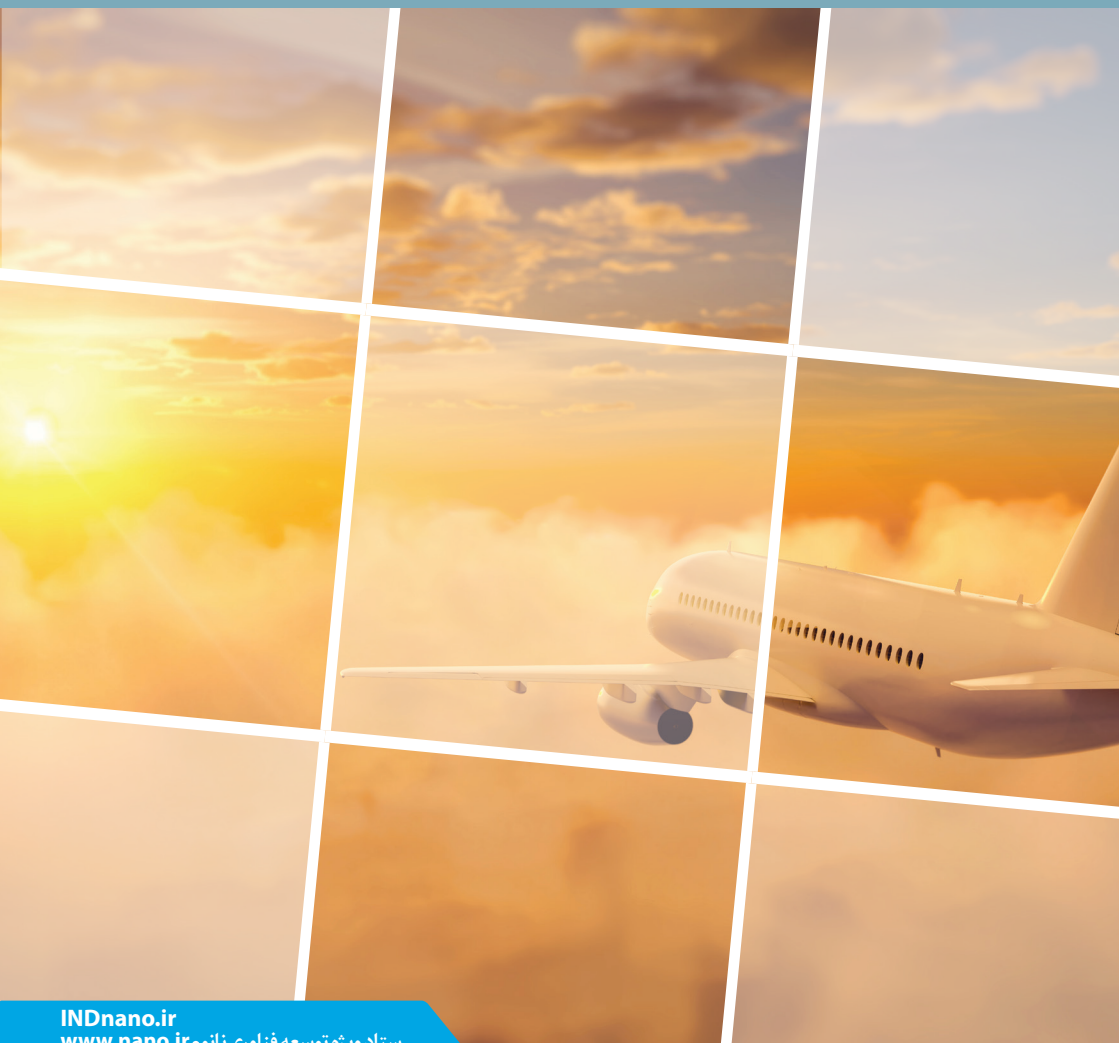


# کاربردهای فناوری نانو در چسب‌های مورد استفاده صنایع هوایی



## شناسنامه

### ستاد ویژه توسعه فناوری نانو

گروه رصد و تولید محتوای بخش ترویج صنعتی

طراحی و اجرا:	توسعه فناوری مهرویژن	تلفن:	۰۲۱-۶۳۱۰۰
نظارت:	داود قزایلو	نمابر:	۰۲۱-۶۳۱۰۶۳۱۰
تهیه‌کننده:	کارگزاری ترویج صنعتی حوزه پلیمر	پایگاه اینترنتی:	www.nano.ir
صندوق پستی:	۱۴۵۶۵-۳۴۴		
پست الکترونیک:	IND@nano.ir		www.INDnano.ir
سال انتشار:	۱۴۰۱	اینستاگرام نانو و صنعت:	@INDnano.ir

## فهرست مطالب

۳	مقدمه
۴	بازار چسب‌های مورد استفاده در صنایع هوایی
۴	بازار چسب‌های نانو و پیش‌بینی آن
۴	چسب و نیروی چسبندگی
۵	ترکیبات چسب‌ها
۷	تقسیم‌بندی چسب‌ها
۸	انواع چسب‌های نانویی
۸	انواع افزودنی‌ها در چسب‌های نانو و اثرات آن‌ها بر خصوصیات چسب‌ها
۱۴	چسب‌های نانو مورد استفاده در صنایع هوایی
۱۵	انواع نانوافزودنی‌های چسب‌های مورد استفاده در صنایع هوایی
۱۹	انواع چسب‌های هوشمند مورد استفاده در صنعت هواپیما
۱۹	مکانیزم بهبود خواص چسب با استفاده از فناوری نانو
۲۰	مزیت و صرفه‌جویی حاصل از استفاده از چسب نانو
۲۱	شرکت‌های تولیدکننده چسب مورد استفاده در صنایع هوایی در جهان
۲۳	نتیجه‌گیری
۲۳	پی‌نوشت‌ها
۲۳	مراجع

فناوری نانو رشته‌ای از دانش کاربردی و فناوری است که حوزه‌های گسترده‌ای را در برمی‌گیرد. موضوع اصلی آن نیز کنترل ماده یا تجهیزات در محدوده ۱ تا ۱۰۰ نانومتر است. در واقع فناوری نانو فهم و به‌کارگیری خواص جدیدی از مواد و سیستم‌هایی در این ابعاد است که اثرات فیزیکی جدیدی، عمدتاً متأثر از غلبه خواص کوانتومی بر خواص کلاسیک از خود نشان می‌دهند. فناوری نانو در تمامی گرایش‌های علمی راه یافته و از فناوری‌های نوینی است که با سرعت بالایی در حال توسعه است.

پیش‌بینی شده است که فناوری نانو عامل اصلی در پیشبرد فناوری و کسب‌وکار در این قرن است و سبب ایجاد مواد با عملکرد بالاتر، سیستم‌های هوشمند و روش‌های تولیدی جدید با تأثیر قابل توجهی بر همه جنبه‌های جامعه می‌شود. در حال حاضر محصولات متنوع حاوی نانومواد مورد استفاده قرار می‌گیرند. محصولاتی با قابلیت‌های منحصر به فرد جدید شامل تجهیزات با سطوح آسان تمیزشونده، محصولات مقاوم نسبت به خراش، ضربه‌گیرهای خودرو، لباس‌های مقاوم به چروک، کرم‌های ضد آفتاب، استخوان‌های مصنوعی با استحکام بالا و...

انتظار می‌رود که طراحی و به‌کارگیری فناوری نانو تحول عظیمی را در صنایع هوایی در آینده نزدیک ایجاد کند. قابلیت فناوری نانو برای ایجاد راه‌حل‌هایی که به طور هم‌زمان خصوصیات بسیار مهمی همچون استحکام و مقاومت حرارتی را افزایش دهد، در صنایع هوایی مورد توجه بسیاری از محققان و صنایع قرار گرفته است [۱].

کاربردهای متنوعی از فناوری نانو و استفاده از نانومواد در صنایع هوایی در شکل ۱ نشان داده شده است. یکی از این موارد، استفاده از نانوجسب‌ها به عنوان یکی از اجزای ضروری در صنایع هوایی است. برای مثال اتصالات چسبی (ABJs) که شامل حداقل دو جزء بوده که از طریق لایه چسب به هم متصل می‌شوند. لایه چسب به عنوان یکی از مهم‌ترین قسمت‌ها برای اتصالات مطرح است و سبب انتقال بار از یک جزء به جز دیگر می‌شود. این اتصالات به خصوص در کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با الیاف FRP<sup>۲</sup> به کار می‌روند. از جمله معایب استفاده از چسب‌ها به عنوان عامل اتصال به جای اتصالات مکانیکی، می‌توان زمان پخت طولانی و مقاومت کم به دما و رطوبت را نام برد. یکی از رویکردها جهت بهبود خواص چسب‌ها استفاده از نانوپرکننده‌های رسانا در چسب‌ها است. استفاده از این نانومواد، سبب ایجاد مواد با کاربرد چندگانه می‌شود، به طوری که علاوه بر ایجاد خواص الکتریکی مورد نیاز، خواص مکانیکی مطلوبی را نیز فراهم کنند [۲].



شکل ۱- کاربردهای فناوری نانو و استفاده از نانومواد در صنایع هوایی

## بازار چسب‌های مورد استفاده در صنایع هوایی

انتظار می‌رود بازار چسب‌های هوایی رشد سالانه‌ای (CAGR) معادل ۴/۵ درصد در طول دوره ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳ داشته باشد. افزایش نفوذ کامپوزیت‌ها در تولید هواپیما و افزایش سرمایه‌گذاری دولت آمریکا در صنعت دفاعی از عوامل اصلی این رشد است.

