کاربردهای نوین نانومواد در صنایع هوافضا، مروری بر پیشرفت‌ها، چالش‌ها و چشم‌اندازها

محمد پارسا شهابی نیا، محمد حسین خالصی*
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

چکیده
در دهه‌های اخیر، نانوفناوری تحولی بنیادین در صنعت هوافضا ایجاد کرده است و پژوهش های ارزشمندی در این حوزه صورت گرفته است. با این حال، اغلب مطالعات مروری موجود به بیان پراکنده ویژگی‌ها و کاربردهای نانومواد بسنده کرده‌اند و کمتر به تحلیل ساختارمند جایگاه آن‌ها در سامانه‌های پروازی پرداخته‌اند. این مقاله با تمرکز بر خلأ مذکور، مروری نظام‌مند بر دسته‌بندی نانومواد پیشرفته نظیر نانولوله‌های کربنی، نانوکامپوزیت‌های پلیمری، ایروژل‌ها، نانوپوشش‌ها و نانوسرامیک‌ها ارائه می‌دهد و نقش هر یک را در ارتقای عملکرد اجزای کلیدی مانند بدنه، موتورها، سامانه‌های عایق حرارتی و الکترونیکی بررسی می‌کند. نوآوری مقاله در ارائه یک چارچوب تلفیقی است که ضمن مقایسه یافته‌های پژوهش‌های بین‌المللی و داخلی، قابلیت‌ها و محدودیت‌های فناورانه و اقتصادی را در قالبی یکپارچه تحلیل می‌کند. همچنین، برای نخستین‌بار تصویری جامع از جایگاه پژوهش‌های ایران در قیاس با روندهای جهانی ترسیم شده است تا ارزش افزوده‌ای برای جامعه علمی و سیاست‌گذاران حوزه هوافضا فراهم شود. در پایان، با تأکید بر چالش‌های کلیدی همچون هزینه تولید، استانداردسازی و مقیاس‌پذیری صنعتی، چشم‌انداز آینده این حوزه ترسیم شده است. مقاله حاضر می‌کوشد علاوه بر پرکردن خلأ منابع فارسی، مسیرهای نوین تحقیقاتی و صنعتی را برای بهره‌گیری راهبردی از نانومواد در صنعت هوافضا معرفی کند.

واژه‌های کلیدی: *نانومواد، نانوکامپوزیت، هوافضا، نانولوله‌های کربنی، عایق حرارتی*

ایمیل نویسنده مسئول: mhkhalesi@semnan.ac.ir

تاریخ دریافت : ۱۴۰۴/۵/۲ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۷/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۸/۲۶

۱-مقدمه

صنعت هوافضا به‌عنوان یکی از پیچیده ترین و پیشرفته ترین عرصه‌های فناوری در جهان، همواره نیازمند استفاده از موادی بوده است که در عین سبکی، دارای استحکام، پایداری حرارتی و دوام شیمیایی بالا باشند. الزامات عملکردی شدید این حوزه، شامل نوسانات دمایی گسترده، فشارهای آیرودینامیکی و تابش‌های کیهانی، ضرورت توسعه مواد نوینی را ایجاد کرده است که بتوانند عملکرد قابل اعتماد و پایدار را در محیط‌های خشن فراهم آورند [۱]. در این میان، فناوری نانو به‌عنوان بستری تحول‌آفرین در طراحی و مهندسی مواد در مقیاس اتمی و مولکولی، افق تازه‌ای را در ارتقای سامانه های هوافضایی گشوده است. نانومواد به دلیل برخورداری از ویژگی‌هایی نظیر نسبت سطح به حجم

بالا، رفتار کوانتومی، خواص مکانیکی و حرارتی برتر، و قابلیت اصلاح‌پذیری ساختاری، توانسته‌اند در دهه‌های اخیر جایگزین یا مکمل مواد مهندسی متداول در این صنعت شوند [۲–۴]. به‌کارگیری این مواد در اجزایی چون سازه‌های پروازی، عایق‌های حرارتی، سامانه‌های پیشران و زیرسیستم‌های الکترونیکی، منجر به افزایش نسبت استحکام به وزن، بهبود مدیریت حرارتی و کاهش خوردگی سطحی شده است [۵–۷].

کاربردهای صنعتی نانومواد در پروژه‌های پیشرفته شرکت‌هایی مانند بوئینگ، ایرباس، اسپیس‌ایکس و ناسا، بیانگر گذار این فناوری از مرحله تحقیقاتی به سطح عملیاتی است. استفاده از نانوکامپوزیت‌های پلیمری در ساخت بدنه‌ی هواپیمای ایرباس ای ۳۵۰[1] و بهره‌گیری از ایروژل‌های سیلیکا در سامانه‌های حرارتی مأموریت‌های فضایی ناسا نمونه‌هایی از این تحول‌اند [۸]. در کنار این روند جهانی، در ایران نیز مراکزی نظیر پژوهشگاه هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف و پژوهشگاه مواد و انرژی، مطالعات کاربردی در زمینه نانوپوشش‌های ضدخوردگی، کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده و حسگرهای نانویی را آغاز کرده‌اند [۹].

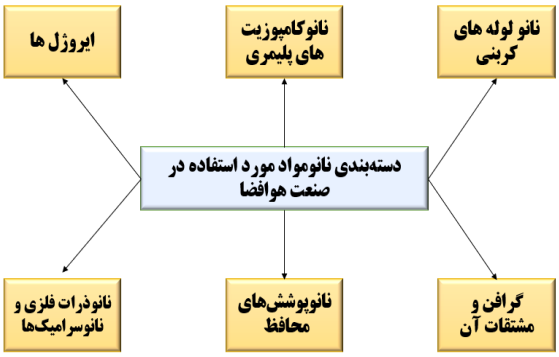
با وجود این پیشرفت‌ها، چالش‌هایی همچون تولید انبوه با کیفیت یکنواخت، هزینه‌های بالا، نبود زنجیره تأمین بومی، پایداری بلندمدت نانوساختارها در شرایط خشن، و نگرانی‌های زیست‌محیطی و ایمنی، همچنان موانعی جدی در مسیر تجاری‌سازی و استفاده گسترده از این فناوری محسوب می‌شوند [۱۰،۱۱]. در همین راستا، نیاز به پژوهش های میان رشته‌ای که از مرحله سنتز و شبیه سازی تا آزمون‌های میدانی و ارزیابی چرخه عمر را دربرگیرد، بیش از پیش احساس می‌شود.

پژوهش حاضر با ارائه مروری تحلیلی و ساختاریافته بر انواع نانومواد مورد استفاده در صنعت هوافضا، بررسی نقش آن‌ها در بهبود عملکرد اجزای کلیدی پروازی، تحلیل مطالعات موردی جهانی و ملی، و تبیین چالش‌ها و چشم‌اندازهای توسعه آتی این حوزه است. این مطالعه می‌کوشد ضمن پر کردن خلأ ادبیات پژوهشی موجود در منابع فارسی، تصویری جامع از روند جهانی و بومی بهره‌گیری از نانومواد در صنعت هوافضا ارائه دهد و مسیرهای آتی پژوهش و توسعه فناورانه را تبیین نماید.

۲- دسته‌بندی نانومواد مورد استفاده در صنعت هوافضا

توسعه نانومواد برای کاربردهای هوافضا مستلزم شناخت دقیق ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و عملکردی این دسته از مواد است[۱۲]. بسته به ساختار، ترکیب شیمیایی و نوع کاربرد نانومواد را می‌توان به دسته‌های گوناگون تقسیم کرد. در این بخش، به معرفی و بررسی شش رده اصلی از نانومواد پرکاربرد در صنعت هوافضا که در شکل ۱ قابل مشاهده است پرداخته شده است. این مواد در سامانه های پیشران، بال، بدنه سیستم های حفاظتی، رادار گریزی و ... کاربرد دارند.[۱۳و۱۴].

