

## An Overview of Adhesives and Their Evolving Role in Industry

Zahra Rahmani, Behzad Shirkavand Hadavand\*

Department of Resin and Additives, Institute for Color Science and Technology, P. O. Box: 16765-654, Tehran, Iran.

### ARTICLE INFO

Article history:

Received: 16-10-2024

Accepted: 19-02-2025

Available online: 21-04-2025

Print ISSN: 2251-7278

Online ISSN: 2383-2223

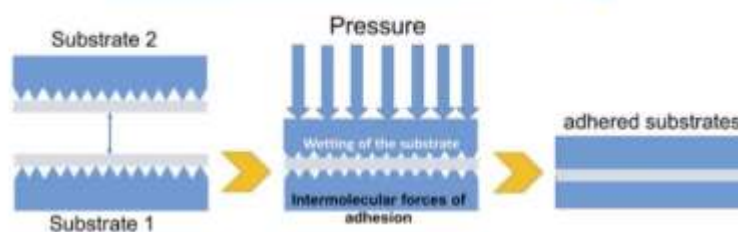
DOI: [10.30509/jscw.2025.167402.1211](https://doi.org/10.30509/jscw.2025.167402.1211)

### Keywords:

Adhesives  
Adhesion mechanisms  
Chemical composition  
Industrial applications  
Environmental impact

### ABSTRACT

Adhesives play a very important role in various industries as bonding materials that enable the bonding of different surfaces. This review article examines the types of adhesives, their chemical compositions, adhesion mechanisms, and their various applications. Adhesives are categorized based on their chemical composition, such as natural, synthetic, epoxy, silicone, etc. Adhesion mechanisms include chemical, physical, and mechanical bonds, each of which has a different function, depending on the type of adhesive and the surface used. The applications of adhesives range from the automotive and aerospace industries to medicine and electronics. In this article, the important characteristics of adhesives have been investigated. Also, the challenges and opportunities ahead in developing new adhesives with higher efficiency and less environmental impact have been investigated. Finally, recent advances in adhesive research and development, including the use of nanoparticles and advanced technologies to improve performance and environmental compatibility, are discussed.



## مروری بر چسب‌ها و نقش در حال تحول آنها در صنعت

زهرا رحمانی<sup>۱</sup>، بهزاد شیرکوند هداوند<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکترا، گروه پژوهشی رزین و افزودنی‌ها، پژوهشکده پوشش‌های سطح و فناوری‌های نوین، پژوهشگاه رنگ، تهران، ایران، صندوق پستی: ۶۵۴-۱۶۷۶۵۴

۲- استاد، گروه پژوهشی رزین و افزودنی‌ها، پژوهشکده پوشش‌های سطح و فناوری‌های نوین، پژوهشگاه رنگ، تهران، ایران، صندوق پستی: ۶۵۴-۱۶۷۶۵۴

### چکیده

چسب‌ها به عنوان مواد اتصال دهنده‌ای که امکان پیوند سطوح مختلف را فراهم می‌کنند، نقش بسیار مهمی در صنایع مختلف ایفا می‌کنند. این مقاله مروری به بررسی انواع چسب‌ها، ترکیبات شیمیایی آن‌ها، سازوکارهای چسبندگی و کاربردهای مختلف آن‌ها می‌پردازد. چسب‌ها بر اساس ترکیب شیمیایی خود به دسته‌های مختلفی نظیر چسب‌های طبیعی، مصنوعی، اپوکسی، سیلیکونی و غیره تقسیم می‌شوند. سازوکارهای چسبندگی شامل پیوندهای شیمیایی، فیزیکی و مکانیکی است که هر کدام با توجه به نوع چسب و سطح مورد استفاده، عملکرد متفاوتی دارند. کاربردهای چسب‌ها از صنایع خودروسازی و هوافضا گرفته تا پزشکی و الکترونیک گسترده است. در این مقاله به بررسی ویژگی‌های مهم چسب‌ها پرداخته شده است. همچنین، چالش‌ها و فرصت‌های پیش رو در توسعه چسب‌های جدید با کارایی بالاتر و تأثیرات محیطی کمتر نیز مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت، پیشرفت‌های اخیر در تحقیق و توسعه چسب‌ها، شامل استفاده از نانوذرات و فناوری‌های پیشرفته برای بهبود عملکرد و سازگاری با محیط زیست، مورد بحث قرار می‌گیرد.

### اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۰۱

در دسترس به صورت الکترونیکی: ۱۴۰۴/۰۲/۰۱

شاپا چاپی: ۲۲۵۱-۲۲۷۸

شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۲۲۲۳

DOI: 10.30509/jscw.2025.167402.1211

### واژه‌های کلیدی:

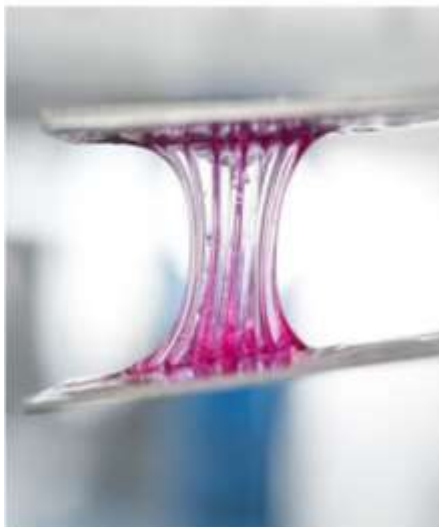
چسب‌ها

سازوکارهای چسبندگی

ترکیب شیمیایی

کاربردهای صنعتی

اثرات زیست محیطی



## ۱- مقدمه

چسب‌ها موادی هستند که برای اتصال سطوح و اجسام به یکدیگر بدون نیاز به سازوکارهای مکانیکی یا گرمایی استفاده می‌شوند. این مواد نقش مهمی در صنایع مختلف ایفا می‌کنند و به عنوان یکی از ابزارهای اساسی در ساخت و تولید محصولات گوناگون شناخته می‌شوند. چسب‌ها در اشکال و انواع متنوعی تولید می‌شوند و می‌توانند شامل مواد طبیعی و مصنوعی باشند. از جمله رایج‌ترین انواع چسب‌ها می‌توان به چسب‌های اپوکسی، پلی‌یورتان، سیلیکونی و اکریلیک اشاره کرد (۱).

چسب‌ها در صنایع مختلف به دلیل ویژگی‌ها و مزایای متعددی که ارائه می‌دهند، از جمله مزایای استفاده از چسب‌ها می‌توان به توانایی اتصال مواد مختلف با خواص فیزیکی و شیمیایی متفاوت، کاهش وزن سازه‌ها، بهبود زیبایی ظاهری محصول نهایی، توزیع یکنواخت تنش‌ها و کاهش تمرکز تنش‌ها در نقاط خاص اشاره کرد. این ویژگی‌ها به ویژه در صنایعی مانند خودروسازی، هوافضا، الکترونیک و ساختمان‌سازی اهمیت بسیاری دارند (۲).

در صنعت خودروسازی، چسب‌ها برای اتصال قطعات مختلف خودرو مانند شیشه‌ها، صفحه‌های بدنه و قطعات داخلی استفاده می‌شوند. این امر به کاهش وزن خودرو و بهبود کارایی سوخت منجر می‌شود. در صنعت هوافضا نیز چسب‌ها برای اتصال قطعات حساس و حیاتی به کار می‌روند، به طوری که اتصالات چسبی می‌توانند تنش‌های ناشی از تغییرات دما و فشار را به خوبی تحمل کنند. علاوه بر این، در صنعت الکترونیک، چسب‌ها برای اتصال قطعات حساس و ریز الکترونیکی به کار می‌روند و به بهبود عملکرد و دوام محصولات الکترونیکی کمک می‌کنند (۲).

این مقاله نگاهی اجمالی به چسب و کاربردهای آن دارد. مواردی همچون دسته‌بندی چسب‌ها از نظر طبیعی و سنتزی، خواص و عملکرد چسب‌ها، عوامل مؤثر بر عملکرد چسب‌ها و کاربردهای چسب‌ها در زندگی روزمره و صنایع مختلف دارد. همچنین فناوری‌ها و نوآوری‌های جدید در چسب‌ها مطرح شده است تا سرآغاز پژوهش‌های جدید در این زمینه باشد.

## ۲- مروری بر تاریخچه و توسعه چسب‌ها

تاریخچه چسب‌ها به هزاران سال پیش بازمی‌گردد. نخستین استفاده‌های مستند از چسب‌ها مربوط به دوران ماقبل تاریخ است، زمانی که انسان‌های اولیه از مواد طبیعی مانند رزین‌های درختان و عصاره‌های گیاهی برای اتصال ابزارها و سلاح‌های خود استفاده می‌کردند. شواهد باستان‌شناسی نشان می‌دهند که مصریان باستان نیز از چسب‌های ساخته شده از ترکیب مواد طبیعی مانند استخوان، پوست و صمغ برای ساخت اشیای مختلف از جمله تابوت‌ها و جواهرات بهره می‌بردند (۳).

در دوران باستان، یونانیان و رومیان نیز به توسعه و استفاده از چسب‌ها پرداختند. آن‌ها از مواد طبیعی مانند قیر، موم و صمغ‌های گیاهی برای ساخت سازه‌ها و محصولات روزمره خود استفاده می‌کردند. این مواد معمولاً به عنوان مواد آب‌بند و یا برای تقویت اتصالات در سازه‌های چوبی به کار می‌رفتند. در طول قرون وسطی، استفاده از چسب‌های حیوانی به طور گسترده‌ای رواج یافت. این چسب‌ها عمدتاً از جوشاندن استخوان‌ها، پوست و سایر ضایعات حیوانی به دست می‌آمدند و برای اتصال چوب و پارچه در صنایع دستی و هنری استفاده می‌شدند (۳).

تحولات اساسی در توسعه چسب‌ها در قرن نوزدهم و بیستم میلادی رخ داد. با ظهور صنعت شیمیایی مدرن و پیشرفت‌های علمی، تولید چسب‌ها از حالت سنتی و طبیعی به سمت استفاده از مواد مصنوعی تغییر کرد. در اوایل قرن بیستم، تولید چسب‌های مصنوعی مانند فنول-فرمالدهید و نیتروسولوز آغاز شد. این چسب‌ها به دلیل خواص مکانیکی برتر و قابلیت تولید در مقیاس بزرگ، به سرعت جایگزین چسب‌های طبیعی شدند. دهه‌های بعدی شاهد توسعه چسب‌های پیشرفته‌تری مانند چسب‌های اپوکسی، پلی‌یورتان و سیلیکون بودیم که کاربردهای گسترده‌ای در صنایع مختلف پیدا کردند (۴).

در سال‌های اخیر، تحقیقات و توسعه در زمینه چسب‌ها به سمت بهبود خواص عملکردی، کاهش اثرات زیست‌محیطی و افزایش سازگاری با مواد مختلف متمرکز شده است. نوآوری‌های جدید شامل چسب‌های هوشمند با قابلیت تغییر خواص در پاسخ به محرک‌های خارجی، چسب‌های زیست‌تخریب‌پذیر و چسب‌های سازگار با محیط زیست است. این پیشرفت‌ها نه تنها کارایی و ایمنی محصولات را افزایش می‌دهند، بلکه به کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی نیز کمک می‌کنند (۴).

## ۳- سازوکارهای چسبندگی چسب

سازوکارهای چسبندگی چسب به طور کلی شامل سه دسته اصلی پیوندهای شیمیایی، فیزیکی و مکانیکی هستند. پیوندهای شیمیایی از جمله سازوکارهای اصلی چسبندگی به شمار می‌روند و به واسطه تشکیل پیوندهای شیمیایی بین مولکول‌های چسب و سطح مورد اتصال صورت می‌گیرند. این پیوندها می‌توانند شامل پیوندهای کووالانسی، یونی یا هیدروژنی باشند. قدرت چسبندگی این نوع پیوندها به ترکیب شیمیایی چسب و سطح بستگی دارد و در نتیجه پیوندهای قوی‌تر می‌توانند مقاومت بیشتری در برابر جدا شدن سطوح ایجاد کنند (۵). پیوندهای فیزیکی نیز یکی از سازوکارهای مهم چسبندگی هستند که بر پایه نیروهای واندروالسی و نیروی بین مولکولی ایجاد می‌شوند. این پیوندها معمولاً در چسب‌هایی که برای اتصال سطوح غیرقطبی و صاف استفاده می‌شوند، اهمیت دارند. نیروهای واندروالسی که بین

قدیم توسط انسان‌ها برای اتصال مواد مختلف مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این چسب‌ها به دلیل سازگاری با محیط زیست و عدم استفاده از مواد شیمیایی مضر، همواره مورد توجه بوده‌اند. چسب‌های طبیعی شامل انواع مختلفی هستند که از مواد گیاهی و حیوانی استخراج می‌شوند (۹).

یکی از قدیمی‌ترین و شناخته‌شده‌ترین چسب‌های طبیعی، صمغ عربی است. این چسب از درختان آکاسیا به دست می‌آید و به دلیل خواص چسبندگی بالا و شفافیت در صنایع مختلف مانند صنایع غذایی، دارویی و هنری استفاده می‌شود. صمغ عربی به خصوص در تهیه آبنبات‌ها و نوشیدنی‌ها به عنوان پایدارکننده و تثبیت‌کننده کاربرد دارد. چسب حیوانی دیگری که بسیار معروف است، ژلاتین می‌باشد. ژلاتین از آبکافت کلاژن موجود در پوست و استخوان حیوانات به دست می‌آید و در صنایع غذایی، داروسازی و حتی عکاسی استفاده می‌شود. در ساخت کپسول‌های دارویی و برخی از غذاهای ژله‌ای از ژلاتین به عنوان چسب استفاده می‌شود. مثال دیگر، چسب کازئین است که از پروتئین موجود در شیر تهیه می‌شود. این چسب در صنایع چوب و کاغذ کاربرد دارد و به دلیل مقاومت بالایش در برابر رطوبت و عوامل شیمیایی، گزینه مناسبی برای اتصال قطعات چوبی به شمار می‌رود (۱۰).

علاوه بر این‌ها، صمغ گیاهی مانند صمغ گزانتان که از تخمیر میکروبی به دست می‌آید نیز به عنوان یک چسب طبیعی در صنایع غذایی و داروسازی استفاده می‌شود. این صمغ به دلیل خاصیت ژل‌کنندگی بالا و توانایی حفظ رطوبت، در تهیه انواع سس‌ها، کرم‌ها و محصولات دارویی مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به افزایش آگاهی عمومی نسبت به مسائل زیست‌محیطی و نگرانی‌های مربوط به استفاده از مواد شیمیایی مضر، چسب‌های طبیعی بار دیگر مورد توجه قرار گرفته‌اند و تلاش‌هایی برای بهبود و توسعه آن‌ها در حال انجام است.

مولکول‌های چسب و سطح برقرار می‌شوند، نسبتاً ضعیف‌تر از پیوندهای شیمیایی هستند، اما همچنان می‌توانند یک لایه نازک از چسب را به سطح بچسبانند. این نوع چسبندگی به ویژه در چسب‌های حساس به فشار<sup>۱</sup> مشاهده می‌شود که در آن‌ها با اعمال فشار، مولکول‌های چسب به سطح نزدیک شده و پیوندهای فیزیکی ایجاد می‌کنند (۶).

