

# Adhesive Bonding of Polymer Composites

Hamid Rahimi\*

Iran Polymer and Petrochemical, P.O. Box: 14975-112, Tehran, Iran

Received: 19 June 2013, Accepted: 23 July 2013

## Abstract

This article is an introduction to adhesive bonding process. The joints in structures are challenged with some limitations such as material size, different types of materials joining together, accessibility and inspection, maintenance, and transportation. Therefore, a proper selection and design of composite bonding is essential. Polymer composites of interest in this study are polyester resins and reinforced epoxy with glass and carbon fibers. The structure of the review includes: an overview on various aspects of adhesive bonding and fundamental concepts of adhesion phenomena and then general methods for the preparation of composites surfaces including mechanical and physical preparations. The structural adhesives for bonding of polymer composites and their properties under different conditions are discussed. Finally, the mechanical properties of adhesive joints and effective parameters on the strength of these types of joints are analyzed.

## Key Words

**composite,  
adhesive bonding,  
structural adhesive,  
mechanical properties,  
surface preparation**

---

(\*) To whom correspondence should be addressed.  
E-mail: h.rahimi@ippi.ac.ir

## اتصال چسبی کامپوزیت‌های پلیمری

حمید رحیمی\*

تهران، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، صندوق پستی ۱۱۲-۱۴۹۷۵

دریافت: ۹۲/۳/۲۹، پذیرش: ۹۲/۵/۲۰

هدف از کار حاضر، آشنایی دانشجویان، مهندسان، طراحان و متخصصان فعال در زمینه کامپوزیت‌های پلیمری با کلیات فرایند اتصال چسبی است. دلایل وجود اتصالات در سازه‌ها شامل محدودیت در ابعاد قطعات، استفاده از مواد مختلف، ضرورت دسترسی و بازرسی، تعمیرات و حمل و نقل است. از این رو، انتخاب صحیح و طراحی اصولی روش اتصال کامپوزیت‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است. کامپوزیت‌های پلیمری مورد بحث در این مقاله، رزین‌های پلی‌استر و اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه و کربن‌اند. در این مقاله، ابتدا به جنبه‌های کلی اتصالات چسبی و مفاهیم بنیادی پدیده چسبندگی به‌طور مختصر اشاره می‌شود. سپس، روش‌های متداول برای آماده‌سازی سطوح کامپوزیت‌ها شامل روش‌های مکانیکی و فیزیکی مرور می‌شود. در ادامه، چسب‌های ساختاری مناسب برای اتصال کامپوزیت‌های پلیمری و خواص آنها در شرایط محیطی مختلف بررسی می‌شود. در بخش پایانی، خواص مکانیکی اتصالات چسبی نیز بررسی و پارامترهای موثر بر استحکام این نوع اتصالات تحلیل می‌شوند.

### چکیده



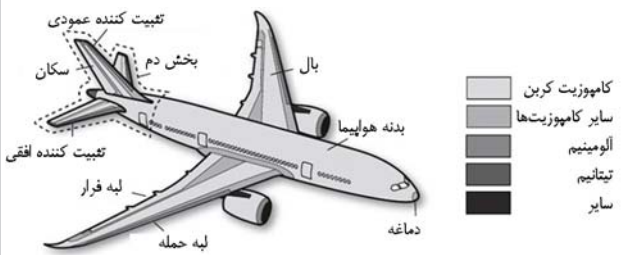
حمید رحیمی

### واژگان کلیدی

کامپوزیت،  
اتصال چسبی،  
چسب‌ساختاری،  
خواص مکانیکی،  
آماده‌سازی سطح

مقدمه

بشر از دیرباز از چسب‌ها برای مصارف گوناگون استفاده کرده است. امروزه با توجه به روند رو به رشد فعالیت‌های انسانی، کاربرد این مواد به‌طور چشمگیری افزایش یافته است [۵-۱]. در قدیم، چسب‌ها منشا گیاهی و حیوانی داشتند، ولی امروزه عمدتاً از پلیمرهای سنتزی استفاده می‌شود. صنایع بسته‌بندی، ساختمان و حمل و نقل به ترتیب عمده مصرف‌کنندگان چسب‌ها و درزگیرها در جهان هستند. در سال‌های اخیر، جایگاه چسب‌های ساختاری ارتقا یافته و ما شاهد تغییر فرایند ساخت سازه‌ها با استفاده از کامپوزیت‌های پلیمری و چسب‌ها هستیم. برای مثال، در ساخت هواپیماهای پیش‌رفته به تدریج قطعات کامپوزیتی اتصال یافته با چسب جایگزین سازه‌های آلومینیومی پرچ شده می‌شوند (شکل‌های ۱ و ۲). همان‌طور که از شکل ۲ مشخص است، مواد کامپوزیتی بیش از ۵۰ درصد وزن سازه هواپیمای بوئینگ ۷۸۷ را تشکیل می‌دهند و این روند رو به رشد است. شایان ذکر است، چسب‌ها برای مصارف پزشکی نیز استفاده می‌شوند. مثال بارز در این‌باره، استفاده از چسب‌های پخت نوری با تابش فرابنفش در دندانپزشکی است. چسب‌های قطره‌ای از نوع سیانوآکریلات یا ابرچسب‌ها به‌عنوان بخیه کاربرد دارند. گزارش شده است، این نوع چسب‌ها برای جلوگیری از خونریزی شدید سربازان مجروح در جنگ ویتنام، کاربرد داشته‌اند [۶]. دست‌یابی به اتصالات چسبی مناسب مستلزم رعایت مجموعه‌ای از اصول اولیه است که باید دقیقاً رعایت شود. با توجه به اینکه اتصال چسبی اصولاً یک پدیده سطحی است، شناخت ویژگی‌های سطح از اهمیت خاصی برخوردار است.