[1] Airbus A350



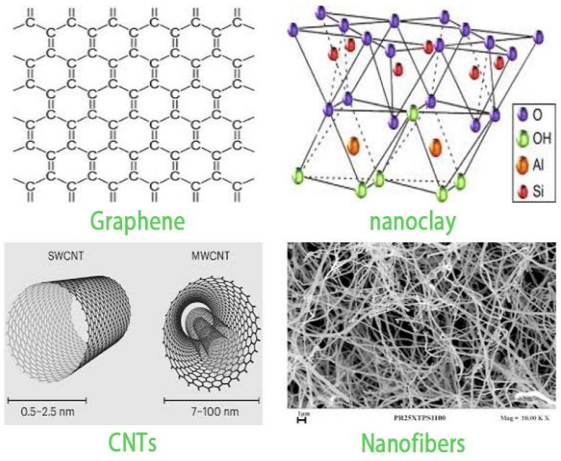
شکل ۱. دسته بندی نانو مواد مورد استفاده در صنعت هوافضا

۲-۱- نانولوله‌های کربنی

نانولوله‌های کربنی، استوانه‌هایی از صفحات گرافن[۲] با آرایش منظم اتم‌های کربن هستند که به‌صورت تک دیواره[۳] یا چند دیواره[۴] وجود دارند. این نانوساختارها دارای خواص مکانیکی و الکتریکی استثنایی هستند؛ استحکام کششی آن‌ها به بیش از ۶۰ گیگاپاسکال می‌رسد، در حالی که چگالی آن‌ها حدود یک ششم فولاد است [۱۵]. این ویژگی‌ها موجب شده است که نانولوله های کربنی در تقویت کامپوزیت‌های پلیمری[۵] مورد استفاده در ساخت بدنه هواپیما، قطعات پره‌های موتور و سامانه‌های کنترل حرارتی به‌کار روند [۱۶]. از دیگر مزایای نانو لوله های کربنی، رسانایی الکتریکی بالا و پایداری حرارتی آن‌هاست، که در طراحی سپرهای ضدالکتریسیته ساکن، پوشش‌های ضدآتش و حسگرهای دما و فشار استفاده می‌شود [۱۷].

۲-۲- نانوکامپوزیت‌های پلیمری

کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با نانوذرات، یکی از پرکاربردترین نانومواد در صنایع هوافضا هستند. در این مواد، نانوذراتی مانند نانولوله‌های کربنی، گرافن، نانوکلی[۶] یا نانوفیبرها[۷] که تصویری از ساختار این نانوذرات در شکل ۲ قابل مشاهده است درون ماتریس پلیمری توزیع شده و باعث بهبود خواص مکانیکی، حرارتی و ضدخوردگی می‌شوند [۱۸].



شکل ۲. ساختار نانو ذرات تقویت کننده کامپوزیت های پلیمری

یکی از مزایای کلیدی نانو کامپوزیت های پلیمری[۸]، قابلیت طراحی و مهندسی خواص بر اساس نوع و درصد فاز نانو است. در پژوهشی توسط دهرویه[۹] و همکاران در سال ۲۰۲۱ مشخص شد افزودن تنها ۱ درصد وزنی نانولوله‌های کربنی به رزین اپوکسی می‌تواند سختی آن را تا ۲۵٪ افزایش دهد و دمای انتقال شیشه‌ای[۱۰] را تا ۱۵ درجه سلسیوس بالا ببرد [۱۹]. این ویژگی‌ها آن‌ها را برای قطعات سبک‌وزن، پوشش‌های مقاوم به شعله و

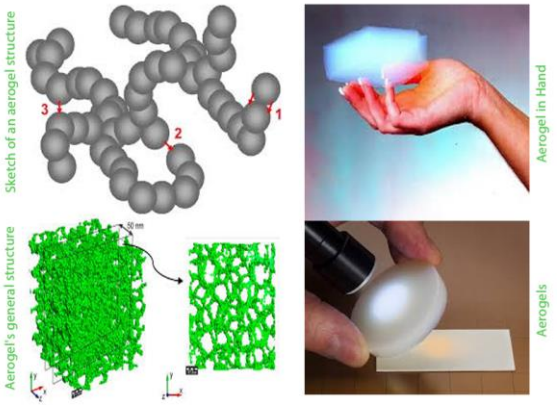
[2] Graphene
[3] SWCNT
[4] MWCNT
[5] Polymer composites

[6] nanoclay
[7] Nanofibers
[8] PNC
[9] Dehrooyeh
[10] Tg

ساختارهای ترکیبی در سامانه‌های پروازی ایده‌آل می‌سازد.

۲-۳- ایروژل‌ها

ایروژل‌ها به‌دلیل ساختار نانومتخلخل و چگالی فوق‌العاده پایین خود (در حدود ۰.۰۰۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب)، یکی از مؤثرترین مواد در مدیریت حرارتی و حفاظت سازه‌های فضایی محسوب می‌شوند. شبکه سه‌بعدی حفره‌های نانومتری در این مواد، مانع انتقال رسانشی و همرفتی حرارت می‌شود و به همین دلیل در سپرهای حرارتی فضاپیماها، لباس‌های فضانوردی و عایق‌های چندلایه ماهواره‌ها به‌طور گسترده به‌کار می‌روند [۲۱,۲۰]. در پژوهشی، استفاده از ایروژل‌های هیبریدی تقویت شده با نانولوله های کربنی برای بهبود پایداری مکانیکی پیشنهاد شده‌است که می‌تواند کارایی آن‌ها را در ساختارهای متحرک افزایش دهد [۲۲]. ساختار ایرژول و تصاویری از آن در شکل 3 قابل مشاهده است.



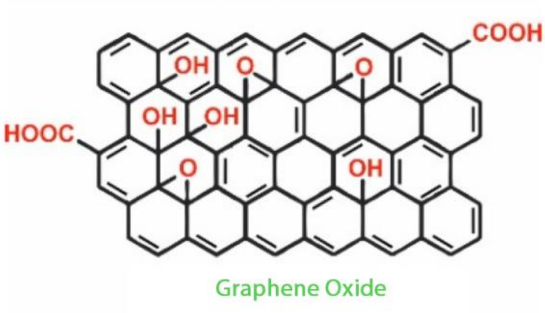
شکل۳ . ساختار نانومتخلخل ایروژل‌های سیلیکا و نمونه‌های تصویری آن در مقیاس میکروسکوپی

فضای متخلخل به وضوح قابل مشاهده است که عامل اصلی کاهش ضریب هدایت حرارتی و افزایش پایداری در برابر شوک‌های دمایی محسوب می‌شود. این ویژگی، ایروژل‌ها را برای استفاده در سیستم‌های حفاظتی حرارتی فضاپیماها و سازه‌های سبک‌وزن هوافضایی به گزینه‌ای ایده‌آل تبدیل کرده است.

۲-٤- گرافن و مشتقات آن

گرافن، یک صفحه‌ی تک‌اتمی از اتم‌های کربن با چیدمان لانه‌زنبوری است که از خواصی مانند هدایت الکتریکی و حرارتی فوق‌العاده، استحکام مکانیکی بالا (۱۱۰۰ گیگاپاسکال) و انعطاف‌پذیری عالی برخوردار است [۲۳].

