگاند (به‌عنوان مثال، آیتامر)، پلیمر (به‌عنوان مثال، پلی(اتیلن گلیکول اکریلات)) و مولکول‌های معدنی (به‌عنوان مثال، NaOH) تثبیت می‌شوند که این امر از تجمع ذرات جلوگیری کرده و پایداری کلوئیدی را افزایش می‌دهد. فلزات پیچیده را نیز می‌توان با استفاده از این روش سنتز کرد؛ به‌عنوان مثال، سنتز آهن-کرومیت از مخلوط نمک آهن (III) و کرومات حاصل می‌شود. در محیط آبی، یون‌های فلزی ابتدا تشکیل کمپلکس داده و سپس با استفاده از باز آمونیوم رسوب داده می‌شوند. رسوب حاصل در دمای بالا تجزیه شده و کرومیت آهن (III) تولید می‌شود. ویژگی گونه‌های شیمیایی سنتز شده با استفاده از روش هم‌رسوبی، نامحلول بودن و دارا بودن اندازه ذرات کوچک به دلیل ایجاد شرایط فوق اشباع بالا است. اندازه ذرات می‌تواند در بازه نانومتری تغییر کند و تحت تأثیر پدیده‌هایی مانند تجمع و رسیدن اُستوالد قرار گیرد. در طول فرایند هسته‌زایی، هسته‌های اولیه تشکیل شده و سپس از طریق رشد کنترل‌شده به اندازه نهایی می‌رسند. از دیدگاه ترمودینامیکی، میزان فوق اشباع و انرژی سطحی نقش اساسی در تعیین سرعت هسته‌زایی دارند، در حالی‌که عوامل سینتیکی رشد بلورها را کنترل می‌کنند. همچنین، کنترل اتمسفر واکنش و جلوگیری از اکسیداسیون ناخواسته یون‌های فلزی می‌تواند بر خلوص فازی محصول نهایی تأثیرگذار باشد. در نهایت، بهینه‌سازی هم‌زمان تمامی این پارامترها برای دستیابی به توزیع اندازه یکنواخت و خواص عملکردی مطلوب ضروری است. مزایای روش‌های هم‌رسوبی شامل

می‌شوند. پیش‌ساز آلکوکسید در حضور یک باز یا اسید هیدرولیز می‌شود و منجر به یک ژل پلیمری می‌شود. محصول نهایی با سرعت تراکم و هیدرولیز تعیین می‌شود. به‌عنوان مثال، هرچه نانوذرات ساخته شده کوچک‌تر باشند، سرعت هیدرولیز کمتر است. این یک فرایند مناسب برای سنتز کامپوزیت‌ها، اکسیدها و نانوذرات سرامیکی با توزیع همگن با خلوص بالا است. این روش نسبت به روش همجوشی اکسیدی مرسوم مزیت دارد. برای مثال، نانوکامپوزیت‌های زیروژل ساخته شده از آهن یا سیلیس با مخلوط مستقیم نیترات آهن III، با استفاده از TEOS در فرمولاسیون سل-ژل تولید می‌شوند. آهن فریک در حضور گاز هیدروژن در دمای حدود ۴۰۰ تا ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد به آهن فلزی کاهش می‌یابد. کاربرد زیروژل شامل فشرده‌سازی یک نانوکامپوزیت به صورت گلوله‌ای روی اسلایدهای شیشه‌ای برای رسانایی الکتریکی یا مغناطیسی است. مزیت روش سل-ژل خلوص بالا و دستیابی به یک نانوساختار یکنواخت در دمای پایین در حضور لیگاند به‌عنوان عامل پوششی است. عیب اصلی این روش، سطح بالای ناخالصی‌ها از محصولات جانبی واکنش و نیاز به عملیات پس از تصفیه است [۹۵].

۳-۲- روش CVD

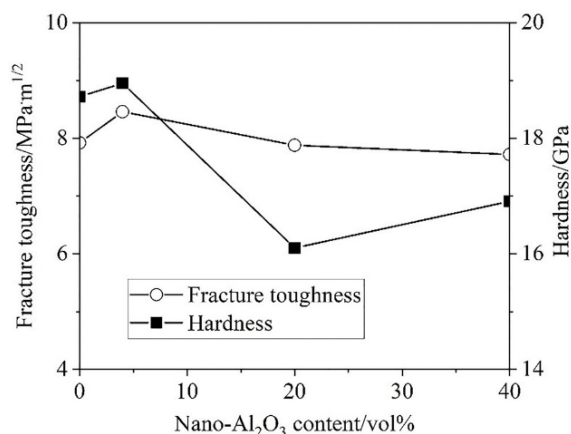
رسوب بخار شیمیایی CVD یک فرایند رسوب‌گذاری مبتنی بر خلاء برای تولید مواد جامد با کیفیت و عملکرد بهتر است. در این روش، لایه‌های نازک روی زیر لایه رسوب می‌کنند و شامل واکنش‌های شیمیایی بین گونه‌هایی مانند گازهای آلی-فلزی و سایر گازها می‌شوند. منحصر به فرد بودن CVD در روش رسوب‌گذاری چندجتهه برای پوشش دادن روی زیر لایه است، در حالی که PVD از روش برخورد خطی استفاده می‌کند. CVD معمولاً برای رسوب مواد به اشکال مختلف مانند رشد کریستالی، آمورف و اپیتاکسیال در فرایند میکروساخت استفاده می‌شود. در CVD، مخلوطی از گازها به صورت شیمیایی روی سطح مواد حجیم واکنش می‌دهند که منجر به تجزیه شیمیایی و تشکیل یک پوشش متراکم روی پایه سطح ماده می‌شود. به‌عنوان مثال، کریستال‌های الماس را می‌توان با استفاده از روش CVD روی زیر لایه‌های سیلیکون یا مولیبدن رسوب داد. نانوذرات الماس باردار را می‌توان با استفاده از فرایند رسوب بخار شیمیایی رشته داغ (HFCVD) تولید کرد. نانوذرات الماس با استفاده از زیر لایه‌های شناور و زمینی به دام می‌افتند. برخی از زیر لایه‌ها عبارت‌اند از SiO_2 ، غشاهای گرافنی شبکه TEM مس و کربن. انواع مختلف آلوتروپ‌های الماس به‌عنوان الماس شش ضلعی و مکعبی، ذرات i-کربن و n-الماس

امکان دخالت گونه‌های بدون بار، احتمال حضور مقدار اندکی ناخالصی در طول رسوب‌گذاری، زمان‌بر بودن نسبی، ناهمگنی در تکرارپذیری و تأثیرپذیری نتایج از سرعت و شرایط دقیق رسوب‌گذاری است [۹۵]. شکل ۷ شماتیک گرافیکی از انواع روش‌های سنتز را نشان می‌دهد.



شکل ۷: خلاصه‌ای از روش‌های سنتز نانومواد، (الف) آسیاب گلوله‌ای، (ب) PVD، (ج) CVD، (د) لیتوگرافی، (ه) روش سل-ژل، و (و) روش هم‌رسوبی [۹۵]

نانومواد در اینجا در درجه اول به فاز نانو-تقویت در نانوکامپوزیت‌ها اشاره دارد. شکل ۸، قانون تغییرات چقرمگی شکست و سختی را با افزایش محتوای نانو Al_2O_3 نشان می‌دهد. چقرمگی شکست و سختی پس از افزایش اولیه با افزایش مقدار نانو Al_2O_3 ، به‌طور واضح کاهش می‌یابند. هنگامی که مقدار نانو Al_2O_3 به ۴ درصد حجمی می‌رسد، چقرمگی شکست و سختی آن به حداکثر می‌رسد. بنابراین، افزودن مقدار زیادی نانوذرات به ماتریس ممکن است خواص مکانیکی نانوکامپوزیت را کاهش دهد [۹۶].



شکل ۸: اثرات میزان نانو Al_2O_3 بر چقرمگی شکست و سختی ماده سرامیکی [۹۶]

سادگی و مستقیم بودن فرایند، کنترل اندازه ذرات بر اساس ترکیب شیمیایی، امکان اصلاح سطح با عملکردهای مختلف، نیاز به دمای نسبتاً پایین، جلوگیری از استفاده گسترده از حلال‌های آلی و صرفه‌جویی در مصرف انرژی است. عیب اصلی این روش، محدود بودن

۴- خواص مکانیکی نانوذرات

خواص مکانیکی نانومواد به دلیل اثرات سطحی، تقلیل بُعد و افزایش نسبت سطح به حجم، به‌طور اساسی با همان مواد در مقیاس میکرومتری و حجیم متفاوت است. اتم‌های سطحی در نانومواد سهم بسیار بیشتری در کل خواص نسبت به کریستال‌های بزرگ‌تر دارند و این سبب می‌شود که مدول الاستیسیته و استحکام کششی در مقیاس نانو به‌طور معنی‌داری بالاتر باشد؛ برای مثال، گرافن تک‌لایه‌ای مدول ۵۳۰۰-۱۰۰۰ گیگاپاسکال دارد درحالی‌که گرافیت سیاه تنها ۲۰ گیگاپاسکال است. این انقلاب در خواص اجازه می‌دهد تا نانومواد در کسرهای حجمی بسیار پایین (۰/۵-۰/۲) تقویت‌های چشمگیر ایجاد کنند که از دیدگاه وزن و هزینه بهترین است. نقطه عطف اساسی این است که خواص نانومواد از رفتار خطی در مقیاس میکرو خارج شده و غیرخطی می‌شوند؛ به‌طور خاص، میکروالیاف کلاسیک (مثل الیاف شیشه یا کربن) از قانون مخلوط خطی دقیق‌تری تبعیت می‌کنند، اما نانومواد به دلیل اثرات کوانتومی و افزایش سطح تماس انرژی بالا، انحرافات قابل‌توجهی از این قانون نشان می‌دهند. از آن‌جا که هر نانوذره خواص مکانیکی منحصر به فرد خود را دارد، مقایسه چقرمگی مواد نانوسرامیکی و نانومواد طبیعی غیرمنطقی است بنابراین، انتخاب

نانولوله‌های کربنی در داخل اسکاترودیت‌ها است. کلوخه‌های صفحه مانند به‌عنوان صفحات لغزش و صفحاتی عمل می‌کنند که در آن‌ها ترک‌ها می‌توانند به راحتی پخش شوند و در نتیجه منجر به شکستگی نمونه در بارهای مکانیکی کم می‌شوند.