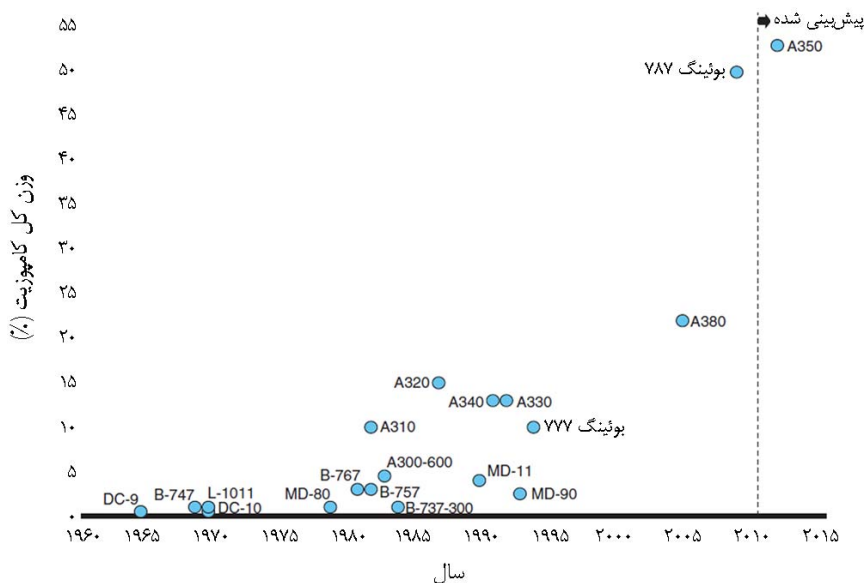
شکل ۱- مواد استفاده شده در ساختار هواپیمای بوئینگ ۷۸۷ [۷].

نکات عمومی

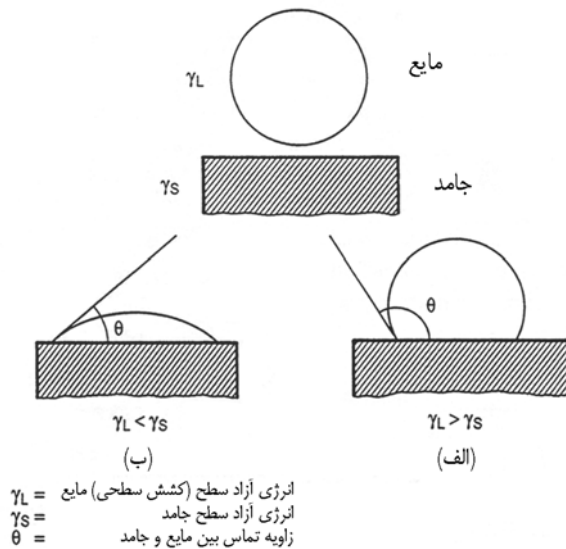
برای دستیابی به اتصال چسبی مناسب، باید نکات زیر لحاظ شود:

- ۱- چسب مناسب انتخاب شود.
- ۲- آماده‌سازی سطوح انجام گیرد.
- ۳- اتصال به‌طور مناسب طراحی شود.
- ۴- فرایند ساخت اتصال به‌طور دقیق کنترل شود.
- ۵- برای حصول اطمینان، باید در کلیه مراحل ساخت آزمون‌های کنترل کیفی اجرا شود.

چسب‌ها، ماهیتاً انتخاب مناسبی برای اتصال مواد کامپوزیت پلیمری هستند. دلیل اینکه رزین‌های استفاده شده در کامپوزیت‌ها نوعی چسب محسوب می‌شوند آن است که خواص آنها از خیلی جهات مشابه خواص چسب‌هاست. برای مثال، استفاده از چسب اپوکسی برای چسباندن کامپوزیت‌های بر پایه همان رزین، مصداق اتصال مواد یک‌جنس است. البته ممکن است، اختلاف دمای پخت و برخی خواص دیگر وجود داشته باشد.