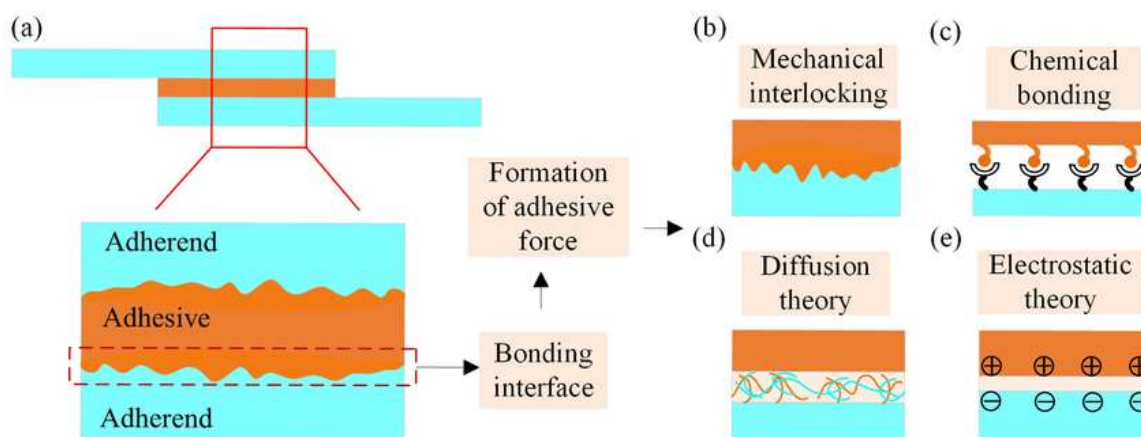
پیوندهای مکانیکی سومین نوع سازوکار چسبندگی هستند که بر اساس قفل شدن فیزیکی چسب در منافذ و ناهمواری‌های سطح ایجاد می‌شوند. در این حالت، چسب به داخل حفره‌ها و شکاف‌های سطح نفوذ می‌کند و با خشک شدن یا سخت شدن، به طور مکانیکی در جای خود ثابت می‌شود. این نوع چسبندگی بیشتر در موادی که سطح آن‌ها دارای بافت یا زبری است، موثر است. پیوندهای مکانیکی به دلیل عدم وابستگی به پیوندهای شیمیایی یا فیزیکی، می‌توانند در شرایطی که سطح دارای خاصیت شیمیایی متفاوت یا ناسازگار است، عملکرد خوبی داشته باشند (۷).

اتصالات معمولی ساختار یک ماده یا مواد غیرمشابه از اتصال دو قسمت به یکدیگر توسط چسب به دست می‌آید که به آن اتصال چسبی می‌گویند. نیروهای پیوند تشکیل‌دهنده دو قطعه را به هم نگه می‌دارند. رابط پیوند مشترک در شکل (a) نشان داده شده است، که عمدتاً شامل قفل مکانیکی، پیوند شیمیایی، تئوری انتشار و تئوری جذب الکترواستاتیکی است، همانطور که در شکل (b)-(e) نشان داده شده است (۸).

#### ۴- دسته‌بندی چسب‌ها

##### ۴-۱- چسب‌های طبیعی<sup>۲</sup>

چسب‌های طبیعی از منابع زیستی به دست می‌آیند و از زمان‌های بسیار



شکل ۱: سازوکار اتصال چسب. (a) رابط اتصال مشترک؛ (b) قفل مکانیکی؛ (c) پیوند شیمیایی؛ (d) تئوری انتشار؛ (e) نظریه الکترواستاتیکی (۸).

Figure 1. Adhesive bonding mechanism. a) Joint interface; b) mechanical lock; c) chemical bonding; d) diffusion theory; and e) electrostatic theory (8).

<sup>2</sup> Natural adhesives

<sup>1</sup> Pressure-sensitive adhesives

منحصر به فرد و کارایی بالا، هنوز در برخی کاربردهای خاص جایگاه خود را حفظ کرده‌اند (۱۳).

#### ۴-۱-۲- چسب‌های گیاهی

چسب‌های گیاهی از منابع طبیعی گیاهی تهیه می‌شوند و به دلیل سازگاری با محیط زیست، عدم سمیت و قابلیت تجدیدپذیری، از اهمیت بالایی برخوردارند. این چسب‌ها به طور سنتی برای مقاصد مختلف مانند ساخت لوازم التحریر، صنایع چوب، مواد غذایی و پزشکی استفاده می‌شوند. چسب‌های گیاهی عمدتاً از پلیمرهای طبیعی مانند پلی‌ساکاریدها و پروتئین‌ها تشکیل شده‌اند. این پلیمرها دارای گروه‌های عاملی مانند هیدروکسیل (-OH)، کربوکسیل (-COOH) و آمین (-NH<sub>2</sub>) هستند که در فرآیند چسبندگی نقش کلیدی دارند. گروه‌های هیدروکسیل نقش در تشکیل پیوندهای هیدروژنی، پیوندهای کربوکسیلاتی فراهم‌کننده چسبندگی یونی و شاخه‌های جانبی تأثیر بر انعطاف‌پذیری و گرانشی چسب دارند.

فرآیند چسبندگی چسب‌های گیاهی شامل چند مرحله اصلی خیس کردن سطح که در آن چسب مایع با سطح تماس پیدا می‌کند و به داخل منافذ سطح نفوذ می‌کند. مرحله بعد تشکیل پیوند است که چسب‌های گیاهی اغلب از طریق پیوندهای هیدروژنی، یونی و گاهی پیوندهای کووالانسی به سطح متصل می‌شوند و در خاتمه پس از تبخیر آب یا ایجاد تغییرات شیمیایی، ساختار چسب به حالت جامد تبدیل می‌شود و اتصال مقاوم ایجاد می‌شود.

از مزایای چسب‌های گیاهی می‌توان به تجدیدپذیری و زیست‌تخریب‌پذیری، غیرسمی بودن و کاربرد گسترده در صنایع غذایی و دارویی نام برد. اما معایبی مانند حساسیت به رطوبت و مقاومت کمتر در برابر حرارت و فشار در مقایسه با چسب‌های شیمیایی سنتزی را دارند (۱۴).

چسب‌های گیاهی را می‌توان به طور کلی به چهار دسته چسب‌های نشاسته‌ای<sup>۵</sup>، چسب‌های سلولزی<sup>۶</sup>، چسب‌های صمغی<sup>۷</sup> و چسب‌های پروتئینی<sup>۸</sup> تقسیم‌بندی کرد.

منبع چسب‌های نشاسته‌ای نشاسته است که از دانه‌های غلات مانند ذرت، گندم و سیب‌زمینی استخراج می‌شود. بیشترین کاربردها را در چسب کاغذدیواری و چسب جعبه‌های کارتنی دارند. ساختار شیمیایی اصلی این چسب‌ها از پلی‌ساکاریدهای آمیلوز (ساختار خطی) و آمیلوپکتین (ساختار شاخه‌ای) است. سازوکار چسبندگی در آنها بدین طریق است که در آب گرم، نشاسته ژلاتینه‌شده و پیوندهای هیدروژنی با سطوح مختلف ایجاد می‌کند (۱۴).

این چسب‌ها به عنوان گزینه‌های پایدار و سازگار با محیط زیست می‌توانند نقش مهمی در کاهش استفاده از مواد شیمیایی و حفظ سلامت محیط زیست ایفا کنند (۱۱).

#### ۴-۱-۱- چسب‌های حیوانی<sup>۱</sup>

چسب‌های حیوانی از موادی که از بدن حیوانات استخراج می‌شود، تهیه می‌گردند و از زمان‌های بسیار قدیم در صنایع مختلف مورد استفاده قرار می‌گرفته‌اند. این چسب‌ها به دلیل خواص منحصر به فرد و سازگاری بالا با مواد طبیعی، همواره محبوب بوده‌اند و هنوز هم در برخی کاربردها جایگاه ویژه‌ای دارند.

یکی از مشهورترین انواع چسب‌های حیوانی، ژلاتین است. ژلاتین از آبکافت کلاژن موجود در پوست، استخوان‌ها و بافت‌های حیوانات به دست می‌آید. این ماده در صنایع مختلفی از جمله صنایع غذایی، دارویی و عکاسی کاربرد دارد. در صنایع غذایی، ژلاتین به عنوان ماده ژله‌ساز در تهیه ژله، مارشمالو و برخی دسرها استفاده می‌شود. همچنین، در داروسازی، از ژلاتین برای ساخت کپسول‌های دارویی بهره می‌برند، زیرا به راحتی در معده حل می‌شود و مواد دارویی را آزاد می‌کند (۱۲).

نوع دیگری از چسب‌های حیوانی، چسب ماهی‌آست است. این چسب از مثانه ماهی تهیه می‌شود و به طور سنتی در صنایع نوشیدنی، برای شفاف‌سازی آنها استفاده می‌شده است. چسب ماهی به دلیل خاصیت تصفیه‌کننده‌اش، باعث ته‌نشینی ذرات معلق در نوشیدنی‌ها می‌شود و آن‌ها را شفاف‌تر و خوش‌طعم‌تر می‌سازد (۱۲).

چسب خرگوش نمونه دیگری از چسب‌های حیوانی است که در صنایع هنری و به خصوص در نقاشی و مرمت آثار هنری استفاده می‌شود. این چسب از پوست خرگوش به دست می‌آید و به دلیل خاصیت چسبندگی بالا و مقاومت در برابر ترک خوردن، برای چسباندن بوم به چارچوب‌های چوبی و نیز به عنوان پرایمر قبل از رنگ‌آمیزی مورد استفاده قرار می‌گیرد (۱۲).

همچنین، چسب استخوان<sup>۲</sup> که از استخوان‌های حیوانات به دست می‌آید، یکی از قدیمی‌ترین چسب‌های مورد استفاده در صنایع چوب و مبلمان است. این چسب به دلیل خاصیت چسبندگی قوی و توانایی ایجاد اتصالات محکم، همچنان در مرمت مبلمان‌های قدیمی و کارهای دستی چوبی کاربرد دارد (۱۳).

با توجه به روند رو به افزایش استفاده از مواد طبیعی و زیست‌سازگار، چسب‌های حیوانی بار دیگر در برخی صنایع مورد توجه قرار گرفته‌اند. هرچند با پیشرفت فناوری و ظهور چسب‌های سنتزی، استفاده از چسب‌های حیوانی کاهش یافته است، اما به دلیل خواص

<sup>5</sup> Starch-based Adhesives

<sup>6</sup> Cellulose-based adhesives

<sup>7</sup> Gum-based adhesives

<sup>8</sup> Protein-based adhesives

<sup>1</sup> Animal glues

<sup>2</sup> Isinglass

<sup>3</sup> Rabbit skin glue

<sup>4</sup> Bone glue

و سپس اعمال آن بر روی سطح مورد نظر است که پس از مدتی، با واکنش شیمیایی این دو جزء، چسب سخت و مقاومی ایجاد می‌شود. یکی از کاربردهای مهم چسب‌های اپوکسی در صنعت ساختمان است. این چسب‌ها برای اتصال بتن، سنگ، فلزات و دیگر مواد ساختمانی به کار می‌روند. به عنوان مثال، در تعمیر ترک‌ها و شکاف‌های موجود در سازه‌های بتنی، چسب اپوکسی به عنوان ماده‌ای پرکننده و اتصال‌دهنده استفاده می‌شود. این چسب‌ها به دلیل توانایی بالا در تحمل بارهای سنگین و شرایط محیطی سخت، گزینه‌ای مناسب برای تعمیرات ساختمانی هستند (۱۷).

در صنعت خودروسازی نیز چسب‌های اپوکسی نقش مهمی ایفا می‌کنند. از این چسب‌ها برای اتصال قطعات فلزی و پلاستیکی خودروها استفاده می‌شود. به عنوان مثال، در مونتاژ بدنه خودرو، قطعات فلزی با استفاده از چسب‌های اپوکسی به یکدیگر متصل می‌شوند. این چسب‌ها به دلیل مقاومت بالا در برابر لرزش‌ها، ضربات و دماهای متغیر، موجب افزایش عمر و دوام قطعات خودرو می‌شوند (۱۸).

صنعت الکترونیک نیز یکی دیگر از حوزه‌هایی است که چسب‌های اپوکسی به طور گسترده در آن به کار می‌روند. این چسب‌ها برای محافظت از قطعات الکترونیکی در برابر رطوبت، گرد و غبار و ضربه‌های مکانیکی استفاده می‌شوند. برای مثال، در تولید بردهای مدار چاپی، چسب‌های اپوکسی به عنوان لایه‌ای محافظ بر روی مدارها اعمال می‌شوند تا از آسیب‌های فیزیکی و شیمیایی جلوگیری کنند. چسب‌های اپوکسی شفاف نیز به عنوان یک گزینه مناسب برای تعمیرات خانگی و کارهای دستی شناخته می‌شوند. این چسب‌ها به دلیل شفافیت و مقاومت بالای خود، برای تعمیر وسایل شیشه‌ای، چوبی و پلاستیکی مناسب هستند. به عنوان مثال، در تعمیر شکستگی‌های ظروف شیشه‌ای یا اتصال قطعات چوبی کوچک، از چسب‌های اپوکسی شفاف استفاده می‌شود (۱۸).

#### ۵-۱-۲- چسب‌های سیلیکونی<sup>۲</sup>

چسب‌های سیلیکونی نوعی چسب هستند که پایه اصلی آنها سیلیکون است (شکل ۳) و به دلیل ویژگی‌های منحصر به فردشان در بسیاری از صنایع و کاربردهای مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. این چسب‌ها به دلیل انعطاف‌پذیری، مقاومت بالا در برابر گرما، آب و شرایط محیطی سخت، و همچنین توانایی اتصال به سطوح مختلف، از محبوبیت بالایی برخوردارند (۱).

در چسب‌های سلولزی، سلولز از منابعی مانند پنبه، چوب و خمیر کاغذ استخراج می‌شود. ساختار شیمیایی آنها پلیمر خطی از واحدهای گلوکز متصل به هم از طریق پیوند  $\beta(1\rightarrow4)$  می‌باشد. سازوکار چسبندگی آنها بدین صورت است که سلولز محلول در آب با ایجاد پیوندهای هیدروژنی بین مولکول‌های سلولز و سطح، چسبندگی را فراهم می‌کند. کاربرد آنها در چسب نوار چسب‌های کاغذی است و متیل سلولز و کربوکسی متیل سلولز در چسب‌های ساختمانی که برای اتصال بتن، سنگ، فلزات و دیگر مواد ساختمانی بکار برده می‌شود.

چسب‌های صمغی از صمغ از گیاهانی مانند افاقیا، گوار و درخت کارایا به دست می‌آید. ساختار شیمیایی آنها متشکل از پلی‌ساکاریدهای طبیعی که شامل واحدهای قندی مانند مانوز، گالاکتوز و گلوکز هستند، می‌باشد و سازوکار چسبندگی در آنها بدین صورت است که صمغ‌ها به واسطه حل شدن در آب و ایجاد گرانشی بالا، چسبندگی ایجاد می‌کنند. به عنوان مثال چسب صمغ افاقیا در صنایع غذایی و صمغ گوار در داروسازی مورد استفاده قرار می‌گیرند (۱۴).

چسب‌های پروتئینی از پروتئین‌های گیاهی مانند گلوتن گندم و سویا تهیه می‌شوند. ساختار شیمیایی این چسب‌ها زنجیره‌های آمینواسیدی با قابلیت تشکیل پیوندهای هیدروژنی و واندروالس است. سازوکار چسبندگی در این نوع چسب‌ها مبتنی بر ساختار پروتئین‌ها است. پروتئین‌ها به واسطه دناتور شدن در فرآیند چسبندگی و ایجاد شبکه‌های پیوسته ساختار سطح را تثبیت می‌کنند. این چسب‌ها به عنوان چسب‌های تخته سه‌لا و چسب‌های غذایی مورد استفاده قرار می‌گیرند (۱۶، ۱۵).

#### ۵- دسته‌بندی چسب‌ها بر اساس ساختار شیمیایی

این دسته‌بندی به نوع ماده اولیه و ترکیب شیمیایی چسب‌ها اشاره دارد و به چسب‌های پلیمری یا آلی، چسب‌های غیرآلی و چسب‌های هیبریدی تقسیم‌بندی می‌شوند.