فرایند کلوخه‌ای شدن یک امر طبیعی در ساختار نانوکامپوزیت‌های دارای الیاف کربنی است. جدول ۴ خواص مکانیکی نانومواد غیرفلزی را نشان می‌دهد. بدیهی است که افزودن نانولوله‌های کربنی چند جداره به اسکاترودیت‌ها منجر به کاهش خواص مکانیکی نانوکامپوزیت خواهد شد. این امر به دلیل تشکیل کلوخه‌های

جدول ۴: خواص مکانیکی نانومواد غیرفلزی [۹۵ و ۹۶]

Sample	Vickers hardness (Gpa)	Compressive strength (Mpa)	Flexural strength (Mpa)	Tensile strength (Mpa)	Elongation at break (%)	Young's/ Bending modulus (Gpa)
p-type skutterudites	52±576	20±630	10±105	—	—	8±44
p-type skutterudites+ 0.5 wt% multi-walled carbon nano tubes	52±513	15±355	7±65	—	—	6±40
p-type skutterudites+ 1.0 wt% multi-walled carbon nano tubes	85±563	15±320	7±54	—	—	8±39
p-type skutterudites+ 1.5 wt% multi-walled carbon nano tubes	70±569	10±255	5±45	—	—	33-10
oil palm empty fruit bunch fiber	—	—	—	50-400	8-18	1-9
Kenaf fiber	—	—	—	500-600	1.5-3.5	40-53
100% nano-PLLA	—	—	135.6	55.6	—	3.3
90% nano- PLLA+ 10% nano-HA	—	—	142.5	53.2	—	3.5
80% nano- PLLA+ 20% nano-HA	—	—	156.8	48.6	—	3.8
70% nano- PLLA+ 30% nano-HA	—	—	130.3	42.3	—	3.9
60% nano- PLLA+ 40% nano-HA	—	—	125.9	38.6	—	4.1

۴-۱- قانون مخلوط خطی برای کامپوزیت‌های دارای الیاف نانو

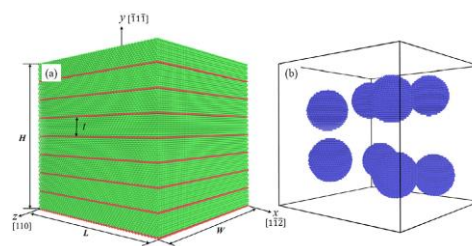
قانون مخلوط خطی طبق رابطه ۱۹، برای الیاف طولی جهت در کامپوزیت‌ها استفاده می‌شود که در آن $E_{composite}$ مدول الاستیسیته کامپوزیت نهایی، V_m کسر حجمی الیاف یا نانوماده بین ۰ تا ۱، E_f مدول الاستیسیته الیاف برحسب گیگاپاسکال، V_m کسر حجمی ماتریس و E_m مدول الاستیسیته ماتریس پلیمری معمولاً ۵-۳ گیگاپاسکال برای رزین‌های اپوکسی است. این رابطه بر فرض اتصال کامل بین الیاف و ماتریس بدون لغزش نسبی استوار است و برای نانومواد کربنی با مدول بسیار بالا، افزایش قابل توجهی را در سختی کل سیستم ایجاد می‌کند.

$$V_f \times E_f + V_m \times E_m = V_f \times E_f + (1 - V_f)E_m \quad (21)$$

۴-۲- قانون مخلوط معکوس برای کامپوزیت‌های دارای الیاف نانو

قانون معکوس برای خواص عرضی کامپوزیت به کار می‌رود که در آن $E_{transverse}$ مدول الاستیسیته عمود بر جهت الیاف است و نشان‌دهنده آن است که مقاومت کمتر در مسیر انتقال بار، کل سیستم را کنترل

به دنبال بررسی نانوذرات فلزی مغناطیسی، طی پژوهشی، وانگ و همکارانش [۹۷] فرایند کشش تک محوری نانو دوقلویی مس با اجزای نقره را با روش دینامیک مولکولی شبیه‌سازی کردند و دریافتند که کاهش کسر حجمی نقره یا افزایش اندازه نقره منجر به افزایش استحکام نهایی مواد نانو دوقلویی می‌شود (شکل ۹). از نظر مطالعه تجربی، محققان بر اصلاح نانومواد، یعنی بهبود خواص مکانیکی نانومواد تمرکز دارند. در حال حاضر، یک روش رایج، افزودن نانوذرات به ماتریس برای بهبود خواص مکانیکی نانومواد است. به‌عنوان مثال، استحکام مواد مدرج تابعی را می‌توان با افزودن نانولوله‌های کربنی افزایش داد.



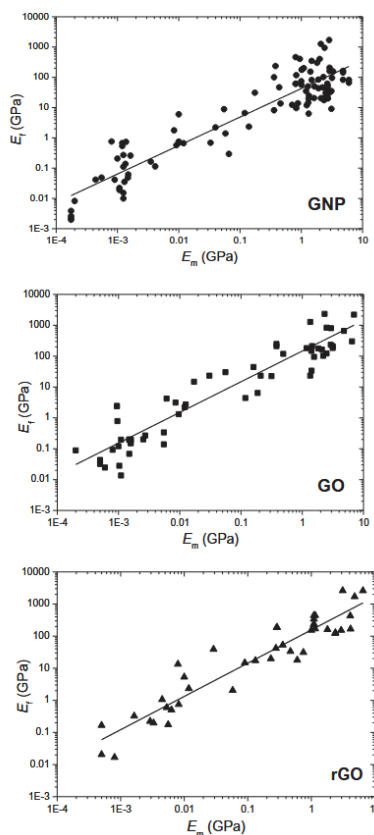
شکل ۹: نمودار شماتیک سه‌بعدی از نانو دوقلویی شبیه‌سازی شده مس با اجزای کروی نقره [۹۷]

$$K = \begin{Bmatrix} 1 & 0^\circ \\ 3.8 & 2D \\ \frac{1}{15} & 3D \end{Bmatrix} \quad (26)$$

$$E_{eff} = K.E_{longitudinal} + (1 - K).E_{transverse} \quad (27)$$

۶-۴- اثرات ماتریسی ساختارهای گرافنی

در تلاشی برای جمع‌آوری هرچه بیشتر اطلاعات در مورد خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های مبتنی بر گرافن که در مقالات موجود است، جدول ۵ تهیه شده است که در آن خواص مکانیکی اصلی طیف وسیعی از نانوکامپوزیت‌ها فهرست شده است.



شکل ۱۰: نمودار لگاریتمی مدول گرافن به‌عنوان تابعی از مدول ماتریس [۱۰۰]

بهبود خواص در درجه اول به صورت افزایش درصد در خاصیت در مقایسه با ماتریس نشان داده شده است. این روشی است که اغلب در مقالات ارائه می‌شود، اما می‌تواند گمراه‌کننده باشد زیرا به خواص ماده ماتریس بسیار وابسته است. به‌عنوان مثال، اگر خواص مکانیکی ماتریس نسبتاً ضعیف باشد، ممکن است بهبود حاصل از افزودن گرافن نسبتاً خوب به نظر برسد، حتی اگر خواص واقعی نانوکامپوزیت کاملاً متوسط باشد. نتایج جدول ۵ نشان می‌دهد که، از نظر افزایش خواص مکانیکی پس از افزودن گرافن، ماتریس‌هایی با مدول پایین‌تر (مانند

می‌کند. بدین معنی که در جهت عرضی، ماتریس نقش حاکم ایفا می‌کند و نانوماده نقشی ثانویه دارد، لذا E_t عموماً بسیار کمتر از $E_{composite}$ در جهت طولی است و برای نانومواد سطحی مانند گرافن و اشتقاقیات آن این تفاوت بسیار چشمگیر است.

$$\frac{1}{E_{transverse}} = \frac{v_f}{E_f} + \frac{1 - v_f}{E_m} \quad (22)$$

۳-۴- ماتریس سختی لامینا

ماتریس سختی [C] تنسور دوم مرتبه الاستیکی است که رابطه تنش- کرنش را برای لامینای متعامد طبق رابطه ۲۱، بیان می‌کند که در آن C درایه‌های ماتریس سختی در جهات الیاف و ماتریس، σ ماتریس تنش و ماتریس کرنش می‌باشد.

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & 0 \\ C_{21} & C_{22} & 0 \\ 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (23)$$

۴-۴- مدل هالپین-سای

این مدل برای نانوماده‌های غیرهم‌ریخت مثل نانولوله‌های کربنی استفاده می‌شود که در آن E_c مدول الاستیسیته کامپوزیت است، عامل شکل (shape factor) یک پارامتر تجربی است که برای نانولوله‌های کربنی بین (۲-۴) وابسته به نسبت طول به قطر برای ذرات کروی حدود ۱/۵ است و همین‌طور عامل تصحیح است. این مدل برای توزیع‌های تصادفی 3D دقیق‌تر از قانون مخلوط خطی است و خاصه برای SWCNT و MWCNT بسیار مؤثر است [۹۸].

$$E_c = E_m \times \frac{1 + 2\xi\eta V_f}{1 - \eta V_f} \quad (24)$$

$$\eta = E_m \times \frac{\frac{E_f}{E_m} - 1}{\frac{E_f}{E_m} + 2\xi} \quad (25)$$

۵-۴- عامل جهت‌گیری

عامل جهت‌گیری K نشان می‌دهد که توزیع تصادفی الیاف چگونه سختی کامپوزیت را کاهش می‌دهد. برای الیاف کاملاً موازی $K=1$ ، 1D و تمام بار در جهت الیاف منتقل می‌شود، اما برای توزیع تصادفی 2D (صفحه‌ای) که $K=3.8$ است، سختی تا 62.5% کاهش می‌یابد، و برای توزیع تصادفی 3D کامل با $K=1/15$ ، سختی تنها با 6.7% مقدار جهت‌دار خود را حفظ می‌کند [۹۹].

بر GNP، GO و rGO، در مجموعه نمودارهای لگاریتمی شکل ۱۰ به‌عنوان تابعی از مدول ماتریس رسم شده است. می‌توان مشاهده کرد که اگرچه پراکندگی قابل توجهی در داده‌ها وجود دارد، اما برای هر نوع پرکننده، داده‌ها از یک رابطه خطی با شیب تقریباً واحد در هر مورد پیروی می‌کنند. این رفتار کاملاً قابل توجه است زیرا داده‌ها از تعداد زیادی از نشریات مربوط به مواد ماتریس پلیمری مختلف، از الاستومرهای نرم گرفته تا پلیمرهای سفت و سخت، و تعدادی از مواد مختلف دیگر گرفته شده‌اند.