شکل ۲- روند رشد مصرف کامپوزیت‌ها در هواپیماهای مسافری [۷].



شکل ۳- نمایی از پدیده خیس شدگی سطح جامد با قطره مایع.

### تماس بین سطحی

پدیده اتصال چسبی شامل خیس شدن سطح جامد با چسب مایع است. یادآور می‌شود، تشکیل یک فیلم نازک مایع باید یکنواخت و بدون گسستگی انجام شود (شکل ۳). از ساده‌ترین روش‌های کنترل کیفی برای بررسی خیس شدگی سطح، آزمون پخش آب روی سطح است. در این آزمون، چنانچه هنگام ریختن آب روی سطح مورد نظر قطره تشکیل شود، نشانه عدم خیس شدن و اگر آب به حالت لایه یکنواخت تشکیل شود، نشانه خیس شدگی خوب و خواص چسبندگی مناسب است.

همان‌طور که مایعات دارای کشش سطحی یا انرژی سطحی هستند، جامدات نیز از این ویژگی برخوردارند. اکثر پلاستیک‌ها و مواد آلی دارای انرژی سطح نسبتاً کم حدود  $30 \text{ mJm}^{-2}$  تا  $60 \text{ mJm}^{-2}$  هستند (جدول ۱).

انرژی سطح زیرآیند موردنظر باید بیش از کشش سطحی چسب باشد تا خیس‌شوندگی انجام شود. برای کامپوزیت‌های پلیمری اختلاف انرژی سطحی زیرآیند و چسب زیاد نیست. ولی با آماده‌سازی سطح زیرآیند، انرژی سطح آن افزایش می‌یابد که موجب خیس‌شدگی بهتر توسط چسب می‌شود.

### سازوکارهای چسبندگی

پس از برقراری پیوند مولکولی نزدیک بین زیرآیند و چسب، اتصال چسبی پس از پخت چسب آماده تحمل نیرو می‌شود. دو نظریه اصلی در ارتباط با پدیده چسبندگی مطرح است:

از مشکلات مرتبط با اتصال چسبی کامپوزیت‌ها، مسئله وجود آلاینده‌ها و پوشش ژلی نسبتاً شکننده روی سطح است. به همین دلیل، با وجود مزایای زیاد استفاده از چسب، نکات متعددی در مقایسه با اتصالات مکانیکی باید لحاظ شود. در مرحله طراحی قطعات کامپوزیت، اتصالات باید در نظر گرفته شوند تا مشکلات مرتبط با استحکام ضعیف در جهت ضخامت کامپوزیت کاهش یابد. آماده‌سازی سطح بسیار حیاتی است و کلیه آلاینده‌ها باید از روی سطح پاک شوند.

به‌طورکلی، استحکام یک اتصال چسبی تابعی از موارد زیر است:

- ترکیب و خواص کامپوزیت و نیز استحکام بین‌لایه‌ای آن،
- خواص سطحی کامپوزیت،
- هندسه اتصال و
- خواص مکانیکی چسب.

در ادامه، این موارد برای اتصالات با شکل هندسی ساده بررسی می‌شوند. در منابع متعددی آماده‌سازی سطح مهم‌ترین عامل اثرگذار برای دستیابی به ساخت اتصال چسبی مطلوب گزارش شده است [۱۰-۱]. از موانع اصلی استفاده گسترده از اتصالات چسبی، نبود دانش کافی درباره چسبندگی، روش‌های آماده‌سازی سطوح و اثر آنها بر خواص کوتاه‌مدت و درازمدت در برابر شرایط محیطی است. شرایط محیطی گرم و مرطوب، به‌ویژه برای قطعات فلزی چسبانده شده، مضر است. گرچه این شرایط در ظاهر برای کامپوزیت‌های پلیمری مشکل‌آفرین نیست، ولی آماده‌سازی سطح مناسب به عنوان پیش‌نیاز اصلی برای کاهش مشکلات همواره توصیه می‌شود. مباحث جامعی درباره بحث چسبندگی و آماده‌سازی سطوح توسط پژوهشگران ارائه شده است.

### پدیده چسبندگی

چسب‌ها با قابلیت چسبندگی به سطوح در لایه‌ای به ضخامت حدود  $0.1 \text{ nm}$  تا  $0.5 \text{ nm}$  عمل می‌کنند. پدیده چسبندگی با نیروهای بین‌مولکولی که بین سطوح عمل می‌کنند، مطرح و شامل انرژی سطح و کشش بین‌سطحی است. چسب‌ها هنگام چسباندن باید به‌حالت مایع و تا حدودی روی سطح جریان داشته باشند تا قابلیت نفوذ در خلل و فرج سطح را پیدا کرده و در نتیجه بتوانند پیوند مولکولی با سطح برقرار کنند. سپس، چسب جامد شده و اتصال به‌وجود می‌آید. البته در چسب‌های حساس به فشار به‌طور استثنائی، حالت ماده هنگام چسباندن تغییر نمی‌کند. پیش‌نیاز اصلی برای چسبندگی مناسب، پیوند نزدیک بین چسب و کامپوزیت و عدم وجود لایه‌های ضعیف یا آلاینده در میان سطوح است.