#### ۵-۱- چسب‌های پلیمری یا آلی

##### ۵-۱-۱- چسب‌های اپوکسی<sup>۲</sup>

چسب‌های اپوکسی، نوعی چسب دو جزئی هستند که از رزین اپوکسی و عامل پخت تشکیل شده‌اند (شکل ۲). این چسب‌ها به دلیل مقاومت بالا در برابر عوامل شیمیایی، گرمایی و مکانیکی، در بسیاری از صنایع و کاربردهای تخصصی مورد استفاده قرار می‌گیرند. فرآیند عمل‌آوری چسب‌های اپوکسی شامل مخلوط کردن رزین و عامل پخت

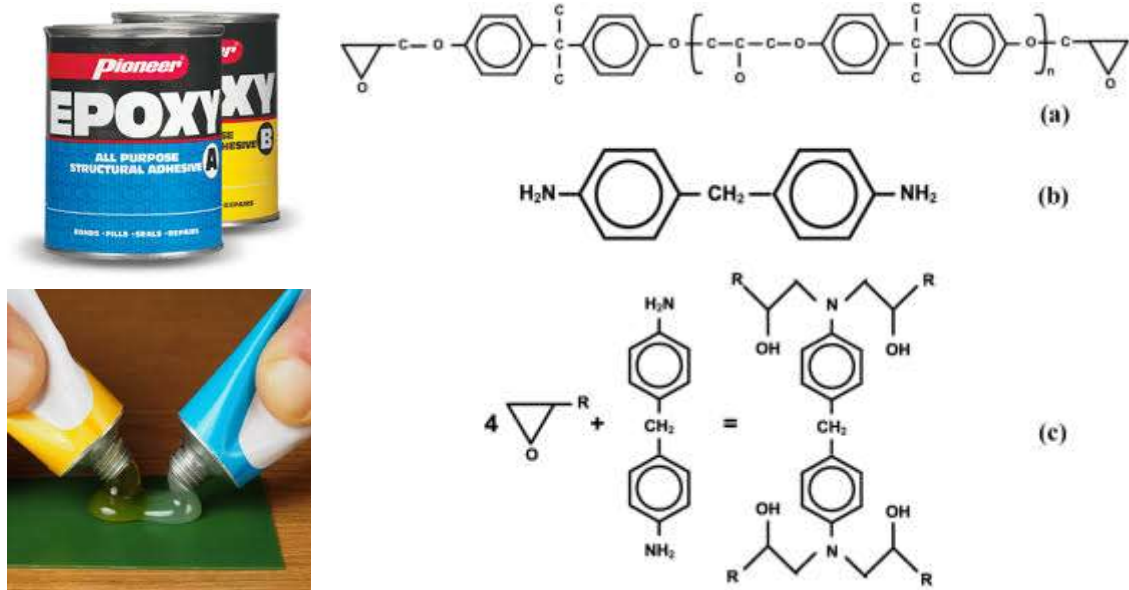
از دست دادن ساختار سه‌بعدی مولکول است، اما پیوندهای کووالانسی اصلی (مانند پیوندهای پپتیدی در پروتئین‌ها) دست‌نخورده باقی می‌مانند.

<sup>2</sup> Epoxy adhesives

<sup>3</sup> Silicone adhesives

<sup>۱</sup> دناتور شدن به فرآیندی گفته می‌شود که در آن ساختار طبیعی یک مولکول زیستی، به ویژه پروتئین یا اسید نوکلئیک، تحت تأثیر عوامل مختلف تغییر می‌کند و ویژگی‌های زیستی خود را از دست می‌دهد. این تغییر شامل





شکل ۲: ساختار شیمیایی چسب اپوکسی (EPON828): (a) رزین اپوکسی (DEGBA)، (b) مولکول متقابل پیوند دهنده (MDA) و (c) واکنش شیمیایی درگیر در پخت یک DEGBA با یک مولکول MDA (۱۷).

Figure 2: Chemical structure of epoxy adhesive (EPON828): a) Epoxy resin (DEGBA), b) Cross-linking molecule (MDA), and c) Chemical reaction involved in curing a DEGBA with a MDA molecule (17).



شکل ۳: چسب سیلیکونی و تفنگ اعمال آن.

Figure 3: Silicone adhesive and its application gun.

مختلف خودرو، از جمله موتور، سیستم‌های خنک‌کننده و سیستم‌های آگزوز، به کار می‌روند. به عنوان مثال، برای آب‌بندی درزهای موتور و جلوگیری از نشت روغن و مایعات دیگر، از چسب‌های سیلیکونی استفاده می‌شود. این چسب‌ها به دلیل مقاومت بالا در برابر گرما و مواد شیمیایی، گزینه‌ای مناسب برای کاربردهای خودرویی هستند. صنعت الکترونیک نیز از دیگر حوزه‌هایی است که چسب‌های سیلیکونی در آن بسیار مفید واقع می‌شوند. این چسب‌ها به عنوان مواد محافظ و درزگیر در تولید و مونتاژ قطعات الکترونیکی و بردهای مدار چاپی استفاده می‌شوند. به عنوان مثال، در تولید گوشی‌های هوشمند و دستگاه‌های

یکی از کاربردهای مهم چسب‌های سیلیکونی در صنعت ساختمان و ساخت‌وساز است. این چسب‌ها به عنوان مواد درزگیر در پنجره‌ها، درها، نماهای شیشه‌ای و اتصالات خارجی ساختمان‌ها استفاده می‌شوند. به عنوان مثال، برای درزگیری پنجره‌های شیشه‌ای و جلوگیری از نفوذ آب و هوا، از چسب‌های سیلیکونی بهره می‌برند. این چسب‌ها به دلیل مقاومت بالا در برابر تغییرات دما و پرتو فرابنفش، برای استفاده در فضای باز و شرایط آب و هوایی مختلف بسیار مناسب هستند. در صنعت خودروسازی نیز چسب‌های سیلیکونی کاربرد گسترده‌ای دارند. این چسب‌ها برای درزگیری و آب‌بندی قطعات

محصولات بسته‌بندی استفاده می‌شوند. نوارهای چسب اکریلیک به دلیل شفافیت، چسبندگی قوی و مقاومت در برابر تغییرات دما و رطوبت، برای بسته‌بندی‌های صنعتی و مصرفی مناسب هستند. به عنوان مثال، در بسته‌بندی مواد غذایی و محصولات دارویی که نیاز به حفظ کیفیت و ایمنی بالا دارند، از نوارهای چسب اکریلیک استفاده می‌شود (۲۱).

صنعت خودرو نیز یکی از زمینه‌های کاربرد چسب‌های اکریلیک است. این چسب‌ها برای اتصال و درزگیری قطعات مختلف خودرو، از جمله صفحه‌های بدنه، شیشه‌ها و قطعات داخلی استفاده می‌شوند. به عنوان مثال، در نصب شیشه جلو و عقب خودرو، چسب‌های اکریلیک به دلیل مقاومت بالا در برابر لرزش و شرایط محیطی مختلف، انتخابی ایده‌آل هستند. این چسب‌ها همچنین به کاهش سروصدا و ارتعاشات کمک می‌کنند و باعث افزایش راحتی و ایمنی در خودرو می‌شوند (۲۲).

صنعت تبلیغات و تابلوها نیز از دیگر حوزه‌های استفاده از چسب‌های اکریلیک است. این چسب‌ها برای اتصال و نصب انواع تابلوها، بنرها و پوسته‌های تبلیغاتی به کار می‌روند. به عنوان مثال، در نصب تابلوهای تبلیغاتی بزرگ در فضای باز، چسب‌های اکریلیک به دلیل مقاومت در برابر پرتو فرابنفش و شرایط جوی نامساعد، گزینه‌ای مناسب هستند و به طول عمر و دوام تابلوها کمک می‌کنند (۲۱). شکل ۴ ساختار شیمیایی چسب‌های اکریلیک معمولی حساس به فشار (۲۲).

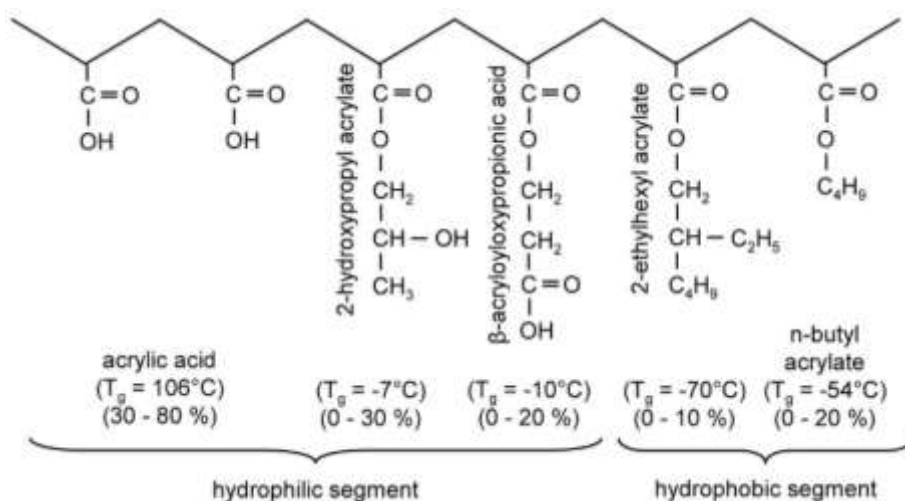
الکترونیکی دیگر، از چسب‌های سیلیکونی برای محافظت از قطعات حساس در برابر رطوبت و گرد و غبار بهره می‌برند (۱۹، ۱۰). چسب‌های سیلیکونی پزشکی نیز به طور گسترده‌ای در صنایع بهداشتی و پزشکی کاربرد دارند. این چسب‌ها به دلیل زیست‌سازگاری و عدم تحریک پوست، برای تولید انواع وسایل پزشکی و پروتزها استفاده می‌شوند. به عنوان مثال، در تولید بانداژها و چسب‌های زخم، از چسب‌های سیلیکونی استفاده می‌شود که به پوست نمی‌چسبند و به راحتی جدا می‌شوند، بدون اینکه به زخم آسیب برسانند (۱۹).

### ۵-۱-۳- چسب‌های اکریلیک<sup>۱</sup>

چسب‌های اکریلیک نوعی چسب‌های پلیمری هستند که بر پایه مونومرهای اکریلیک ساخته می‌شوند (شکل ۴). این چسب‌ها به دلیل خواص چسبندگی قوی، مقاومت بالا در برابر پرتو فرابنفش و شرایط محیطی سخت و توانایی اتصال به سطوح مختلف، در بسیاری از صنایع و کاربردها مورد استفاده قرار می‌گیرند.

یکی از کاربردهای اصلی چسب‌های اکریلیک در صنعت ساختمان است. این چسب‌ها به طور گسترده‌ای برای نصب و اتصال انواع مصالح ساختمانی مانند صفحه‌های دیواری، کاشی‌ها و کف‌پوش‌ها استفاده می‌شوند. به عنوان مثال، در نصب کاشی‌های دیواری و کف، چسب‌های اکریلیک به دلیل چسبندگی قوی و مقاومت در برابر رطوبت، گزینه‌ای مناسب هستند. این چسب‌ها همچنین برای درزگیری و آب‌بندی اتصالات در حمام و آشپزخانه نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند (۲۰).

در صنعت بسته‌بندی، چسب‌های اکریلیک نقش مهمی ایفا می‌کنند. این چسب‌ها برای تولید نوارهای چسب، برچسب‌ها و انواع



شکل ۴: ساختار شیمیایی چسب‌های اکریلیک معمولی حساس به فشار (۲۲).

Figure 4: Chemical structure of common acrylic pressure-sensitive adhesives (22).

<sup>1</sup> Acrylic adhesives



۵-۱-۴- چسب‌های پلی یورتان<sup>۱</sup>

چسب‌های پلی یورتان نوعی چسب‌های پلیمری هستند که بر پایه پلی یورتان ساخته می‌شوند و به دلیل خواص چسبندگی قوی، مقاومت بالا در برابر رطوبت و شرایط محیطی مختلف و توانایی اتصال به سطوح مختلف، کاربردهای گسترده‌ای در صنایع و مصارف خانگی دارند. این چسب‌ها به دو صورت یک‌جزئی و دوجزئی موجود هستند و بسته به نیاز می‌توانند در طیف وسیعی از کاربردها مورد استفاده قرار گیرند.

یکی از کاربردهای اصلی چسب‌های پلی یورتان در صنعت ساخت و ساز است. این چسب‌ها به دلیل مقاومت بالا در برابر آب و شرایط جوی، به عنوان مواد چسبنده و درزگیر در سازه‌های مختلف استفاده می‌شوند. به عنوان مثال، برای اتصال و آببندی صفحه‌های ساختمانی، کاشی‌ها و کفپوش‌ها، از چسب‌های پلی یورتان استفاده می‌شود. این چسب‌ها همچنین در نصب و آببندی درها و پنجره‌ها به کار می‌روند و به دلیل مقاومت در برابر تغییرات دما و رطوبت، عمر طولانی‌تری دارند (۲۳).

در صنعت خودروسازی، چسب‌های پلی یورتان نقش مهمی ایفا می‌کنند. این چسب‌ها برای اتصال و درزگیری قطعات مختلف خودرو از جمله شیشه‌ها و قطعات داخلی استفاده می‌شوند. به عنوان مثال، در نصب شیشه جلو و عقب خودرو، از چسب‌های پلی یورتان استفاده می‌شود که به دلیل مقاومت بالا در برابر لرزش، ضربه‌ها و شرایط جوی، امنیت و دوام بالایی را فراهم می‌کنند. این چسب‌ها همچنین به کاهش سروصدا و ارتعاشات در خودرو کمک می‌کنند (۲۴).

صنعت چوب و مبلمان نیز یکی دیگر از حوزه‌هایی است که چسب‌های پلی یورتان در آن کاربرد گسترده‌ای دارند. این چسب‌ها به دلیل چسبندگی قوی و مقاومت بالا در برابر رطوبت، برای اتصال قطعات چوبی و تولید مبلمان مورد استفاده قرار می‌گیرند. به عنوان مثال، در تولید مبلمان خارجی که در معرض شرایط جوی قرار دارند، از چسب‌های پلی یورتان استفاده می‌شود تا مقاومت و دوام بالایی را در برابر رطوبت و تغییرات دما فراهم کنند (۲۴).

صنعت دریایی نیز از چسب‌های پلی یورتان بهره می‌برد. این چسب‌ها به دلیل مقاومت بالا در برابر آب شور و شرایط محیطی دریایی، برای اتصال و درزگیری قطعات مختلف قایق‌ها و کشتی‌ها استفاده می‌شوند. به عنوان مثال، در تعمیر و نگهداری قایق‌های تفریحی و کشتی‌ها، از چسب‌های پلی یورتان برای درزگیری و آببندی اتصالات و همچنین اتصال قطعات مختلف بدنه استفاده می‌شود (۲۵).

۵-۱-۵- چسب‌های فنولیک<sup>۲</sup>

چسب‌های فنولیک یکی از انواع مهم چسب‌های صنعتی هستند که به دلیل خواص مکانیکی و شیمیایی منحصر به فردشان در صنایع

مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. این چسب‌ها بر پایه رزین‌های فنولیک ساخته می‌شوند که از ترکیب فنل با فرمالدهید تولید می‌شوند (شکل ۵). چسب‌های فنولیک به دلیل مقاومت بالا در برابر گرما، مواد شیمیایی و رطوبت، در کاربردهایی که نیاز به دوام و استحکام بالا دارند، بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند (۲۶).

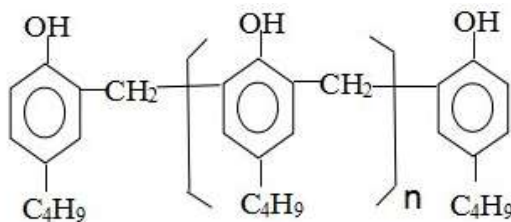
یکی از مهم‌ترین کاربردهای چسب‌های فنولیک در صنعت هوافضا است. به عنوان مثال، در تولید بدنه هواپیماها از کامپوزیت‌هایی استفاده می‌شود که با چسب‌های فنولیک به هم متصل شده‌اند. این چسب‌ها به دلیل مقاومت گرمایی بالا، می‌توانند در شرایط سخت و دمای بالا عملکرد خوبی داشته باشند. همچنین، مقاومت به خوردگی و خواص ضدآب این چسب‌ها، آنها را برای استفاده در بخش‌هایی از هواپیما که در معرض رطوبت و عوامل جوی قرار دارند، مناسب می‌سازد (۲۶).