جدول ۵: خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های مبتنی بر گرافن با توجه به نوع ماتریس و درصد جرمی الیاف [۱۰۰]

Graphene type	Matrix	Preparation method	Optimum loading	Matrix modulus Em (GPa)	Tensile modulus increase (%)	Graphene modulus Ef (Gpa)	Tensile strength increase(%)	Fracture toughness increase (%)
GNP	Epoxy	Three roll mill	8 wt%	2.8	22	14	24 at 3Wt%	80
fGNP	Epoxy	Three roll mill	1 wt%	2.4	15.8	106	59 at 0.5Wt%	—
fGr	Epoxy	Three-roll mill	0.2 wt%	2.9	8	243	57 at 0.1 Wt%	—
GNS	Epoxy	Solution blending	0.1 wt%	2	33	402	3.5	—
Go	Epoxy	Solution blending	1 wt%	2.5	24	122.5	14	—
fGr	PVA	Solution blending	5 wt%	2.9	150	177	153	—
GNS	PVA	Solution blending	3 wt%	0.12	990	36	166	—
Gr	PVA	Solution blending	0.4 wt%	4.8	70	1704	66 at 0.8Wt%	—
GNP	PVA	Melt mixing	20 wt%	1.2	412	54	—	—

۴-۷- خصوصیات الاستیک نانومواد

۲ درصد، افزودن گرافن یا SWCNT می‌تواند مدول ماتریس پلیمری را تا ۳ تا ۵ برابر افزایش دهد. گرافن اکسید (GO) با مدول پایین‌تر ۲۰۰ تا ۳۰۰ گیگاپاسکال و کرنش نهایی ۱ تا ۵ درصد، به دلیل حضور گروه‌های عاملی و پیوندهای ضعیف‌تر، رفتار الاستیک نرم‌تری دارد، اما نسخه‌ی احیاشده‌ی آن (rGO) با بازسازی ساختار شبکه‌ای خود، مدول را تا حدود ۸۰۰ گیگاپاسکال بازمی‌یابد و سختی در جهت طولی را به‌طور محسوسی افزایش می‌دهد. در مقابل، نانولوله‌های تک‌جداره با مدول تقریبی ۱۰۰۰ گیگاپاسکال و مقاومت کششی ۱۵۰ تا ۲۰۰ گیگاپاسکال، رفتار غیرخطی شدیدی در ماتریس سختی دارند که

جدول ۶ نشان می‌دهد که خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها به‌شدت تابع نوع نانوماده، چسبندگی بین فازها و سازگاری بلوری با ماتریس است. در این میان، نانومواد کربنی مانند گرافن، نانولوله‌های کربنی تک‌جداره (SWCNT) و چندجداره (MWCNT) بیشترین سهم را در بهبود سختی و مقاومت کششی دارند؛ به‌گونه‌ای که گرافن با مدول الاستیسیته در بازه‌ی ۱۰۰۰ تا ۱۳۰۰ گیگاپاسکال و مقاومت کششی حدود ۱۳۰ تا ۱۵۰ گیگاپاسکال، یکی از بالاترین مقادیر گزارش‌شده در میان تمام مواد شناخته‌شده است. حتی در کسری حجمی کمتر از

وابسته به دما را نشان می‌دهند. با این حال، در سیستم‌های ترکیبی با گرافن یا rGO، Fe_3O_4 می‌تواند با اثرات کوپلمری و مغناطیسی موجب بهبود پایداری حرارتی شود. از نظر پدیده‌ی کماتش، مواد کربنی به دلیل نسبت بالای مدول به چگالی (E/ρ) بیش از ۲۵۰۰ برای گرافن مقاومت فوق‌العاده‌ای در برابر ناپایداری فشاری دارند، در حالی که سرامیک‌ها و فلزات نرم بیشتر در برابر خمش یا خردشدگی موضعی تسلیم می‌شوند. پدیده‌ی خزش نیز برای نانومواد کربنی تقریباً ناچیز است و عمدتاً توسط ماتریس کنترل می‌شود، درحالی‌که در سرامیک‌ها خزش دمای بالا و در فلزات نفوذی مشاهده می‌شود. در مجموع، تحلیل کمی و کیفی جدول نشان می‌دهد که گرافن و SWCNT در تقویت مدول طولی و برشی برترند، سرامیک‌ها نقش مکمل در پایداری حرارتی دارند، و Fe_3O_4 ضمن دارا بودن خواص مغناطیسی، تنها در حضور پیوند مؤثر با ماتریس می‌تواند به‌طور معنادار به افزایش مدول و کاهش خزش کمک کند.

معمولاً با مدل‌های هالپین-سای توصیف می‌شود. نانولوله‌های چندجداره نیز با مدول حدود ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ گیگاپاسکال تقویت متوسطی ایجاد می‌کنند ولی از پایداری بالایی در برابر کماتش برخوردارند. در بخش سرامیک‌ها، TiO_2 با مدول ۳۰۰ تا ۴۰۰ گیگاپاسکال و ZrO_2 با حدود ۲۰۰ تا ۲۳۰ گیگاپاسکال، افزایش متوسطی در سختی ایجاد می‌کنند اما شکنندگی بالا و کرنش نهایی کمتر از نیم درصد، استفاده‌ی آن‌ها را به کاربردهای حرارتی و پوششی محدود کرده است. Al_2O_3 با مدول حدود ۳۵۰ گیگاپاسکال عملکردی متعادل بین سختی و پایداری ارائه می‌دهد. در نانومواد فلزی، طلا و نقره به ترتیب با مدول‌های ۷۸ تا ۸۵ و ۸۳ تا ۹۰ گیگاپاسکال، به‌جای افزایش سختی، بیشتر باعث بهبود چقرمگی و شکل‌پذیری ماتریس می‌شوند. رفتار Fe_3O_4 و Fe_2O_3 متفاوت است؛ هر دو دارای مدول حدود ۱۸۰ تا ۳۰۰ گیگاپاسکال هستند، ولی به دلیل ماهیت مغناطیسی و چسبندگی ضعیف با ماتریس پلیمری، اغلب کاهش در مقاومت کششی (تا حدود ۰/۰۲ تا ۰/۰۵ گیگاپاسکال) و افزایش خزش

جدول ۶: خصوصیات الاستیک و مکانیکی نانو ساختارهای مختلف [۱۰۱-۱۰۷]

Typical Matrices	Creep Behavior	Buckling (Formula)	Strengthening Type	C_{12} (Poisson-related)	C_{66} (shear)	C_{22} (transverse)	C_{11} (longitudinal)	Modeling Method	Fracture Strain ϵ_f (%)	σ (GPa)	E (GPa)	Density (g/cm ³)	Formula	Material Name
Epox y, PVA, PVB	No measurable creep at RT	Euler: $\sigma_{cr} = k\pi^2 E / 12(1 - \nu^2)(t/b)^2$	Ultra-high	0.25E1	200 – 600	$1/C_{22} = \nu_f E_f / E + (1 - \nu_f) / E_m$	$E_f \nu_f + E_m(1 - \nu_f)$	ROM, Halpin-Tsai, MD	8–11	130 – 150	100 – 130	2	C (sp ²)	Graphene
Epox y, Nylon, PU	Viscoelastic (matrix driven)	Plate buckling, reduced E_{eff}	Moderate	0.4E1	5–15	$1/C_{22} = \nu_f / 0.3 E_f + (1 - \nu_f) / E_m$	$0.5 E_f \nu_f + E_m(1 - \nu_f)$	Inv Halpin-Tsai, ROM	1–5	20–50	200 – 300	1.8	C–O–H	Graphene Oxide (GO)
Epox y, PP, PET	Low creep; strong matrix bonding	Euler/plate hybrid	High	0.3E1	50–150	$1/C_{22} = \nu_f / 0.5 E_f + (1 - \nu_f) / E_m$	$0.8 E_f \nu_f + E_m(1 - \nu_f)$	Halpin-Tsai, ROM	2–8	30–100	300 – 800	1.9	C (partial O)	rGO (Reduced GO)
Epox y, PEI	No creep at RT; matrix controlled	$\sigma_{cr} = \pi^2 EI / L^2$	Extremely high	Slight reduction	2–5	$1/C_{22} = \nu_f E_f / E + (1 - \nu_f) / E_m$	$(1 + 13.6 \nu_f) E_m$	ROM, Halpin-Tsai, MD	5–15	150 – 200	100 – 200	1.35	C	SWCNT
Epox y, PE	Creep negligible	Local shell buckling dominates	Moderate to high	Stable	0.5–2	$0.75 E_m + 0.25 E_f$	$E_m(1 + 7.8 \nu_f)$	Halpin-Tsai, ROM	3–10	10–60	100 – 1000	1.4	C	MWCNT
Epox y	Low creep; thermally stable	Plate buckling model	High	0.23E1	≈150	$1/C_{22} = \nu_f E_f / E + (1 - \nu_f) / E_m$	$E_f \nu_f + E_m(1 - \nu_f)$	Halpin-Tsai, ROM	5–10	60–80	800 – 900	2.1	BN	BN nanosheet

Typical Matrices	Creep Behavior	Buckling (Formula)	Strengthening Type	C ₁₂ (Poisson-related)	C ₆₆ (shear)	C ₂₂ (transverse)	C ₁₁ (longitudinal)	Modeling Method	Fracture Strain ϵ_f (%)	σ (GPa)	E (GPa)	Density (g/cm ³)	Formula	Material Name
Epoxy, glass	Stable; creep via matrix	Particulate effect	Moderate	0.23E1	0.1–0.3	0.85Em+0.15Ef	3.6Vf(Ef-Em)+Em	(Eshelby) , ROM	<0.5	0.1–0.5	300–400	4.2	TiO ₂	TiO ₂
Epoxy, PVD F	Minimal creep	Inclusion buckling	Low–Moderate	0.18E1	0.05–0.15	0.9Em+0.1Ef	2.25Vf(Ef-Em)+Em	(Eshelby) , ROM	<0.5	0.5–1.2	140–200	5.6	ZnO	ZnO
Epoxy, PVD F	Creep by interfacial relaxation Matrix	(magnetic influence)	Limited	Negative effect	<0.1	0.65Em+0.35Ef	12.5Vf(Ef-Em)+Em	ROM	<0.5	0.2–0.8	200–300	5.2	Fe ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
Epoxy	dominated, time-dependent	Limited shell/matrix	Moderate	0.25E1	0.1–0.2	Matrix-dominated	Moderate filler effect	(Eshelby) , ROM	<1	0.02–0.05	180–220	5.2	Fe ₃ O ₄	Fe ₃ O ₄
Epoxy glass	Negligible creep at RT	Homogenized matrix	Low	0.05E1	0.01–0.05	0.95Em+0.05Ef	2.5Vf(Ef-Em)+Em	(Eshelby) , ROM	<0.5	0.1–0.4	70–100	2.2	SiO ₂	SiO ₂
Epoxy	low; ceramic type	Inclusion stiffening	Moderate	0.22E1	0.08–0.25	0.82Em+0.18Ef	3.2Vf(Ef-Em)+Em	(Eshelby) , ROM	<0.5	0.2–0.8	215–413	3.9	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃
Epoxy	Low–moderate creep Diffusion-controlled creep	Transformation toughening	Good	0.27E1	0.06–0.2	0.86Em+0.14Ef	4.1Vf(Ef-Em)+Em	transformation toughening	<0.5	0.5–1.5	200–230	5.6	ZrO ₂	ZrO ₂
Epoxy	Diffusion-controlled creep	Very low	Very low	Softening	0.02–0.04	0.98Em+0.02Ef	Em(1+1.5Vf)	ROM	several %	0.0–0.05	78–85	19.3	Au	Au
Epoxy	Diffusion-controlled creep	–	Very low	Softening	0.02–0.05	–	Em(1+1.6Vf)	ROM	several %	–	83–90	10.5	Ag	Ag