جدول ۱- مقادیر نوعی انرژی آزاد سطوح.

دسته بندی مواد	انرژی آزاد سطح ( $\text{mJm}^{-2}$ )	سطح - روش آماده سازی
فلزات - اکسید فلزات	الف ۱۳۵۰	آهن اکسید
	ب ۶۳۰	آلومینیم اکسید
	ج ۲۹۰	سیلیکا
	د ۷۲	آب
پلیمرهای گرماسخت	۶۴	پلیمر تقویت شده با الیاف کربن (CFRP <sup>1</sup> ) - لایه جدا شونده
	۵۸	پلیمر تقویت شده با الیاف کربن (CFRP <sup>2</sup> ) - به شدت سمباده زده شده
	۵۷	پلیمر تقویت شده با الیاف کربن (GFRP) - کرونا (تخلیه الکتریکی)
	۵۵	پلیمر تقویت شده با الیاف کربن (GFRP) - کرونا (تخلیه الکتریکی)
	۵۱	پلیمر تقویت شده با الیاف کربن (CFRP) - کرونا (تخلیه الکتریکی)
	۴۵	چسب اپوکسی
پلیمرهای گرما نرم	۳۸	پلیمر تقویت شده با الیاف کربن (GFRP) - سطح قالب گیری شده
	۴۲	نایلون
	۳۵	چسب آکرلیک
	۳۳	پلی اتیلن
	۳۰	چسب پلی یورتان
الاستومر	۲۴	سیلیکون

۱- رزین وینیل استر، ۲- رزین اپوکسی، ۳- رزین پلی استر، الف- در شرایط ایده آل (خلأ)، مقادیر اندازه گیری شده در هوا بین ۵۰ تا  $\text{mJm}^{-2}$  ۱۰۰ است و ب- برای مایعات کشش سطحی به جای انرژی آزاد سطح گزارش می شود. کشش و انرژی از لحاظ عددی یکسان اند، ولی کمیت های متفاوتی هستند.

### آماده سازی سطح

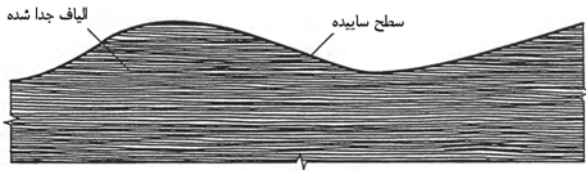
آماده سازی سطح نه فقط برای پاک کردن آلاینده ها به کار می رود، بلکه موجب افزایش سطح تماس و نیز اصلاح شیمیایی می شود. این مسئله به درگیری مکانیکی و همچنین برقراری پیوند شیمیایی یا فیزیکی کمک می کند. روش های اصلی آماده سازی سطوح کامپوزیت های پلیمری شامل چربی گیری، سایش مکانیکی و استفاده از لایه جداشونده هستند. البته نتایج برخی پژوهش ها نشان می دهد، ترکیبی از این روش ها برای افزایش چسبندگی موثرتر است. امروزه با منسوخ شدن استفاده از ترکیبات شیمیایی خطرناک برای آماده سازی سطح، تمایل به سمت استفاده از روش های فیزیکی همچون کرونا (تخلیه الکتریکی)، پلاسما و لیزر سوق یافته است. در روش کرونا، زیرآیند در برابر هوای یونی شده قرار می گیرد که موجب تشکیل گروه های قطبی روی سطح می شود. اثر آماده سازی روی انرژی آزاد سطح مواد کامپوزیتی در جدول ۱

- نظریه پیوند شیمیایی و فیزیکی و

- نظریه درگیری مکانیکی بین زیرآیند و چسب.

نظریه پیوند شیمیایی و فیزیکی بر این اساس است که امکان برقراری پیوندهای مختلف بین زیرآیند و چسب وجود دارد که البته به ماهیت این دو ماده بستگی دارد.