مثال دیگر از کاربرد چسب‌های فنولیک در صنعت خودروسازی است. این چسب‌ها برای اتصال قطعات مختلف خودرو مانند لنت‌های ترمز، صفحات کلاچ و قطعات موتور به کار می‌روند. لنت‌های ترمز که باید در برابر گرما و فشار بالا مقاومت داشته باشند، با استفاده از چسب‌های فنولیک به پایه‌های فلزی متصل می‌شوند. خواص مکانیکی و گرمایی چسب‌های فنولیک موجب می‌شود که این قطعات تحت شرایط سخت عملکرد مطمئنی داشته باشند و عمر مفید بالایی داشته باشند (۲۷).

در صنایع الکتریکی و الکترونیکی نیز از چسب‌های فنولیک استفاده می‌شود. به عنوان نمونه، این چسب‌ها برای اتصال و عایق‌بندی قطعات الکتریکی که نیاز به مقاومت در برابر گرما و مواد شیمیایی دارند، به کار می‌روند. این ویژگی‌ها موجب می‌شود که چسب‌های فنولیک در تولید بردهای مدار چاپی و قطعات الکترونیکی با کارایی بالا و دوام طولانی، بسیار مؤثر باشند (۲۸).

۵-۲- چسب‌های غیرآلی (چسب‌های سرامیکی)<sup>۳</sup>

چسب‌های سرامیکی نوعی از چسب‌های غیرآلی هستند که برای اتصال یا درزگیری قطعاتی طراحی شده‌اند که در شرایط دمایی بسیار بالا یا محیط‌های شیمیایی خورنده به کار می‌روند.



شکل ۵: ساختار شیمیایی رزین‌های فنولیک.

Figure 5: Chemical structure of phenolic resins.

<sup>3</sup> Ceramic adhesives

<sup>1</sup> Polyurethane adhesives

<sup>2</sup> Phenolic adhesives

عالی به فلزات و پلاستیک‌ها و همچنین مقاومت در برابر شرایط سخت جوی و گرمایی، در صنعت خودروسازی محبوب هستند. استفاده از این چسب‌ها می‌تواند به کاهش وزن خودروها و افزایش ایمنی و دوام آنها کمک کند (۳۳).

در صنعت الکترونیک، چسب‌های هیبریدی نیز به دلیل قابلیت‌های ویژه‌شان کاربرد دارند. برای مثال، چسب‌های هیبریدی که از ترکیب رزین‌های اپوکسی و سیلیکون تولید می‌شوند، به دلیل خواص عایق‌بندی خوب و مقاومت در برابر دماهای بالا، در مونتاژ و چسباندن قطعات الکترونیکی استفاده می‌شوند. این چسب‌ها می‌توانند به حفاظت از مدارهای الکترونیکی در برابر آسیب‌های گرمایی و شیمیایی کمک کنند و به افزایش عمر مفید تجهیزات الکترونیکی منجر شوند (۳۴).

### ۶- دسته‌بندی بر اساس عملکرد چسب

این دسته‌بندی به نحوه عملکرد و کاربرد چسب اشاره دارد و شامل چسب‌های ساختاری و غیر ساختاری، چسب‌های آب‌بندی و درزگیری و چسب‌های رسانا می‌باشند.

#### ۶-۱- چسب‌های ساختاری

چسب‌هایی با استحکام بالا که برای اتصال قطعات اصلی در سازه‌ها استفاده می‌شوند و شامل چسب‌های اپوکسی، پلی‌یورتان، سیلیکونی، اکریلیک، فنلیک و چسب‌های سیانواکریلات (چسب قطره‌ای) می‌باشند که قبلاً در مورد آنها صحبت شده است.

#### ۶-۲- چسب‌های غیرساختاری

این چسب‌ها برای کاربردهای ساده‌تر که نیاز به استحکام بالایی ندارند استفاده می‌شوند و شامل چسب‌های گرمایی، چسب‌های حساس به فشار، چسب‌های محلول در آب و چسب‌های رسانا می‌باشند.

#### ۶-۲-۱- چسب‌های گرمایی<sup>۲</sup>

چسب‌های گرمایی، یا همان چسب‌های گرمادوب، نوعی چسب هستند که با گرم شدن به حالت مایع در می‌آیند و پس از سرد شدن به سرعت سخت می‌شوند و ایجاد اتصال می‌کنند. این چسب‌ها به دلیل سرعت بالای اتصال، سهولت استفاده و قابلیت استفاده در انواع مختلف مواد، به ویژه در صنایع و کارهای دستی، بسیار محبوب هستند (شکل ۶).

یکی از پرکاربردترین انواع چسب‌های گرمایی، چسب گرمایی میله‌ای است که به وسیله‌ی تفنگ چسب‌آمورد استفاده قرار می‌گیرد (شکل ۶).

این چسب‌ها معمولاً از مواد معدنی مانند سیلیکات‌ها، اکسیدها و کربنات‌ها تشکیل شده‌اند و به دلیل خواص منحصر به فردشان، در صنایع خاصی مورد استفاده قرار می‌گیرند. از ویژگی‌های چسب‌های سرامیکی می‌توان به مقاومت حرارتی بسیار بالا تا بیش از ۱۵۰۰ درجه سانتی‌گراد، مقاومت شیمیایی در برابر مواد خورنده مانند اسیدها، بازها و گازهای شیمیایی، خواص مکانیکی قوی مخصوصاً استحکام و سختی زیاد در دماهای بالا، غیرقابل احتراق بودن در برابر آتش و شعله، پایداری ابعادی تحت شرایط شدید حرارتی یا فشاری و عایق حرارتی و الکتریکی اشاره کرد (۲۹).

ماده اصلی در چسب‌های سرامیکی معمولاً سیلیکات سدیم، آلومینات‌ها، اکسیدهای فلزی هستند و پرکننده‌هایی مانند ذرات ریز سرامیکی یا شیشه‌ای برای بهبود خواص مکانیکی و حرارتی وجود دارد. همچنین برای تنظیم گرانشی، سرعت گیرش و بهبود چسبندگی از افزودنی‌های مناسب استفاده می‌شود (۳۰).

#### ۵-۳- چسب‌های هیبریدی<sup>۱</sup>

چسب‌های هیبریدی، که به عنوان چسب‌های چندمنظوره یا چسب‌های ترکیبی نیز شناخته می‌شوند، نوعی از چسب‌ها هستند که با ترکیب دو یا چند خصوصیت از انواع چسبندگی مختلف، خواص بهبود یافته‌ای را ارائه می‌دهند که شامل همه فناوری چسبندگی می‌شود. این چسب‌ها به دلیل تطبیق‌پذیری و عملکرد بالایشان در شرایط مختلف، در صنایع مختلف کاربردهای گسترده‌ای دارند. ترکیب فناوری‌های مختلف به چسب‌های هیبریدی اجازه می‌دهد که به ویژگی‌های مطلوب از جمله چسبندگی بالا، مقاومت در برابر شرایط محیطی و دوام طولانی مدت دست یابند (۳۱).

یک نمونه از چسب‌های هیبریدی، چسب‌های پلی‌یورتان-سیلیکونی هستند که ترکیبی از پلی‌یورتان و سیلیکون را ارائه می‌دهند. این نوع چسب‌ها به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد هر دو ماده پایه، دارای چسبندگی عالی به مواد مختلف، مقاومت بالا در برابر گرما و رطوبت و انعطاف‌پذیری بالا هستند. به عنوان مثال، در صنعت ساختمان، چسب‌های پلی‌یورتان-سیلیکونی برای چسباندن و درزگیری پنجره‌ها و درب‌ها به کار می‌روند. این چسب‌ها قادرند به خوبی در شرایط جوی مختلف عمل کرده و عمر مفید طولانی‌تری را ارائه دهند (۳۲).

در صنعت خودروسازی، چسب‌های هیبریدی به طور گسترده‌ای برای اتصال و مونتاژ قطعات استفاده می‌شوند. به عنوان مثال، چسب‌های هیبریدی که ترکیبی از رزین‌های اپوکسی و پلی‌یورتان هستند، در مونتاژ قطعات بدنه خودرو، چسباندن شیشه‌ها و حتی در نصب قطعات داخلی به کار می‌روند. این چسب‌ها به دلیل چسبندگی

<sup>3</sup> Glue gun

<sup>1</sup> Hybrid adhesives

<sup>2</sup> Hot melt adhesives

آنها در ایجاد پیوند سریع و پایدار با اعمال فشار جزئی است (۳۶). یکی از کاربردهای متداول چسب‌های فشار - حساس در تولید نوار چسب‌ها است. نوار چسب‌های شفاف، نوار چسب‌های بسته‌بندی، و نوار چسب‌های دوطرفه همگی از چسب‌های فشار-حساس بهره می‌برند. به عنوان مثال، نوار چسب‌های دوطرفه که برای چسباندن کاغذ دیواری، فرش، یا حتی قطعات الکترونیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند، به دلیل قابلیت چسبندگی بالا و عدم نیاز به ابزارهای خاص برای اعمال چسب، بسیار محبوب هستند (۳۷).

در پزشکی نیز چسب‌های فشار - حساس کاربرد گسترده‌ای دارند. بانداها، چسب‌های پزشکی، و نوارهای حرکت‌شناسی نمونه‌هایی از محصولات پزشکی هستند که از چسب‌های فشار - حساس استفاده می‌کنند. این چسب‌ها به دلیل توانایی ایجاد پیوند محکم با پوست بدون ایجاد تحریک و یا آسیب به پوست، برای مصارف پزشکی بسیار مناسب هستند. به عنوان مثال، نوارهای حرکت‌شناسی که برای حمایت از عضلات و مفاصل به کار می‌روند، با استفاده از چسب‌های فشار - حساس به راحتی به پوست چسبیده و قابلیت حرکت را محدود نمی‌کنند (۳۸).

در صنایع الکترونیک و خودروسازی نیز از چسب‌های فشار - حساس استفاده می‌شود. در صنعت الکترونیک، این چسب‌ها برای اتصال قطعات کوچک به بوردهای مدار چاپی، مونتاژ نمایشگرهای الکترونیکی و چسباندن ورقه‌های محافظ استفاده می‌شوند. در صنعت خودروسازی، چسب‌های فشار-حساس برای اتصال قطعات داخلی خودرو، عایق‌بندی صدا و لرزش و نصب قطعات تزئینی استفاده می‌شوند. به عنوان مثال، استفاده از چسب‌های فشار-حساس برای نصب قطعات تزئینی داخلی خودروها نه تنها فرآیند تولید را سرعت می‌بخشد، بلکه دوام و پایداری این قطعات را نیز تضمین می‌کند (۳۹).

### ۶-۲-۳- چسب‌های محلول در آب

چسب‌های محلول در آب نوعی از چسب‌ها هستند که از طریق حل شدن در آب فعال شده و عملکرد چسبندگی خود را نشان می‌دهند.



شکل ۷: نمونه‌هایی از چسب‌های حساس به فشار.  
Figure 7: Examples of pressure-sensitive adhesives.



شکل ۶: چسب گرمایی و تفنگ گرمایی اعمال آن.  
Figure 6: Hot melt adhesive and heat gun for its application.

این نوع چسب در قالب میله‌های جامد به فروش می‌رسد و با قرار دادن آنها در تفنگ چسب، حرارت داده می‌شوند و به حالت مایع در می‌آیند. از این چسب‌ها در کارهای دستی، صنایع کاغذ و کارتن، و حتی در برخی کاربردهای خانگی مانند تعمیرات کوچک و تزئینات استفاده می‌شود. چسب گرمایی پلی‌یورتان نمونه دیگری از این چسب‌ها است که به دلیل مقاومت بالا در برابر رطوبت و شرایط محیطی سخت، در صنایع مختلف کاربرد دارد. این چسب‌ها به خصوص در صنعت چوب و مبلمان، ساخت و ساز و حتی در صنعت خودروسازی مورد استفاده قرار می‌گیرند. به عنوان مثال، در صنعت خودروسازی برای چسباندن قطعات داخلی خودرو، مانند صفحه‌های درونی و روکش‌ها، از چسب‌های گرمایی پلی‌یورتان استفاده می‌شود. یکی از مزایای بزرگ چسب‌های گرمایی، سرعت اتصال بالا است. برخلاف بسیاری از چسب‌های دیگر که برای خشک شدن و ایجاد اتصال قوی نیاز به زمان دارند، چسب‌های گرمایی پس از اعمال به سرعت سرد می‌شوند و اتصال را برقرار می‌کنند. این ویژگی باعث می‌شود که این چسب‌ها در خطوط تولید سریع و فرآیندهای مونتاژ صنعتی بسیار مفید باشند. علاوه بر این، چسب‌های گرمایی اتیلن وینیل استات (EVA) نیز به طور گسترده‌ای در بسته‌بندی و صنایع کاغذی استفاده می‌شوند. این چسب‌ها به دلیل انعطاف‌پذیری بالا و قدرت چسبندگی خوب، در بسته‌بندی‌های مواد غذایی، جعبه‌های کاغذی و کارتن‌ها به کار می‌روند (۳۵).

### ۶-۲-۲- چسب‌های فشار - حساس<sup>۱</sup>

این چسب‌ها با فشار دادن به سطح، چسبندگی ایجاد می‌کنند و در نوار چسب‌ها، برچسب‌ها و بسته‌بندی استفاده می‌شوند (شکل ۷). مزایای آنها شامل سهولت استفاده و عدم نیاز به تجهیزات خاص است. معایب آنها شامل مقاومت کم در برابر دما و حلال‌ها می‌باشد. چسب‌های فشار-حساس نوعی از چسب‌ها هستند که بدون نیاز به گرما، حلال، یا هر گونه فعال‌کننده دیگری، با اعمال فشار ملایم، به سطوح مختلف می‌چسبند. این چسب‌ها در دمای اتاق قابل استفاده بوده و به طور گسترده‌ای در کاربردهای صنعتی، تجاری و خانگی مورد استفاده قرار می‌گیرند. ویژگی اصلی چسب‌های فشار-حساس، توانایی

<sup>2</sup> Kinesiology tapes

<sup>1</sup> Pressure-sensitive adhesives

یون-لیتیم و استفاده در پنل‌های خورشیدی برای اتصالات الکتریکی می‌باشد. چسب‌های رسانا به دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فرد خود، در بسیاری از صنایع جایگزین روش‌های سنتی مانند لحیم‌کاری شده‌اند و با پیشرفت فناوری، نقش بیشتری در مونتاژ قطعات پیشرفته ایفا می‌کنند (۴۵).

## ۷- خواص و عملکرد چسب‌ها

چسب‌ها به عنوان موادی که برای اتصال سطوح مختلف به کار می‌روند، دارای خواص فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی متنوعی هستند که بر اساس نوع مواد تشکیل‌دهنده و کاربردهای خاص آنها تعیین می‌شوند. در زیر به توضیح هر یک از این خواص پرداخته می‌شود (۴۶).

### ۷-۱- خواص فیزیکی

۱. گرانبوی: گرانبوی چسب‌ها نشان‌دهنده مقاومت آنها در برابر جریان است. این خاصیت بر روی قابلیت اعمال چسب و پخش شدن آن بر روی سطوح مختلف تأثیر می‌گذارد. گرانبوی می‌تواند بسته به نوع چسب از کم (مانند چسب‌های فوری) تا بسیار زیاد (مانند چسب‌های اپوکسی غلیظ) متغیر باشد.
۲. نقطه ذوب و نقطه جوش: نقطه ذوب و جوش چسب‌ها تعیین‌کننده محدوده دمایی است که در آن چسب می‌تواند به صورت کارآمد عمل کند. چسب‌های گرمایی باید نقطه ذوب پایین و گیرش سریع داشته باشند، در حالی که چسب‌های مقاوم به گرما مانند چسب‌های سیلیکونی باید نقطه ذوب بالا داشته باشند.
۳. چگالی: چگالی چسب‌ها می‌تواند بر وزن نهایی محصول تأثیر بگذارد. چسب‌های سبک‌تر برای کاربردهایی که وزن نهایی مهم است، مانند صنایع هوافضا، ترجیح داده می‌شوند.