۸-۴- اثرات اندازه و ویژگی‌های ساختاری

اثر اندازه ذرات نانو، ویژگی‌های فصل مشترک و ناهمگنی‌های ریزساختاری در مقیاس نانو، تعیین‌کننده توزیع تنش، مدول مؤثر و مقاومت به شکست نانوکامپوزیت‌ها هستند. در این مقیاس، نسبت سطح به حجم بالای ذرات و تعاملات بین‌فازی غالب، منجر به تغییر قابل توجه در خواص الاستیک-پلاستیک و رفتار خزشی می‌شود. مرور مطالعات نشان می‌دهد که مدل‌های تحلیلی کلاسیک، از جمله قانون مخلوط‌ها و Halpin-Tsai، در صورت عدم اعمال اصلاحات چندمقیاسی و در نظر گرفتن اثرات بین‌فازی و پراکندگی ذرات، نمی‌توانند رفتار واقعی مکانیکی را به‌دقت پیش‌بینی کنند. لذا، برای طراحی نانوکامپوزیت‌های با عملکرد بهینه، نیاز به تلفیق شبیه‌سازی‌های میکرو-مکانیکی، تحلیل‌های چندمقیاسی و داده‌های

تجربی جهت مدل‌سازی دقیق اثر اندازه، چسبندگی بین‌فازی و ناهمگنی ریزساختاری وجود دارد.

۹-۴- کاربردهای مکانیکی

مهندسی مکانیک به لطف فناوری نانو که راه‌های جدیدی را باز می‌کند و قلمرو آنچه امکان‌پذیر است را گسترش می‌دهد، پیشرفت قابل توجهی داشته است. فناوری نانو اکنون ابزاری حیاتی در حوزه مهندسی مکانیک است. سهم آن منجر به پیشرفت‌های قابل توجهی در زمینه‌های چاپ سه‌بعدی نانو، بهبود عملکرد و دوام، توسعه حسگرها و محرک‌ها و کاهش مصرف انرژی در عملکرد سیستم‌های مهندسی مکانیک شده است. این پیشرفت‌ها باعث بهبود کارایی و عملکرد مهندسی مکانیک شده و در عین حال به نفع جامعه و محیط زیست نیز بوده است. فناوری نانو همچنین اساساً فرایند تولید در مهندسی

مکانیک را تغییر داده است. دقت و کنترل فناوری نانو امکان ایجاد اجزای کوچک‌تر و پیچیده‌تر را فراهم می‌کند که منجر به توسعه سیستم‌های میکرو و نانو الکترومکانیکی می‌شود.

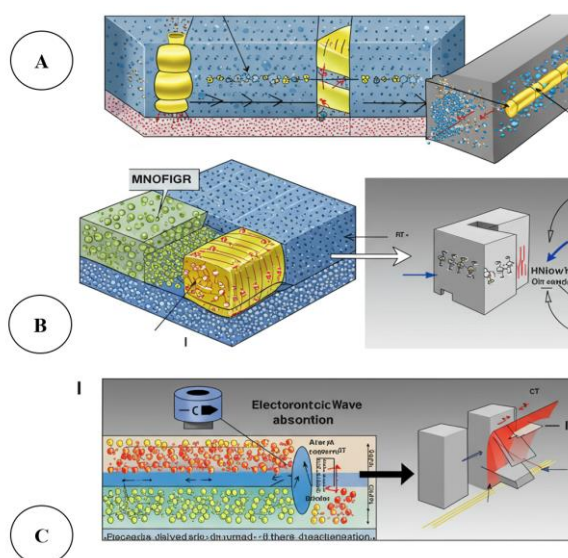
این سیستم‌ها امکانات جدیدی را در زمینه‌های محرک‌ها، حسگرها و دستگاه‌های پزشکی ایجاد کرده‌اند. علاوه بر این، نانومواد به‌طور گسترده در ساخت پوشش‌های کامپوزیتی مقاوم به سایش، خوردگی و دماهای بالا به کار گرفته می‌شوند که طول عمر قطعات مکانیکی را به‌طور چشم‌گیری افزایش می‌دهد. نانوذرات سرامیکی و کربنی در ترکیب با پلیمرها و فلزات، موادی با استحکام بالا و وزن کم ایجاد می‌کنند که در صنایع خودروسازی، هوافضا و انرژی کاربرد فراوان دارند. همچنین، استفاده از نانومواد در طراحی عایق‌های صوتی و

ارتعاشی باعث بهبود عملکرد سازه‌ها و کاهش نویز و لرزش در ماشین‌آلات می‌شود. در حوزه‌ی محافظت الکترومغناطیسی (EMI) Shielding (نانوذرات فلزی و نانولوله‌های کربنی در تولید پوشش‌ها و کامپوزیت‌هایی به کار می‌روند که از تجهیزات حساس در برابر تداخلات الکترومغناطیسی محافظت می‌کنند. به‌طور کلی، فناوری نانو نه تنها موجب ارتقای خواص مکانیکی مواد شده است، بلکه چشم‌انداز تازه‌ای برای طراحی هوشمند، سبک و پایدار در صنایع مختلف مهندسی مکانیک فراهم کرده است [۱۰۸-۱۱۰]. جدول ۷، خلاصه‌ای از کاربردهای نانومواد بررسی شده در این پژوهش را نشان می‌دهد.

جدول ۷: خلاصه‌ای از کاربردهای نانو مواد مختلف در صنایع مکانیکی

نانوماده	حوزه‌های صنعتی	کاربردهای عملکردی اصلی	ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی کلیدی	ماتریس / پایه کامپوزیتی متداول
گرافن	هوافضا، خودروسازی، دفاع	تقویت ساختاری، شیلدینگ تداخل الکترومغناطیسی (EMI)، پوشش‌های ضدسایش	استحکام کششی بسیار بالا، رسانایی حرارتی و الکتریکی بالا، وزن کم	اپوکسی، پلیمر، آلومینیوم
اکسید گرافن (GO)	پوشش‌ها، سامانه‌های مکانیکی، سازه‌های عمرانی	پوشش‌های ضدخوردگی، لایه‌های جذب انرژی، کامپوزیت‌های هیبریدی	پراکنش‌پذیری مناسب، واکنش‌پذیری سطحی بالا، رسانایی متوسط	پلیمر، سرامیک، ماتریس سیمانی
اکسید گرافن احیاءشده (rGO)	هوافضا، الکترونیک، طراحی مکانیکی	شیلدینگ EMI، پوشش‌های خودترمیم‌شونده، کامپوزیت‌های سبک	رسانایی بهبودیافته، سختی بالا، خواص سدکنندگی مناسب	اپوکسی، پلی‌ایمید، ماتریس فلزی
نانولوله کربنی تک‌جداره (SWCNT)	هوافضا، خودروسازی، مهندسی آکوستیک	جاذب‌های صوتی، حسگرها، نانو کامپوزیت‌های ساختاری	استحکام کششی فوق‌العاده بالا، انعطاف‌پذیری زیاد، تحرک الکترونی مناسب	پلیمر، ماتریس فلزی
نانولوله کربنی چندجداره (MWCNT)	هوافضا، صنایع دریایی، پوشش‌های مکانیکی	تقویت ساختاری، لایه‌های میرایی، پوشش‌های دفع حرارت	سختی و چقرمگی بالا، رسانایی مناسب	اپوکسی، رزین فنولیک، آلومینیوم
نانولایه نیتريد بور (BN Nanosheet)	هوافضا، تریبولوژی، مدیریت حرارتی	مواد واسط حرارتی، پوشش‌های مقاوم به سایش	پایداری حرارتی بالا، خاصیت روان‌کاری، عایق الکتریکی	پلیمر، سرامیک، آلومینیوم
دی‌اکسید تیتانیوم (TiO ₂)	پوشش‌های هوافضایی، حفاظت مکانیکی	پوشش‌های خود تمیز شونده، ضدخش و محافظتی	سختی بالا، خاصیت فوتوکاتالیستی، محافظت در برابر UV	پلیمر، پوشش سل-ژل، سرامیک

نانوماده	حوزه‌های صنعتی	کاربردهای عملکردی اصلی	ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی کلیدی	ماتریس / پایه کامپوزیتی متداول
اکسید روی (ZnO)	الکترونیک هوافضا، فناوری پوشش	حسگرهای صوتی، پوشش‌های فوتوکاتالیستی، جاذب‌های EMI	پیزوالکتریک، جذب UV، خاصیت ضدباکتری	اپوکسی، اکریلیک، سل-ژل
اکسید آهن (Fe_2O_3)	مواد پنهان کار هوافضا، حسگرها	جاذب‌های الکترومغناطیسی، پوشش‌های هوشمند	خاصیت مغناطیسی، مقاومت به خوردگی	پلیمر، سیمان، سرامیک
اکسید آهن مغناطیسی (Fe_3O_4)	دفاع، فناوری پنهان کاری	مواد جاذب رادار (RAM)، لایه‌های میرایی ارتعاش	سوپر پارامغناطیس، ضریب اتلاف بالا	پلیمر، اپوکسی
دی‌اکسید سیلیسیم (SiO_2)	هوافضا، اپتیک، پوشش‌های مکانیکی	پوشش‌های ضدخش، عایق صوتی، سازه‌های سبک	سختی بالا، شفافیت، ضریب انبساط حرارتی پایین	اپوکسی، پلیمر، ماتریس فلزی
اکسید آلومینیوم (Al_2O_3)	موتورهای هوافضا، ابزارهای مکانیکی	پوشش‌های مقاوم به سایش، موانع حرارتی	سختی بسیار بالا، پایداری شیمیایی، خاصیت دی‌الکتریک	فلز، سرامیک، اپوکسی
اکسید زیرکونیوم (ZrO_2)	توربین‌های هوافضا، سامانه‌های مکانیکی	پوشش‌های سد حرارتی (TBC)، کامپوزیت‌های ساختاری	چقرمگی شکست بالا، مقاومت حرارتی زیاد	سرامیک، فلز، پلیمر
طلا (Au)	الکترونیک هوافضا، حسگرها	پوشش‌های رسانا، نانوحسگرها، لایه‌های کاتالیستی	رسانایی عالی، مقاومت به خوردگی	پلیمر، جوهر رسانا، فلز
نقره (Ag)	الکترونیک هوافضا، پوشش‌های مکانیکی	پوشش‌های رسانا و بازتابنده، شیلدینگ EMI	رسانایی الکتریکی بالا، خاصیت ضد میکروبی	پلیمر، اپوکسی، سل-ژل