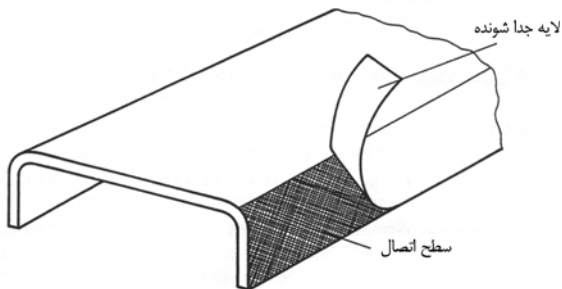
پیوند شیمیایی بین گروه های زیرآیند و چسب، علاوه بر افزایش استحکام کوتاه مدت، موجب تقویت اتصال چسبی در شرایط محیطی سخت می شود. در شرایطی که احتمال تشکیل پیوند شیمیایی کمتر است، پیوندهای فیزیکی بین زیرآیند و چسب ممکن است نقش داشته باشند. طبق نظریه درگیری مکانیکی، زبری سطح که موجب افزایش سطح تماس و درگیری چسب با سطح می شود، عامل اصلی چسبندگی به شمار می آید. در این باره مقدار زبری سطح و گرانش چسب نقش کلیدی در سازوکار چسبندگی ایفا می کنند.



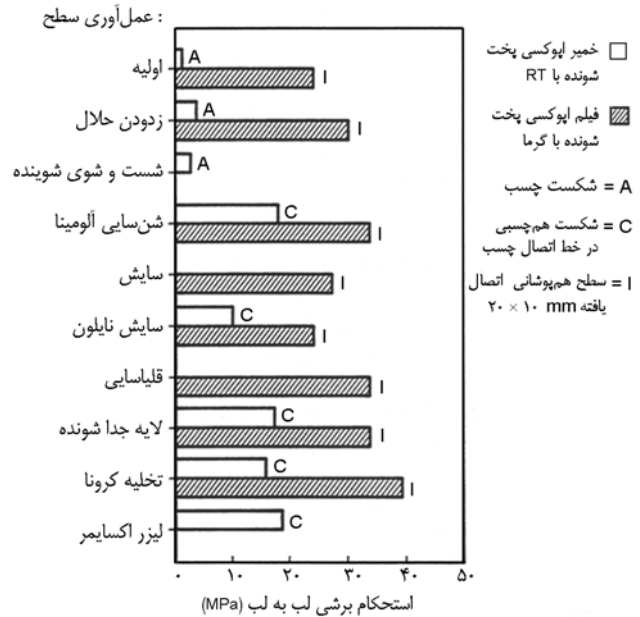
شکل ۶- نمایی از صدمه دیدن و قطع شدن الیاف پیوسته سطح کامپوزیت به دلیل سمباده کاری بیش از حد.

شود. به اعتقاد آنها این روش موجب تشکیل پیوندهای شیمیایی روی سطح می شود. شن سایی یکی دیگر از روش های مکانیکی آماده سازی سطح است که در آن از ذرات مختلف، همچون آلومینیم اکسید می توان استفاده کرد. استفاده از یخ خشک در فرایندی مشابه شن سایی برای پاک کردن رنگ از سطوح با حداقل آسیب رسانی نیز گزارش شده است. متغیرهای فرایندی در شن سایی شامل نوع و اندازه ذرات ساینده، فشار و زمان پاشش و همچنین فاصله دهانه دستگاه از سطح است [۸،۱۱].

آماده سازی سطح به روش لایه جداشونده، با استفاده از یک پارچه به شکل یک بار مصرف انجام می شود [۸،۱۲،۱۳]. طی قالب گیری و پخت کامپوزیت، لایه جداشونده به سطح قطعه می چسبد و هنگام اتصال چسبی از سطح جدا می شود (شکل های ۷ و ۸). لایه جداشونده معمولاً از پارچه الیاف شیشه، نایلون و پلی استر تهیه می شود. هنگامی که لایه جداشونده از سطح جدا می شود، موجب شکست در لایه رزین شده و سطحی تمیز و زبر روی زیرآیند ایجاد می شود. ساختار زبری سطح به وجود آمده همانند بافت پارچه لایه جداشونده است (شکل ۸). برخی پژوهشگران نشان داده اند، رطوبت موجود در لایه جداشونده اثر منفی بر خواص سطح کامپوزیت می گذارد که بدین ترتیب باعث افت خواص اتصال چسبی می شود. نکته مهم آنکه لایه جداشونده هنگام پخت کامپوزیت نباید تخریب شود. در غیر این صورت، هنگام جدا کردن لایه امکان باقی ماندن آن روی سطح وجود دارد که موجب کاهش



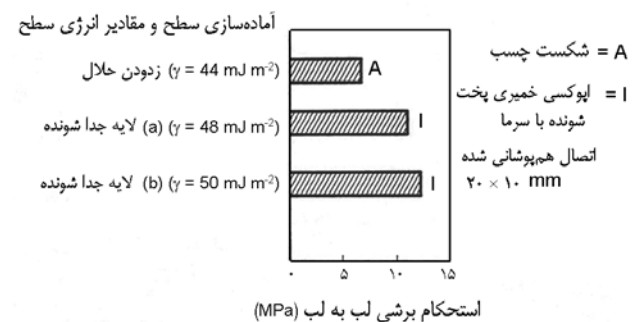
شکل ۷- نمایی از برداشتن لایه جداشونده از سطح کامپوزیت به منظور آماده سازی برای چسب زنی.