کاربردهای گرافن در هوافضا را میتوان چنین بیان کرد: باتری‌های سبک وزن، سوپرخازن‌های پرظرفیت، پوشش‌های ضدالکتریسیته ساکن، و مواد مقاوم به تابش کیهانی است [۲۴]. از سوی دیگر، اکسید گرافن[11] با دارا بودن گروه‌های عاملی اکسیژنه، در ساخت چسب‌های پلیمری و نانومواد رسانای یونی نقش مهمی ایفا کرده است، که تصویری از ساختار آن در شکل ۴ قابل مشاهده است. پژوهشگران نشان داده‌اند که ترکیب اکسید گرافن با رزین‌های اپوکسی منجر به بهبود خواص چسبندگی و پایداری حرارتی کامپوزیت‌ها می‌شود [۲۵].



شکل٤ . ساختار گرافن اکسید

[11] GO

۲-۵- نانوپوشش‌های محافظ [12]

پوشش‌های نانوساختار، به‌ویژه نانوسرامیک‌ها و پوشش‌های اکسیدی (مانند دی‌اکسید تیتانیوم[13] و اکسید آلومینیوم[14])، نقش مهمی در حفاظت سطحی از قطعات هوافضایی ایفا می‌کنند. این پوشش‌ها معمولاً از طریق روش‌هایی چون پاشش پلاسمایی[15]، لایه‌نشانی فیزیکی بخار [16] یا سل-ژل ایجاد می‌شوند و مقاومت در برابر خوردگی، فرسایش و تابش را فراهم می‌سازند [۲۶]. برای مثال، در موتورهای توربینی، استفاده از پوشش‌های حرارتی نانوساختار سبب افزایش مقاومت سطحی در برابر اکسیداسیون دمای بالا و کاهش نرخ فرسایش پره‌ها شده است. همچنین در بدنه هواپیما، پوشش‌های نانویی آب‌گریز، میزان چسبندگی یخ و آلودگی را کاهش داده‌اند که تأثیر مستقیمی بر ایمنی پرواز دارد [۲۷].

۲-۶- نانوذرات فلزی و نانوسرامیک‌ها

نانوذرات فلزی (نقره، مس، آلومینیوم) و نانوسرامیک‌ها (اکسید زیرکونیم[17]، سیلیسیم کاربید[18]) نیز در طراحی چسب‌ها، روان‌سازها، رنگ‌های مقاوم به تابش و حتی مواد جاذب امواج الکترومغناطیسی کاربرد دارند. استفاده از این ذرات به دلیل خواص نوری، مغناطیسی و الکتریکی خاص در سامانه‌های مخفی[19] و همچنین حسگرهای نانویی هوافضایی رو به افزایش است [۲۸].

دسته‌بندی نانومواد نشان می‌دهد که طراحی و انتخاب مناسب هر یک از این دسته‌ها می‌تواند متناسب با نیازهای عملکردی، در بخش خاصی از یک سامانه هوافضایی اعمال شود. در ادامه مقاله، به کاربردهای عملی و موردی این نانومواد در اجزای مختلف صنایع هوایی و فضایی پرداخته خواهد شد.

۳- کاربرد نانومواد در اجزای مختلف سامانه‌های هوافضایی

کاربرد نانومواد در صنعت هوافضا تنها به سطح تحقیقاتی محدود نشده و به‌صورت مستقیم در طراحی، ساخت، بهینه‌سازی و افزایش طول عمر اجزای کلیدی سامانه‌های هوافضایی وارد شده است. در این بخش، استفاده از نانومواد در 5 بخش مهم: ساختارهای اصلی (ایرفریم[20])، سامانه‌های پیشران، حفاظت حرارتی، سامانه‌های الکترونیکی و اپتیکی، و تجهیزات پشتیبان زمینی بررسی می‌شود[۲۹].

۳-۱- بدنه، بال‌ها و اجزای ساختاری

ساختارهای هواپیماها و فضاپیماها باید در عین سبکی، مقاوم به بارهای مکانیکی پیچیده، ارتعاش، و پایداری حرارتی بالا باشند. نانوکامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با نانولوله های کربنی، گرافن یا نانوالیاف شیشه‌ای، به دلیل چگالی کم و استحکام بالا، به‌طور گسترده در ساخت بال‌ها، بدنه، سطوح کنترل پروازی و بدنه ماهواره‌ها استفاده می‌شوند [۳۰]. برای مثال، شرکت بوئینگ در هواپیمای دریم لاینر[21] از نانوکامپوزیت‌های کربنی برای ۵۰ درصد ساختار بدنه بهره برده که نسبت مقاومت به وزن را به‌طور چشمگیری افزایش داده و مصرف سوخت را کاهش داده است [۳۱]. همچنین، تحقیقات ناسا نشان می‌دهد استفاده از نانولوله‌های

[12] Nanocoatings
[13] TiO_2
[14] Al_2O_3
[15] APS
[16] PVD
[17] ZrO_2
[18] SiC
[19] stealth

[20] Airframe
[21] Dreamliner

کربنی در کامپوزیت‌های اپوکسی می‌تواند سختی خمشی را تا ۳۵ درصد و مقاومت شکست را تا ۵۰ درصد افزایش دهد [۳۲].

۳-۲- سامانه‌های پیشران (موتورهای جت و راکت)

در پیشرانه‌های هوافضایی، قطعاتی مانند پره‌های توربین، محفظه احتراق، و نازل موتور باید مقاومت بالایی در برابر دماهای بالا (بیش از ۱۵۰۰ درجه سانتی گراد)، خوردگی، و سایش داشته باشند. در این راستا، پوشش‌های نانوساختار سرامیکی (مانند اکسید یودید[۲۲] و اکسید زیرکونیوم) به عنوان پوشش‌های سد حرارتی[۲۳] بر روی پره‌های موتور اعمال می‌شوند [۳۳]. همچنین، روان‌سازهای نانویی بر پایه سولفید مولیبدنوم[۲۴] یا نانوذرات اکسید مس[۲۵] عملکرد اصطکاکی را در بلبرینگ‌ها بهبود می‌دهند و از سایش در شرایط خلا جلوگیری می‌کنند [۳۴]. نانوکامپوزیت‌های فلزی[۲۶] نیز در ساخت قطعات ساختاری سبک‌وزن مقاوم به دمای بالا نظیر شاسی نگهدارنده موتور مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۳۵].

۳-۳- سیستم‌های حفاظت حرارتی و مدیریت انرژی

یکی از بزرگ‌ترین چالش‌ها در پروازهای فضایی، کنترل دمایی در مواجهه با ورود مجدد به جو و یا تابش مستقیم خورشید در خلا است. ایروژل‌های تقویت‌شده با نانولوله های کربنی و نانوذرات سیلیکا، به‌دلیل ضریب هدایت حرارتی پایین و مقاومت دمایی بالا تا ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد، به‌عنوان مواد عایق حرارتی در سپرهای فضاپیماهای بازگشتی مانند اریون[۲۷] و دراگون[۲۸] مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۳۶]. همچنین، در سلول‌های خورشیدی ماهواره‌ها، استفاده از نانوساختارهای آنتی‌رفلکتیو (مانند نانوپوشش‌های تیتانیوم اکسید[۲۹]) باعث افزایش بهره‌وری تبدیل انرژی تا ۱۰٪ شده است [۳۷]. مواد تغییر فازدهنده[۳۰] مبتنی بر نانوذرات آلومینا و گرافن نیز برای ذخیره و تنظیم حرارتی در ماهواره‌های کوچک طراحی شده‌اند [۳۸].