شکل ۱۱: کاربردهای نانو مواد شامل بهبود خواص سطحی و دوام در صنایع پوششی، مکانیکی و هوافضایی. (a)، افزایش کارایی در عایق‌های صوتی و صنعتی (b)، عایق‌های حرارتی، (c) نانوپوشش‌های جاذب امواج الکترومغناطیس

۵- جمع‌بندی

نانومواد و نانوکامپوزیت‌ها به دلیل ویژگی‌های مکانیکی، حرارتی و الکتریکی منحصربه‌فرد، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین حوزه‌های نوظهور در علوم مواد مطرح بوده و ظرفیت بالایی در توسعه مواد عملکردی و هوشمند دارند. نتایج این مرور نشان می‌دهد که عملکرد مکانیکی نانوکامپوزیت‌ها تابعی چند پارامتری از خواص ذاتی نانوذرات، نوع و رفتار ماتریس، ویژگی‌های ناحیه بین‌فازی و نحوه توزیع و جهت‌گیری تقویت‌کننده‌ها است. همان‌گونه که در جدول ۸ ارائه شده است، تفاوت در رده ابعادی نانومواد صفربعدی تا سه بعدی مستقیماً به تفاوت در

جدول ۸: خلاصه‌ای از مقایسه اثرات وابسته به اندازه، انتقال بار و برهم‌کنش‌های بین‌فازی در نانومواد با ابعاد مختلف

رده ابعادی	مثال ساختاری	مکانیزم غالب انتقال تنش	نقش ناحیه بین‌فازی	اثرات وابسته به اندازه	محدودیت‌های مکانیکی	مثال ساختاری
صفر بعدی (0D)	نانوذرات	انتقال تنش برشی از طریق ماتریس؛ مکانیزم Orowan	مساحت بین‌فازی بالا؛ چسبندگی تعیین‌کننده	افزایش استحکام با کاهش اندازه؛ حساس به آگلومراسیون	تمرکز تنش و کلوخه‌شدن	نانوذرات
یک بعدی (1D)	نانولوله‌ها، نانوالیاف	انتقال بار محوری؛ مکانیزم کششی و پل‌زنی ترک	طول بحرانی و چسبندگی تعیین‌کننده راندمان	نسبت طول به قطر بالا → تقویت مؤثرتر	کمانش، جدایش بین‌فازی	نانولوله‌ها، نانوالیاف
دو بعدی (2D)	نانوصفحات	مهار لغزش لایه‌ای؛ انحراف ترک	سطح تماس گسترده؛ اصطکاک بین‌فازی مهم	ضخامت کم → تقویت خمشی بالا	دلامینیشن	نانوصفحات
سه بعدی (3D)	آئروژل‌ها، شبکه‌های متخلخل	انتقال تنش شبکه‌ای؛ توزیع سه بعدی بار	پیوستگی ساختاری مهم‌تر از چسبندگی نقطه‌ای	رفتار وابسته به چگالی نسبی	شکندگی و حساسیت به عیوب	آئروژل‌ها، شبکه‌های متخلخل

مدل‌های تحلیلی کلاسیک نظیر قانون اختلاط (ROM) تنها برآورد اولیه‌ای از مدول مؤثر ارائه می‌دهند و قادر به لحاظ کردن ناهمگنی‌های بین‌فازی و اثرات نانومقیاس نیستند. در مقابل، مدل هالپین-سای با در نظر گرفتن نسبت طول به قطر، درصد حجمی و جهت‌گیری، پیش‌بینی دقیق‌تری از مدول یانگ، سختی و استحکام کششی فراهم می‌سازد. افزون بر آن، تحلیل‌های میکرو-مکانیکی سه‌فازی نشان می‌دهد که ضخامت، مدول و چسبندگی شیمیایی ناحیه بین‌فازی نقش تعیین‌کننده‌ای در انتقال تنش، بهبود سختی و افزایش چقرمگی دارند. ویژگی‌های ماتریس شامل مدول الاستیک، ویسکوالاستیسیته، انرژی سطحی و پایداری حرارتی نیز به‌طور مستقیم بر رفتار خزشی، مقاومت به شکست و توزیع تنش اثرگذار هستند. نانوذرات کربنی نظیر گرافن، GO، rGO، SWCNT و MWCNT با

مدول و استحکام کششی بسیار بالا، در صورت پراکندگی یکنواخت و جلوگیری از آگلومراسیون، موجب بهبود چشمگیر خواص مکانیکی می‌شوند. در مقابل، نانوذرات سرامیکی و مغناطیسی مانند TiO_2 ، ZnO ، Fe_2O_3 ، Fe_3O_4 و Al_2O_3 با مقاومت حرارتی و سایشی بالا، گزینه‌های مناسب برای ماتریس‌های اپوکسی و سرامیکی هستند؛ به‌طوری‌که مکانیزم‌هایی نظیر transformation toughening در ZrO_2 و سختی ذرات سرامیکی موجب افزایش چقرمگی و مقاومت به شکست می‌شود، در حالی‌که نانوذرات فلزی عمدتاً نقش عملکردی و الکتریکی دارند. روش‌های سنتزی مانند سل-ژل، هم‌رسوبی و CVD با کنترل اندازه، مورفولوژی و یکنواختی ذرات، امکان مهندسی ریزساختار و بهینه‌سازی خواص مکانیکی را فراهم می‌کنند. تلفیق داده‌های تجربی با مدل‌سازی چندمقیاسی نشان می‌دهد که توزیع

[6] A. K. Geim, and K. S. Novoselov, "The rise of graphene," *Nature Materials*, Vol. 6, No. 3, pp. 183–191, 2007, DOI: [10.1038/nmat1849](https://doi.org/10.1038/nmat1849).

[7] E. T. Thostenson, Z. Ren, and T. W. Chou, "Advances in the science and technology of carbon nanotubes and their composites: a review," *Composites Science and Technology*, Vol. 61, No. 13, pp. 1899–1912, 2001, DOI: [10.1016/S0266-3538\(01\)00094-X](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(01)00094-X).

[8] M. J. Treacy, T. W. Ebbesen, and J. M. Gibson, "Exceptionally high Young's modulus observed for individual carbon nanotubes," *Nature*, Vol. 381, No. 6584, pp. 678–680, 1996, DOI: [10.1038/381678a0](https://doi.org/10.1038/381678a0).

[9] M. F. Yu, O. Lourie, M. J. Dyer, K. Moloni, T. F. Kelly, and R. S. Ruoff, "Strength and breaking mechanism of multiwalled carbon nanotubes under tensile load," *Science*, Vol. 287, No. 5453, pp. 637–640, 2000, DOI: [10.1126/science.287.5453.637](https://doi.org/10.1126/science.287.5453.637).

[10] R. Andrews, and M. C. Weisenberger, "Carbon nanotube polymer composites," *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, Vol. 8, No. 1, pp. 31–37, 2004, DOI: [10.1016/j.cossms.2003.10.006](https://doi.org/10.1016/j.cossms.2003.10.006).

[11] Q. Zhang, J. Q. Huang, W. Z. Qian, Y. Y. Zhang, and F. Wei, "The road for nanomaterials industry: a review of carbon nanotube production, post-treatment, and bulk applications for composites and energy storage," *Small*, Vol. 9, No. 8, pp. 1237–1265, 2013, DOI: [10.1002/smll.201203252](https://doi.org/10.1002/smll.201203252).

[12] H. Kim, A. A. Abdala, and C. W. Macosko, "Graphene/polymer nanocomposites," *Macromolecules*, Vol. 43, No. 16, pp. 6515–6530, 2010, DOI: [10.1021/ma100572e](https://doi.org/10.1021/ma100572e).

[13] D. G. Papageorgiou, I. A. Kinloch, and R. J. Young, "Mechanical properties of graphene and graphene-based nanocomposites," *Progress in Materials Science*, Vol. 90, pp. 75–127, 2017, DOI: [10.1016/j.pmatsci.2017.07.004](https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.07.004).

[14] A. Gupta, T. Sakthivel, and S. Seal, "Recent developments in 2D materials beyond graphene," *Progress in Materials Science*, Vol. 73, pp. 44–126, 2015, DOI: [10.1016/j.pmatsci.2015.02.002](https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2015.02.002).

[15] I. A. Kinloch, J. Suhr, J. Lou, R. J. Young, and P. M. Ajayan, "Composites with carbon nanotubes

یکنواخت و جهت‌گیری کنترل‌شده ذرات، کاهش تمرکز تنش و افزایش پایداری خزشی را ممکن می‌سازد، در حالی‌که آگلومراسیون منجر به افت چقرمگی و افزایش شکنندگی می‌شود. از منظر کاربردی، نانوکامپوزیت‌ها در پوشش‌های مقاوم به سایش، حسگرهای مغناطیسی، سامانه‌های الکترومکانیکی، صنایع هوافضا و نیز حوزه دارویی به‌عنوان حامل‌های دارویی کنترل‌شده و پوشش‌های زیست‌سازگار با عملکرد مکانیکی بهینه، ظرفیت بالایی دارند. در نهایت، این کار با ارائه یک چارچوب تلفیقی مبتنی بر تحلیل چندمقیاسی، بررسی نظام‌مند اثرات بین‌فازی و هم راستاسازی داده‌های تجربی و مدل‌سازی میکرو-مکانیکی، امکان پیش‌بینی دقیق‌تر خواص و طراحی هدفمند نانوکامپوزیت‌ها را فراهم می‌کند. پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آینده بر توسعه مدل‌های پیشرفته برای شبیه‌سازی توزیع و آگلومراسیون ذرات، مهندسی ناحیه بین‌فازی عملکردی و طراحی نانوکامپوزیت‌های چندوظیفه‌ای با دوام، چقرمگی و مقیاس‌پذیری صنعتی متمرکز شوند. این مسیر، زمینه‌ساز توسعه مواد هوشمند با عملکرد مکانیکی برتر و کاربرد گسترده صنعتی و زیست‌پزشکی خواهد بود.