چسب‌های مورد استفاده در صنایع هوایی دسته‌بندی‌های مختلفی دارند. به عنوان مثال از لحاظ:

- نوع عملکرد: ساختاری و غیرساختاری؛
- نوع رزین: اپوکسی، پلی‌اورتان، سیلیکون و انواع رزین‌های دیگر؛
- فناوری مورد استفاده: waterborne-solvent borne-reactive؛
- کاربر نهایی: تولیدکننده تجهیزات اصلی<sup>۳</sup> عملیات تعمیر و نگهداری.

در این میان انتظار می‌رود که چسب‌های از نوع رزین اپوکسی به علت کاربرد در بخش‌های مختلف صنایع هوایی مانند مونتاژ صفحات، سیستم فیلترها، کف پوش، کاربرد در پنجره‌ها نسبت به انواع دیگر چسب‌ها، بیشترین رشد را در دوره مورد نظر داشته باشند. استفاده از ترکیب نانولوله‌های کربنی و نانوافزودنی‌ها با چسب‌های اپوکسی به احتمال زیاد در آینده نزدیک به عنوان یک فرصت مطرح خواهند بود.

آمریکای شمالی با بیشترین مصرف (کشورهایی همچون کانادا و آمریکا) در جهان بزرگ‌ترین بازار را در دست دارد. شرایطی مانند دماهای بسیار پایین و خلأ بسیار بالا در صنایع هوایی از چالش‌های مهم در برابر رشد این صنعت است.

## بازار چسب‌های نانو و پیش‌بینی آن

نانوچسب‌ها که شامل مواد نانو در درزگیرها (sealant) یا چسب‌ها هستند در حوزه هوافضا، الکترونیک، نفت و پتروشیمی و بسیاری از حوزه‌های دیگر کاربرد دارند. استفاده از مواد نانو در این چسب‌ها سبب بهبود ویژگی‌ها و خصوصیات آن‌ها می‌شود. برای مثال علاوه بر چسبندگی به رطوبت نیز مقاوم می‌شوند [۳].

شرکت‌های بزرگی همچون هنکل<sup>۴</sup>، گروه سایتک سولوای<sup>۵</sup>، کمپانی 3M شرکت هگزل<sup>۶</sup>، شرکت بین‌المللی هانتسمن<sup>۷</sup> نقش اصلی را در این بازار ایفا می‌کنند [۴]. پیش‌بینی شده است بازار سیلان‌ها (درزگیرها) و چسب‌ها در صنایع هوایی ارزشی معادل ۱,۱۷ میلیارد دلار تا سال ۲۰۲۵ داشته باشد و رزین اپوکسی سهمی حدود ۴۵,۶ درصدی را در بازار چسب‌ها و سیلان‌ها در طول دوره پیش‌بینی تا سال ۲۰۲۵ به خود اختصاص دهد. گروه‌های زیادی از تولیدکنندگان به دنبال روش‌های جدید جهت بهبود خواص همچون مقاومت به رطوبت و مقاومت به گرما هستند. انتظار می‌رود جهت نیل به اهداف ذکر شده در بالا و رسیدن به خصوصیات مطلوب، استفاده از فناوری‌های پیشرفته (برای مثال استفاده از فناوری نانو) در محصولات به منظور تقویت عملکرد هواپیما رشد قابل ملاحظه‌ای داشته باشد [۵]. شرکت‌های NBD nano و 3M Master Bond Inc از جمله شرکت‌های اصلی در زمینه نانوچسب‌ها هستند [۶].

## چسب و نیروی چسبندگی

چسب‌های مرسوم برای ایجاد اتصال فیزیکی بین اجسام از طریق چسبندگی (پیوند سطحی)<sup>۸</sup> و پیوستگی Cohesion (استحکام داخلی) به کار گرفته شده‌اند [۷]. چسب مخلوط پلیمری با ماده‌ای با قابلیت پلیمریزه شدن در زمینه مایع یا شبه مایع بوده که دو جسم را به یکدیگر می‌چسباند و در تعریفی دیگر به ماده‌ای اطلاق

می‌شود که با اعمال روی سطوح مواد سبب اتصال آن‌ها و جلوگیری از جدایش آن‌ها می‌شود. علم چسبندگی و چسب‌ها تا اواسط دهه ۱۹۴۰ پیشرفت قابل توجهی نداشت، با بروز جنگ جهانی دوم توسعه فناوری‌های مختلف مانند صنعت پلیمر و ارتباط بسیار نزدیک این صنعت با چسب‌ها، سبب بهبود چشمگیری در حوزه چسب و کاربرد چسب‌ها در صنایع مختلف شد [۸].

## ترکیبات چسب‌ها

اجزای تشکیل دهنده چسب را می‌توان پلیمر، الیگومر، پرکننده<sup>۹</sup>، افزودنی‌های طبیعی و مصنوعی به شمار آورد. فرمولاسیون چسب به ماده پایه (اصلی) و کاربرد مورد نظر وابسته است [۹]. جدول ۱ انواع چسب را بر مبنای ماده اصلی تشکیل دهنده و کاربردهای آن‌ها ارائه می‌کند.

■ **fixture time**: زمانی که چسب به استحکام اولیه می‌رسد و بدین معناست که پیوند به اندازه‌ای قوی است که بتوان مجموعه را مورد استفاده قرار داد. برای چسب‌های فوری این زمان در حد ثانیه است.

■ **cure time**: مدت زمانی که طول می‌کشد که چسب به بالاترین میزان استحکام چسبندگی خود برسد برای مثال چسب‌های فوری ۲۴ ساعت [۱۱].

جدول ۱- انواع چسب بر مبنای ماده اصلی تشکیل دهنده و کاربرد آن‌ها [۱۰]

نوع چسب	کاربرد صنعتی
<b>منبع طبیعی</b>	
منبع حیوانی: آلبومین، چسب حیوانی، کازئین (ماده پروتئین شیر)، صدف، موم زنبور عسل	صنعت چوب و کاغذ
منبع سبزیجات: رزین طبیعی، صمغ عربی، tragacant، colophony	صنعت کاغذ، تخته کاغذ، چوب‌های سبک، چوب پنبه
روغن‌ها و موم‌ها: موم کارناوبا، روغن‌های متفاوت	درزگیر در صنعت چوب و فلز
پروتئین‌ها: سویا کروهیدرات: نشاسته، دکسترین	صنعت چوب و کاغذ
معدنی معدنی غیرآلی: سیلیکات‌ها، فسفات‌ها، سولفور، متیزیم، موم معدنی: پارافین رزین‌های معدنی: کهربا	صنعت چوب
قیر طبیعی: آسفالت	بایندر در جاده‌ها و سقف، نصب کاشی، آسفالت، درزگیر
<b>چسب‌های مصنوعی</b>	
لاستومرها: لاستیک‌های طبیعی و مشتقات آن	پیوند و اتصال کاغذ، چرم، صنعت کفش

ادامه جدول ۱- انواع چسب بر مبنای ماده اصلی تشکیل دهنده و کاربرد آن‌ها [۱۰]

چسب‌های مصنوعی	
پیوند لاستیک به لاستیک و مواد پلاستیکی و فلزات، تشکیل پیوند خوب با بیشتر فیلم‌های پلاستیکی، شیشه، چوب. برخی از آن‌ها درزگیر هستند.	لاستیک مصنوعی: بوتیل، پلی‌ایزوبوتیلن، ترکیبات پلی‌بوتادین، پلی‌ایزوپرن‌ها، پلی‌کلورپرن‌ها، پلی‌اورتان، سیلیکون، پلی‌سولفید، پلی‌ولفین
اتصال و پیوند کاغذ، لاستیک، پلاستیک و کاشی سرامیکی، چسب برای تأسیسات الکتریکی	لاستیک اصلاح شده
درزگیر، مواد عایق صدا برای فلزات و مواد درزگیر برای جلوگیری از نفوذ هوا	لاستیک نئوپرن
اتصال لایه‌های پلاستیکی به فلزات و مواد الیافی - نایلون به نایلون و دیگر مواد. درزگیر.	لاستیک نیتریل
ترموپلاستیک‌ها	
اتصال مواد غیرفلزی، چوب، چرم، پلاستیک کاغذ- کاربرد در بسته‌بندی	مشتقات سلولزی acetate, acetate-butyrate, caprate, nitrate, methyl cellulose, hydroxyl ethyl cellulose, ethyl cellulose, carboxymethyl cellulose
عموماً برای فلزات، برخی از آن‌ها برای پلاستیک‌ها	پلی‌اکریلاتات و acrylate polymers, cyanoacrylates
درزگیر برای قالب‌گیری و encapsulation	پلی‌استرها: پلی‌استارن، پلی‌آمید
پیوند مواد متخلخل، کاغذ و چوب کاربرد در بسته‌بندی	کوپلیمرها و پلیمرهای وینیل: polyvinyl acetate, polyvinyl alcohol, polyvinyl chloride, polyvinylidene chloride
ترموست‌ها	
صنعت چوب	آمینو پلاستیک‌ها
توانایی پیوند با اکثر زیرلایه‌ها استفاده به عنوان درزگیر در سازه‌ها و الکتریسیته	اپوکسی‌ها
صنعت چوب و صنعت فلز	رزین‌های فنولیک و مشتقات آن‌ها

لازم به ذکر است که برای چسب‌ها ۲ زمان در مشخصات آن‌ها مطرح و دیده می‌شود که ذکر آن به بهبود خاصیت آن کمک می‌کند.