### ۷-۲- خواص شیمیایی

۱. ترکیب شیمیایی: چسب‌ها می‌توانند از مواد طبیعی یا مصنوعی ساخته شوند. ترکیب شیمیایی چسب‌ها نقش مهمی در تعیین خواص آنها دارد. برای مثال، چسب‌های اپوکسی از واکنش بین رزین اپوکسی و عامل پخت تشکیل می‌شوند که پیوندهای عرضی قوی ایجاد می‌کنند (۴۶).
۲. مقاومت شیمیایی: مقاومت چسب‌ها در برابر مواد شیمیایی مانند اسیدها، بازها و حلال‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است. چسب‌های سیلیکونی و اپوکسی معمولاً مقاومت شیمیایی بالایی دارند و برای کاربردهای صنعتی مناسب هستند.

این چسب‌ها معمولاً بر پایه پلیمرهای محلول در آب طراحی شده‌اند و برای کاربردهای خاص در صنایع بسته‌بندی، کاغذ، نساجی و صنایع دستی استفاده می‌شوند (۴۰).

از ویژگی‌های چسب‌های محلول در آب به دلیل اینکه فاقد حلال‌های آلی مضر بوده و اثرات زیست‌محیطی کمی دارند، زیست‌سازگاری آنها است. همچنین غیرسمی بوده و مناسب برای مصارف خانگی و بسته‌بندی مواد غذایی است. این چسب‌ها چسبندگی مناسب به مواد متخلخل مانند کاغذ، مقوا، پارچه و چوب را دارند (۴۱). از ترکیبات اصلی چسب‌های محلول در آب می‌توان از پلی‌وینیل‌الکل (PVA) به عنوان پایه بسیاری از چسب‌های کاغذ و بسته‌بندی نام برد. همچنین پلی‌وینیل‌استات (PVAc) ماده اصلی در چسب‌های چوب و کاغذ است و کربوکسی‌متیل سلولز (CMC) پلیمری محلول در آب با چسبندگی بالا، به‌ویژه برای کاربردهای نساجی و کاغذسازی است. نشاسته و مشتقات آن مانند نشاسته اصلاح‌شده یا دکسترین برای کاربردهای ساده و کم‌هزینه استفاده می‌شود (۴۲).

### ۶-۲-۴- چسب‌های رسانا<sup>۱</sup>

چسب‌های رسانا نوعی چسب خاص هستند که علاوه بر چسبندگی، قابلیت هدایت الکتریسیته یا گرما را نیز دارند. این چسب‌ها با استفاده از مواد رسانای الکتریکی مانند نقره، مس، گرافیت یا نانوذرات طراحی شده‌اند و در صنایع الکترونیک، مخابرات، خودرو و تجهیزات پیشرفته مورد استفاده قرار می‌گیرند (۴۳).

از ویژگی‌های چسب‌های رسانا می‌توان به هدایت الکتریکی آنها از طریق ذرات رسانای موجود در ترکیب چسب اشاره کرد. برخی از انواع این چسب‌ها علاوه بر هدایت الکتریکی، انتقال گرما را نیز انجام می‌دهند. چسبندگی قوی، امکان اتصال قطعات کوچک و حساس الکترونیکی به سطوح مختلف، مقاومت بالا در برابر شرایط محیطی مقاوم در برابر حرارت، رطوبت و مواد شیمیایی و سازگاری با مواد مختلف قابل استفاده برای اتصال فلزات، سرامیک‌ها، شیشه و پلیمرها، از خصوصیات این چسب‌ها می‌باشند.

ترکیبات اصلی چسب‌های رسانا شامل پایه چسب است، که معمولاً شامل مواد پلیمری مانند اپوکسی، سیلیکون یا اکریلیک می‌باشد. مواد رسانا که می‌تواند فلزاتی مثل نقره، مس، طلا یا آلومینیم، کربن به‌صورت‌های گرافیت، نانولوله‌های کربنی و نقاط کوانتومی کربن، پلیمرهای هادی مانند پلی‌آنیلین، پلی‌پیرول و پلی‌تیوفن و نانوذرات فلزی یا ترکیبات اکسیدی باشند (۴۴).

کاربرد چسب‌های رسانا بیشتر در اتصال قطعات الکترونیکی مانند LED، مدارها و تراشه‌ها، مونتاژ سلول‌های خورشیدی و باتری‌های

<sup>4</sup> Density

<sup>5</sup> Chemical resistance

<sup>1</sup> Conductive Adhesives

<sup>2</sup> Viscosity

<sup>3</sup> Melting and boiling point

چسب‌های سیلیکونی می‌توانند در دماهای بسیار بالا (بیش از ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد) نیز مقاوم باشند (۳۸).

#### ۸-۲- تأثیر رطوبت بر چسبندگی

رطوبت می‌تواند به دو صورت بر عملکرد چسب‌ها تأثیر بگذارد: اولاً، می‌تواند مستقیماً بر روی چسب اثر بگذارد و خواص فیزیکی و شیمیایی آن را تغییر دهد. ثانیاً، می‌تواند با تغییر خصوصیات سطح چسبانده‌شده، مانند جذب آب توسط مواد جاذب رطوبت، اثر بگذارد (۳۸).

جذب آب و عملکرد چسب: چسب‌هایی مانند چسب‌های پلی‌یورتان ممکن است در حضور رطوبت دچار واکنش‌های اضافی شوند که می‌تواند به بهبود یا تضعیف خواص چسب منجر شود. چسب‌های سیانوآکریلات، معروف به چسب‌های فوری، نیز برای گیرش به مقدار کمی رطوبت نیاز دارند، اما رطوبت زیاد می‌تواند موجب تشکیل سفیدک‌ها یا تخریب اتصال شود (۳۸).

#### ۸-۳- نوع سطح تأثیر نوع سطح بر چسبندگی

نوع و وضعیت سطح چسبانده‌شده نقش حیاتی در عملکرد چسب‌ها ایفا می‌کند. سطوح صاف و تمیز معمولاً چسبندگی بهتری را فراهم می‌کنند، زیرا امکان تماس بیشتری بین چسب و سطح وجود دارد. برعکس، سطوح آلوده یا دارای روغن و گرد و غبار می‌توانند مانع از ایجاد پیوند محکم شوند (۳۹).

خصوصیات سطحی: خصوصیات سطحی مانند انرژی سطح، زبری و پرزدار بودن می‌تواند به شدت بر چسبندگی اثر بگذارد. سطوح با انرژی سطحی بالا مانند فلزات به طور معمول چسبندگی بهتری با چسب‌ها دارند، در حالی که سطوح با انرژی سطحی پایین مانند پلاستیک‌ها ممکن است به پیش‌تیمارهایی مانند استفاده از پرایمرها یا انجام عملیات‌های سطحی نیاز داشته باشند (۳۹).

#### ۹- معیارهای ارزیابی عملکرد چسب‌ها

ارزیابی عملکرد چسب‌ها بر اساس معیارهای مختلفی صورت می‌گیرد که هر کدام به جوانب خاصی از ویژگی‌های چسب مرتبط است. این معیارها شامل خواص مکانیکی، گرمایی، شیمیایی و دوام چسب هستند. در ادامه به این معیارها می‌پردازیم (۴۰).

#### ۹-۱- استحکام مکانیکی<sup>۶</sup>

استحکام کششی<sup>۷</sup>: استحکام کششی نشان‌دهنده توانایی چسب در مقاومت در برابر نیروی کششی قبل از شکست است. این آزمون

۳. پایداری گرمایی: چسب‌ها باید در محدوده دمایی وسیعی پایدار باشند. چسب‌های سیلیکونی و برخی از چسب‌های فنولیک می‌توانند دماهای بالا را تحمل کنند بدون اینکه خواص چسبندگی خود را از دست بدهند.

#### ۷-۳- خواص مکانیکی

۱. استحکام کششی: استحکام کششی چسب‌ها میزان نیرویی است که می‌تواند قبل از شکستن تحمل کند. این خاصیت برای کاربردهایی که چسب تحت بارهای کششی قرار می‌گیرد، مانند اتصالات ساختاری، بسیار مهم است.

۲. مدول یانگ: مدول یانگ نشان‌دهنده سختی و انعطاف‌پذیری چسب است. چسب‌هایی با مدول یانگ بالا سفت‌تر و کمتر انعطاف‌پذیر هستند، در حالی که چسب‌هایی با مدول یانگ پایین انعطاف‌پذیرتر و کشسان‌تر هستند.

۳. چقرمگی: چقرمگی به توانایی چسب در جذب انرژی قبل از شکست اشاره دارد. چسب‌های با چقرمگی بالا مانند چسب‌های پلی‌یورتان، می‌توانند در برابر ضربه‌ها و لرزش‌ها مقاومت کنند.

۴. چسبندگی اولیه: چسبندگی اولیه به سرعت و قدرت اتصال اولیه چسب پس از اعمال بر سطح اشاره دارد. چسب‌های فشار-حساس معمولاً چسبندگی اولیه بالایی دارند که برای کاربردهایی مانند نوارچسب و برچسب‌ها مناسب است (۴۶).

#### ۸- عوامل مؤثر بر عملکرد چسب‌ها

عملکرد چسب‌ها تحت تأثیر عوامل مختلفی قرار می‌گیرد که می‌تواند بر کیفیت و دوام اتصال تأثیر بگذارد. از جمله مهم‌ترین این عوامل می‌توان به دما، رطوبت و نوع سطح چسبانده‌شده اشاره کرد. در ادامه به بررسی این عوامل می‌پردازیم (۳۸).

#### ۸-۱- تأثیر دما بر چسبندگی

دما نقش مهمی در فرآیند پخت و عملکرد نهایی چسب‌ها دارد. در دماهای پایین، سرعت واکنش‌های شیمیایی کاهش یافته و ممکن است زمان گیرش طولانی شود، که می‌تواند منجر به اتصالات ضعیف‌تر گردد. بالعکس، دماهای بالا می‌تواند سرعت پخت را افزایش داده و زمان گیرش را کاهش دهد، اما ممکن است باعث تخریب برخی از چسب‌ها یا کاهش استحکام آنها در دماهای بسیار بالا شود (۳۸).

نقاط دمای بحرانی: هر چسب دارای یک محدوده دمایی بهینه برای عملکرد است. برای مثال، چسب‌های اپوکسی معمولاً در دماهای بالاتر از ۶۰ درجه سانتی‌گراد بهترین عملکرد را دارند، در حالی که

<sup>۵</sup> Initial tack

<sup>۶</sup> Mechanical strength

<sup>۷</sup> Tensile strength

<sup>۱</sup> Thermal stability

<sup>۲</sup> Tensile strength

<sup>۳</sup> Young's modulus

<sup>۴</sup> Toughness

مقاومت در برابر پرتو فرابنفش: چسب‌هایی که در معرض نور خورشید قرار می‌گیرند، باید مقاومت خوبی در برابر تخریب ناشی از پرتو فرابنفش (UV) داشته باشند. آزمون‌های مقاومت در برابر UV شامل قرار دادن نمونه‌ها در معرض نور UV و ارزیابی تغییرات در خواص چسب‌ها است (۴۰).

### ۱۰- کاربردهای چسب‌ها

چسب‌ها در صنایع مختلف نقش بسیار مهمی ایفا می‌کنند و به دلیل ویژگی‌های خاص خود مانند چسبندگی بالا، انعطاف‌پذیری، مقاومت در برابر دما و شرایط محیطی مختلف و سهولت استفاده، جایگزین روش‌های سنتی مانند جو شکاری و پیچ و مهره شده‌اند. در ادامه به کاربرد چسب‌ها در صنایع مختلف پرداخته می‌شود.

چسب‌ها در خودروسازی برای اتصال قطعات بدنه و داخلی خودرو مانند صفحه‌های داخلی، شیشه‌ها و سیستم‌های صوتی استفاده می‌شوند. استفاده از چسب‌ها می‌تواند به کاهش وزن خودرو کمک کند، زیرا نیازی به استفاده از پیچ و مهره‌های سنگین نیست. چسب‌ها به عنوان عایق‌های صوتی و گرمایی نیز عمل می‌کنند، که به کاهش صدا و افزایش کارایی سیستم‌های گرمایشی و سرمایشی کمک می‌کند. بطور مثال شرکت تسلا از چسب‌های ساختاری برای اتصال صفحه‌های بدنه و شاسی استفاده می‌کند. این چسب‌ها به کاهش وزن خودرو کمک می‌کنند و باعث افزایش استحکام و ایمنی خودرو می‌شوند. از مزایای آن می‌توان به کاهش وزن خودرو، بهبود مصرف سوخت، کاهش سر و صدا و ارتعاشات اشاره کرد. در یک پروژه تحقیقاتی شرکت BMW درباره استفاده از چسب‌های پلی‌یورتان برای اتصال شیشه‌های جلو و عقب خودرو استفاده کرده است. این چسب‌ها علاوه بر ایجاد اتصال محکم، به عنوان عایق گرمایی و صوتی نیز عمل کردند که باعث کاهش زمان مونتاژ، بهبود عملکرد عایق‌بندی و افزایش راحتی سرنشینان شد (۴۷).

در صنعت هوافضا، چسب‌ها برای اتصال قطعات مختلف سازه‌ای مانند بال‌ها و بدنه هواپیما استفاده می‌شوند. چسب‌های مورد استفاده در این صنعت باید مقاومت بالایی در برابر تغییرات دما و فشار داشته باشند. چسب‌ها به کاهش وزن هواپیماها کمک می‌کنند، که این مسئله بسیار حیاتی است زیرا کاهش وزن می‌تواند مصرف سوخت را کاهش دهد و کارایی حرکت را افزایش دهد. به عنوان مثال در ساخت بدنه هواپیماهای بوئینگ ۷۸۷، از چسب‌های اپوکسی برای اتصال کامپوزیت‌های الیاف کربن استفاده می‌شود. این چسب‌ها وزن هواپیما را کاهش داده و مقاومت ساختاری را افزایش می‌دهند. از مزایای آن می‌توان به کاهش مصرف سوخت، افزایش برد پرواز و بهبود کارایی

معمولاً با استفاده از دستگاه‌های کشش یونیورسال انجام می‌شود که نمونه‌های چسب خورده را تحت نیروی کششی قرار می‌دهد تا زمان شکست بررسی شود. استحکام کششی بالا نشان‌دهنده چسبندگی قوی است که برای کاربردهای ساختاری بسیار مهم است.

مدول یانگ: مدول یانگ نشان‌دهنده سختی و انعطاف‌پذیری چسب است. چسب‌هایی با مدول یانگ بالا سفت‌تر و سخت‌تر هستند، در حالی که چسب‌هایی با مدول یانگ پایین انعطاف‌پذیرتر و نرم‌تر هستند. این خاصیت برای کاربردهایی که نیاز به انعطاف‌پذیری دارند، مانند چسب‌های مورد استفاده در صنایع خودروسازی، مهم است. چقرمگی: چقرمگی نشان‌دهنده توانایی چسب در جذب انرژی قبل از شکست است. چسب‌های با چقرمگی بالا می‌توانند در برابر ضربه‌ها و لرزش‌ها مقاومت کنند و در کاربردهایی مانند هوافضا و صنایع نظامی اهمیت دارند (۳۹).

### ۹-۲- خواص گرمایی

پایداری گرمایی: پایداری گرمایی چسب‌ها نشان‌دهنده مقاومت آنها در برابر تجزیه گرمایی در دماهای بالا است. آزمون‌های پایداری گرمایی معمولاً با استفاده از تحلیل گرمایی مانند گرموزن‌سنجی<sup>۲</sup> انجام می‌شود که کاهش وزن نمونه را در دماهای مختلف بررسی می‌کند. ضریب انبساط گرمایی: این ضریب نشان‌دهنده میزان تغییر طول یا حجم چسب با تغییر دما است. چسب‌هایی با ضریب انبساط گرمایی پایین در تغییرات دمایی کمتر تغییر شکل می‌دهند و برای کاربردهایی که نیاز به دقت ابعادی دارند، مناسب‌ترند (۳۹).