۶- منابع

[1] S. Iijima, "Helical microtubules of graphitic carbon," *Nature*, Vol. 354, No. 6348, pp. 56–58, 1991, DOI: [10.1038/354056a0](https://doi.org/10.1038/354056a0).

[2] K. S. Novoselov et al., "Electric field effect in atomically thin carbon films," *Science*, Vol. 306, No. 5696, pp. 666–669, 2004, DOI: [10.1126/science.1102896](https://doi.org/10.1126/science.1102896).

[3] P. M. Ajayan, "Nanotubes from carbon," *Chemical Reviews*, Vol. 99, No. 7, pp. 1787–1800, 1999, DOI: [10.1021/cr970102g](https://doi.org/10.1021/cr970102g).

[4] R. H. Baughman, A. A. Zakhidov, and W. A. De Heer, "Carbon nanotubes--the route toward applications," *Science*, Vol. 297, No. 5582, pp. 787–792, 2002, DOI: [10.1126/science.1060928](https://doi.org/10.1126/science.1060928).

[5] J. N. Coleman, U. Khan, W. J. Blau, and Y. K. Gun'ko, "Small but strong: A review of the mechanical properties of carbon nanotube-polymer composites," *Carbon*, Vol. 44, No. 9, pp. 1624–1652, 2006, DOI: [10.1016/j.carbon.2006.02.038](https://doi.org/10.1016/j.carbon.2006.02.038).

- [25] M. Syduzzaman, M. S. I. Saad, M. F. Piam, T. A. Talukdar, T. T. Shobdo, and N. M. Pritha, "Carbon nanotubes: Structure, properties and applications in the aerospace industry," *Results in Materials*, Vol. 25, Art. No. 100654, 2025, DOI: [10.1016/j.rinma.2024.100654](https://doi.org/10.1016/j.rinma.2024.100654).
- [26] Zecchi, S., Cristoforo, G., Piatti, E., Torsello, D., Ghigo, G., Tagliaferro, A., Rosso, C., & Bartoli, M. A Concise Review of Recent Advancements in Carbon Nanotubes for Aerospace Applications. *Micromachines*, 16(1), 53, DOI: [10.3390/mi16010053](https://doi.org/10.3390/mi16010053).
- [27] D. Wilson, A. Clark, and M. Evans, "MXene Composite *Materials* for Wearable Sensors: A Review," *Materials*, Vol. 17, No. 14, pp. 3418, 2024, DOI: [10.3390/ma17143418](https://doi.org/10.3390/ma17143418).
- [28] Weerasinghe, J., Prasad, K., Mathew, J., Trifoni, E., Baranov, O., Levchenko, I., & Bazaka, K. CarbonNanocomposites in Aerospace Technology: A Way to Protect Low-Orbit Satellites. *Nanomaterials*, 13(11), 1763, DOI: [10.3390/nano1311176](https://doi.org/10.3390/nano1311176).
- [29] Costăchescu, B., Moldoveanu, E., Niculescu, A., Grumezescu, A. M., & Teleanu, D. M. Advancements in Nanotechnology for Spinal Surgery: Innovations in Spinal Fixation Devices for Enhanced Biomechanical Performance and Osteointegration. *Nanomaterials*, 15(14), 1073, DOI: [10.3390/nano15141073](https://doi.org/10.3390/nano15141073).
- [30] S. Anderson, H. Young, and C. Adams, "Nanostructured thermal barrier coatings: Recent developments and future prospects," *Materials, Science and Engineering A*, 867, 144712, 2023.
- [31] K. J. Hughes, K. A. Iyer, R. E. Bird, J. Ivanov, S. Banerjee, G. Georges, and Q. A. Zhou, "Review of carbon nanotube research and development," *Materials and Emerging Applications*, 2024.
- [32] Samory, Paolo., Kinloch, IA., Feng, X., Palermo, V., Graphene-based nanocomposites for structural and functional applications: Using 2-dimensional materials in a 3-dimensional world (2015), DOI: [10.1088/2053-1583/2/3/032005](https://doi.org/10.1088/2053-1583/2/3/032005).
- [33] M. Liu, X. Zhao, and Y. Chen, "Carbon nanotube reinforced metal matrix composites: A review," *Materials Today Communications*, Vol. and graphene: An outlook," *Science*, Vol. 362, No. 6414, pp. eaat1788, 2018, DOI: [10.1126/science.aat7439](https://doi.org/10.1126/science.aat7439).
- [16] D. B. Tripathy, and A. Gupta, "Nanocomposites as sustainable smart materials: A review," *Journal of Composite Materials*, Vol. 58, No. 12, pp. 1823–1845, 2024.
- [17] X. Wang, H. Zhao, A. Khan, C. Meng, B. Yang, Z. Xu, and X. Su, "Mechanical properties of nanomaterials: A review," *Nanotechnology Reviews*, Vol. 9, No. 1, pp. 259–273, 2020.
- [18] Y. Liu, S. Kumar, and L. Zhang, "Multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs)-reinforced ceramic nanocomposites for aerospace applications: a review," *Journal of Materials Science*, Vol. 57, pp. 3701–3760, 2021.
- [19] L. Chen, Y. Zhao, and H. Wang, "Two-Dimensional Nanomaterials for Anticorrosive Polymeric Coatings: A Review," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 59, No. 35, pp. 15424–15447, 2020, DOI: [10.1021/acs.iecr.0c02876](https://doi.org/10.1021/acs.iecr.0c02876).
- [20] R. Singh, P. Kumar, and A. Sharma, "Nanostructured Coatings: Review on Processing Techniques, Corrosion Behaviour and Tribological Performance," *Nanomaterials*, Vol. 11, No. 4, pp. 1067, 2021, DOI: [10.3390/nano11041067](https://doi.org/10.3390/nano11041067).
- [21] V. A. Pillay. V, B. Ramasubramanian, O. Sequerth, and S. Pilla, "Nanomaterial advanced smart coatings: Emerging trends shaping the future," *Materials Today Communications*, Vol. 38, Art. no. 105195, 2025.
- [22] P. Martinez, L. Garcia, and M. Rodriguez, "Nano-Enhanced Polymer Composite Materials: A Review of Current Advancements and Challenges," *Polymers*, Vol. 17, No. 7, pp. 893, 2025, DOI: [10.3390/polym17070893](https://doi.org/10.3390/polym17070893).
- [23] Jaafar, T., Saar, S et al. Thermal spray coating technology – A Review January 2003.
- [24] R. Thompson, K. Anderson, and J. Davis, "Structural Applications of Carbon Nanotubes," *Advanced Materials Review*, Vol. 15, No. 2, pp. 112–128, 2025.

processing, manufacturing, and application: An overview," *Journal of Composite Materials*, 40, 2006, DOI: [10.1177/0021998306067321](https://doi.org/10.1177/0021998306067321).

[43] J. Hu, ", " *Nanomaterials*, in aerospace: Revolutionizing flight and exploration through nanoscale advancements. Applied and Computational Engineering, 60(1), 1–5, 2024, DOI: [10.54254/2755-2721/60/20240821](https://doi.org/10.54254/2755-2721/60/20240821).

[44] M. Dehghanidashtabi, and H. Hekmatara, "Structural, electrical, and EMI shielding properties of carbon nanotube decorated magnetic/ceramic nanoparticles," *Scientific Reports*, 15(1), 2025, DOI: [10.1038/s41598-025-85378-4](https://doi.org/10.1038/s41598-025-85378-4) (in Persian).

[45] Kim, D., Han, W., Kim, K., & Kim, B. Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness of Direct-Grown-Carbon Nanotubes/Carbon and Glass Fiber-Reinforced Epoxy Matrix Composites. *Materials*, 16(7), 2604, DOI: [10.3390/ma16072604](https://doi.org/10.3390/ma16072604).

[46] Bozsaky, D. (2015, November). Thermal insulation with nanotechnology-based materials. In Internationales Symposium "Eventmaterials": Materialtechnologie und Eventinnovationen, Wien. Széchenyi István University.

[47] Jin, R., Zhou, Z., Liu, J., Shi, B., Zhou, N., Wang, X., Jia, X., Guo, D., & Xu, B. Aerogels for Thermal Protection and Their Application in Aerospace. *Gels*, 9(8), 606, DOI: [10.3390/gels9080606](https://doi.org/10.3390/gels9080606).

[48] K. K. Ajekwene, S. Ulaeto, J. K. Pancrecious, and G. Mathew, "Advanced nanocoatings for anticorrosion," *Nanomaterials*, Series: Micro & Nano Technology Books, pp. 499–509. Elsevier, 2020, DOI: [10.1016/B978-0-12-819359-4.00025-8](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819359-4.00025-8).

[49] Şomoghi, R., Semenescu, A., Pasăre, V., Chivu, O. R., Niţoi, D. F., Marcu, D. F., & Florea, B. The Impact of ZnO Nanofillers on the Mechanical and Anti-Corrosion Performances of Epoxy Composites. *Polymers*, 16(14), 2054, DOI: [10.3390/polym16142054](https://doi.org/10.3390/polym16142054).

[50] M. A. S. Sujon, Development of Novel Polymer Matrix Composites and their Processing for Enhanced Damping. Technical University of Denmark, 2024.

34, Art. no. 105567, 2023, DOI: [10.1016/j.mtcomm.2023.105567](https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.105567).

[34] R. Miller, F. Turner, and L. Parker, "Nanocoatings in automotive industry: Current trends and future prospects," *Coatings*, Vol. 178, Art. no. 107432, 2023.

[35] S. Kumar, and R. Kumar, "Nanomaterials Coatings for Aerospace and Defense Applications: Current Prospects and Future Trends," *Nanomaterials*, for Defense, Aeronautical and Aerospace Applications. Advanced Structured Materials, vol 236. Springer, Cham, 2025, DOI: [10.1007/978-3-031-92723-2_3](https://doi.org/10.1007/978-3-031-92723-2_3).

[36] S. B. Ulaeto, J. K. Pancrecious, K. K. Ajekwene, G. M. Mathew, and T. Rajan, "Advanced nanocoatings for anticorrosion," *NANO*, scale, 499–510, 2019, DOI: [10.1016/B978-0-12-819359-4.00025-8](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819359-4.00025-8).