۳-٤- سامانه‌های الکترونیکی، حسگری و اپتیکی

در هواپیماها و فضاپیماهای نسل جدید، سیستم‌های الکترونیکی، مخابراتی و اپتیکی نقش کلیدی در ناوبری، نظارت، و ارتباطات ایفا می‌کنند. استفاده از نانوحسگرها بر پایه نانولوله‌های کربنی و گرافن موجب افزایش حساسیت در حسگرهای دما، فشار، تابش و گاز شده است [۳۹]. به‌علاوه، نانوآنتن‌های پلاسمونیک مبتنی بر نانوذرات طلا و نقره، در طراحی تجهیزات ارتباطی پرسرعت در باندهای بالا مانند کا[۳۱] و وی-بند[۳۲] برای ماهواره‌ها به‌کار رفته‌اند. در سیستم‌های تصویربرداری اپتیکی نیز، عدسی‌های مبتنی بر متامواد نانوساختار، قدرت تفکیک را افزایش داده‌اند [۴۰].

۳-۵- کاربرد در تجهیزات زمینی و پشتیبان

نانومواد همچنین در تجهیزاتی نظیر پایگاه‌های پرتاب، لباس‌های فضایی، مخازن سوخت و سازه‌های پشتیبان

---

22 Y_2O_3
23 TBCs
24 MoS_2
25 CuO
26 MMC

27 Orion
28 Dragon
29 TiO_2
30 PCM
31 Ka
32 V-band

زمینی نیز نقش دارند. برای مثال، لباس‌های فضانوردی جدید مجهز به پوشش‌های گرافنی برای حفاظت از اشعه یو وی[33] و تنظیم دمای بدن طراحی شده‌اند [۴۱]. همچنین، نانوپوشش‌های مقاوم به خوردگی در ساخت سکوهای پرتاب و مخازن سوخت با مقاومت بالا به اکسیداسیون دمای بالا استفاده شده‌اند. در مخازن هیدروژن مایع برای سامانه‌های پیشران، استفاده از کامپوزیت‌های پلیمری نانوتقویت‌شده، خطر نفوذ گاز و ترک‌خوردگی را کاهش داده و عملکرد حرارتی را بهبود بخشیده است [۴۲].

کاربردهای عملی نانومواد در صنعت هوافضا گستره‌ای از اجزای ساختاری تا سامانه‌های پیچیده مخابراتی و الکترونیکی را در بر می‌گیرد. ترکیب خواص منحصربه فرد نانو با طراحی مهندسی دقیق، امکان توسعه پرنده‌هایی سبک‌تر، مقاوم‌تر و هوشمندتر را فراهم کرده است. در بخش بعدی، به بررسی مطالعات موردی از نمونه‌های عملیاتی در سطح جهانی و ملی پرداخته خواهد شد.

٤- مطالعات موردی جهانی و ملی در کاربرد نانومواد هوافضایی

پیشرفت‌های عملی در صنعت هوافضا به‌واسطه کاربرد نانومواد، در قالب پروژه‌های واقعی و اجرایی در سازمان‌های فضایی و شرکت‌های هوافضایی معتبر جهانی و ملی نمود یافته است. این بخش با بررسی برخی مطالعات موردی برجسته از سازمان‌های معتبری چون ناسا[34]، اسا[35]، اسپیس ایکس[36]، و همچنین نمونه‌هایی از ایران، نشان دهنده نقش نانومواد را از آزمایشگاه تا پرتابگر نشان است.

٤-١- مطالعات موردی جهانی

در این بخش به مطالعه پژوهش های صورت گرفته در سطح بین الملل پرداخته است.

٤-١-١- ناسا و فضاپیمای اریون

در پروژه اریون، سازمان فضایی آمریکا از نانوکامپوزیت‌های اپوکسی تقویت‌شده با نانولوله‌های کربنی برای ساخت قطعات ساختاری سبک وزن استفاده کرد. این مواد در آزمون‌های ضربه و حرارتی، بهبود ۳۰٪ مقاومت شکست در دمای بالا را نشان دادند [۴۳]. همچنین، در سیستم‌های حفاظت حرارتی فضاپیما، از ایروژل‌های تقویت‌شده با نانوسیلیکا استفاده شد که قادر به تحمل دماهای بیش از ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد بودند [۴۴]. تصویری از این فضاپیما در شکل ۵ قابل مشاهده است.

شکل ۵. فضاپیما اریون

٤-١-٢- اسپیس ایکس و استفاده از نانوپوشش‌ها

[33] UV
[34] NASA
[35] ESA
[36] SpaceX

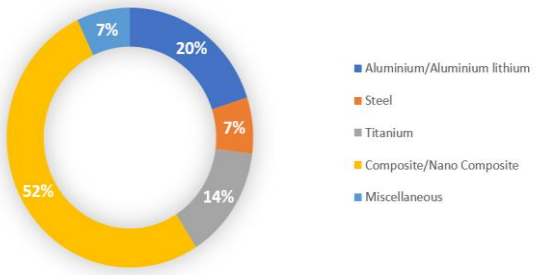
شرکت اسپیس ایکس از پوشش‌های نانوساختار کروم-آلومینیوم-نیکل در نازل موتور راپاتور[37] بهره برده است. این پوشش‌ها در برابر خوردگی گاز داغ عملکرد پایداری داشتند و طول عمر نازل را افزایش دادند [۴۵]. علاوه بر این، در بدنه موشک فلاکون ۹[38]، نانوپوشش‌های ضد خوردگی برای محافظت در برابر شرایط رطوبتی و نمکی در محل‌های پرتاب دریایی مورد استفاده قرار گرفت [۴۶]. تصویری از نازل راپاتور در شکل ۶ قابل مشاهده است.

شکل٦ . نازل موتور راپاتور

٤-١-٣- ایرباس و نانوکامپوزیت‌ها در A350 XWB

شرکت ایرباس در طراحی و ساخت هواپیمای پیشرفته A350 XWB از فناوری‌های نوین و مواد پیشرفته نانوکامپوزیت‌های کربنی بهره‌برداری کرده است. این نانوکامپوزیت‌ها، به دلیل سبک‌بودن، استحکام بالا و مقاومت شیمیایی و فیزیکی، در ساختار بال‌ها و پنل‌های بدنه این هواپیما مورد استفاده قرار گرفته‌اند. باتوجه‌به گزارش‌های رسمی منتشر شده، به‌کارگیری این مواد منجر به کاهش وزن کل ساختار هواپیما به میزان تقریبی ۲۵ درصد نسبت به نسل قبلی خود، یعنی هواپیمای A330، شده است. این کاهش وزن، به‌نوبه خود، تأثیر مستقیم بر کاهش مصرف سوخت و افزایش کارایی اقتصادی و زیست‌محیطی هواپیما دارد، به‌گونه‌ای که بر اساس ارزیابی‌های صورت‌گرفته، میزان مصرف سوخت در این مدل در مقایسه با نسخه‌های پیشین حدود ۲۰ درصد کاهش یافته است [۴۵].