### ۹-۳- خواص شیمیایی

مقاومت شیمیایی: مقاومت چسب‌ها در برابر مواد شیمیایی مانند اسیدها، بازها و حلال‌ها ارزیابی می‌شود. این خاصیت برای چسب‌هایی که در محیط‌های خورنده یا تماس با مواد شیمیایی قرار دارند، بسیار مهم است. آزمون‌های مقاومت شیمیایی شامل غوطه‌وری نمونه‌ها در محلول‌های شیمیایی مختلف و ارزیابی تغییرات در خواص فیزیکی و مکانیکی چسب‌ها است (۴۰).

### ۹-۴- دوام<sup>۴</sup>

مقاومت به رطوبت: این معیار نشان‌دهنده توانایی چسب در حفظ خواص خود در حضور رطوبت است. آزمون‌های مقاومت در برابر رطوبت شامل غوطه‌وری نمونه‌ها در آب و ارزیابی تغییرات در استحکام چسبندگی و خواص مکانیکی می‌باشد.

<sup>3</sup> Coefficient of thermal expansion

<sup>4</sup> Durability

<sup>1</sup> Thermal stability

<sup>2</sup> Thermogravimetric Analysis (TGA)



می‌کنند. این چسب‌ها بدون ایجاد آلودگی زیست‌محیطی تجزیه می‌شوند، که کاهش آلودگی زیست‌محیطی، بهبود بازیافت و افزایش پذیرش مصرف‌کنندگان از نتایج آن بود. دانشگاه استنفورد تحقیقی درباره چسب‌های خوراکی برای بسته‌بندی مواد غذایی انجام داده است. این چسب‌ها از مواد طبیعی تهیه شده و به طور کامل ایمن بودند و باعث توسعه بسته‌بندی‌های جدید با ایمنی بالا و بدون نیاز به استفاده از مواد شیمیایی شد (۵۱).

در صنعت ساختمان چسب‌ها برای اتصال مصالح ساختمانی مانند کاشی، سرامیک و کف‌پوش‌ها به کار می‌روند. چسب‌ها برای عایق‌بندی پنجره‌ها و درها، جلوگیری از نفوذ هوا و افزایش کارایی انرژی استفاده می‌شوند. همچنین چسب‌ها در نصب و تعمیر اجزای مختلف ساختمان مانند لوله‌ها و سیستم‌های تهویه به کار می‌روند. استفاده گسترده از چسب‌ها در این صنایع نشان‌دهنده اهمیت بالای آنها در افزایش کارایی، کاهش هزینه‌ها و بهبود کیفیت محصولات است. در ساختمان‌سازی، از چسب‌های سیلیکونی برای عایق‌بندی پنجره‌ها و درها استفاده می‌شود. این چسب‌ها مقاومت بالایی در برابر شرایط آب و هوایی مختلف دارند. افزایش کارایی انرژی ساختمان، کاهش هزینه‌های گرمایش و سرمایش و بهبود راحتی ساکنان از نتایج آن بود. یک پروژه تحقیقاتی در زمینه استفاده از چسب‌های اپوکسی برای اتصال قطعات سازه‌ای در برج‌های بلند انجام شده است. این چسب‌ها استحکام بالایی دارند و می‌توانند فشارهای زیاد را تحمل کنند که باعث افزایش استحکام و ایمنی سازه‌ها، کاهش زمان و هزینه‌های ساخت و بهبود کیفیت ساختمان‌ها می‌شود (۵۲).

جدول ۱ به بررسی انواع چسب‌ها و روش‌های آماده‌سازی و کاربرد آنها بر روی سطوح چسبنده می‌پردازد. در این جدول، چسب‌ها از نظر نوع، نحوه تهیه محلول، دمای اعمال، روش خشک‌شدن و شرایط محیطی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. به‌عنوان مثال، چسب ژلاتینی به‌صورت محلول ۱۰ درصد وزنی در آب مقطر تهیه شده و در دمای ۴۷ درجه سانتی‌گراد اعمال می‌شود، سپس در دمای اتاق (RT) به مدت ۷ روز خشک می‌گردد. به‌طور مشابه، چسب‌هایی مانند Isinglass و Funori با درصد‌های مختلف در آب مقطر حل شده و در دماهای متفاوتی اعمال و خشک می‌شوند. برخی از چسب‌ها مانند BEVA® متفاوتهای اعمال و خشک می‌شوند. برخی از چسب‌ها مانند BEVA® NF و 371b نیاز به حلال‌های خاصی مانند تولوئن دارند و تحت شرایط خلا و دمای بالا تبخیر می‌شوند. همچنین، برخی چسب‌ها مانند BEVA® D-8 و Evacol-R® مستقیماً از ظرف خود استفاده شده و در دمای اتاق خشک می‌شوند. دیگر چسب‌های ذکر شده، مانند Mowilith® 20 و Paraloid® B-72، با حلال‌های مختلفی تهیه شده و روش‌های خاصی برای رقیق‌سازی و اعمال دارند.

هواپیما اشاره کرد. همچنین ناسا در یک تحقیق به بررسی چسب‌های دما بالا برای استفاده در فضاپیماها پرداخته است. این چسب‌ها باید در برابر دماهای بسیار بالا و پایین مقاومت کنند که در نهایت به توسعه چسب‌های جدید با مقاومت گرمایی بالا رسیدند که در ماموریت‌های فضایی به کار گرفته شده‌اند (۴۸).

در پزشکی چسب‌ها در تولید و تعمیر تجهیزات پزشکی و پروتزها استفاده می‌شوند. چسب‌های پزشکی برای ساخت پانسمان‌ها و باند‌های پزشکی که به ترمیم زخم‌ها کمک می‌کنند، استفاده می‌شوند. برخی چسب‌ها برای استفاده داخلی در بدن انسان طراحی شده‌اند و می‌توانند بافت‌ها را به هم متصل کنند بدون اینکه واکنش منفی ایجاد کنند. در برخی از جراحی‌های قلبی، از چسب‌های زیست‌سازگار برای اتصال بافت‌های قلبی و بستن زخم‌ها استفاده می‌شود. این چسب‌ها بدون ایجاد واکنش‌های منفی در بدن جذب می‌شوند. کاهش زمان جراحی، تسهیل در فرایند بهبودی بیمار و کاهش خطر عفونت از مزایای آن است. در یک پژوهش دانشگاه هاروارد تحقیقی در زمینه توسعه چسب‌های هیدروژلی برای ترمیم زخم‌ها انجام شد و این نتیجه بدست آمد که این چسب‌ها می‌توانند به عنوان پانسمان‌های هوشمند عمل کرده و فرآیند بهبود زخم را تسریع کنند و باعث افزایش سرعت بهبودی زخم، کاهش درد بیمار و بهبود کلی کیفیت درمان شود (۴۹). چسب‌ها در مونتاژ قطعات الکترونیکی مانند بردهای مدار چاپی و اجزای مختلف الکترونیکی استفاده می‌شوند. چسب‌ها به عنوان عایق و محافظ برای اجزای حساس الکترونیکی عمل می‌کنند و آنها را در برابر رطوبت، گرد و غبار و سایر عوامل محیطی محافظت می‌کنند. برخی چسب‌ها برای انتقال گرما از قطعات داغ به چاهک‌گرماها استفاده می‌شوند. در تولید لپ‌تاپ‌ها و تلفن‌های هوشمند، از چسب‌های گرمایی برای اتصال و انتقال گرما از قطعات داغ مانند پردازنده‌ها به گرماگیرها استفاده می‌شود. افزایش طول عمر قطعات الکترونیکی، بهبود کارایی گرمایی و کاهش خطر خرابی از مزیت‌های آن است. شرکت اپل در یک پروژه تحقیقاتی از چسب‌های رسانا برای اتصال اجزای بردهای الکترونیکی استفاده کرده است. این چسب‌ها علاوه بر ایجاد اتصال مکانیکی، رسانایی الکتریکی نیز داشتند که بهبود عملکرد الکترونیکی بردها، کاهش حجم و وزن محصولات و افزایش کارایی تولید را به همراه داشت (۵۰).

چسب‌ها در بسته‌بندی مواد غذایی، داروها و سایر محصولات مصرفی به کار می‌روند. چسب‌ها در برچسب‌های محصولات برای شناسایی و اطلاعات محصول استفاده می‌شوند. در بسته‌بندی‌های گرمایی، چسب‌ها برای ایجاد اتصالات محکم و محافظت از محتویات بسته‌بندی استفاده می‌شوند. شرکت‌های تولید کننده مواد غذایی از چسب‌های قابل تجزیه برای بسته‌بندی‌های زیست‌محیطی استفاده

<sup>1</sup> Heat sink

جدول ۱: آماده‌سازی چسب و کاربرد آن بر روی سطوح چسبنده (RT دمای اتاق، n.a. قابل استفاده نیست) (۵۳).

**Table 1:** Preparation of adhesive and its application to the adhesive surfaces (RT room temperature, n.a. not applicable) (53).

Type	Adhesive Preparation	Adhesive application for bonding
Gelatine	Solution of 1:10 w/w% dissolved in distilled water (47 °C)	Adhesive solution (47 °C) applied. Drying 7 days at RT
Rabbit Skin Glue	Solution of 1:10 w/w% dissolved in distilled water (57 °C)	Adhesive solution (57 °C) applied. Drying 7 days at RT
Isinglass	3 w/w% solution in distilled water at 47 °C	Adhesive solution (55 °C) applied. Drying 7 days at RT
Funori	3 w/w% solution prepared by soaking the seaweed in distilled water overnight at a temperature of 55 °C	Adhesive solution (47 °C) applied
Klucel® G	Solution of 1:10 w/w% dissolved in distilled water	Adhesive solution (RT) applied. Drying 7 days at RT
BEVA® 371b	Prepared as a 40 w/w% solution in toluene	Adhesive solution applied, the solvent evaporated by heat (70 °C) under vacuum (200 mbar) during 7 days.
BEVA® NF	n.a. Applied directly from the can	Adhesive applied, the solvent evaporated by heat (70 °C) under vacuum (200 mbar) during 7 days.
BEVA® D-8	n.a. Applied directly from the jar	Adhesive applied at RT. Drying 7 days at RT
Evacol-R®	Applied directly from the bottle	Adhesive applied at RT. Drying 7 days at RT
Mowilith® 20	Diluted as 1:1 w/w in ethanol with 5 w% water	Adhesive applied at RT. Drying 7 days at RT
Jade® 403	n.a. Applied directly from the bottle	Adhesive applied at RT. Drying 7 days at RT
Paraloid® B-72	Prepared as a 1:1 w/w solution in acetone	Adhesive solution applied at RT. Drying 7 days at RT

مشق شده‌اند و در آب مقطر قابل حل هستند. این موضوع اهمیت ایمنی و سازگاری مواد با سطوح مختلف را برجسته می‌کند. در مجموع، این جدول نشان می‌دهد که انتخاب چسب باید با توجه به شرایط محیطی، سطح موردنظر، روش کاربرد و ملاحظات ایمنی انجام شود (۵۳).

## ۱۱- فناوری‌ها و نوآوری‌های جدید در چسب‌ها

پیشرفت‌ها و نوآوری‌های جدید در زمینه تولید و کاربرد چسب‌ها به طور مداوم در حال توسعه هستند و این روند به دلیل نیاز به کارایی بالاتر، سازگاری بیشتر با محیط زیست و کاربردهای پیچیده‌تر در صنایع مختلف، شتاب گرفته است. برخی از مهم‌ترین پیشرفت‌ها و نوآوری‌ها در این حوزه چسب‌های زیست‌سازگار و تجزیه‌پذیر است. به دلیل نگرانی‌های زیست‌محیطی، تحقیق و توسعه در زمینه چسب‌های زیست‌سازگار و تجزیه‌پذیر افزایش یافته است. این چسب‌ها از مواد طبیعی و تجدیدپذیر مانند نشاسته، سلولز و پروتئین‌های طبیعی تولید می‌شوند و در زمان استفاده و پس از پایان عمر مفیدشان به سرعت تجزیه می‌شوند. چسب‌های مبتنی بر پلی‌لاکتیک‌اسید (PLA) و چسب‌های هیدروژلی که در بسته‌بندی‌های مواد غذایی و محصولات پزشکی استفاده می‌شوند از مثال‌های آن است (۴۲). برای کاهش انتشار ترکیبات آلی فرار (VOC) که می‌توانند به آلودگی هوا و مشکلات سلامتی منجر شوند، چسب‌های جدیدی توسعه یافته‌اند که

در مجموع، این جدول اطلاعاتی دقیق در مورد نحوه آماده‌سازی و استفاده از چسب‌های مختلف در کاربردهای چسبندگی ارائه می‌دهد. نتایج حاصل از جدول نشان می‌دهد که انواع چسب‌ها ویژگی‌های متفاوتی از نظر ترکیب، نحوه آماده‌سازی، روش اعمال و شرایط خشک‌شدن را دارند. این تفاوت‌ها به‌طور مستقیم بر انتخاب چسب مناسب برای کاربردهای مختلف تأثیر می‌گذارند. سه نکته در مورد چسب‌ها می‌بایست در نظر گرفته شود که عبارتند از:

الف- تفاوت در روش آماده‌سازی: برخی چسب‌ها مانند ژلاتین و Isinglass نیاز به حل شدن در آب مقطر و حرارت‌دهی دارند، در حالی که برخی دیگر مانند BEVA® D-8 و Jade® 403 به‌صورت آماده از ظرف خود قابل استفاده هستند. این موضوع نشان می‌دهد که پیچیدگی فرآیند آماده‌سازی در انتخاب چسب تأثیر دارد.

ب- تفاوت در روش اعمال و خشک شدن: برخی چسب‌ها در دماهای پایین و شرایط محیطی عادی خشک می‌شوند (مانند Klucel® G و Evacol-R®)، در حالی که برخی دیگر نیاز به شرایط خاصی مانند خلأ و دمای بالا دارند (مانند BEVA® 371b و BEVA® NF). این تفاوت نشان می‌دهد که بسته به شرایط کاربری، ممکن است محدودیت‌هایی در استفاده از برخی چسب‌ها وجود داشته باشد.

ج- لزوم توجه به حلال‌ها: برخی چسب‌ها مانند Paraloid® B-72 و BEVA® 371b برای استفاده نیاز به حلال‌هایی مانند استن و تولوئن دارند، در حالی که برخی دیگر مانند Funori از مواد طبیعی

نانولوله‌های کربنی (CNTs) افزایش هدایت الکتریکی، حرارتی و تقویت مکانیکی چسب‌ها را به همراه دارد. نانوذرات گرافن باعث بهبود رسانایی الکتریکی، حرارتی و کاهش وزن چسب‌ها بدون کاهش استحکام می‌شود. نانوذرات اکسید فلزی مانند  $ZnO$  و  $TiO_2$  ایجاد مقاومت در برابر پرتو فرابنفش (خاصیت ضد UV) و مقاومت در برابر خوردگی را سبب می‌شوند. همچنین نانو ذراتی برای کاربردهای خاص مورد استفاده قرار می‌گیرند که باعث خاصیت خودترمیمی و ایجاد انعطاف‌پذیری بالا می‌شوند (۶۰، ۵۹).

فناوری نانو به‌طور مداوم در حال توسعه است و پیش‌بینی می‌شود که چسب‌های نانویی با ویژگی‌های هوشمند و کارایی بالا در آینده جایگزین بسیاری از چسب‌های سنتی شوند. که می‌توان به مواردی مانند توسعه چسب‌های هوشمند با خاصیت خودترمیمی، افزایش استفاده از نانوذرات زیست‌سازگار برای کاربردهای پزشکی و کاهش هزینه تولید اشاره کرد (۶۱).