[37] Yao, C., Lian, I., Zhou, J., Bernazzani, P., & Jao, M. The Elevated-Temperature Nano-Mechanical Properties of a PDMS–Silica-Based Superhydrophobic Nanocomposite Coating. *Nanomaterials*, 15(12), 898, DOI: [10.3390/nano15120898](https://doi.org/10.3390/nano15120898).

[38] F. Paz-Triviño, R. Buitrago-Sierra, and J. F. Santa, "Wear resistance and hardness of nanostructured hardfacing coatings," *Dyna*, Vol. 87, No. 214, pp. 146–154, 2020, DOI: [10.15446/dyna.v87n214.85683](https://doi.org/10.15446/dyna.v87n214.85683).

[39] Mandal, B. B., Kumar, V., Sahoo, S., Oraon, B., & Mukherjee, S. Nanoparticle-Reinforced Electroless Composite Coatings for Pipeline Steel: Synthesis and Characterization. *Materials*, 18(17), 3949, DOI: [10.3390/ma18173949](https://doi.org/10.3390/ma18173949).

[40] D. Pitsa, and M. Danikas, "Interfaces features in polymer nanocomposites: A review of proposed models," *NANO*, Vol. 6, No. 6, pp. 497, 2011, DOI: [10.1142/S1793292011002949](https://doi.org/10.1142/S1793292011002949).

[41] Pardo, S., & Bucio, E. Interaction between Filler and Polymeric Matrix in Nanocomposites: Magnetic Approach and Applications. *Polymers*, 13(17), 2998, DOI: [10.3390/polym13172998](https://doi.org/10.3390/polym13172998).

[42] F. Hussain, M. Hojjati, M. Okamoto, and R. E. Gorga, "Polymer matrix nanocomposites,

Origami Honeycomb Metamaterials Based on Nano-Fe₃O₄ Shape Memory Polymer Composites. *Polymer Engineering & Science*, DOI: [10.1002/pen.70148](https://doi.org/10.1002/pen.70148).

[60] Kareem, S., Al-Ansari, L.S., and Gömze, L.A., 2022. Modeling of Modulus of Elasticity of Nano-Composite Materials: Review and Evaluation. *Journal of Physics: Conference Series*, 2315, 012038, DOI: [10.1088/1742-6596/2315/1/012038](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2315/1/012038).

[61] N. T. Thanh, N. Maclean, and S. Mahiddine, "Mechanisms of nucleation and growth of nanoparticles in solution," *Chemical Reviews*, Vol. 114, No. 15, pp. 7610–7630, 2014, DOI: [10.1021/cr400544s](https://doi.org/10.1021/cr400544s).

[62] Bwatanglang, I.B.; Mohammad, F.; Yusof, N.A.; Abdullah, J.; Alitheen, N.B.; Hussein, M.Z.; Abu, N.; Mohammed, N.E.; Nordin, N.; Zamberi, N.R. In vivo tumor targeting and anti-tumor effects of 5-fluorouracil-loaded, folic acid-targeted quantum dot system. *J. Colloid Interface Sci.* 2016, 480, 146–158, DOI: [10.1016/j.jcis.2016.07.014](https://doi.org/10.1016/j.jcis.2016.07.014).

[63] Zayed, D.G.; Abdelhamid, A.S.; Freag, M.S.; Elzoghby, A.O. Hybrid quantum dot-based theranostic nanomedicines for tumor-targeted drug delivery and cancer imaging. *Future Med.* 2019, 14.

[64] Yong, K.-T.; Ding, H.; Roy, I.; Law, W.-C.; Bergey, E.J.; Maitra, A.; Prasad, P.N. Imaging pancreatic cancer using bioconjugated InP quantum dots. *ACS Nano* 2009, 3, 502–510, DOI: [10.1021/nn8008933](https://doi.org/10.1021/nn8008933).

[65] Unnikrishnan, B.; Wu, R.-S.; Wei, S.-C.; Huang, C.-C.; Chang, H.-T. Fluorescent carbon dots for selective labeling of subcellular organelles. *ACS Omega* 2020, 5, 11248–11261.

[66] Atmaja, B.; Lui, B.H.; Hu, Y.; Beck, S.E.; Frank, C.W.; Cochran, J.R. Targeting of cancer cells using quantum dot-dot-polypeptide hybrid assemblies that function as molecular imaging agents and carrier systems. *Adv. Funct. Mater.* 2010, 20, 4091–4097.

[67] Q. Wu, W.-S. Miao, Y.-D. Zhang, H.-J. Gao, and D. Hui, "Mechanical properties of nanomaterials: A review," *Nanotechnology Reviews*, Vol. 9, No. 1, pp. 259–273, 2020, DOI: [10.1515/ntrev-2020-0021](https://doi.org/10.1515/ntrev-2020-0021).

[51] Murugarathinasamy, P. (2013, March). Applications of composite materials in vibration damping. In Proceedings of ICCSP'13. Velalar College of Engineering and Technology.

[52] J. Chen et al., "Well-defined nanostructures of high entropy alloys for electrocatalysis," *Exploration*, Vol. 5, No. 2, pp. 20230036, 2025, DOI: [10.1002/EXP.20230036](https://doi.org/10.1002/EXP.20230036).

[53] Sheela, M.S., Kumarganesh, S., Pandey, B.K. et al. Integration of silver nanostructures in wireless sensor networks for enhanced biochemical sensing. *Discover Nano* 20, 7 (2025), DOI: [10.1186/s11671-024-04159-6](https://doi.org/10.1186/s11671-024-04159-6).

[54] A. Khorsand Zak, and A. M. Hashim, "Recent advances in BiFeO₃-based nanostructures: Properties and applications," *Coordination Chemistry Reviews*, Vol. 523, Art. No. 216297, 2025, DOI: [10.1016/j.ccr.2024.216297](https://doi.org/10.1016/j.ccr.2024.216297).

[55] L. Yin, Z. Yang, K. Zhang, and L. Jia, "Flow boiling heat transfer in multi-stage enhanced open microchannels with micro/nano structures," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 258, Art. no. 124695, 2024, DOI: [10.1016/j.applthermaleng.2024.124695](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.124695).

[56] X. Bai et al., "Durable superhydrophobicity-memory coating with femtosecond laser-structured micro/nanostructures for anti-corrosion applications," *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 680, pp. 265–277, 2025, DOI: [10.1016/j.jcis.2024.11.082](https://doi.org/10.1016/j.jcis.2024.11.082).

[57] M. A. Roudbari, T. D. Jorshari, C. Lü, R. Ansari, A. Z. Kouzani, and M. Amabili, "A review of size-dependent continuum mechanics models for micro- and nano-structures," *Thin-Walled Structures*, Vol. 170, Art. No. 108562, 2021, DOI: [10.1016/j.tws.2021.108562](https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.108562).

[58] V. Harish et al., "Cutting-edge advances in tailoring size, shape, and functionality of nanoparticles and nanostructures: A review," *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, Vol. 149, Art. no. 105010, 2023, DOI: [10.1016/j.jtice.2023.105010](https://doi.org/10.1016/j.jtice.2023.105010).

[59] Zhang, Y., Huang, S., Zhu, M., Zhang, H., Qian, Z., Xue, B., Zhang, J., Agyenim-Boateng, E., & Zhou, J. Mechanical Properties of 4D Printed

Oxide: A Review. RSC Adv. 2020, 10, 15328–15345, DOI: [10.1039/D0RA01068E](https://doi.org/10.1039/D0RA01068E).

[77] Yin, P.T.; Shah, S.; Chhowalla, M.; Lee, K.B. Design, Synthesis, and Characterization of Graphene-Nanoparticle Hybrid Materials for Bioapplications. Chem. Rev. 2015, 115, 2483–2531, DOI: [10.1021/cr500537t](https://doi.org/10.1021/cr500537t).

[78] ang, K.; Feng, L.; Shi, X.; Liu, Z. Nano-Graphene in Biomedicine: Theranostic Applications. Chem. Soc. Rev. 2013, 42, 530–547, DOI: [10.1039/C2CS35342C](https://doi.org/10.1039/C2CS35342C).

[79] Liu, J.; Cui, L.; Losic, D. Graphene and Graphene Oxide as New Nanocarriers for Drug Delivery Applications. Acta Biomater. 2013, 9, 9243–9257, DOI: [10.1016/j.actbio.2013.08.016](https://doi.org/10.1016/j.actbio.2013.08.016).

[80] Kumar, S.; Chatterjee, K. Comprehensive Review on the Use of Graphene-Based Substrates for Regenerative Medicine and Biomedical Devices. ACS Appl. Mater. Interfaces 2016, 8, 26431–26457, DOI: [10.1021/acsami.5b09801](https://doi.org/10.1021/acsami.5b09801).

[81] Shin, S.R.; Li, Y.C.; Jang, H.L.; Khoshakhlagh, P.; Akbari, M.; Nasajpour, A.; Zhang, Y.S.; Tamayol, A.; Khademhosseini, A. Graphene-Based Materials for Tissue Engineering. Adv. Drug Deliv. Rev. 2016, 105, 255–274, DOI: [10.1016/j.addr.2016.03.007](https://doi.org/10.1016/j.addr.2016.03.007).

[82] Bai, R.G.; Muthoosamy, K.; Manickam, S.; Hilal-Alnaqbi, A. Graphene-Based 3D Scaffolds in Tissue Engineering: Fabrication, Applications, and Future Scope in Liver Tissue Engineering. Int. J. Nanomedicine 2019, 14, 5753–5783, DOI: [10.2147/IJN.S192779](https://doi.org/10.2147/IJN.S192779).

[83] Yusaf, T.; Mahamude, A.S.F.; Farhana, K.; Harun, W.S.W.; Kadirgama, K.; Ramasamy, D.; Kamarulzaman, M.K.; Subramonian, S.; Hall, S.; Dhahad, H.A. A Comprehensive Review on Graphene Nanoparticles: Preparation, Properties, and Applications. Sustainability 2022, 14, 12336, DOI: [10.3390/su141912336](https://doi.org/10.3390/su141912336).

[84] D. R. Dreyer, S. Park, C. W. Bielawski, and R. S. Ruoff, The chemistry of graphene oxide. Chemical Society Reviews, 39(1), 228–240, 2010, DOI: [10.1039/B917103G](https://doi.org/10.1039/B917103G).

[68] R. Garg et al., "Mechanics–microstructure relations in 1D, 2D and mixed dimensional carbon nanomaterials," Carbon, *, 197, 26–43, 2022, DOI: [10.1016/j.carbon.2022.05.027](https://doi.org/10.1016/j.carbon.2022.05.027).