علاوه بر این، شرکت ایرباس در زمینه بهبود کارایی و امنیت پرواز، از پوشش‌های نانوکامپوزیت‌های خاصی استفاده کرده است که بر روی سطح ورودی‌های موتور نصب شده‌اند. این پوشش‌ها، به‌عنوان پوشش‌های ضد یخ و ضد باکتری، نقش مهمی در جلوگیری از تشکیل لایه‌های یخ در ارتفاعات بالا و همچنین کاهش آلودگی‌های میکروبی ایفا می‌کنند. این فناوری، ضمن افزایش مقاومت و دوام موتور در برابر شرایط جوی سخت، به بهبود عملکرد و افزایش ایمنی سیستم‌های هواپیما کمک می‌کند. بنابراین، به‌کارگیری فناوری نانو در طراحی این هواپیمای پیشرفته، نشانگر توجه‌پذیری و اهمیت فناوری‌های نوین در کاهش وزن، بهبود بهره‌وری سوخت، تضمین ایمنی و کاهش هزینه‌های عملیاتی در صنعت هوافضا است. این نوآوری‌ها نه تنها در سطح فناوری‌های صنعتی بلکه در مسیر توسعه فناوری‌های سبز و پایداری محیط زیستی در حوزه حمل‌ونقل هوایی، نقش حیاتی ایفا می‌کنند [۴۶]. در شکل ۷ به تفکیک مقادیر مورد استفاده از مواد مختلف در ساخت این هواپیما بر حسب درصد قابل مشاهده است[۴۹].



[37] Raptor
[38] Falcon 9

شکل۷. مواد به کار رفته در هواپیما شرکت ایرباس

٤-١-٤- سازمان فضایی اروپا و نانوحسگرها در ماهواره‌های کوچک

سازمان فضایی اروپا در پروژه CubeSat از نانوحسگرهای گرافنی برای پایش دمای داخل ماهواره‌های کوچک استفاده کرده است. این حسگرها، با حساسیت بیش‌از ۹۸٪ و دقت حدود ۰.۱ درجه سانتی‌گراد، در مقیاس نانومتری (کمتر از ۱۰ نانومتر) ساخته شده‌اند و مقاومت قابل توجهی در برابر تشعشع و دماهای بالا دارند. استفاده از فناوری نانوگرافن، امکان اندازه‌گیری‌های دقیق و پایدار در محیط‌های فضایی اتمسفری و چالش‌برانگیز را فراهم می‌کند. این فناوری، نقش مهمی در افزایش ایمنی، کارایی و جمع‌آوری داده‌های حساس در ماموریت‌های فضایی کوچک و متوسط دارد[۵۰].

٤-٢- مطالعات موردی ملی (ایران)

در این بخش به مطالعه پژوهش های صورت گرفته در ایران پرداخته است.

٤-٢-١- پژوهشگاه هوافضا و کامپوزیت‌های نانویی

در پروژه‌ی طراحی و ساخت سامانه هواپایه در پژوهشگاه هوافضا، از نانوکامپوزیت‌های اپوکسی تقویت‌شده با نانوسیلیکا به منظور ساخت پوسته‌های بیرونی استفاده شده است. نتایج آزمون‌های مکانیکی نشان داده است که افزودن تنها ۲ درصد وزنی نانوسیلیکا موجب افزایش ۱۸ درصدی استحکام کششی و ۲۲ درصدی مدول خمشی در مقایسه با نمونه‌های بدون فاز نانویی شده است. این میزان بهبود، در مقایسه با گزارش‌های بین‌المللی از جمله پروژه‌های ناسا[39] و اسا[40] که افزایش‌هایی در حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد در شاخص‌های مکانیکی سازه‌های کامپوزیتی گزارش کرده‌اند. نشان دهنده قابلیت رقابت‌پذیری عملکردی نانوکامپوزیت‌های توسعه یافته در ایران است. از منظر صنعتی، بهبود خواص مکانیکی یادشده منجر به افزایش حدود ۱۰ درصدی نسبت استحکام به وزن سازه و به تبع آن، کاهش ۵ تا ۷ درصدی وزن کل سامانه شده است؛ امری که تأثیر مستقیمی بر کاهش مصرف سوخت و بهبود پایداری پروازی دارد. افزون بر این، پایداری عملکرد مکانیکی این نانوکامپوزیت‌ها در آزمون‌های حرارتی و ارتعاشی تا دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس بدون افت محسوس خواص تأیید شده است. بر اساس این نتایج، می‌توان نتیجه گرفت که توسعه‌ی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی ـ نانوسیلیکا در پژوهشگاه هوافضا از نظر علمی هم‌تراز با نمونه‌های خارجی بوده و از حیث پایداری عملکرد، هزینه‌ی تولید و بومی‌سازی فناوری دارای مزیت‌های قابل‌توجهی است[۵۱,۴۷,۴۳].

٤-٢-٢- دانشگاه صنعتی شریف و نانوسیالات خنک‌کننده

پژوهشگران دانشکده مهندسی مکانیک شریف، نانوسیالات بر پایه Al_2O_3 در سیستم خنک‌کننده موتورهای راکتی آزمایشی را توسعه داده‌اند. بررسی‌ها نشان داده است که این نانوسیال‌ها توانسته‌اند نرخ انتقال حرارت را تا ۴۰٪ نسبت به سیالات پایه افزایش دهند [۵۲].

[39] NASA
[40] ESA

٤-۲-۳- سازمان صنایع هوایی (صها) و پوشش‌های نانوساختار

در نوسازی جنگنده‌های موجود، سازمان صها اقدام به توسعه پوشش‌های نانوساختار برای کاهش امضای راداری[41] کرده است. این پوشش‌ها شامل نانومواد جاذب امواج (مانند نانوکامپوزیت‌های Fe_3O_4-epoxy) هستند که موجب کاهش بازتاب امواج راداری در باند ایکس[42] شده‌اند که این فناوری، با کاهش قابل توجه امضای راداری، قابلیت‌های پنهان‌کاری و امنیت جنگنده‌ها را در مقابل ردگیری توسط سامانه‌های پیشرفته راداری افزایش می‌دهد[۵۳].

٤-۲-٤- پژوهشگاه مواد و انرژی و نانولایه‌های حفاظتی

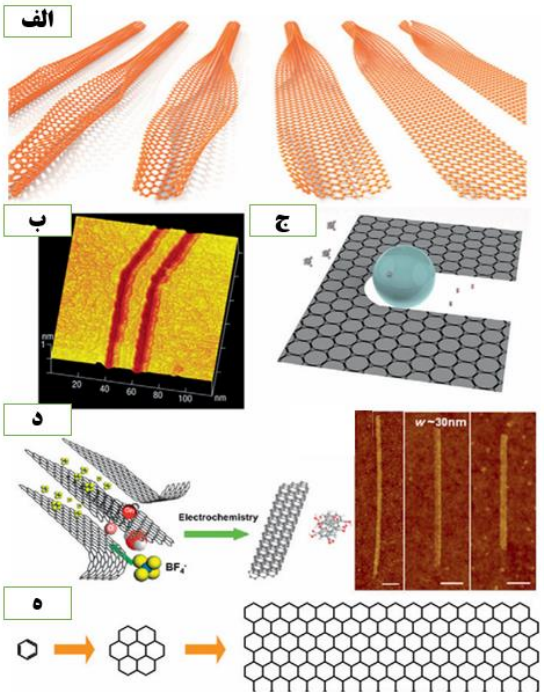
در همکاری میان پژوهشگاه مواد و انرژی و وزارت دفاع، نانولایه‌های آلومینا-سیلیکا بر روی قطعات بدنه موشک‌های سوخت جامد برای افزایش مقاومت به اکسایش و تخریب حرارتی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این پوشش‌ها با روش لایه‌نشانی شیمیایی از فاز بخار[43] اعمال شده‌اند [۵۴].