### ۱۳- چالش‌های فرایند تولید در چسب‌ها

توسعه چسب‌های جدید با کارایی بالاتر، به دلیل کاربرد گسترده آنها در صنایع مختلف (از جمله هوافضا، خودروسازی، الکترونیک، پزشکی و بسته‌بندی)، با چالش‌ها و فرصت‌های متعددی همراه است. در بسیاری از کاربردها نیازمند چسب‌هایی با عملکرد ترکیبی مثلاً مقاومت بالا به دما، رطوبت می‌باشیم. تنش مکانیکی. ترکیب این ویژگی‌ها در یک محصول واحد بسیار پیچیده است و چالش‌های کلیدی در توسعه مواد جدید در این حوزه است. این نیاز ناشی از کاربردهای پیچیده و محیط‌های عملیاتی متنوعی است که چسب‌ها باید در آنها به کار گرفته شوند. همچنین ایجاد چسب‌های زیست‌تخریب‌پذیر با مقاومت بالا همچنان یک چالش علمی و مهندسی است (۶۲).

### ۱۳-۱- عملکرد چندگانه در چسب‌ها

چسب‌هایی که برای کاربردهای صنعتی، پزشکی یا مصرفی طراحی می‌شوند، اغلب باید چندین ویژگی را به طور همزمان ارائه دهند. این ویژگی‌ها ممکن است شامل چسبندگی بالا به مواد مختلف (فلز، پلاستیک، شیشه، چوب و غیره)، مقاومت در برابر تنش‌های مکانیکی (مانند کشش، برش و ضربه)، پایداری شیمیایی در برابر رطوبت، اسیدها، بازها یا حلال‌ها، تحمل دماهای بسیار بالا یا پایین، خواص الکتریکی یا حرارتی ویژه (مانند عایق بودن یا رسانایی)، زیست‌سازگاری و قابلیت استفاده در بدن انسان (برای کاربردهای پزشکی) و قابلیت تجزیه پذیری زیستی برای کاهش اثرات زیست‌محیطی باشد (۶۳).

فاقد VOC هستند و بهبود قابل توجهی در کیفیت هوا و ایمنی محیط‌زیست ایجاد می‌کنند. چسب‌های مبتنی بر سیلیکون و چسب‌های هیدروژلی که به کاهش انتشار VOC کمک می‌کنند از این دسته از چسب‌ها هستند (۵۴).

### ۱۲- فناوری نانو در چسب‌ها

فناوری نانو با وارد کردن نانوذرات در ساختار چسب‌ها، انقلابی در خواص مکانیکی، شیمیایی و عملکردی آنها ایجاد کرده است. چسب‌های مبتنی بر فناوری نانو قادرند ویژگی‌هایی چون استحکام بالا، چسبندگی پیشرفته، مقاومت در برابر دما و مواد شیمیایی و حتی خواص خاص مانند رسانایی الکتریکی و حرارتی را فراهم کنند. این فناوری در صنایع مختلف از جمله خودرو سازی، هوافضا، پزشکی و الکترونیک به کار گرفته می‌شود (۵۵).

### ۱۲-۱- ویژگی‌های چسب‌های مبتنی بر فناوری نانو

از ویژگی‌های استفاده از نانوذرات در ساخت چسب‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد (۵۸-۵۶).

- استحکام و دوام بیشتر با نانوذرات که ساختار مولکولی چسب، تقویت و مقاومت مکانیکی را بهبود می‌بخشند.
- چسبندگی بهتر به سطوح به دلیل اندازه کوچک نانوذرات، تماس سطحی چسب با مواد افزایش یافته و چسبندگی قوی‌تری ایجاد می‌شود.
- مقاومت حرارتی و شیمیایی بالا نانوذرات اکسیدهای فلزی یا سرامیکی به چسب‌ها خاصیت تحمل دماهای بالا و مقاومت در برابر مواد شیمیایی را می‌بخشند.
- رسانایی الکتریکی و حرارتی با افزودن نانوذرات رسانا مانند نانوذرات نقره، مس یا گرافن ایجاد می‌شود که چسب‌ها می‌توانند جریان الکتریسیته یا گرما را منتقل کنند.
- خواص آب‌گریزی یا ضد رطوبت استفاده از نانوذرات سیلیکا یا فلئوئوروکربن‌ها، چسب‌ها را مقاوم به آب و شرایط مرطوب می‌کند.
- هوشمندی و واکنش به محرک‌ها، نانوذرات می‌توانند خاصیت خودترمیمی یا پاسخ به تغییرات دما و فشار را به چسب‌ها اضافه کنند (۵۸-۵۶).

### ۱۲-۲- نقش نانوذرات در چسب‌ها

نانوذرات متنوعی در فرمول‌بندی چسب‌های نانویی استفاده می‌شوند که هر یک عملکرد و ویژگی‌های خاصی به چسب می‌بخشند. مثلاً نانوذرات سیلیکا ( $SiO_2$ ) باعث افزایش استحکام مکانیکی و چسبندگی و بهبود مقاومت در برابر خراش و فرسایش می‌شود. نانوذرات نقره (Ag) ایجاد خاصیت رسانایی الکتریکی و ضدباکتری می‌کند.

ویژگی‌های مورد نظر (چسبندگی، مقاومت حرارتی و غیره) به دست آیند. هر ماده خواص شیمیایی و فیزیکی خاص خود را دارد که ممکن است در تعامل با یکدیگر تغییر کند. فرمولبندی باید به گونه‌ای طراحی شود که چسب در طول زمان، حتی در شرایط محیطی مختلف، پایدار بماند. دستیابی به ویژگی‌هایی مانند گرانروی مناسب، زمان گیرش دقیق و چسبندگی به مواد مختلف، نیازمند تنظیمات پیچیده در فرمولبندی است (۶۷).

فرمولبندی‌هایی که در مقیاس آزمایشگاهی عملکرد مطلوب دارند، ممکن است در تولید انبوه با مشکلاتی مانند تغییر در خواص یا کاهش یکنواختی مواجه شوند. بسیاری از چسب‌ها نیازمند کنترل دقیق دما و فشار در طول تولید هستند. این موضوع در مقیاس صنعتی چالش‌برانگیزتر می‌شود. از دیگر موارد می‌توان به تجهیزات تولیدی که باید توانایی ترکیب دقیق مواد، جلوگیری از آلودگی و تضمین یکنواختی محصول نهایی را داشته باشند، اشاره کرد (۶۸).

زمان واکنش شیمیایی مواد اولیه برای تولید چسب باید به گونه‌ای باشد که تولید را کند نکند. چسب‌هایی با زمان گیرش طولانی ممکن است فرایند تولید را مختل کنند. بسیاری از مواد اولیه چسب‌ها گران هستند و مدیریت هزینه مواد اولیه بدون کاهش کیفیت محصول یکی از چالش‌های کلیدی است. و صرفه‌جویی در مصرف انرژی در فرایند تولید چسب نکته مهمی است که باید به آن توجه داشت (۶۸).

#### ۱۳-۴- الزامات زیست‌محیطی و ایمنی

در صنعت چسب مانند سایر صنایع دستورالعمل‌های استفاده از حلال‌ها و مواد شیمیایی مضر مانند ترکیبات آلی فرار (VOCs) باید کاهش یابد. این مواد به دلیل خطرات زیست‌محیطی و سلامتی، در بسیاری از کشورها محدودیت قانونی دارند که باید توجه و رعایت شود. تولید چسب می‌تواند پسماندهای شیمیایی تولید کند که مدیریت و دفع آن‌ها نیازمند فرایندهای خاص است (۶۹).

#### ۱۳-۵- فرصت‌ها در صنعت چسب

نوآوری در مواد جدید از فرصت‌هایی است که می‌تواند در صنعت چسب مورد توجه قرار گیرد. توسعه مواد نوین مانند نانوکامپوزیت‌ها، پلیمرهای هوشمند و چسب‌های زیستی امکان ارتقا چشمگیر عملکرد را فراهم می‌کند. همچنین استفاده از مواد جدید و نانوذرات می‌تواند خواص حرارتی، مکانیکی یا چسبندگی را بهبود دهند. افزایش تقاضا برای چسب‌های زیست‌تخریب‌پذیر یا مبتنی بر منابع تجدیدپذیر، فرصت‌های جدیدی ایجاد می‌کند که با استفاده از پلیمرهای زیستی (مانند پلی‌لاکتیک‌اسید یا نشاسته) به جای رزین‌های سنتی نفتی مورد توجه قرار گیرد. توسعه چسب‌هایی که بتوانند به محرک‌های خارجی (مانند دما، رطوبت، یا نور) واکنش نشان دهند، به عنوان مثال،

افزایش تقاضای عملکرد چندگانه در چسب‌ها متناسب با صنعت بکارگیرنده دلایل مختلفی دارد. مثلاً در صنایعی مانند هوافضا، خودروسازی و الکترونیک، به دلیل نیاز به وزن کمتر، مقاومت بیشتر، و عمر طولانی‌تر، به موادی با عملکرد بالا نیاز دارند. در بسیاری از کاربردها، چسب باید دو یا چند ماده با خواص کاملاً متفاوت (به عنوان مثال، اتصال فلز به پلاستیک در خودروها یا اتصال شیشه به مواد کامپوزیتی در پنجره‌های هوشمند) را به هم متصل کند. در صنایعی مانند نفت و گاز، چسب‌ها باید در برابر فشارهای بالا، دماهای شدید و محیط‌های خورنده مقاومت کنند. همچنین افزایش آگاهی زیست‌محیطی، تقاضا برای چسب‌هایی که هم عملکرد چندگانه داشته و هم زیست‌سازگار باشند، را افزایش داده است (۶۴).

#### ۱۲-۲- چالش‌های مرتبط با دستیابی به عملکرد چندگانه و راه‌های رفع آنها

تناقض‌های عملکردی در برخی از ویژگی‌ها که ممکن است با یکدیگر در تضاد باشند از چالش‌های مهم می‌باشد. این چالش‌ها نظیر چسبندگی بالا و قابلیت جداسدن آسان، مقاومت حرارتی بالا و انعطاف‌پذیری، استحکام مکانیکی و زیست‌تخریب‌پذیری و مواردی از این دست می‌باشند. تعداد مواد شیمیایی و پلیمری که بتوانند چندین ویژگی مورد نظر را هم‌زمان ارائه دهند، محدود است که به عنوان محدودیت در مواد اولیه است. طراحی و تولید چسب‌هایی با عملکرد چندگانه اغلب به فناوری‌های پیچیده و هزینه‌بر نیاز دارد. همچنین چسب‌های چندمنظوره باید بتوانند ویژگی‌های خود را در طول زمان حفظ کنند، که این موضوع به‌ویژه در صنایع هوافضا و پزشکی حیاتی است.

برای رفع این موارد راهکارهایی مثل افزودن نانوذرات (مانند نانولوله‌های کربنی، نانوذرات سیلیکا، یا گرافن) می‌تواند خواص چسب را بهبود دهد، مثلاً استحکام مکانیکی را افزایش داده و مقاومت حرارتی را ارتقا دهد. استفاده از کوپلیمرها و پلیمرهای هیبریدی برای ترکیب ویژگی‌های مختلف در یک چسب و طراحی چسب‌هایی که بتوانند به محرک‌های خارجی مانند گرما، نور یا فشار واکنش نشان دهند، به عنوان راه‌حلی برای نیازهای عملکردی پیچیده مطرح است (۶۶، ۶۵).

#### ۱۳-۳- چالش‌های فرایند تولید

چالش‌های فرایند تولید چسب‌ها از طراحی اولیه تا تولید صنعتی و بسته‌بندی گسترده را در بر می‌گیرند. این چالش‌ها به دلیل نیاز به ترکیب دقیق مواد، تضمین کیفیت، پایداری محصول و انطباق با استانداردهای زیست‌محیطی و صنعتی به وجود می‌آیند.

فرمولبندی پیچیده مواد اولیه در چسب‌ها از اولین چالش‌ها در فرایند تولید است. مواد تشکیل‌دهنده چسب (مانند رزین‌ها، تقویت‌کننده‌ها، حلال‌ها و افزودنی‌ها) باید به دقت ترکیب شوند تا

این حوزه، بهبود خواص چسب‌ها نظیر مقاومت گرمایی، زمان خشک‌شدن، دوام در شرایط محیطی مختلف و چسبندگی به سطوح متنوع است. همچنین، استفاده از مواد اولیه با منبع طبیعی و کاهش اثرات زیست‌محیطی تولید و استفاده از چسب‌ها از دیگر مسائلی است که توجه بیشتری را می‌طلبد. پیشرفت‌های اخیر در زمینه نانو فناوری و مواد پیشرفته، افق‌های جدیدی را برای بهبود عملکرد چسب‌ها و توسعه محصولات نوآورانه باز کرده است. در نهایت، این مقاله نشان می‌دهد که چسب‌ها نه تنها در بهبود کیفیت و عمر محصولات نقش دارند، بلکه می‌توانند به کاهش هزینه‌ها و بهبود فرآیندهای تولید نیز کمک کنند. با توجه به پیشرفت‌های اخیر، آینده‌ای روشن برای توسعه چسب‌های پیشرفته و سازگار با محیط زیست متصور است که می‌تواند به نیازهای مختلف صنایع پاسخ دهد و در نهایت منجر به تولید محصولات با کیفیت‌تر و پایدارتر شود.

#### تقدیر و تشکر

از پشتیبانی و حمایت پژوهشگاه رنگ برای انجام این مطالعه تشکر و قدردانی می‌گردد.

#### تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

چسب‌هایی که در صورت خرابی خود را ترمیم می‌کنند. همچنین کاربردهای جدید در زمینه چسب‌های زیست‌پزشکی مانند چسب‌های حساس به زیست‌محیط یا قابل جذب در بدن از جمله مواردی است که تحت عنوان چسب‌های هوشمند می‌تواند تحولاتی را در بازار و صنعت چسب ایجاد کند (۷۰).

بهره‌گیری از فناوری‌های جدید از جمله فناوری‌های دیجیتال مانند مدل‌سازی و شبیه‌سازی کامپیوتری برای طراحی چسب‌های جدید و استفاده از هوش مصنوعی و یادگیری ماشینی برای پیش‌بینی خواص مواد و تسریع فرایند توسعه از جمله مواردی است که به عنوان راهکارهای جدید تولید چسب باید مورد توجه و استفاده شود (۷۰). خوانندگان محترم برای اطلاعات بیشتر می‌توانند به مراجع انگلیسی (۷۲، ۷۱) و فارسی (۷۴، ۷۳) مراجعه نمایند.