[69] M. Khakbaz, Z. S. Mousavi, and F. Khakbaz, "Investigation of mechanical and microwave absorption properties of single-wall and multi-wall," NANO, tubes in X-band. In 7th National Conference on New Technologies in Electrical, Computer, and Mechanical Engineering of Iran, Tehran, Iran. Retrieved from, 2024, Available: <https://civilica.com/doc/2050303> (in Persian).

[70] A. Gebrekrstos, G. Madras, and S. Bose, "Tailoring the Properties of 2D Nanomaterial-Polymer Composites for Electromagnetic Interference Shielding and Energy Storage by 3D Printing—A Review," Advanced Engineering Materials, *, 27(1), 2402179, 2025, DOI: [10.1002/adem.202402179](https://doi.org/10.1002/adem.202402179).

[71] I. Sengupta, and S. Chakraborty, "Mechanical and tribological properties of nanocomposites incorporated with two-dimensional materials," Friction, *, 8(4), 635–651, 2020, DOI: [10.1007/s40544-019-0315-4](https://doi.org/10.1007/s40544-019-0315-4).

[72] M. Tarfaoui, K. Lafdi, and A. El Moumen, "Mechanical properties of aerospace epoxy composites reinforced with 2D nano-fillers: current status and road to industrialization," Nanoscale Advances, *, 3(11), 3058–3072, 2021, DOI: [10.1039/D1NA00043G](https://doi.org/10.1039/D1NA00043G).

[73] K. Khan et al., "Recent developments in emerging two-dimensional materials and their applications," Journal of Materials Chemistry C, *, 8(2), 387–440, 2020, DOI: [10.1039/C9TC04187G](https://doi.org/10.1039/C9TC04187G).

[74] DPriyadarsini, S.; Mohanty, S.; Mukherjee, S.; Basu, S.; Mishra, M. Graphene and Graphene Oxide as Nanomaterials for Medicine and Biology Application. J. Nanostructure Chem. 2018, 8, 123–137, DOI: [10.1007/s40097-018-0265-6](https://doi.org/10.1007/s40097-018-0265-6).

[75] Patel, K.D.; Singh, R.K.; Kim, H.W. Carbon-Based Nanomaterials as an Emerging Platform for Theranostics. Mater. Horiz. 2019, 6, 434–469, DOI: [10.1039/C8MH00966J](https://doi.org/10.1039/C8MH00966J).

[76] Yu, W.; Sisi, L.; Haiyan, Y.; Jie, L. Progress in the Functional Modification of Graphene/Graphene

- [96] Q. Wu, W.-S. Miao, Y.-D. Zhang, H.-J. Gao, and D. Hui, "Mechanical properties of nanomaterials: A review," *Nanotechnology Reviews*, Vol. 9, No. 1, pp. 259–273, 2020, DOI: [10.1515/ntrev-2020-0021](https://doi.org/10.1515/ntrev-2020-0021).
- [97] Wang L., Li Q., Sun J., Li Z.M., Zheng Y.G., Tensile mechanical properties of nano-twinned copper containing silver inclusions, *Physica B*, 2019, 554, 97–101, DOI: [10.1016/j.physb.2018.11.051](https://doi.org/10.1016/j.physb.2018.11.051).
- [98] J. C. Halpin, and S. W. Tsai, "Materials," Air Force Materials Laboratory Technical Report, 67(2), 423–450, 1976.
- [99] M. F. Ashby, and D. R. Jones, "Engineering," *Materials*, 1: An introduction to their properties and applications (4th ed.). Butterworth–Heinemann, 2012.
- [100] D. G. Papageorgiou, I. A. Kinloch, and R. J. Young, "Mechanical properties of graphene and graphene-based nanocomposites," *Progress in Materials Science*, Vol. 90, pp. 75–127, 2017, DOI: [10.1016/j.pmatsci.2017.07.004](https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.07.004).
- [101] Cao, K., Feng, S., Han, Y. et al. Elastic straining of free-standing monolayer graphene. *Nat Commun* 11, 284 (2020), DOI: [10.1038/s41467-019-14130-0](https://doi.org/10.1038/s41467-019-14130-0).
- [102] S. Pyo, Y. Eun, J. Sim, K. Kim, and J. Choi, "Carbon nanotube-graphene hybrids for soft electronics, sensors, and actuators," *NANO, Systems Letters*, 10(1), 1–12, 2022, DOI: [10.1186/s40486-022-00151-w](https://doi.org/10.1186/s40486-022-00151-w).
- [103] Brzozowski, P.; Strzałkowski, J.; Rychtowski, P.; Wróbel, R.; Tryba, B.; Horszczaruk, E. Effect of Nano-SiO₂ on the Microstructure and Mechanical Properties of Concrete under High Temperature Conditions. *Materials* 2022, 15, 166, DOI: [10.3390/ma15010166](https://doi.org/10.3390/ma15010166).
- [104] Samad, U. A., Alam, M. A., Anis, A., Abdo, H. S., Shaikh, H., & M., S. Nanomechanical and Electrochemical Properties of ZnO-Nanoparticle-Filled Epoxy Coatings. *Coatings*, 12(2), 282, DOI: [10.3390/coatings12020282](https://doi.org/10.3390/coatings12020282).
- [105] Abyzov, A.M. Aluminum Oxide and Alumina Ceramics (review). Part 1. Properties of Al₂O₃ and
- [85] S. Pei, and H. M. Cheng, "The reduction of oxide," *Carbon*, Vol. 50, No. 9, pp. 3210–3228, 2012, DOI: [10.1016/j.carbon.2011.11.010](https://doi.org/10.1016/j.carbon.2011.11.010).
- [86] W. S. Hummers, and R. E. Offeman, "Preparation of graphitic oxide," *Journal of the American Chemical Society*, Vol. 80, No. 6, pp. 1339, 1958, DOI: [10.1021/ja01539a017](https://doi.org/10.1021/ja01539a017).
- [87] S. Pei, and H.-M. Cheng, "The reduction of graphene oxide," *Carbon*, Vol. 50, No. 9, pp. 3210–3228, 2012, DOI: [10.1016/j.carbon.2011.11.010](https://doi.org/10.1016/j.carbon.2011.11.010).
- [88] S. et al. Stankovich et al., "Synthesis of graphene-based nanosheets via chemical reduction of exfoliated graphite oxide," *Carbon*, Vol. 45, No. 7, pp. 1558–1565, 2007, DOI: [10.1016/j.carbon.2007.02.034](https://doi.org/10.1016/j.carbon.2007.02.034).
- [89] Liu Y. et al. 3D Nanostructured *Materials* and devices:, *Adv. Mater.* 34, 2022.
- [90] Yu M.F. et al. Tensile loading of ropes of single wall carbon nanotubes, *Science* 287, 637–640 (2000), DOI: [10.1126/science.287.5453.637](https://doi.org/10.1126/science.287.5453.637).
- [91] Halpin J.C., Tsai S.W. Effects of environmental factors on composite materials, AFML-TR-67-423, 1969.
- [92] Mori T., Tanaka K. Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions, *Acta Metall.* 21, 571–574 (1973), DOI: [10.1016/0001-6160\(73\)90064-3](https://doi.org/10.1016/0001-6160(73)90064-3).
- [93] Jones R.M. *Mechanics of Composite Materials*, Taylor & Francis, 1999, DOI: [10.1201/9781498711067](https://doi.org/10.1201/9781498711067).
- [94] Eker F, Duman H, Akdaşçi E, Bolat E, Sarıtaş S, Karav S, Witkowska AM. A Comprehensive Review of Nanoparticles: From Classification to Application and Toxicity. *Molecules*. 2024 Jul 25;29(15):3482. PMID: 39124888; PMCID: PMC11314082, DOI: [10.3390/molecules29153482](https://doi.org/10.3390/molecules29153482).
- [95] Paramasivam G, Palem VV, Sundaram T, Sundaram V, Kishore SC, Bellucci S. *Nanomaterials: Synthesis and Applications in Theranostics*. *Nanomaterials* (Basel). 2021 Nov 28;11(12):3228. PMID: 34947577; PMCID: PMC8705396, DOI: [10.3390/nano11123228](https://doi.org/10.3390/nano11123228).

- [108] M. Khakbaz, M. Javadi, and R. Sarkhosh, "Investigation of Radar Cross Section Reduction of Quadratic and Conic Aluminum Surfaces in the X-Band Frequency Range: A Study Based on Electromagnetic Permittivity and Permeability," *Mechanics of Structures and Fluids*, Vol. 15, No. 2, pp. 65–80, 2025, DOI: [10.22044/jsfm.2025.15682.3937](https://doi.org/10.22044/jsfm.2025.15682.3937) (in Persian).
- [109] S. B. Mishra, K. S. Sayyad Liyakat, and K. K. Sayyad Liyakat, "Nanotechnology's importance in mechanical engineering," *Journal of Fluid Mechanics and Mechanical Design*, Vol. 6, No. 1, pp. 1–9. e-ISSN: 2582–9165, 2024.
- [110] Y. Na, T. Agnhage, and G. Cho, "Sound absorption of multiple layers of nanofiber webs and the comparison of measuring methods for sound absorption coefficients," *Fibers and Polymers*, 13(10), 2012, DOI: [10.1007/s12221-012-1348-5](https://doi.org/10.1007/s12221-012-1348-5).
- Commercial Production of Dispersed Al₂O₃. *Refract Ind Ceram* 60, 24–32 (2019), DOI: [10.1007/s11148-019-00304-2](https://doi.org/10.1007/s11148-019-00304-2).
- [106] Abdelhamid Issaoui, Sobhi Hcini, Nejeh Hamdaoui, Salah Knani, Abdulrahman Mallah, Rached Ben Younes, Structural, elastic, and optical properties of Cr-substituted Cu_{0.4}Cd_{0.3}Ni_{0.3}Fe_{2-x}Cr_xO₄ spinel oxides for enhanced UV photodetection, *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 394, 2025, 116883, ISSN 09244247,, DOI: [10.1016/j.sna.2025.116883](https://doi.org/10.1016/j.sna.2025.116883).
- [107] Hamid Soltanian, Reza Khalokakaie, Mohammad Ataei, Ezatallah Kazemzadeh, Fe₂O₃ nanoparticles improve the physical properties of heavy-weight wellbore cements: A laboratory study, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, Volume 26, 2015, Pages 695-701, ISSN 1875-5100,, DOI: [10.1016/j.jngse.2015.06.004](https://doi.org/10.1016/j.jngse.2015.06.004).