## تقسیم‌بندی چسب‌ها

چسب‌ها بسته به عوامل مختلف مانند حلال، جنس و نوع کاربرد دسته‌بندی‌های متفاوتی دارند. در جدول زیر انواع چسب بر مبنای خصوصیات و نوع کاربرد ذکر شده است. روش دیگری که برای دسته‌بندی چسب وجود دارد بر اساس روش چسبندگی است که به دو گروه زیر تقسیم‌بندی می‌شود:

- فعال: چسب برای سخت شدن واکنش شیمیایی می‌دهد.
  - غیرفعال: بدون واکنش شیمیایی. در میان چسب‌های ذکر شده در جدول بالا چسب‌های تماسی، حساس به فشار و hot melt به عنوان چسب‌های غیرفعال در نظر گرفته می‌شوند [۱۹].
- به علاوه در دسته‌بندی دیگر چسب‌ها به دو گروه ساختاری و حساس به فشار تقسیم می‌شود:
- اول: در چسب‌های ساختاری سخت شدن چسب برای ایجاد پیوند دائم از طریق فرآیندهایی مانند تبخیر حلال، واکنش با اشعه UV (چسب‌های دندان)، واکنش‌های شیمیایی (اپوکسی دوجزئی) و یا سرد شدن (hot melt adhesive) صورت می‌گیرد، در حالی که در چسب‌های حساس به فشار، ایجاد پیوند به سادگی از طریق اعمال فشار انجام می‌شود [۲۰].

جدول ۲- انواع چسب بر اساس خصوصیات و کاربرد آن‌ها

کاربرد	خصوصیات	نام چسب
این نوع چسب‌ها برای پر کردن فاصله بین اجزا به کار می‌رود [۱۲]	این چسب‌ها عموماً برای افزایش نیروی نگهدارندگی اجزای مکانیکی استفاده می‌شوند. این چسب‌ها تا زمانی که در حضور یون‌های فلزی نسبت به اکسیژن ایزوله شوند، به صورت مایع باقی می‌مانند.	Anaerobic adhesive 
مناسب برای اتصال قطعات بزرگ	دارای زمان پخت سریع	Contact adhesive
برای برچسب، نوار و کارهای گرافیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۴].	چسبندگی این چسب‌ها تحت فشار صورت می‌گیرد و به هیچ حلال، گرما و آب برای فعال‌سازی چسب احتیاج نیست [۱۳].	Pressure Sensitive adhesive 
کابرد در حوزه الکترونیک، دارویی، اتومبیل، بسته‌بندی [۱۵]	مواد جامدی که در دمای نسبتاً کمی ذوب می‌شوند و بالای ۸۰ °C در زمان استفاده یا قالب‌گیری به محض سرد شدن به جامد تبدیل می‌شوند و چسبندگی تضمین می‌شود.	Hotmelt adhesive 
اتصال مواد مختلف در ثانیه (چوب، فلز - لاستیک پلی استایرن و حتی پلاستیک‌های نسل جدید) [۱۶]	تک جزئی قابل پخت در دمای اتاق - Cyanoacrylates	Instant adhesive 

## ادامه جدول ۲- انواع چسب بر اساس خصوصیات و کاربرد آن ها

نام چسب	خصوصیات	کاربرد
Waterbased adhesive (Dispersion glue) 	اغلب به عنوان امولسیون در نظر گرفته می شود، عموماً یک بایندر آلی (PVAC) در آب پراکنده شده	تجهیزات خانگی، اجزای ساختمان، بسته بندی غذا و نوشیدنی [۱۷]
UV Light cure adhesive 	شفافیت بالا، پایداری استثنایی	صنایع دارویی و اپتیکی [۱۸]

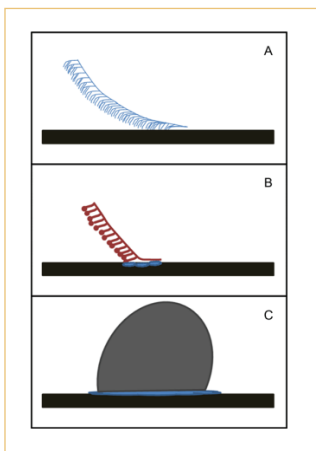
## انواع چسب های نانویی

با ظهور فناوری نانو و تمرکز عمیق آن بر حوزه های مولکولی و اتمی، اصول و عملکرد چسبندگی نیز دچار تغییر شده است. در فناوری نانو چسبندگی به عملکرد نیروهایی که در سطح اتمی و ابعاد نانو مربوط است محدود می شود. برای مثال چسبندگی پای مارمولک از جمله چسبندگی ها در حوزه نانو بوده و ناشی از اثر جمعی نیروهای جاذبه و اندروالس است. محققان در سراسر جهان در تلاش برای ارزیابی این پدیده به موفقیت هایی دست پیدا کرده اند [۲۱]. به طور کلی نانوچسب ها به سه دسته کلی نانوچسب تر (کاپیلاری)، نانوچسب خشک (واندروالس<sup>۱</sup>) و نانوچسب دائم تقسیم بندی می شوند که در شکل ۲ و جدول ۴ به معرفی آن ها پرداخته شده است. برای مثال چسب های خشک نوع جدیدی از چسب های حساس به فشار هستند که از طبیعت الهام گرفته شده اند. در مقابل چسب های با محیط مایع و یا نیازمند به واکنش شیمیایی برای تشکیل پیوند قوی بین دو سطح تولید شده اند، این چسب ها اصول کاری یکسانی دارند و همانند اصول استفاده شده در پای مارمولک، استحکام خود را از سطح تماس میلیون ها الیاف جامد به دست می آورند. این چسب ها ترکیبی از خصوصیات چسبندگی شدید، آسانی استفاده و سهولت برداشت را فراهم می کنند [۲۲].

## انواع افزودنی ها در چسب های نانو و اثرات آن ها بر خصوصیات چسب ها

پرکننده هایی از جنس نانوذرات می توانند سبب بهبود عملکرد چسب ها به خصوص چسب های اپوکسی شوند. این نانوچسب ها در صنایع اپتیکی، الکترونیکی، هوافضا و اتموبیل مورد استفاده قرار می گیرند. برای مثال پرکننده های نانو به فرمولاسیون خاص اپوکسی اضافه شده و سبب بهبود خواص مکانیکی، الکتریکی، حرارتی و اپتیکی می شوند. این نانوذرات می توانند به همراه یا بدون حضور پرکننده های مرسوم مورد استفاده قرار بگیرند و با توجه به اینکه سبب بهبود خواص می شوند در مقایسه با پرکننده های مرسوم می توانند به میزان کمتری مورد استفاده قرار بگیرند [۲۶]. در استفاده از نانوافزودنی ها مواردی مانند هدف نهایی استفاده از نانوافزودنی در چسب، سازگاری چسب با نانوذره و عامل دار کردن نانوذرات و شرایط کاری مورد استفاده حتماً باید در نظر گرفته شود [۲۱]. در جدول زیر برخی از نانوذرات مورد استفاده در اپوکسی به همراه خاصیت آن ها آورده شده است [۲۷].





◀ شکل ۲- نمودار چسبندگی برگشت پذیر خشک، تر و چسبندگی دائم (A) چسبندگی خشک برگشت پذیر: بدون حضور رطوبت عمل می کند و به جای آن به برهم کنش بین ساختار در حال پیوند<sup>۱۱</sup> و زیرلایه وابسته است (B) چسبندگی تر برگشت پذیر با ترشوندگی و اتصال برای ایجاد نیروی مورد نیاز برای اتصال وابسته است. (C) چسبندگی دائم شامل تشکیل پیوند طولانی مدت با استحکام بالا بین ساختار attaching و زیرلایه است [۲۳].

### جدول ۳- انواع نانوچسب و خصوصیات آن ها [۲۱]

نوع نانو چسب	خصوصیات
<b>نانو چسب خشک</b>	
آرایه های نانولوله کربنی	آرایه های عمودی نانولوله های کربنی به شدت متراکم که از الگوی چسبندگی پای مارمولک تقلید می کنند.
آرایه های نانولوله های کربنی جهت دار	آرایه های نانولوله کربنی با سر در هم که از ترکیب سلسله مراتبی پای مارمولک تقلید می کنند.
Janus -faced نانوپیلاز	کامپوزیت فلز/پلیمر قالب گیری شده در ابعاد نانو با چسبندگی جهت دار متغیر
Fibrillar با تقلید از قارچ	میکرو پیلازهای به شکل قارچ با انتهای کلاهک دار که از مکانیزم چسبندگی سوسک تقلید می کنند.
<b>نانو چسب تر</b>	
تقلید از mussel	ترکیبی که به تمامی سطوح اعم از فلزات خنثی و اکسید شده و نیمه رساناها، شیشه و مواد زیستی آلی می چسبند.
Geckel برگشت پذیر	چسبندگی برگشت پذیر قوی در هر دو محیط آب و هوا
تقلید از سلول باکتری	یکی از قوی ترین چسب های موجود در طبیعت را تولید می کند و می تواند از طریق روش تقلید از طبیعت ساخته شود.