شکل ۴- اثر آماده سازی سطح بر استحکام برشی اتصال چسبی تک لایه با استفاده از کامپوزیت بر پایه رزین اپوکسی تقویت شده با پارچه بافته شده الیاف کربن (ضخامت کامپوزیت ۲ mm).

نشان داده شده است. مقایسه روش های مختلف آماده سازی سطح و اثر آن بر استحکام اتصال چسبی نیز در شکل های ۴ و ۵ نشان داده شده است.

برای زدودن آلاینده هایی از قبیل روغن و مواد جداکننده قالب می توان از استون و متیل اتیل کتون استفاده کرد. فرایند سایش مکانیکی به منظور از بین بردن براقیت سطح اجرا می شود و پس از آن باید برای پاک کردن آلاینده های تولید شده با سایش، از حلال استفاده شود. سایش مکانیکی به طور دستی یا با استفاده از ماشین آلات انجام می شود (شکل ۶). برخی پژوهشگران توصیه کرده اند، سایش مکانیکی در حالت خیس و در مجاورت ترکیبات سیلانی انجام



شکل ۵- اثر آماده سازی سطح بر استحکام برشی کوتاه مدت اتصال چسبی تک لایه با استفاده از کامپوزیت پولترود شده رزین پلی استر و تقویت شده با الیاف شیشه (ضخامت کامپوزیت ۴ mm).



رطوبت قرار گیرند، مستعد نفوذ و تخریب با آب هستند. با توجه به اینکه زیرآیندهای پلیمری دارای انرژی آزاد سطح کمتر از آب هستند، از لحاظ نظری پیوند چسب‌پلیمر در مجاورت آب پایدار خواهد بود.

### مواد چسبی

تنوع چسب‌های سنتزی زیاد است و همانند سایر فرایندهای انتخاب مواد، شاخص کارایی مناسب‌ترین روش برای دسته‌بندی آنهاست. برای اتصال چسبی ساختارهای مهندسی، نیازهای اصلی شامل موارد زیر است:

- ترجیحا چسب‌های نسبتا چقرمه، البته با رعایت تعادل بین استحکام با انعطاف‌پذیری و چقرمگی و  
- چسب‌های مقاوم به خزش و شرایط محیطی (دمای زیاد و رطوبت).

دسته‌بندی چسب‌ها از لحاظ سازوکار پخت یا تبدیل به فاز جامد نیز امکان‌پذیر است که شامل تبخیر حلال، سرد شدن از دمای ذوب و واکنش شیمیایی است. دو مورد اول عمدتا مربوط به چسب‌های غیرساختاری است که در تناقض با نیازهای اصلی چسب‌های ساختاری است. واکنش شیمیایی، که سومین مورد است، با چسب‌های ساختاری شامل اپوکسی، پلی‌یورتان و آکریلیک مرتبط است.

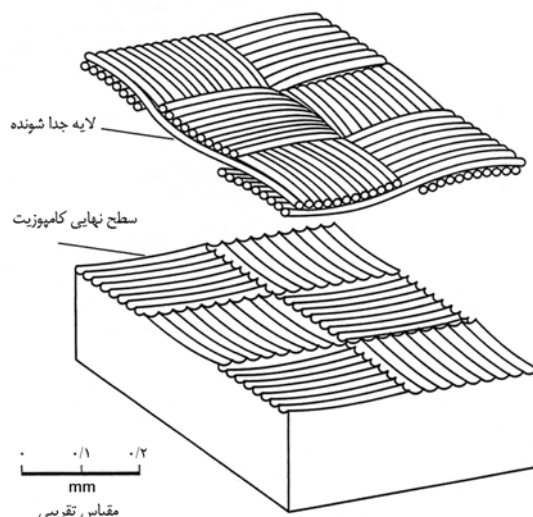
ملاحظات اصلی برای فرایند انتخاب چسب به شرح زیر است:

- استحکام (برش، کشش، فشار، ضربه و غیره)،
- شاخص تغییر شکل‌پذیری (مدول، چقرمگی، کرنش شکست، خزش و غیره)،
- سازگاری با زیرآیند،
- شرایط کاری و محیطی (دما، رطوبت و تنش)،
- شکل هندسی اتصال،
- فرایند ساخت اتصال (روش آماده‌سازی، نحوه اعمال چسب، سرعت پخت) و
- هزینه.

شایان ذکر است، یک سازمان پژوهشی در انگلستان با ایجاد بانک اطلاعاتی نرم‌افزاری برای انتخاب چسب تهیه کرده است [۱۵].