#### ۱۴- نتیجه‌گیری

چسب‌ها به عنوان یکی از مهم‌ترین مواد اتصال‌دهنده در صنایع مختلف، نقشی کلیدی در بهبود کارایی و عملکرد محصولات ایفا می‌کنند. در این مقاله به بررسی انواع مختلف چسب‌ها، سازوکارهای چسبندگی و کاربردهای آنها در صنایع گوناگون پرداخته شد. با توجه به گسترش نیازهای صنعتی و پیچیدگی‌های روزافزون در فرآیندهای تولید، توسعه چسب‌های با کارایی بالاتر و سازگاری بیشتر با محیط زیست به یک ضرورت تبدیل شده است. یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در

#### ۱۵- مراجع

- Giese-Hinz J, Kothe C, Louter C, Weller B. Mechanical and chemical analysis of structural silicone adhesives with the influence of artificial aging, *Int J Adhes Adhes.* 117, Part B, 2022, 103019, <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2021.103019>.
- Paiva RM, Marques EA, da Silva LF, António CA, Arán-Ais F. Adhesives in the footwear industry. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part L J Mater Des Appl.* 2016;230(2):357-374. <https://doi.org/10.1177/1464420715602441>.
- Skeist I, Miron J. History of Adhesives. *J Macromol Sci Part A Chem.* 1981;15(6):1151-1163. <https://doi.org/10.1080/00222338108066458>.
- Skeist I, Miron J. History of Adhesives. *J Macromol Sci Part A Chem.* 1981;15(6):1151-1163. <https://doi.org/10.1080/00222338108066458>.
- Cui C, Liu W. Recent advances in wet adhesives: Adhesion mechanism, design principle and applications, *Prog. Polym. Sci.* 2021;116:101388. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2021.101388>.
- Kinloch A.J. Mechanisms of adhesion. In: *Adhesion and adhesives*, Springer, Dordrecht. 1987. <https://doi.org/10.1007/978-94-015-7764-9>.
- Awaja F, Gilbert M, Kelly G, Fox B, Pigram PJ. Adhesion of polymers, *Prog Polym Sci.* 2009;34(9):948-968, <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2009.04.007>.
- Hu N, Shu L, Zheng X, Deng Z, Cang X. A review of modification methods, joints and self-healing methods of adhesive for aerospace, *Sci Prog.* 2024;107(2),1-22. <https://doi.org/10.1177/00368504241242271>.
- Arias A, González-Rodríguez S, Vetrone Barros M, Salvador R, de Francisco AC, Piekarski CM, et al. Recent developments in bio-based adhesives from renewable natural resources, *J Clean Prod.* 314, 2021;127892. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127892>.
- Parija S, Misra M, Mohanty AK. Studies of natural gum adhesive extracts: An overview. *J Macromol Sci. Part C.* 2001;41(3):175-197. <https://doi.org/10.1081/MC-100107775>.
- Patel S, Goyal A. Applications of natural polymer gum arabic: A Review. *Int J Food Prop.* 2015;18(5):986-998. <https://doi.org/10.1080/10942912.2013.809541>.
- Schellmann NC. Animal glues: a review of their key properties relevant to conservation. *Stud Conserv.* 2007;

- 52(sup1): 55–66. <https://doi.org/10.1179/sic.2007.52.Supplement-1.55>.
13. Román JK, Wilker JJ. Cooking chemistry transforms proteins into high-strength adhesives. *J Am Chem Soc.* 2019;141:1359-1365. <https://doi.org/10.1021/jacs.8b12150>.
  14. Lutz TM, Kimna C, Casini A, Lieleg O. Bio-based and bio-inspired adhesives from animals and plants for biomedical applications, *Mater Today Bio.* 2022;13, 100203. <https://doi.org/10.1016/j.mtbio.2022.100203>.
  15. Eisner T, Aneshansley DJ. Adhesive Strength of the Insect-Trapping Glue of a Plant (*Befaria racemosa*), *Ann. Entomol. Soc. Am.* 1983;76(2):295-298. <https://doi.org/10.1093/aesa/76.2.295>.
  16. Sun L, Liu S, Ye X, Xu Q, Cao J, Zeng X, et al. Research progress on plant-based glue in meat substitutes: main components, formation mechanisms, challenges, and development, *Int J Food Sci Technol.* 2024;59(11):8656-8667. <https://doi.org/10.1111/ijfs.17469>.
  17. Kim HS, Huh J, Ryu J. Investigation of moisture-induced delamination failure in a semiconductor package via multi-scale mechanics, *J Phys D: Appl Phys.* 2011;44:034007. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/44/3/034007>.
  18. Kasper Y, Albiez M, Ummenhofer T, Mayer Ch, Meier T, Choffat F, Ciupack Y, Pasternak H. Application of toughened epoxy-adhesives for strengthening of fatigue-damaged steel structures, *Constr Build Mater.* 2021;275: 121579. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121579>.
  19. White C, Tan K, Wolf A, Carbary L. Advances in structural silicone adhesives, *Adv. Struct. Adhes. Bond.*, Woodhead Publishing, 2010;66-95. <https://doi.org/10.1533/9781845698058.1.66>.
  20. Briggs PC, Jialanella GL. Advances in acrylic structural adhesives, *Adv Struct Adhes Bond.* Woodhead Publishing, 2010;132-150. <https://doi.org/10.1533/9781845698058.1.132>.
  21. Droesbeke MA, Aksakal R, Simula A, Asua JM, Du Prez FE. Biobased acrylic pressure-sensitive adhesives, *Prog Polym Sci.* 2021;117:101396. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2021.101396>.
  22. Czech Z. Solvent-free radiation-curable polyacrylate pressure-sensitive adhesive systems, *J Appl Polym Sci.* 2003;87,2:182-191. <https://doi.org/10.1002/app.11303>.
  23. Rahman M, Kim HD. Characterization of waterborne polyurethane adhesives containing different soft segments, *J Adhes Sci Technol.* 2007;21(1):81–96. <https://doi.org/10.1163/15685610779976088>.
  24. Strobecch Chr. Polyurethane adhesives, *Constr. Build. Mater.* 1990;4(4):214-217. [https://doi.org/10.1016/0950-0618\(90\)90042-Y](https://doi.org/10.1016/0950-0618(90)90042-Y).
  25. Shirmohammadli Y, Pizzi A, Raftery GM, Hashemi A. One-component polyurethane adhesives in timber engineering applications: A review, *Int J Adhes Adhes.* 2023; 123:103358. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2023.103358>.
  26. Tiedeman GT, Sanclemente MR. The chemistry of fast-curing phenolic adhesives. *I J Appl Polym Sci.* 1973;17(6): 1813-1818. <https://doi.org/10.1002/app.1973.070170614>.
  27. Tiedeman GT, Sanclemente MR, Smith HA. The chemistry of fast-curing phenolic adhesives. *J Appl Polym Sci.* 1973;17(6):1819-1832.
  28. Yang I, Kuo M, Myers DJ. Bond quality of soy-based phenolic adhesives in southern pine plywood, *J Am Oil Chem Soc.* 2006;83: 231–237. <https://doi.org/10.1007/s11746-006-1198-7>.
  29. Janda R, Roulet JF, Wulf M, Tiller HJ. A new adhesive technology for all-ceramics, *Dent Mater.* 2003;19(6):567-573. [https://doi.org/10.1016/S0109-5641\(02\)00106-9](https://doi.org/10.1016/S0109-5641(02)00106-9).
  30. Pilecco RO, Saldanha da Rosa L, Rocha Pereira GK, Mendes Tribst JP, May LG, et al. The loss of resin cement adhesion to ceramic influences the fatigue behavior of bonded lithium disilicate restorations, *J Mech Behav Biomed Mater.* 2023;148:106169. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2023.106169>.
  31. Tenorio-Alfonso A, Blandón-Cumbreras FG, Guzmán-Ríos DB, Pischel U, Franco JM. Optimization of the performance of UV light-responsive curing of polyurethane-urea adhesive formulations. *Polym.* 2024;310:127479. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2024.127479>.
  32. Kumar P, Patnaik A, Chaudhary S. A review on application of structural adhesives in concrete and steel-concrete composite and factors influencing the performance of composite connections, *Int J Adhes Adhes.* 2017;77:1-14. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2017.03.009>.
  33. Krenczeski MA, Johnson JF, Temin SC. Chemical and physical factors affecting performance of pressure-sensitive adhesives, *J Macromol Sci. Part C.* 1986;26(1):143-182. <https://doi.org/10.1080/07366578608081971>.
  34. Sun S, Li M, Liu A. A review on mechanical properties of pressure sensitive adhesives, *Int J Adhes Adhes.* 2013; 41: 98-106. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2012.10.011>.
  35. Mapari S, Mestry S, Mhaske ST. Developments in pressure-sensitive adhesives: a review, *Polym Bull.* 2021;78:4075-4108. <https://doi.org/10.1007/s00289-020-03305-1>.
  36. Vineeth S, Gadhave R. Sustainable raw materials in hot melt adhesives: A review, *Open J Polym Chem.* 2020; 10:49-65. <https://doi.org/10.4236/ojpcem.2020.103003>.
  37. Ballard N. Designing acrylic latexes for pressure-sensitive adhesives: a review, *Polym. Int.* 2024;73(2):69-162. <https://doi.org/10.1002/pi.6596>.
  38. Zandi S, Ghasemirad S. Silanization as a strategy to design polyurethane-acrylic hybrid pressure-sensitive adhesives, *Int J Adhes Adhes.* 2024;132:103686. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2024.103686>.
  39. Nam S, Mooney V. Polymeric tissue adhesives, *Chem Rev.* 2021;121(18):11336–11384. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.0c00798>.
  40. Abbas SM, Bissett IP, Parry BR. Meta-analysis of oral water-soluble contrast agent in the management of adhesive small bowel obstruction, *Br J Surg.* 2007;94(4):404-411. <https://doi.org/10.1002/bjs.5775>.
  41. Gadhave R, Gadhave C. Adhesives for the paper packaging industry: An overview, *Open J Polym Chem.* 2022;12:55-79. <https://doi.org/10.4236/ojpcem.2022.122004>.
  42. Watcharakitti J, Win EE, Nimnuan J, Smith SM. Modified starch-based adhesives: A review, *Polym.* 2022;14:2023. <https://doi.org/10.3390/polym14102023>.
  43. Aradhana R, Mohanty S, Nayak SK. A review on epoxy-based electrically conductive adhesives, *Int J Adhes Adhes.* 2020;99: 102596. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2020.102596>.
  44. Mir I, Kumar D. Recent advances in isotropic conductive adhesives for electronics packaging applications, *Int. J. Adhes Adhes.* 2008;28(7):362-371. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2007.10.004>.
  45. Li Y, Wong CP. Recent advances of conductive adhesives as a lead-free alternative in electronic packaging: Materials, processing, reliability and applications. *Mater Sci Eng R*



- Rep. 2006;51(1-3):1-35. <https://doi.org/10.1016/j.msere.2006.01.001>.
46. BMWs Carbon Fiber Roof Attached With Polyurethane Adhesive. 2006[cited 2006 Jan 1]. Available from: <https://www.compositesworld.com/articles/bmws-carbon-fiber-roof-attached-with-polyurethane-adhesive>.
  47. Pala R, Pandey P, Kant Thakur S, Khadam VKR, Dutta P, Arushi, Singh Chawr H, Pal Singh R. The significance of pharmaceutical packaging and materials in addressing challenges related to unpacking pharmaceutical products. *Int J Pharm Healthc Innov*. 2024;1(03):149-173.
  48. Sullivan K, Peterman KD. A review of adhesive steel-to-steel connections for use in heavy construction, *J Constr Steel Res*. 2024;213: 108405. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2023.108405>.
  49. Bao Z, Yang R, Chen B, Luan S. Degradable polymer bone adhesives, *Fundam. Res*. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.fmre.2023.11.023>.
  50. Poulis JA, Mosleh Y, Cansell E, Cimino D, Ploeger R, de la Rie ER, McGlinchey CW, Seymour K. Mechanical and physical characterization of natural and synthetic consolidants, *Int J Adhes Adhes*. 2022;117:103015. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2021.103015>.
  51. Du X, Li Z, Zhang J, Li X, Du G, Deng S. Development of environmentally friendly glyoxal-based adhesives with outstanding water repellency utilizing wheat gluten protein, *Int. J Biol Macromol*. 2024;273:133081. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.133081>.
  52. Marques JB, Barbosa AQ, Silva CID, Carbas RJC, Silva LFMD. An overview of manufacturing functionally graded adhesives - Challenges and prospects. *J Adhes*. 2021;97(2): 172-206. <https://doi.org/10.1080/00218464.2019.1646647>.
  53. Jeevi G, Nayak SK, Abdul Kader M. Review on adhesive joints and their application in hybrid composite structures, *J Adhes Sci Technol*. 2019;33(14):1497-1520. <https://doi.org/10.1080/01694243.2018.1543528>.
  54. Akhavan-Safar A, Ramezani F, Delzendehtrooy F, Ayatollahi MR, Silva LFMD. A review on bi-adhesive joints: Benefits and challenges, *Int J Adhes Adhes*. 114, 2022, 103098. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2022.103098>.
  55. Jiang C, Zi C, Li J, Hao C, Cai S, Xu Y, Su F, Cao G, Tian Y. Flexible conductive adhesives with high conductivity and infrared stealth performance. *Compos. Part A Appl Sci Manuf*. 2025;188:108559. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2024.108559>.
  56. Nicolae CL, Pirvulescu DC, Niculescu AG, Rădulescu M, Grumezescu AM, Croitoru GA. An overview of nanotechnology in dental medicine, *J Compos Sci*. 2024; 8(9):352. <https://doi.org/10.3390/jcs8090352>.
  57. Venugopal A, Edwin Sudhagar P. Enhancing shear strength of single lap composite adhesive joint with graphene nanoparticles and Z-pins reinforcement through co-curing technique, *Tribol. Int*. 2024;195:109636. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.109636>.
  58. Karthikeyan N, Naveen J. Effect of surface modified adherend and nanofiller modified adhesives on the shear behaviour of single lap joints: a mini review, *J Adhes Sci Technol*. 2024;38(21):3943-3962. <https://doi.org/10.1080/01694243.2024.2362297>.
  59. Liu L, Chen T, Han L, Qian Z, Li J, Gan G. Thermally conductive silver adhesive enhanced by MXene@AgNPs with excellent thermal conductivity for thermal management applications, *Appl Surf Sci*. 2024;672:160787. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2024.160787>.
  60. Yang H, Dong Y, Li X, Gao Y, He W, Liu Y, Mu X, Zhao Y. Anti-corrosion superhydrophobic micro-GF/micro-TiB<sub>2</sub>/nano-SiO<sub>2</sub> based coating with braid strengthening structure fabricated by a single-step spray deposition, *J. Alloys Compd*. 2024;1008:176725. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.176725>.
  61. Ekrem M, Koyunbakan M, Ünal B. Investigation of the mechanical and thermal properties of epoxy adhesives reinforced by carbon nanotubes and silicon dioxide nanoparticles in single-lap joints, *J Adhes Sci Technol*. 2024;38(20): 3860-3875. <https://doi.org/10.1080/01694243.2024.2358037>.
  62. Baldan A. Adhesion phenomena in bonded joints, *Int J Adhes Adhes*. 2012;38:95-116. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2012.04.007>.
  63. Cui C, Liu W. Recent advances in wet adhesives: Adhesion mechanism, design principle and applications, *Prog Polym Sci*. 2021;116:101388. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2021.101388>.
  64. Marques JB, Barbosa AQ, Silva CID, Carbas RJC, Silva LFMD. An overview of manufacturing functionally graded adhesives - Challenges and prospects. *J Adhes*. 2021;97(2): 172-206. <https://doi.org/10.1080/00218464.2019.1646647>.
  65. Hart-Smith LJ. Adhesive bonding of composite structures—Progress to date and some remaining challenges, *J Compos Technol Res*. 2002;24(3):133-151. <https://doi.org/10.1520/CTR10566J>.
  66. Wind T, Diaz P, Funk T, Gbenouvo E, Seger E, Tolls J. Environmental risk assessment for relevant ingredients in adhesives and sealants in commonplace industrial uses. *Integr Environ Assess Manag*. 2022;18(5):1288-1296. <https://doi.org/10.1002/ieam.4566>.
  67. Heinrich LA. Future opportunities for bio-based adhesives - Advantages beyond renewability, *Green Chem*. 2019;21: 1866-1888. <https://doi.org/10.1039/C8GC03746A>.
  68. Marques JB, Barbosa AQ, Silva CID, Carbas RJC, Silva LFMD. an overview of manufacturing functionally graded adhesives-Challenges and prospects, *J Adhes*. 2021;97(2):172-206. <https://doi.org/10.1080/00218464.2019.1646647>.
  69. Hart-Smith LJ. Adhesive bonding of composite structures—Progress to date and some remaining challenges, *J Compos Technol Res*. 2002;24(3):133-151. <https://doi.org/10.1520/CTR10566J>.
  70. Wind T, Diaz P, Funk T, Gbenouvo E, Seger E, Tolls J. Environmental risk assessment for relevant ingredients in adhesives and sealants in commonplace industrial uses. *Integr Environ Assess Manag*. 2022;18(5):1288-1296. <https://doi.org/10.1002/ieam.4566>.

#### How to cite this article:

Rahmani Z, Shirkavand Hadavand B. An overview of adhesives and their evolving role in industry. *J Stud Color World*. 2025;15(1):91-111. <https://doi.org/10.30509/jscw.2025.167402.1211> [ In Persian].