## ادامه جدول ۳- انواع نانوچسب و خصوصیات آن‌ها [۲۱]

انواع دیگر نانو چسب‌ها	
پراکنده شده با روش Ink-jet printing جهت کاربرد در میکروالکترونیک	رزین پر شده با نقره
پخت حرارتی از طریق نانوذرات مغناطیسی آهن که وقتی در معرض میدان مغناطیسی قرار می‌گیرند گرم شده و دوباره با اعمال میدان مغناطیسی مجدد debound شوند.	اکسید آهن و اکسید سیلیکون فعال شده به صورت مغناطیسی

در جدول ۴ نیز برای نمونه به مطالعه موردی سه نانو چسب پرداخته شده است.

## جدول ۴- مطالعه موردی سه نانو چسب

نوع چسب	خصوصیات و کاربرد
nanogluce	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ ضخامت حدود ۱ نانومتر (۱۰۰۰ برابر نازک‌تر از چسب‌های معمولی)، چسبندگی بسیار بالا</li> <li>■ اتصال تراشه‌های کامپیوتری اتصال تجهیزات یا دستگاه‌های استفاده شده در دمای بسیار بالا [۲۴]</li> </ul>
Nanofiber Adhesive	شامل نانوالیافی با قطر sub-micron بوده و با سطوح میکروسکوپی برهمکنش داشته تا چسبندگی پرشی قوی را ایجاد کند اما ضخامت نزدیک به صفر دارند. اولین نسل از این محصولات چسب‌های خشک بر پایه نانوالیاف تحت عنوان shear Grip عرضه شدند که مشکلات معمول موجود در چسب‌های مرسوم و سنتی مانند سطوح تخریب شده در آن‌ها رفع شده بود. برای مثال چسب‌های خشک دارای قابلیت استفاده مجدد AAI <sup>۳</sup> شامل الیاف جامدی هستند که هزاران برابر کوچک‌تر از یک تار مو هستند [۲۵].
نانو برچسب	نانو برچسبی بسیار نازک و ارزان قیمت شده که قابلیت ترکیب با ادوات الکترونیکی و مخابراتی را نیز دارد. این برچسب که به LORa <sup>®</sup> شهرت دارد، قابل استفاده در حوزه اینترنت اشیا است.

## خصوصیات مکانیکی

بسیاری از کاربردهای چسب‌های ساختاری (مانند چسب در صنایع هوایی) احتیاج به مواد پایداری تحت شرایط کاری دارند که قادر به تحمل دمای محیط بوده و نسبت به شکست ناشی از بارگذاری خستگی و ارتعاش نیز مقاوم باشند. افزودن نانو پرکننده‌ها به فرمولاسیون اصلی چسب، استحکام و مدول آن را افزایش می‌دهد. با این وجود هدف اصلی از افزودن این پرکننده‌ها به چسب، افزایش چقرمگی شکست بوده بدون اینکه خصوصیات اصلی چسب دچار نقصان شود. بهبود چقرمگی شکست پلیمرهای ترد (مانند ترموست) اگرچه از طریق برخی پرکننده‌های مرسوم (پرکننده‌های لاستیکی) صورت گرفته است اما معمولاً خصوصیات مکانیکی دیگر تقلیل پیدا کرده است. برای مثال بهبود چقرمگی شکست با افزودن نانولوله‌های کربنی به زمینه اپوکسی گزارش شده است. مشارکت مکانیزم‌های جدید (مانند انحراف ترک، پل زنی ترک و بیرون کشیده شدن الیاف) بین

## جدول ۵- انواع نانوافزودنی مورد استفاده در اپوکسی و اثر آن‌ها بر خواص اپوکسی

ویژگی‌های سایشی	نانوالماس	نوع نانوذره
تقویت حرارتی و مکانیکی، رسانش الکتریکی	نانولوله‌های کربنی	نانوذرات پایه کربنی
مقاومت حرارتی، تقویت مکانیکی	نانوالیاف کربنی	
رسانایی الکتریکی، روانکاری	صفحات گرافیتی	
ضدحریق	نانوصفحات اکسید گرافن	
ارزان بودن، ضدحریق (بازدارنده آتش)، اصلاح‌کننده خواص رئولوژیکی، تقویت‌کننده مکانیکی، مقاوم به نفوذ مایع	نانوصفحات خاک رس	نانوذرات معدنی
کم هزینه، بهبوددهنده چقرمگی، تقویت‌کننده مکانیکی	نانولوله‌های halloycite	
قابل تنظیم بودن ویژگی‌های الکترونیکی و اپتیکی	نانوذرات طلا	نانوذرات پایه فلزی
رسانش الکتریکی، خصوصیات آنتی باکتریال	نانوذرات نقره	
تقویت‌کننده حرارتی و مکانیکی، مقاومت به سایش، بهبود خصوصیات الکتریکی و چسبندگی	$Al_2O_3$	
خصوصیات الکتریکی، arc resistance	$ZrO_2$	
خصوصیات مغناطیسی	$Fe_3O_4$	
بهبود استحکام، انعطاف پذیری، عمر و کارپذیری	$SiO_2$	نانوذرات سیلیکا
بهبود چقرمگی		نانوذرات لاستیک

برهم کنش‌های بین ترک و نانوافزودنی‌ها به عنوان مهم‌ترین دلایل بهبود چقرمگی در نظر گرفته شده‌اند. محققان مکانیزم‌های چقرمه‌سازی را در دو بعد مختلف در نظر گرفته‌اند.

■ مکانیزم‌های میکرومکانیکی مانند انحراف ترک در توده‌ها، قفل شدن و بسته شدن ترک، گسترش منطقه تغییر شکل پلاستیک

■ مکانیزم‌های نانومکانیکی: مانند جدایش فصل مشترک، بیرون زدگی و پل زنی ترک از طریق ورود نانوساختارهایی مانند نانولوله‌های کربنی [۸]. برای مثال اثر نانوافزودنی‌ها بر خواص مکانیکی در جدول‌های زیر مشاهده می‌شود.

### خصوصیات الکتریکی

در این بخش هدف بهبود عملکرد چسب‌های رسانا در مقایسه با محصولات مرسوم است. افزایش رسانش

الکتریکی با افزودن نانوساختارهایی مانند نانولوله‌های کربنی و نانوالیاف کربنی که percolation مناسبی داشته باشند، میسر می‌شود. رسانش این مواد توسعه داده شده گاهی به رسانش مس نزدیک شده است. مقدار آستانه‌ای یا مجاز percolation به نوع تقویت‌کننده نانو وابسته است. برای مثال این مقدار برای نانولوله‌های کربنی در مقایسه با نانوالیاف کربنی کمتر است. روش پراکندگی همچنین اثر چشمگیری بر رسانش خواهد داشت.

### خصوصیات حرارتی و پایداری حرارتی

پایداری حرارتی به عنوان یکی از مهم‌ترین خصیصه‌های نانوکامپوزیت‌های پلیمری در دمای بالا مطرح است. نشان داده شده که نانوذرات رس در زمینه اپوکسی دمای deflection گرما را تا یک میزان مشخصی از افزودنی

جدول ۶- استحکام برشی اتصالات چسب مختلف: مقایسه بین چسب‌های اپوکسی تقویت شده با نانوساختارها و اپوکسی بدون افزودنی

مرجع	درصد تغییرات	چسب تقویت شده با نانو افزودنی	چسب بدون افزودنی	ماده زیرلایه چسب	نوع پرکننده
Gilber,2003	+۱۵	273MPa	237MPa	Al	نانوذرات $Al_2O_3$
Klug,1999	+۱۲	28,5MPa	25,5MPa	Al	نانوذرات $SiO_2$
2003 Kinloch	+۱۱	23MPa	20,8MPa	Al	
2009 Bhowmik	+۶۰	40MPa	25MPa	Ti	POSS
2009 Dodiuk	+۱۴	24MPa	21MPa	Al	
Hsia 2005	+۴۶	-	-	CF/Epoxy	نانولوله کربنی چنددیواره
Gilbert 2003	+۱۲	265MPa	237MPa	Al	نانوالیاف $Al_2O_3$
2003 Meguid	+۳۰	-	-	Al-CF/Epoxy	
Xu 2007	+۱۶	32,5MPa	28MPa	PMMA	نانوالیاف کربنی (CNF)
2009 Prolongo	+۸	12,8MPa	11,9MPa	CF/Epoxy	

جدول ۷- مقایسه بین استحکام peel بین چسب‌های اپوکسی تقویت شده با نانوساختارها و اپوکسی بدون افزودنی

مرجع	درصد تغییرات	چسب تقویت شده با نانو افزودنی	چسب بدون افزودنی	ماده زیرلایه چسب	نوع پرکننده
Gilbert,2003	+۴۹	130 N	87N	Al	نانوذرات $Al_2O_3$

ادامه جدول ۷- مقایسه بین استحکام peel بین چسب‌های اپوکسی تقویت شده با نانوساختارها و اپوکسی بدون افزودنی

مرجع	درصد تغییرات	چسب تقویت شده با نانو افزودنی	چسب بدون افزودنی	ماده زیرلایه چسب	نوع پرکننده
Kinloch,2003	+۷۷	5.5 N/mm	3.1 N/mm	Al	نانوذرات SiO <sub>2</sub>
Dodiuk,2005	+۱۵۸	0.49 N/mm	0.19 N/mm	Al	POSS
Gilbert,2003	+۳۷	119 N	87 N	Al	نانوالیاف AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub>