در فرآیندهای ساخت و اصلاح نانومواد، کنترل ساختارهای میکرو و نانومتری نقش مهمی در بهبود خواص فیزیکی و شیمیایی مواد ایفا می‌کند. شکل ۷، که شامل مراحل مختلف تولید و اصلاح ساختارهای نانولایه‌های گرافنی و فرآیندهای مرتبط است، نمونه‌ای از تکنیک‌های پیشرفته در این حوزه را نشان می‌دهد. بخش (الف) فرآیند طراحی چندلایه‌های گرافن با رویکردهای متفاوت را نشان می‌دهد که منجر به کنترل دقیق بر ساختار و خواص می‌گردد. بخش (ب) نقشه توزیع گرادیان‌های چگالی در نانولایه‌ها را نمایش می‌دهد و اهمیت یکنواختی ساختار را در خواص نهایی تأکید می‌کند.

در ادامه، بخش (ج) ساختارهای پله‌ای و گرادیان تراکم در نمونه‌های نانومواد را نشان می‌دهد که نتیجه فرآیندهای هیدروژناسیون کاتالیتیک و تغییرات دما هستند و بر خواص مکانیکی و شیمیایی تأثیر دارند. بخش (د) به برهم‌کنش‌های الکتروشیمیایی و روش‌های تحلیل سطحی در توسعه نانومواد اشاره دارد که در بهبود خواص الکتریکی و الکترونیکی اهمیت دارد، در حالی‌که بخش (ه) توزیع سطحی نانولایه‌ها را در مقیاس نانومتری نشان می‌دهد، و بر اهمیت کنترل دقیق سطح تأکید می‌کند.

در کنار این فناوری‌ها، در همکاری بین پژوهشگاه مواد و انرژی و وزارت دفاع، نانولایه‌های آلومینا-سیلیکا بر روی قطعات بدنه موشک‌های سوخت جامد توسعه یافته و برای افزایش مقاومت در برابر اکسایش و تخریب حرارتی مورد استفاده قرار گرفته‌اند؛ این پوشش‌ها با روش لایه‌نشانی شیمیایی فاز بخار اعمال شده است. این همکاری مبتنی بر بهره‌گیری از فناوری‌های پیشرفته نانو ساختار، از جمله اصلاح ساختارهای گرافنی و توسعه پوشش‌های مقاوم، نشان می‌دهد که کنترل دقیق ساختارهای نانو، چه در سطح مواد پایه و چه در فرآیندهای لایه‌نشانی، در جهت بهبود خواص کارکردی و امنیتی مواد برای کاربردهای نظامی و فضایی اهمیت حیاتی دارد. در شکل ۸ تصویری از مراحل و ساختارهای نانومواد گرافنی و فرآیندهای اصلاح سطح در توسعه نانوپوشش‌های مقاوم قابل مشاهده است.

[41] Radar Cross Section
[42] X
[43] CVD



شکل۸. مراحل تولید و اصلاح ساختار نانولایه‌های گرافن

مطالعات موردی جهانی و ملی نشان می‌دهند که نانومواد نه‌تنها در سطح مفهومی و تحقیقاتی، بلکه در طراحی عملیاتی و اجرایی محصولات هوافضایی نقشی کلیدی ایفا می‌کنند. شرکت‌هایی چون Boeing، SpaceX و Airbus و نیز مراکز تحقیقاتی در ایران، نشان داده‌اند که به‌کارگیری نانومواد می‌تواند در کاهش وزن، افزایش استحکام، بهبود مدیریت حرارتی، و افزایش طول عمر سامانه‌ها تاثیر قابل‌توجهی داشته باشد.

۵- جمع بندی و آینده‌پژوهی نانومواد در صنعت هوافضا

۵-۱- جمع‌بندی

در دو دهه گذشته، نانومواد از مفاهیم نظری به ابزارهایی عملی در فناوری‌های پیشرفته تبدیل شده‌اند. در صنعت هوافضا، جایی که عملکرد، ایمنی و کارایی در شرایط سخت حیاتی هستند، نانومواد تحولی بنیادین ایجاد کرده‌اند. از تقویت ساختارها با نانولوله‌های کربنی و استفاده از نانوساختارهای سرامیکی در سپرهای حرارتی، تا بهره‌گیری از نانوحسگرها در ماهواره‌ها، کاربردهای آن گسترده و رو به رشد است. نمونه‌های جهانی و ملی، از جمله برنامه اریون ناسا، موتورهای راپاتور اسپیس‌ایکس و بدنه کامپوزیتی ایربایس ای ۳۵۰، نشان می‌دهند که نانومواد به یک نیاز استراتژیک در طراحی نسل جدید سامانه‌های هوافضایی تبدیل شده‌اند. با توجه به فشارهای اقتصادی برای کاهش مصرف سوخت، افزایش طول عمر پرنده‌ها و ارتقای ایمنی، نانومواد به‌عنوان پلی میان خواص مکانیکی، الکترونیکی و حرارتی، مزایایی چندجانبه فراهم می‌کنند که مواد متداول قادر به ارائه آن‌ها نیستند.

۵-۲- چالش‌ها و محدودیت‌ها

با وجود پتانسیل بالای نانومواد در حوزه هوافضا، مسیر تجاری‌سازی آن‌ها با چالش‌های متعددی همراه است. اولاً، بسیاری از نانومواد در مقیاس آزمایشگاهی عملکرد مطلوبی نشان می‌دهند، اما تولید صنعتی یکنواخت و مقرون‌به‌صرفه آن‌ها همچنان دشوار است [۵۵]. ثانیاً، هزینه بالای نانوساختارهای پیشرفته، از جمله گرافن با کیفیت بالا و نانولوله‌های تک‌دیواره، مانع عمده‌ای برای استفاده گسترده آن‌ها محسوب می‌شود [۵۶]. علاوه بر این، برخی نانومواد ممکن است اثرات نامطلوبی بر سلامت انسان و محیط‌زیست داشته باشند، به‌ویژه در مراحل تولید، بازیافت و تخریب [۵۷]. نهایتاً، فقدان استانداردهای جهانی برای آزمون، شبیه‌سازی و ارزیابی عملکرد، امکان مقایسه نتایج آزمایش‌های مختلف را محدود می‌کند [۵۸].

۵-۳- آینده‌پژوهی و مسیر توسعه

در کنار چالش‌ها، روند جهانی تحقیقات و سرمایه‌گذاری‌ها نشان‌دهنده آن است که نانومواد، آینده‌ای روشن در صنعت هوافضا دارند. برخی مسیرهای پیش‌بینی‌شده عبارت‌اند از:

- نانوکامپوزیت‌های هوشمند: توسعه موادی که نه تنها مقاوم هستند، بلکه قابلیت حسگری، خودترمیمی، و تطبیق با محیط را دارند. این ترکیبات می‌توانند در هواپیماهای خودمختار و نسل آینده فضاپیماها استفاده شوند [۵۹].
- مدلسازی چندمقیاسی و شبیه‌سازی کوانتومی: با افزایش قدرت پردازشی و توسعه الگوریتم‌های یادگیری ماشین، پیش‌بینی خواص نانومواد در شرایط واقعی پرواز دقیق‌تر و سریع‌تر خواهد شد [۶۰].
- نانوساختارهای چندکاره: موادی با قابلیت همزمان هدایت حرارتی بالا، جذب انرژی، و مقاومت ساختاری؛ مانند کامپوزیت‌های گرافنی تقویت‌شده با نانولوله‌ها یا نانوروبان‌ها، در طراحی سازه‌های سبک‌وزن قابل‌اعتماد کاربرد خواهند داشت [۶۱].
- ادغام نانومواد با فناوری‌های نوظهور: مانند نانوفوتونیک در سامانه‌های ارتباطی، نانوالکترونیک در میکروماهواره‌ها، و نانوبیوسنسورها در سامانه‌های زیستی پروازهای انسانی [۶۲].