### انواع چسب‌ها

چسب‌های ساختاری مناسب برای چسباندن کامپوزیت‌های پلیمری شامل اپوکسی، آکریلیک و پلی‌یورتان گرماسخت هستند (جدول ۲). فرمول‌بندی‌های تجاری چسب‌ها ترکیبات پیچیده‌ای از مواد مختلف شامل پرکننده، چقرمه‌کننده، نرم‌کننده، رقیق‌کننده، مواد کاهش‌دهنده



شکل ۸- زبری سطح نوعی حاصل با استفاده از لایه جداشونده.

استحکام اتصال چسبی می‌شود. با وجود هزینه استفاده از لایه جدا شونده، این یک روش عملی منحصر به فرد به‌شمار می‌رود.

آماده‌سازی سطح به‌وسیله کرونا با استفاده از پدیده تخلیه الکتریکی انجام شده که موجب تغییر هوا به حالت پلاسما می‌شود. پلاسما با سطح واکنش می‌دهد و باعث تغییر ساختار آن می‌شود. واکنش‌هایی که در محیط پلاسما انجام می‌گیرد، موجب تشکیل گروه‌های قطبی روی سطح می‌شود. همان‌طور که از جدول ۱ مشخص است، کرونا موجب افزایش قابل توجه مقدار انرژی آزاد سطح برای زیرآیند پلیمر تقویت شده با الیاف شیشه (GFRP) می‌شود. برای برخی زیرآیندها، کرونا موجب ذوب موضعی ماتریس پلیمری می‌شود. این مسئله می‌تواند به زیر شدن سطح منجر شود. کرونا روش جاف‌تاده‌ای برای آماده‌سازی سطوح مواد گرمانرم از قبیل پلی‌اتیلن و پلی‌پروپیلن است. گرچه ممکن است اثر آن پس از مدتی از بین برود. از طرفی، آماده‌سازی سطوح کامپوزیت‌های گرماسخت از قبیل GFRP به‌ندرت با کرونا انجام شده، ولی اثر آن در بلندمدت حفظ می‌شود [۱۴].

از جدول ۱ مشاهده می‌شود که انرژی آزاد سطح کامپوزیت GFRP،  $38 \text{ mJm}^{-2}$  است. بنابراین، قابل پیش‌بینی است که چسب پلی‌یورتان با کشش سطحی  $30 \text{ mJm}^{-2}$ ، می‌تواند زیرآیند کامپوزیت را خیس کند. ولی، چسب اپوکسی با کشش سطحی  $45 \text{ mJm}^{-2}$ ، این قابلیت را ندارد. از طرفی، کلیه روش‌های آماده‌سازی کامپوزیت‌ها باعث افزایش انرژی آزاد سطح تا  $50 \text{ mJm}^{-2}$  می‌شود که با استفاده از چسب اپوکسی قابل خیس شدن است. نکته قابل ذکر این است که کشش سطحی آب  $72 \text{ mJm}^{-2}$  است و در مواردی که زیرآیندهای فلزی چسبیده در معرض

جدول ۲ - خواص نوعی برخی چسب‌های مهندسی.

خواص در دمای ۲۰°C	اپوکسی دوجزئی با پخت در دمای محیط	پلی‌یورتان دوجزئی	آکریلیک دوجزئی چقرمه شده
استحکام برشی (MPa)	۱۵-۳۵	۱۵-۲۵	۱۵-۲۵
استحکام کششی (MPa)	۲۰-۴۰	۱۵-۲۵	۱۵-۳۵
مدول کششی (GPa)	۱-۶	۰~/۵	~ ۰/۰۵
کرنش کششی شکست (%)	۱-۴	۱۰	۵۰
انرژی شکست (kJm <sup>-۲</sup> )	۰/۳ - ۱/۵	۵<	
دمای انتقال شیشه‌ای (°C)	۳۵-۵۰	۳۰-۳۵	
ویژگی‌ها			
مقاومت خزشی	عالی	ضعیف	ضعیف
مقاومت رطوبتی	عالی	متوسط	خوب
مقاومت گرمایی	خوب	متوسط	متوسط
پخت محیطی یا دمایی	محیطی - دمایی	محیطی	محیطی
زمان پخت	متوسط - طولانی	متوسط	کوتاه
قابلیت پر کردن فواصل	بلی	بلی	خیر

کشش سطحی و ضداکسنده است.