جدول ۸- مقایسه خصوصیات مکانیکی اتصالات چسب مختلف: بدون افزودنی نانو و با افزودنی نانو

مرجع	درصد تغییرات	چسب تقویت شده با نانو افزودنی	چسب بدون افزودنی	ماده زیرلایه چسب	نوع پرکننده
Gilbert,2003	+۸۱	0,85	0,47Kj/m <sup>2</sup>	CF/Epoxy	نانوذرات AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Klug,1999	+۲۵	0,74	0,59	CF/Epoxy	نانوذرات SiO <sub>2</sub>
kinloch,2003	+۹۲	2,3	1,2	Al	
Gilbert,2003	+۶۸	0,79	0,47	CF/Epoxy	نانوالیاف AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub>

جدول ۹- مقایسه خصوصیات مکانیکی اتصالات چسب‌های مختلف: بدون افزودنی نانو و با افزودنی نانو

مرجع	درصد تغییرات	چسب تقویت شده با نانو افزودنی	چسب بدون افزودنی	نوع تست	ماده زیرلایه چسب	نوع چسب	نوع پرکننده
2006. patel	+۲۱۹	339,6	106,3 kPa	Lap shear	Al	آکرلیک	نانوذرات SiO <sub>2</sub>
	+۲۱۷	128,9	40,7 kPa		چوب		
	+۴۳۳	185,6	34,8 kPa	peel	PP		
	+۴۶	1,98	1,36 kN/m		Al		
	+۵۶	0,25	0,16 kN/m		PP		

ادامه جدول ۹- مقایسه خصوصیات مکانیکی اتصالات چسب‌های مختلف: بدون افزودنی نانو و با افزودنی نانو

مرجع	درصد تغییرات	چسب تقویت شده با نانوافزودنی	چسب بدون افزودنی	نوع تست	ماده زیرلایه چسب	نوع چسب	نوع پرکننده
Ahmadi, 2019	+۱۴۶	323,6	131,7 kPa	Lap shear	Al	آکریلیک	نانورس
	+۱۳۰	339,5	147,9 kPa		چوب		
	+۱۴۲	208,5	86 kPa	peel	pp		
	+۳۳	1,98	1,49 kN/m		Al		
	+۳۵	0,27	0,2 kN/m		pp		
saeed, 2007	+۲۵	22,5	18 MPa	Lap shear	فولاد	پلی‌آمید	نانولوله کربنی چندجداره

(حدود ۵ درصد) افزایش داده است. دمای تجزیه نانوکامپوزیت‌ها معمولاً با افزایش میزان نانوافزودنی افزایش می‌یابد که نشان دهنده این است که تجزیه حرارتی زمینه در حضور نانوافزودنی به تأخیر می‌افتد این تأخیر به اثرات موانع فیزیکی نسبت داده شده است. ضریب انبساط حرارتی به عنوان خاصیت مؤثر دیگری در چسب‌ها مطرح است که برای نوع خاصی از رزین‌های ترموست این مقادیر ممکن است در بالا و پایین دمای انتقال شیشه‌ای با یکدیگر متفاوت باشد.

#### مقاومت در مقابل رطوبت

کاهش نفوذپذیری در چسب‌ها به پراکندگی مناسب نانوساختارهایی با نسبت ابعادی بالا (نانورس‌ها، نانوالیاف و نانولوله‌های کربنی) نسبت داده شده است. این کاهش نفوذپذیری به مسیر پرپیچ‌وخم برای نفوذ در حضور نانوافزودنی‌ها مربوط می‌شود که سبب مقاومت به رطوبت می‌شود. کاهش نفوذ رطوبت در حدود ۵۶-۸۷ درصد برای رزین‌های اپوکسی تقویت شده با نانورس‌ها مشاهده شده است. نسبت ابعادی بسیار بزرگ برای ورقه‌های نانورس‌ها علت اصلی کاهش نفوذپذیری است [۸].

#### چسب‌های نانو مورد استفاده در صنایع هوایی

همان‌طور که در ابتدای بحث نیز ذکر شد، چسب‌ها در قسمت‌ها و بخش‌های مختلف صنایع هوایی استفاده می‌شوند که در ادامه بیان شده است:

- چراغ‌ها، نمایشگرها، AC، صندلی‌ها، درب‌های cockpit (کابین خلبان) و وسایل الکترونیکی؛
- اتصال ساختارها و اجزای مختلف هواپیما مانند بدنه هواپیما، دماغه هواپیما، سطوح کنترل در بال هواپیما و نوک آن، اجزای دم هواپیما، چرخ هواپیما و کف آن. [۲۸] برای مثال نمونه‌هایی از کاربرد چسب‌ها در قسمت‌های مختلف هواپیما در شکل ۳، ۴ و ۵ مشاهده می‌شود.

رزین اپوکسی: متداول ترین چسب مورد استفاده در صنایع هوایی است که از استحکام خوبی برخوردار است، مواد فراری در هنگام پخت تولید نمی کند، دارای انقباض<sup>۱۳</sup> کمی بوده اما از سوی دیگر استحکام peel و انعطاف پذیری کمی داشته و شکننده نیز است.

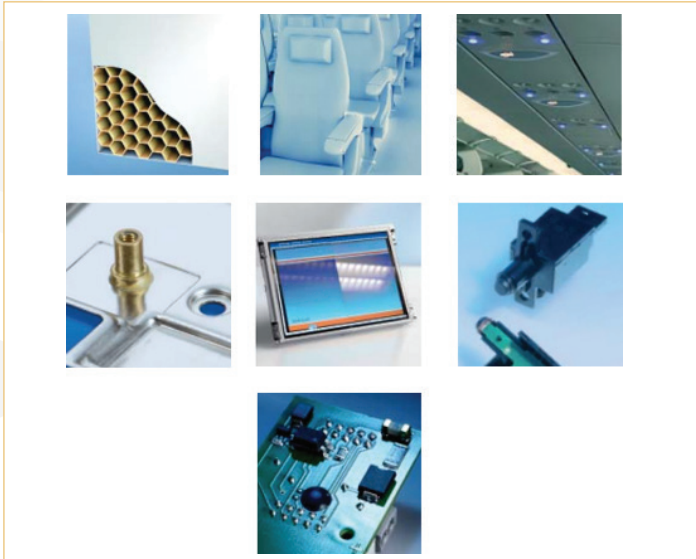
هوایی: Anaerobics، اکریلیک های ساختاری، اپوکسی ها، سیانو اکریلات ها همه به صورت فیلم یا نوار به عنوان چسب های مورد استفاده در صنعت هوافضا به کار گرفته شده اند.

## انواع نانو افزودنی های چسب های مورد استفاده در صنایع هوایی

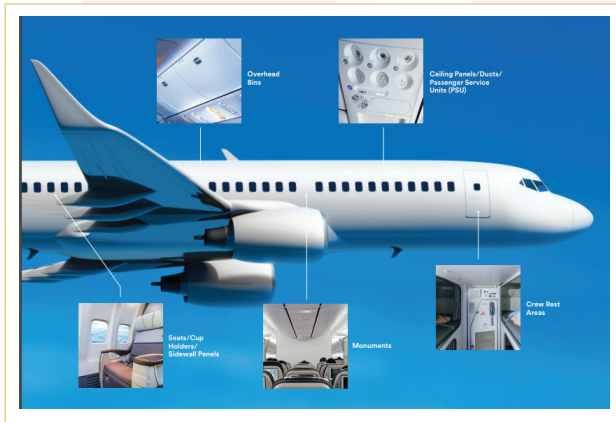
توسعه و تجاری سازی نانو ذراتی مانند نانوذرات رس، نانولوله های کربنی، نانوالیاف و نانوذرات غیرآلی مزایایی را در محدوده نانو برای چسب ها ایجاد کرده اند. برای مثال به علت مساحت سطح زیاد ذرات نانو میزان کمی از این ذرات جهت ایجاد اثرات چشمگیر در نانوکامپوزیت ها و چسبندگی احتیاج است. اثرات استفاده از مواد نانو در چسب ها به برهم کنش های فیزیکی و مکانیکی بین سطح نانوذرات و رزین موجود در نانوکامپوزیت ها به صورت زیر تقسیم می شود [۸].

## نانوساختارهای کربنی

در استفاده از نانوذرات پایه کربنی در چسب ها سه حالت ذرات کروی و صفر بعدی (نانوالماس)، افزودنی های تک بعدی (استوانه ای: نانولوله های کربنی و نانوالیاف کربنی و پرکننده های



شکل ۳- چسب های استفاده شده در قسمت های داخلی هواپیما (کمیانی delo): به ترتیب از بالا راست کاربرد اینوالکترونیک (سیستم های نوری - چراغ های اضطراری داخل هواپیما، صندلی (اتصال صندلی و روکش)، روکش درها و کابین (اتصال ساختار لایه ای به صفحات نازک پلاستیکی، اتصال حسگرها، نمایشگرها، اتصال بست هایی خاص برای مثال در شکل بالا این بست برای توزیع هوا استفاده می شود. سیستم الکترونیکی<sup>۱۴</sup> [۲۹].



شکل ۴- نمونه‌ای از کاربرد چسب‌ها در هواپیما (محصول شرکت 3M) [۳۰]



شکل ۵- نمونه‌ای از کاربردهای چسب‌ها در قسمت‌های مختلف هواپیما. از راست به چپ: محافظت سطوح حساس، نصب قطعات کوچک، پوشش دهی، محافظت از کابل‌ها، سطوح ضدلغزش، کف، لرزش زدایی (صدازدایی)، پرچسب‌های شناسایی، اتصال صفحات لانه زنبوری [۳۱].