همچنین کشورهایی مانند چین، آمریکا، اتحادیه اروپا و هند برنامه‌های کلان راهبردی برای توسعه نانوفناوری در صنعت هوافضا تعریف کرده‌اند. در ایران نیز با توسعه زیرساخت‌های پژوهشی، رشد استارت‌آپ‌های نانو، و همکاری میان صنایع دفاعی و دانشگاهی، افق مناسبی برای استفاده گسترده از نانومواد در حوزه هوافضا ترسیم شده است.

نانومواد، دیگر یک انتخاب نیستند بلکه یک ضرورت فناوری در عصر آینده صنعت هوافضا هستند. استفاده هوشمندانه از این مواد می‌تواند امکان طراحی سامانه‌هایی سبک‌تر، ایمن‌تر، خودهوش‌تر و مقاوم‌تر را فراهم آورد. اگرچه مسیر پرچالشی پیش رو است، اما فرصت‌های پنهان در نانو مقیاس می‌تواند آینده پرواز را بازتعریف کند.

۶- نتیجه گیری

ورود نانومواد به صنعت هوافضا یک نقطه عطف در تحول مواد مهندسی برای محیط‌های فراتر از زمین به شمار می‌رود چرا که مرزهای طراحی سنتی را گسترش و امکان توسعه ساختارهایی سبک‌تر، مقاوم‌تر، هوشمندتر و پایدارتر را فراهم کرده است. شواهد تجربی و مطالعات موردی نشان می‌دهد که نانومواد، از نانولوله‌های کربنی در اجزای ساختاری گرفته تا نانوسیالات در سیستم‌های خنک‌کننده، پوشش‌های جاذب امواج برای کاهش امضای راداری، و نانوحسگرهای گرافنی برای کنترل عملکرد پرنده‌ها، نه تنها در سطح تحقیقاتی بلکه در محصولات تجاری و مأموریت‌های فضایی نیز به‌کار رفته‌اند. با این حال، چالش‌های مهمی همچون تولید یکنواخت انبوه، هزینه‌های بالا، مسائل ایمنی و نبود استانداردهای بین‌المللی، نیازمند همکاری میان پژوهشگران، صنعت‌گران، نهادهای قانون‌گذار و سرمایه‌گذاران است. چشم‌انداز آینده روشن است؛ فناوری‌هایی مانند نانوکامپوزیت‌های خودترمیم‌شونده، مواد چندکاره، نانوالکترونیک فضایی و سیستم‌های حسگر-سازه، همراه

با مدل‌سازی چندمقیاسی مبتنی بر هوش مصنوعی، امکان عملکرد بهینه در شرایط سخت محیطی را فراهم می‌آورند. برای کشورهایی مانند ایران، با توجه به توانمندی‌های علمی و صنعتی، توسعه نانوفناوری هوافضایی می‌تواند به‌عنوان یک مزیت رقابتی و راهبردی عمل کند، مشروط بر حمایت پایدار، سرمایه‌گذاری هدفمند و سیاست‌گذاری مبتنی بر داده. در نهایت، نانوفناوری نه تنها یک دستاورد فناورانه بلکه پلی است به سوی آینده‌ای که در آن مرزهای زمین، آسمان و فضا به هم می‌آمیزند و نانو مقیاس، کلید فتح چالش‌های فضایی خواهد بود.

۷.تعارض منافع

نویسندگان این مقاله بدین وسیله اعلام می دارند که در ارتباط با انجام، تحلیل، نگارش و انتشار این پژوهش، هیچ گونه تعارض منافع مالی، شخصی، علمی یا سازمانی وجود ندارد.

۸. منابع

[1] Hirankittiwong P, Chomchok T, Chakraborty S, Prajongtat P, Singh DP, Hongkarnjanakul N, Channumsin S, Ghosh S, Chattham N. Advanced engineered nanostructures for aerospace technology: A review. Results in Engineering. 2025 Jun 1;26:105381. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105381

[2] Bhushan B. Springer Handbook of Nanotechnology. Springer; 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-662-54357-3

[3] Kharazmi S, Shahabinia MP. Fabrication and investigation of mechanical properties of graphene oxide/silver reinforced chitosan thin film. Nano World. 2025 Jan 11.

[4] Baughman RH, Zakhidov AA, de Heer WA. Carbon nanotubes--the route toward applications. Science. 2002;297(5582):787-792. https://doi.org/10.1126/science.1060928

[5] Pierre AC, Pajonk GM. Chemistry of aerogels and their applications. Chemical Reviews. 2002;102(11):4243–4265. https://doi.org/10.1021/cr0101306

[6] Mukhopadhyay S, Liu Y. Nanocoatings: Principles and Practice. Elsevier; 2014. https://doi.org/10.1016/B978-0-85709-211-3.00001-1

[7] Airbus. A350 XWB Program Overview. Technical Report, 2019.

[8] Marsh, George. (2010). Airbus A350 XWB update. Reinforced Plastics. 54. 20-24. 10.1016/S0034-3617(10)70212-5. https://doi.org/10.1016/S0034-3617(10)70212-5

[9] Hosseinian Rad M, Alizadeh P. Investigating the potential of nanomaterials in the construction of drones. Journal of Advanced Materials of Iran. 2019;11(2):47-55.

[10] Hsu DJ, Huang HL. Environmental and human health risk management of nanomaterials: Review and assessment strategies. Journal of Cleaner Production. 2018;191:352-363. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.165

[11] Teizer W, et al. Scale-up and commercialization challenges of nanomaterials. MRS Bulletin. 2016;41(1):23-30. https://doi.org/10.1557/mrs.2016.4

https://doi.org/10.1177/0021998306067321

[19] Dehrooyeh S, Vaseghi M, Sohrabian M, Sameezadeh M. Glass fiber/Carbon nanotube/Epoxy hybrid composites: Achieving superior mechanical properties. Mechanics of Materials. 2021 Oct 1;161:104025. https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2021.104025

[20] Pierre AC. Aerogels for aerospace. Adv Colloid Interface Sci. 2014;212:1–10. https://doi.org/10.1016/j.cis.2014.06.014

[21] Jones S. Aerogels in aerospace: Mars Rover to ISS. NASA Reports. 2020.

[22] Maleki H. Recent advances in aerogels for environmental remediation applications: A review. Chem Eng J. 2016;300:98–118. https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.04.103

[23] Novoselov KS, et al. Electric field effect in atomically thin carbon films. Science. 2004;306(5696):666–669. https://doi.org/10.1126/science.1102896

[24] Stoller MD, et al. Graphene-based ultracapacitors. Nano Letters. 2008;8(10):3498–3502. https://doi.org/10.1021/nl802558y

[25] Dreyer DR, et al. The chemistry of graphene oxide. Chem Soc Rev. 2010;39(1):228–240. https://doi.org/10.1039/B917103G

[26] Pawlowski L. The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings. John Wiley & Sons; 2008.

[12] Panda SK, Visakh PM, Shibin NB. Nanomaterials for Defense, Aeronautical, and Aerospace Applications: Challenges and Opportunities. Nanomaterials for Defense, Aeronautical and Aerospace Applications. 2025 Aug 25:1-25.