به علاوه عوامل مختلفی در انتخاب چسب دخیل هستند: نوع زیرلایه و محدودیت کاربرد؛ برای مثال اتصال برای چه موادی صورت می‌گیرد، آیا اکل سطح پوشش داده می‌شود، زیرلایه‌ها مشابه بوده یا متفاوت هستند. زبری و نرمی سطح زیرلایه‌ها، حساسیت سطح به گرما یا حلال [۳۲]. چسب‌های مورد استفاده در صنایع نانوالماس‌ها خصوصیات عالی ضدسایش جهت اصلاح سطوح مواد از خود نشان داده‌اند. به علاوه نشان دو بعدی مانند گرافن وجود دارند. داده شده است ورود نانوالیاف کربنی و نانولوله‌های کربنی سبب بهبود خواص مکانیکی، الکتریکی و حرارتی نانوکامپوزیت‌های موجود شده است.



## ■ نانولوله‌های کربنی

شرکت Zyvex نانوجسب به شکل مایع با نام تجاری EPOVEX ارائه نموده است که در آن نانولوله‌های کربنی در زمینه اپوکسی قرار داده شده است. استحکام برشی این محصول ۱۵ درصد بهتر از چسب‌های مرسوم مورد استفاده در صنایع هوایی برآورد شده است [۲۱]. همچنین کمپانی Zyvex چسب دو قسمتی بر پایه اپوکسی شامل نانولوله‌های کربنی با نام تجاری Epovex برای جایگزینی برای کاربردهای چسب در صنایع هوایی ارائه کرده است.

## ■ نانوالیاف کربنی

محققان نشان داده‌اند که با افزودن نانوالیاف کربنی به زمینه اپوکسی، عملکرد مکانیکی و الکتریکی چسب‌های اپوکسی مورد استفاده در صنایع هوایی بهبود یافته است. نانوالیاف کربنی سبب می‌شوند که واکنش پخت اپوکسی آهسته‌تر صورت گیرد که با اعمال پلازما افزایش چشمگیری در انرژی سطح مشاهده شده است که این مسئله به نوبه خود سبب افزایش استحکام پیوند اتصالات می‌شود [۲۱].

## ■ گرافن

تحقیقات نشان داده است افزودن میزان مناسبی (کمتر از ۴ درصد) از ورقه‌های گرافنی به زمینه اپوکسی سبب بهبود خواص مکانیکی اتصالات به ویژه استحکام کششی چسب به میزان قابل ملاحظه‌ای شده است. این اثر به بهبود برهم‌کنش جذب بین سطح چسب و سطح ماده مورد نظر به علت اثرات تجمعی برهم‌کنش‌های بین مولکولی بین گروه‌های هیدروکسیل و کربوکسیلیک ورقه‌های گرافنی و گروه‌های هیدروکسیل رزین‌های اپوکسی با پیوند‌های عرضی شده ارتباط داده شده است. نشان داده شده که استفاده بیشتر از ۴ درصد بر خواص چسب اثر معکوس می‌گذارد که این اثر معکوس ناشی از توده‌ای شدن و پراکندگی ضعیف نانوافزودنی (ورقه گرافنی) به زمینه چسب (اپوکسی) است [۲].

## ■ نانوکامپوزیت‌های پلیمر-خاک رس

صنایع هوایی بازار بزرگی برای تیتانیوم به علت نسبت استحکام به وزن استثنایی آن و همچنین مقاومت بالا به دمای بالا و خوردگی آن محسوب می‌شود. برای اتصال صفحه‌های تیتانیومی به جای استفاده از روش‌های اتصال مانند (جوشکاری و پرچ) از چسب‌ها استفاده می‌شود. مشکل اصلی کاربرد چسب‌ها در صنایع هوایی دماهای بالا است که به علت رسانش گرمایی ایرودینامیک سازه (هواپیما) در حال حرکت است. دماها بسیار متغیر هستند از ۵۰ تا ۲۰۰ و ۳۵۰ تا ۸۰۰ درجه؛ بنابراین استفاده از رزین پایه آلی به عنوان چسب در دماهای بالای ۲۰۰ بسیار سخت خواهد بود در نتیجه به چسب‌های با مقاومت دمایی بالا نیاز است. اخیراً جهت کاهش اثرات ذکر شده از نانوکامپوزیت‌های خاک رس استفاده شده است [۳۳].

## ■ نانو ساختارهای معدنی

### ■ نانوذرات سیلیکا

شرکت Master Bond محصولی را با نام تجاری EP113 ارائه نموده است که شامل سیستم اپوکسی تقویت شده با نانوذرات سیلیکا (برای کاربرد پوشش دهی و درزبندی) است. استفاده از این نانوذره در این سازه سبب بهبود پایداری حرارتی و انقباض بسیار کم در حین Curing می‌شود. از دیگر مزایای این محصول می‌توان

مقاومت خوب به چرخه حرارتی و شوک حرارتی، ویسکوزیته کم، مقاومت شیمیایی به آب، نفت، اسید، بازها و سوخت‌ها را ذکر کرد که این محصول را به عنوان گزینه مناسبی جهت استفاده در کاربردهای OEM هواپیما، جایی که مجموعه‌ای از خصوصیات مختلف مدنظر است، تبدیل می‌کند [۳۴].

### ■ نانوذرات آلومینیوم

نانوذرات آلومینا باعث افزایش چشمگیری در استحکام چسبندگی می‌شود که این استحکام در میزان افزودنی ۲ درصد وزنی به حداکثر خود می‌رسد. استحکام Pull Off این نانوچسب‌ها تقریباً ۵ برابر بالاتر از چسب‌های اپوکسی خالص (بدون افزودنی) است. این افزایش استحکام مربوط به Intimately همراه با تغییر در حالت شکست از شکست فصل مشترک برای چسب‌های تقویت نشده به شکست مخلوط cohesive - فصل مشترک برای اتصالاتی که با نانوچسب‌ها تقویت شده‌اند - ارتباط داده شده است. در مقدار بالای نانوآلومینا استحکام چسب به علت اینکه توانایی ترشوندگی سطحی نمونه با افزایش ویسکوزیته، افت می‌کند، کاهش می‌یابد. مشخصات انواع نانوماده‌ها به همراه زمینه و بهبودی که با نانوآلومینا حاصل شده در جدول زیر خلاصه شده است.

📄 جدول ۱۰- افزودنی‌های نانوچسب‌ها و اثر آن‌ها بر خصوصیات چسب [۲۱]

بهبود	زمینه / محیط حامل	نانوماده
افزایش مدول الاستیک و استحکام کششی و کاهش کرنش شکست	پلی‌امید ترموپلاستیک	نانوپودر نیتريد آلومینیوم
بهبود استحکام چسبندگی فولاد اتصال یافته	اپوکسی	نانوذرات اکسید آلومینیوم
بهبود	زمینه / محیط حامل	نانوماده
چسبندگی شدید برای پیوند گرافیت و انقباض حجمی کم	رزین فنول - فرمالدهید (PF)	کاربید بروم
بهبود استحکام برشی و Peel و خصوصیات حرارتی	اپوکسی	POSS <sup>15</sup> کوچک‌ترین جز ممکن سیلیکا
بهبود EXFOLIATION و ENTERCALATION	پلی‌اورتان	مونت موریلونیت اصلاح شده با ترکیبات آلی
بهبود استحکام و مدول الاستیک	پلی‌امید ترموپلاستیک	نانولوله کربنی چنددیواره
افزایش چقرمگی شکست و استحکام	مونومر استر سیانات رزین دی‌سیانات	نانوالیاف پلی‌آرامید و نانوالیاف Peek
بهبود پایداری حرارتی	اپوکسی NOVOLAC	نانوذرات سیلیکا نانوذرات آلومینا نانوذرات تیتانیا

## ادامه جدول ۱۰- افزودنی‌های نانوچسب‌ها و اثر آن‌ها بر خصوصیات چسب [۲۱]

نانوناماده	زمینه / محیط حامل	بهبود
نانوذرات سیلیکا نانوذرات آلومینا	اکریلات قابل پخت با اشعه	تغلیظ نانوساختار و اصلاح خصوصیات یا جریان‌های رئولوژیکی
کلئوئید نقره	امولسیون پلی‌وینیل استات	بهبود رسانش
نانوذرات دی‌اکسید سیلیکون	رزین اپوکسی	افزایش استحکام چسبندگی و مقاومت به ترک
نانوذرات نقره	رزین اپوکسی-آکریلیک و مونومر فعال همچنین نیترات نقره در اتیلن گلیکول	افزایش رسانش الکتریکی و کاهش مراحل تولید

### انواع چسب‌های هوشمند مورد استفاده در صنعت هواپیما

چسب‌های غیرساختاری نقش مهمی را در مونتاژ قطعات داخلی هواپیما ایفا می‌کنند. علاوه بر کمک به بازدهی سوخت، در موارد اورژانسی جهت افزایش ایمنی مسافران نیز کمک می‌کنند. در جدول ۱۱ و شکل ۶ انواع چسب‌های غیرساختاری هوشمند به همراه نحوه عملکرد و کاربرد آن‌ها در صنعت هواپیما آورده شده است [۳۵].

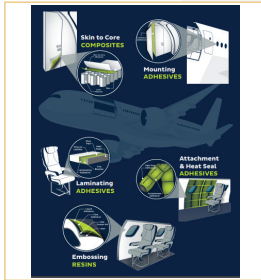
## جدول ۱۱- چسب‌های غیرساختاری هوشمند به همراه نحوه عملکرد و کاربرد آن‌ها در صنعت هواپیما

نوع چسب	نحوه عملکرد	کاربرد
لایه‌ای	لایه‌ای نازک و قابل انعطاف که می‌تواند با گرما و یا فشار فعال شود.	نصب decorative laminate mounting مونتاژ پوسته به کامپوزیت داخلی یا هسته Embossing decorative laminate
مایع	این چسب‌ها با فرمولاسیون بر پایه آب و همچنین بر پایه حلال‌های تأخیردهنده آتش <sup>۱۶</sup> هستند.	اتصال قلاب و حلقه‌ها، اتصال کلی (پیوند کلی)، عایق decorative laminate, HVAC, EDGE WRAPPING, و mounting
شبکه‌ای	این چسب‌ها Hot Melt بوده که تبدیل به لایه‌ای شبکه‌ای شکل (مانند پارچه یا بافت) می‌شود.	ساختارهای لایه‌ای lamiate layers, کامپوزیت‌ها

### مکانیزم بهبود خواص چسب با استفاده از فناوری نانو

#### مکانیزم‌ها و تئوری چسبندگی در حالت نانو

در حالت نانو در واقع یک مکانیزم کلی برای تشکیل همه پیوندها به طور مشخص دخالت ندارد، بلکه مجموعه‌ای از چند مکانیزم را در برمی‌گیرد که در ادامه این مکانیزم‌ها و تئوری‌های چسبندگی به اختصار معرفی می‌شود.



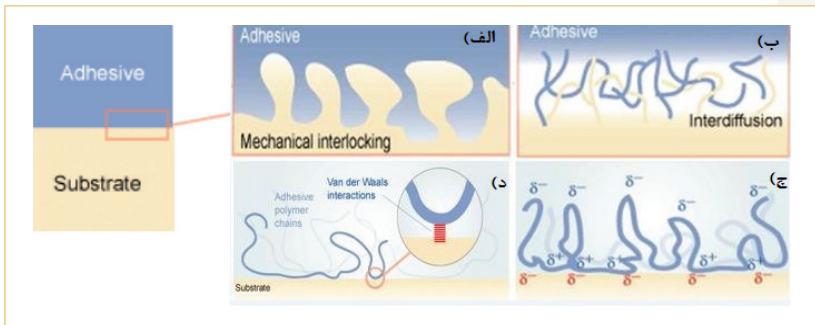
شکل ۶- کاربرد انواع چسب‌های غیرساختاری هوشمند در هواپیما [۳۶]

■ **قفل مکانیکی:** در تئوری قفل مکانیکی، زبری سطح زیرلایه منبع اصلی چسبندگی ذاتی محسوب می‌شود. بدین معنا که چسبندگی مستقیماً به زبری سطح وابسته است. با این وجود این تئوری قادر به توجیه استحکام چسبندگی مناسب در برخی سطوح نرم نیست.

■ **تئوری نفوذ:** نفوذ قسمت‌های مختلف و انتهای زنجیره‌های پلیمری به عنوان مکانیزم چسبندگی پلیمرهای مشابه در نظر گرفته شده است. این تئوری به ماکرومولکول‌ها و زنجیره‌های پلیمری احتیاج دارد که هر دو سطح دارای موبیلیته کافی بوده و در یکدیگر قابل حل باشند.

■ **تئوری الکترونیکی:** برای زیرلایه‌های فلزی، ماهیت متفاوت فلز و پلیمر، به منظور ایجاد تعادل سطح فرمی فلز و پلیمر انتقال الکترون از فلز به چسب تسهیل می‌شود. در نتیجه یک لایه دوگانه الکتریکی در فصل مشترک ایجاد می‌شود.

■ **تئوری جذب:** این تئوری قابل پذیرش‌ترین تئوری بوده و بر مبنای تماس مولکولی در فصل مشترک استوار است در این تئوری مواد به علت نیروهای بین اتمی و بین مولکولی که بین اتم‌ها و مولکول‌ها در سطح زیرلایه و چسب ایجاد شده‌اند، به یکدیگر می‌چسبند. بدین معنی که چسب باید روی سطح جامد گسترده شود و انرژی آزاد سطحی زیرلایه باید بالاتر از کشش چسبندگی چسب باشد. در برخی موارد خصوصاً وقتی پلیمرها و یا کامپوزیت‌های پلیمری یکی از اجزای اتصال باشند، سطوح باید جهت افزایش انرژی آزاد سطحی اصلاح شوند [۸].



شکل ۷- مکانیزم‌های جذب در چسب‌ها (الف) قفل مکانیکی، (ب) نفوذ، (ج) تئوری الکترونیکی، (د) واندروالس [۳۷].

### مزیت و صرفه‌جویی حاصل از استفاده از چسب نانو

مواد در ابعاد نانو که به عنوان پرکننده‌ها<sup>۱۸</sup> و اصلاح‌کننده‌های رئولوژیکی<sup>۱۹</sup> و عوامل اتصال<sup>۱۹</sup> قرار داده می‌شوند، سبب بهبود خواص چسب‌ها و سیلان‌ها (دِرِزگیرها) می‌شوند که این به نوبه خود سبب بهبود خواصی مانند افزایش استحکام و انعطاف‌پذیری و کنترل خواص رئولوژیکی، مقاومت به شعله، تحمل دمای بالا و بهبود

پایداری، بهبود رسانش حرارتی و الکتریکی، تقویت‌کننده‌های ساختاری و قابلیت بازیابی مجدد می‌شود [۳۸]. از جمله مزایای دیگری که می‌توان برای استفاده از چسب‌های نانو در صنایع هوایی ذکر کرد عبارتند از:

- ذخیره هزار برابری سرمایه در مورد هزینه‌های مربوط به نگهداری در صنایع هوایی؛
- ضخامت بهینه‌سازی شده نانوچسب که تقریباً برای رادار غیرقابل ردیابی است؛
- پایداری در برابر اشعه UV جهت جلوگیری از گچی شدن در گذر زمان؛
- سهولت استفاده از این چسب‌ها و غیرقابل دید بودن بعد از نصب و استفاده. [۳۹]

برای مثال شرکت Azo Masterbond Adhesive چسب‌های باگریدهای مختلف برای تأمین احتیاجات عملکردی خاصی طراحی کرده است که مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از:

- مقاومت به سایش، مقاومت شیمیایی، مقاومت ارتعاشی؛
- مقاومت به شوک؛
- سهولت پولیش؛
- پایداری ابعادی؛
- انعکاس نوری مناسب؛
- مقاومت به دمای بالا، ضریب انبساط کم؛
- رسانش حرارتی [۴۰].

## شرکت‌های تولیدکننده چسب مورد استفاده در صنایع هوایی در جهان

### شرکت‌های بین‌المللی

شرکت‌های متعددی در زمینه تولید چسب‌های مورد استفاده در صنایع هوایی فعال هستند. نام برخی از این شرکت‌ها در جدول زیر ارائه شده است.

جدول ۱۲- نام برخی از شرکت‌های تولیدکننده چسب‌های موردنیاز در صنایع هوایی

Master Bond Inc.	Royal Adhesives & Sealants	Hexcel Corporation	3M Company	Huntsman International LLC
Arkema Group (Bostik SA)	PPG Industries Inc.	Hernon Manufacturing Inc.	LORD Corporation	Henkel AG & Company KGaA
Hybond	PermaBond LLC	Dymax Corporation	L&L Products	DELO Industrie Klebstoffe GmbH & Co. KGaA
Avery Dennison Corporation	Parson Adhesives Inc.	Beacon Adhesives Inc.	Hylomar Group	Cytec Solvay Group



شکل ۸- برخی از مهم‌ترین شرکت‌های سازنده چسب‌های مورد استفاده در صنایع هوایی [۴۱].

برخی از این شرکت‌ها در محصولات خود از نانومواد و یا فناوری نانو استفاده می‌کنند که در جدول زیر به آن‌ها اشاره شده است.

## جدول ۱۳- برخی از نانوچسب‌های تولیدی شرکت‌های تولیدکننده چسب و کاربردهای آن

کاربرد	خصوصیات	نام محصول	نام شرکت
	<ul style="list-style-type: none"> <li>ویسکوزیته کم</li> <li>توانایی مقابله با شرایط شدید حرارتی</li> <li>شفافیت خوب نوری</li> <li>مقاومت به سایش عالی [۴۲]</li> </ul>	EP113 چسب اپوکسی با نانوذرات سیلیکا	Master bond
	<ul style="list-style-type: none"> <li>بهبود عملکرد چقرمگی و خستگی</li> </ul>	ALBIDUR یا ALBIPOX	Evonik

همگام با تولیدکنندگان چسب نانو در جهان، برخی از شرکت‌های ایرانی مانند شرکت عایق خودرو توس، شرکت مهندسی ایده‌سازان و فناوران جوان صنعت و چندین شرکت دیگر در محصولات خود از فناوری نانو استفاده می‌کنند. به اختصار برخی محصولات تجاری تولید شده در جدول زیر ارائه شده است.