[13] Ajayan PM, Tour JM. Materials science: nanotube composites. Nature. 2007;447(7148):1066-1068. https://doi.org/10.1038/4471066a

[14] Iqbal A, Saeed A, Ul-Hamid A. A review featuring the fundamentals and advancements of polymer/CNT nanocomposite application in aerospace industry. Polymer Bulletin. 2021 Jan;78(1):539-57. https://doi.org/10.1007/s00289-019-03096-0

[15] Iijima S. Helical microtubules of graphitic carbon. Nature. 1991;354(6348):56–58. https://doi.org/10.1038/354056a0

[16] Coleman JN, et al. Small but strong: a review of the mechanical properties of carbon nanotube–polymer composites. Carbon. 2006;44(9):1624-1652. https://doi.org/10.1016/j.carbon.2006.02.038

[17] Thostenson ET, Ren Z, Chou TW. Advances in the science and technology of carbon nanotubes and their composites. Composites Science and Technology. 2001;61(13):1899–1912. https://doi.org/10.1016/S0266-3538(01)00094-X

[18] Hussain F, et al. Polymer-matrix nanocomposites, processing, manufacturing, and application: An overview. Journal of Composite Materials. 2006;40(17):1511–1575.

composites. InAerospace Materials 2025 Jan 1 (pp. 349-383). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-443-22118-7.00015-4

[36] Atwater HA, Polman A. Plasmonics for solar cells. Nat Mater. 2010;9(3):205–213. https://doi.org/10.1038/nmat2629

[37] Zhang Y, et al. PCM-based thermal regulation. Energy Build. 2015;88:357–365. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.12.035

[38] Snow ES, Campbell PM, Novak JP. Single-walled carbon nanotube sensors. Appl Phys Lett. 2005;86(3):033105. https://doi.org/10.1063/1.1855425

[39] Pendry JB. Negative refraction makes a perfect lens. Phys Rev Lett. 2000;85(18):3966–3969. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.85.3966

[40] Graphene Flagship Reports. Smart textiles for space. 2021.

[41] Mohammadi M, et al. Cryogenic hydrogen tanks with nanocomposites. Cryogenics. 2020;110:103112. https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2020.103112

[42] NASA Technical Reports. CNT composites for aerospace. 2020.

[43] SpaceX Materials Division Report. Raptor coatings performance. 2021.

[44] Johnson M. Corrosion protection in Falcon 9. J Mater Eng Perform. 2020;29(7):4190–4198. https://doi.org/10.1007/s11665-020-04894-y

[27] Meulenberg RA, et al. Nanostructured coatings for aerospace applications. MRS Bulletin. 2016;41(1):39–44. https://doi.org/10.1557/mrs.2016.10

[28] Balasubramanian G, et al. Advances in stealth materials and nanocomposites. Composites Part B. 2018;137:108–120. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.11.042

[29] Sinha A, Behera A. Nanotechnology in the space industry. InNanotechnology-based smart remote sensing networks for disaster prevention 2022 Jan 1 (pp. 139-157). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91166-5.00005-7

[30] Boeing Technical Report. Composite usage in 787 Dreamliner. 2020.

[31] NASA Glenn Research Center. CNT-reinforced composites for aerospace. 2019.

[32] Pawlowski L. Thermal barrier coatings. Surface & Coatings Tech. 2008;202(18):4483-91. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2008.04.036

[33] Erdemir A. Nanolubricants and friction modifiers. Tribol Lett. 2007;24(1):5–15. https://doi.org/10.1007/s11249-006-9140-4

[34] Chawla N, Chawla KK. Metal Matrix Composites. Springer; 2013. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-9710-5

[35] Yazik MH, Ismail I. Aerospace structures and engines from polymer

[45] Airbus Composite Materials Whitepaper. 2019.

[46] Roy R et al. Nanocoatings for anti-icing. Surf Coat Tech. 2017;313:72–80. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.01.003

[47] ESA CubeSat Systems Report. 2022.

[48] Abbaspour et al. Investigation of nanocomposites in air-based structures. Journal of advanced materials, 1399.

[49] Kesarwani, Shivi. (2017). Polymer Composites in Aviation Sector. International Journal of Engineering Research and. V6. 10.17577/IJERTV6IS060291.

[50] Heydari et al. Cooling nanofluids for engines. Sharif Mechanical Engineering Journal, 1400.

[51] Aviation Industry Organization. Technical report of RCS reduction project with nanomaterials, 1401.

[52] Materials and Energy Research Institute. Nano CVD coatings in rocket applications. Internal report, 1400.

[53] Zaman I, et al. Scalable production of nanocomposites: challenges. Adv Mater. 2012;24(39):5388–5394. https://doi.org/10.1002/adma.201201932

[54] Bonaccorso F, et al. Graphene production and processing. Mater Today. 2012;15(12):564–589. https://doi.org/10.1016/S1369-7021(13)70014-2

[55] Donaldson K, et al. Carbon nanotubes and asbestos-like pathogenicity. PNAS. 2010;107(14):6428–6433. https://doi.org/10.1073/pnas.0912318107

[56] ISO/TS 80004-1:2015. Nanotechnologies — Vocabulary. International Organization for Standardization.

[57] Zhang H, et al. Self-healing nanocomposites for aerospace. Prog Mater Sci. 2019;98:1–38. https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2018.05.003

[58] Chen W, et al. Multiscale modeling of nanomaterials. Comp Mater Sci. 2015;103:81–90. https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2015.02.023

[59] Novoselov KS, et al. 2D materials beyond graphene. Science. 2016;353(6298):aac9439. https://doi.org/10.1126/science.aac9439

[60] Roco MC, Bainbridge WS. Nanotechnology and the future of space systems. Nat Nanotechnol. 2005;1(3):102–103. https://doi.org/10.1038/nnano.2006.96

[61] Alamdari, Sanaz, et al. Preparation and characterization of zinc oxide nanoparticles using leaf extract of Sambucus ebulus. *Applied Sciences*, 2020, 10.10: 3620.

[62] ASMATULU, Eylem; HAYNES, H.; ASMATULU, Ramazan. Nanotechnology safety in aerospace industry. In: *Nanotechnology Safety*. Elsevier, 2025. p. 115-133. https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15904-6.00018-6

Emerging Applications of Nanomaterials in the Aerospace Industry: A Review of Advances, Challenges, and Future Perspectives

Mohammad Parsa Shahabi Nia, Mohammad Hossein Khalasi*

Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

Abstract

In recent decades, nanotechnology has brought about a profound transformation in the aerospace industry, leading to numerous valuable research efforts in this field. However, most existing review studies have only sporadically addressed the properties and applications of nanomaterials, with limited structured analysis of their role within flight systems. This paper fills that gap by presenting a systematic review and classification of advanced nanomaterials—such as carbon nanotubes, polymer nanocomposites, aerogels, nanocoatings, and nanoceramics—and examining their impact on improving the performance of key aerospace components including airframes, engines, thermal insulation systems, and electronic assembliesThe novelty of the study lies in introducing an integrative framework that compares international and domestic research findings while analyzing technological and economic capabilities and constraints in a unified manner. Moreover, for the first time, a comprehensive picture of Iran's research landscape is portrayed in comparison with global trends, providing added value for the scientific community and aerospace policymakers.Finally, by emphasizing major challenges such as production cost, standardization, and industrial scalability, the paper outlines the future prospects of the field. The present study aims not only to fill the gap in Persian-language literature but also to highlight innovative academic and industrial pathways for the strategic utilization of nanomaterials in the aerospace sector.

Keywords: Nanomaterials, Nanocomposites, Aerospace, Carbon Nanotubes, Thermal Insulation