## جدول ۱۴- نمونه‌ای از نانوچسب‌های تولید شرکت‌های داخلی

کاربرد	محصول	نام شرکت
مصالح ساختمانی	چسب سنگ ضدباکتریال حاوی نانوصفحات	مهندسی ایده‌سازان و فناوران صنعت
صنعت خودروسازی	چسب فیلتر روغن با ویسکوزیته بالا حاوی نانوذرات	تولیدی و رنگ‌سازی تهران اورانوس
مصالح ساختمانی	چسب سنگ اپوکسی حاوی نانوذرات	مهندسی فناوری‌های برتر فرما
صنعت خودروسازی	چسب تقویت‌کننده بدنه با جریان پذیری بهبود یافته	عایق خودرو توس

اما تاکنون تولیدات نانوچسب‌های تولید شده در شرکت‌های ایرانی جهت کاربرد در صنایع هوایی طراحی و تولید نشده‌اند و فقط برخی کارهای انجام شده در این زمینه فقط در حوزه پژوهش بوده و به تولید صنعتی نرسیده است.

## نتیجه‌گیری

نانومواد و نانو ساختارهای مختلفی به عنوان افزودنی به منظور بهبود خواص چسب‌ها به کار گرفته شده‌اند. در این میان نانوذرات خاک رس و نانولوله‌های کربنی به دلیل خواص مکانیکی و حرارتی برای صنایع هوایی مورد توجه قرار گرفته‌اند. در این گزارش ضمن مرور موقعیت نانوچسب‌ها در صنایع هوایی و پیش‌بینی بازار آن، انواع نانوچسب‌های مورد استفاده در این صنعت بررسی و به بهبود مکانیزم خواص با نانو پرداخته شده است. مشاهده شد استفاده فناوری نانو در تولید چسب‌ها به دلایلی مانند سفتی چسب، چقرمگی شکست، ترشوندگی سطحی، کنترل تنش‌های باقیمانده، افزایش پایداری و عمر چسب‌ها، بهبود خصوصیات الکتریکی، بهبود خصوصیات حرارتی (مقاومت در برابر شوک حرارتی)، مانع نفوذ گاز، افزایش سرعت چسبیدن، سبک‌سازی و مقاوم‌سازی، رسانایی و خودترمیم‌شوندگی مورد توجه قرار گرفته است. استفاده از چسب‌ها به عنوان جایگزینی برای اتصالات مکانیکی، جوشکاری و دیگر روش‌های اتصال سبب کاهش کلی هزینه‌های تولید، افزایش عمر محصول و در نهایت کاربرد بهینه در زمینه طراحی، تولید و مونتاژ می‌شود.

### پی‌نوشت‌ها

۱ Adhesively Bonded Joints	۹ Filler	silsesquioxanes
۲ Fiber Reinforced Polymer	۱۰ Van Der Waals	۱۶ Flame Retardant
۳ original equipment manufacturer	۱۱ Attaching	۱۷ Fillers
۴ Henkel Ag& Co.Kgaa	۱۲ Akron Ascent Innovations Llc (Aai)	۱۸ Modifier Rheological
۵ Cytec Solvay	۱۳ polyhedral oligomeric silsesquioxanes	۱۹ Coupling Agent
۶ Hexcel Corporation	۱۴ Shrinkage	
۷ Huntsman International	۱۵ polyhedral oligomeric	
۸ adhesion		

### مراجع

- ۱ <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/aerospace-adhesives-market>
- ۲ Guadagno, L., et al., Graphene-based structural adhesive to enhance adhesion performance. RSC Advances, 2015. 5(35): p. 27874-27886.
- ۳ <https://www.researchandmarkets.com/reports/4618243/nano-adhesive-market-forecasts-from-2018-to-2023>
- ۴ <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/aerospace-adhesives-market>
- ۵ <https://www.researchandmarkets.com/reports/4618243/nano-adhesive-market-forecasts-from-2018-to-2023>
- ۶ [https://www.researchandmarkets.com/reports/4452026/aviation-adhesives-and-sealants-market-\(\(analysis#relb1-4290474](https://www.researchandmarkets.com/reports/4452026/aviation-adhesives-and-sealants-market-((analysis#relb1-4290474)
- ۷ <https://www.henkel-adhesives.com/sg/en/products/industrial-adhesives.html>
- ۸ Prolongo, S.G., M.R. Gude, and A. Ureña, Nanoreinforced adhesives. Nanotechnology and Nanomaterials "Nano-bers, 2010: p. 39-68.
- ۹ <https://link.springer.com/referenceworkentry>
- ۱۰ <https://www.intechopen.com/books/>

applied-adhesive-bonding-in-science-and-technology/adhesives-applications-and-recent-advances

<sup>۱۱</sup> <https://www.henkel-adhesives.com/sg/en/products/industrial-adhesives/instant-adhesives.html>

<sup>۱۲</sup> <https://www.henkel-adhesives.com/sg/en/products/industrial-adhesives/anaerobic-adhesives.html>

<sup>۱۳</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/Pressure-sensitive\\_adhesive](https://en.wikipedia.org/wiki/Pressure-sensitive_adhesive)

<sup>۱۴</sup> <https://www.henkel-adhesives.com/es/en/products/industrial-adhesives/pressure-sensitive-adhesives.html>

<sup>۱۵</sup> <https://www.henkel-adhesives.com/sg/en/products/industrial-adhesives/hot-melt-adhesives.html>

<sup>۱۶</sup> <https://www.henkel-adhesives.com/sg/en/products/industrial-adhesives/instant-adhesives.html>

<sup>۱۷</sup> <https://www.henkel-adhesives.com/sg/en/products/industrial-adhesives/water-based-adhesives.html>

<sup>۱۸</sup> <https://www.henkel-adhesives.com/sg/en/products/industrial-adhesives/uv-adhesives-light-cure-adhesives.html>

<sup>۱۹</sup> <https://en.wikipedia.org/wiki/Adhesive>

<sup>۲۰</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/Pressure-sensitive\\_adhesive](https://en.wikipedia.org/wiki/Pressure-sensitive_adhesive)

<sup>۲۱</sup> Boehm, F., Nanotechnology in Coatings and Adhesive Applications: Global Markets. BCC Research, 2009. NANO48A

<sup>۲۲</sup> <https://www.pcmag.com/articles/105770-nanofiber-adhesive>

<sup>۲۳</sup> Favi, P.M., et al., Inspiration from the natural world: from bio-adhesives to bio-inspired adhesives. Journal of Adhesion Science and Technology, 2014. 28(3-4): p. 290-319.

<sup>۲۴</sup> <https://www.newscientist.com/article/dn11874-new-nano-glue-likes-it-hot/> Nature (vol 447, p 299)

<sup>۲۵</sup> <https://www.pcmag.com/articles/105770-nanofiber-adhesive>

<sup>۲۶</sup> <https://www.masterbond.com/articles/>

nanoparticle-fillers-improve-epoxy-performance

<sup>۲۷</sup> Ahmadi, Z., Nanostructured epoxy adhesives: A review. Progress in Organic Coatings, 2019. 135: p. 449-453.

<sup>۲۸</sup> <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/aerospace-adhesives-market>

<sup>۲۹</sup> [https://cloudfront.delo.de/documents/en/brochures/Adhesives\\_for\\_aircraft\\_interiors\\_EN.pdf](https://cloudfront.delo.de/documents/en/brochures/Adhesives_for_aircraft_interiors_EN.pdf)

<sup>۳۰</sup> <https://multimedia.3m.com/mws/media/13809720/3m-aerospace-interior-adhesive-solutions-brochure.pdf>

<sup>۳۱</sup> <https://www.tesa.com/en/industry/transportation-industry/aviation>

<sup>۳۲</sup> <https://www.adhesives.org/adhesives-sealants/adhesive-selection>

<sup>۳۳</sup> Bhowmik, S., et al., High-performance nanoadhesive bonding of titanium for aerospace and space applications. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2009. 29(3): p. 259-267.

<sup>۳۴</sup> <https://www.masterbond.com/tds/ep113>

<sup>۳۵</sup> <https://www.bostik-industrial.com/aircraft-interior-adhesive/>

<sup>۳۶</sup> [https://www.bostik.com/globalassets/countries/usa/industrial-assets/brochuresassets/aerospace/aerospace\\_brochure.pdf](https://www.bostik.com/globalassets/countries/usa/industrial-assets/brochuresassets/aerospace/aerospace_brochure.pdf)

<sup>۳۷</sup> Nezhad, H.Y., et al., Mechanical performance of composite bonded joints in the presence of localised process-induced zero-thickness defects. Procedia Manufacturing, 2018. 16: p. 91-98.

<sup>۳۸</sup> <https://www.futuremarketsinc.com/the-global-market-for-nanomaterials-in-adhesives/>

<sup>۳۹</sup> [www.ultimatevalet.aero/leading-edge.html](http://www.ultimatevalet.aero/leading-edge.html)

<sup>۴۰</sup> <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=4783>

<sup>۴۱</sup> <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/aerospace-adhesives-market>

<sup>۴۲</sup> <https://www.masterbond.com/tds/ep113>

<sup>۴۳</sup> [https://adhesives-sealants.evonik.com/sites/lists/RE/DocumentsAC/Evonik%20Adhesives%20Magazine%202017\\_e.pdf](https://adhesives-sealants.evonik.com/sites/lists/RE/DocumentsAC/Evonik%20Adhesives%20Magazine%202017_e.pdf)