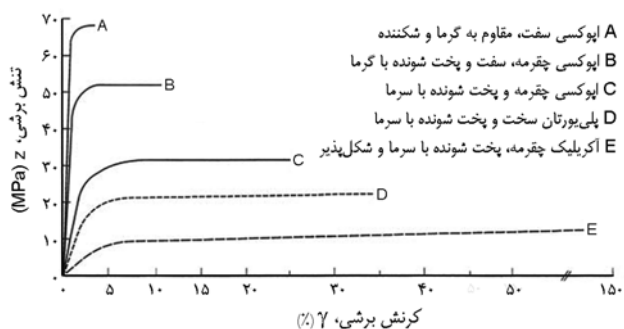
چسب‌های اپوکسی به‌عنوان مواد مستحکم مطرح‌اند. استحکام برشی این چسب‌ها می‌تواند از استحکام بین‌لایه‌ای کامپوزیت‌ها بیشتر باشد. چسب‌های اپوکسی معمولاً دوجزئی هستند، ولی سامانه‌های تک‌جزئی آنها نیز موجود است. برای چقرمه کردن اپوکسی روش‌های مختلفی وجود دارد که متداول‌ترین آنها استفاده از ذرات لاستیک است. اپوکسی‌ها بسته به فرمول‌بندی و نوع پرکننده، قابلیت پرکردن فاصله بین‌لایه‌ای را تا حدود ۱۰ mm دارند. دمای کاربرد این چسب‌ها بین ۶۰°C- تا ۶۰°C+ برای سامانه‌های پخت محیطی و ۱۲۰°C برای پخت‌های دما زیاد است. پلی‌یورتان‌ها طیف گسترده‌ای از چسب‌های پخت محیطی و پخت گرم را در برمی‌گیرند. پلی‌یورتان‌های گرماسخت معمولاً دوجزئی هستند. سامانه‌های تک‌جزئی که ماهیت گرمانرم دارند، در مجاورت رطوبت پخت می‌شوند. پلی‌یورتان‌ها چسبندگی عالی به سطوح کامپوزیت‌ها دارند، ولی از لحاظ استحکام از اپوکسی‌ها ضعیف‌تر بوده و در برابر شرایط محیطی مرطوب مستعد ضعف شدن هستند.

چسب‌های آکریلیک بر پایه مواد گرمانرم و از چسب‌های پخت محیطی هستند. مهم‌ترین نوع آنها سامانه دوجزئی چقرمه شده است. این نوع چسب‌ها حتی به سطوح تهیه شده با حداقل آماده‌سازی،

چسبندگی عالی دارند. از ویژگی‌های مهم این نوع چسب‌ها پخت سریع آنهاست. از آنجا که این مواد ماهیت گرمانرم دارند، خزش و مقاومت آنها در برابر دمای بالا دارای محدودیت است.

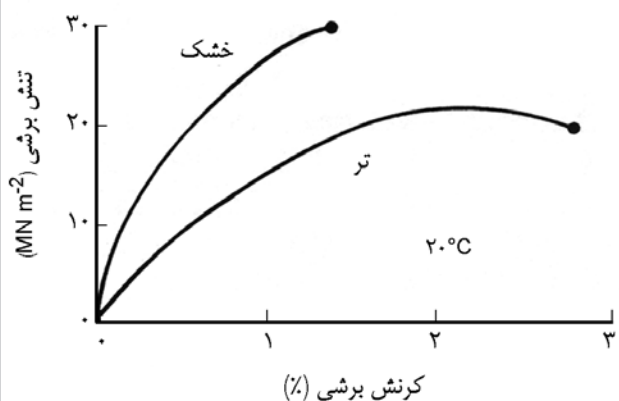
مقایسه رفتار تنش-کرنش چسب‌های یادشده در شکل ۹ نمایش داده شده است. مدول کشسانی چسب‌های اپوکسی بین ۱ GPa تا ۶ GPa متغیر است، در حالی که مدول چسب‌های پلی‌یورتان و آکریلیک ۰/۱ و حتی ۰/۰۱ این مقدار است.

چسب‌های پلیمری مقداری رطوبت جذب می‌کنند که موجب تغییر خواص آنها می‌شود (شکل‌های ۱۰ و ۱۱). همان‌طور که از این شکل‌ها پیداست، رطوبت موجب کاهش مدول و افزایش کرنش شکست می‌شود که البته این تغییرات اغلب برگشت‌پذیر است.



شکل ۹- رفتار نوعی تنش-کرنش چسب‌های مهندسی.





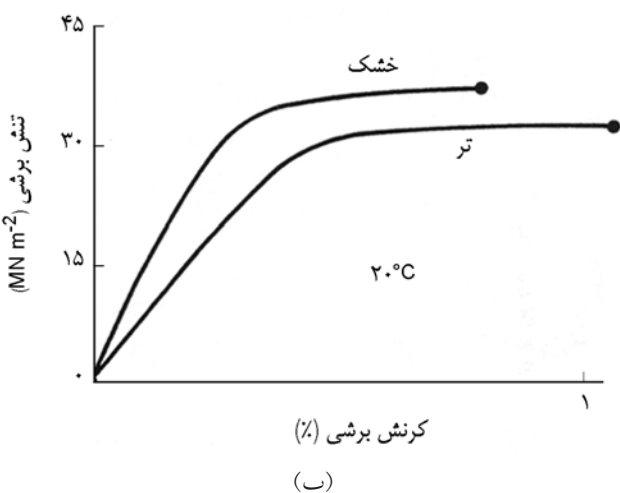
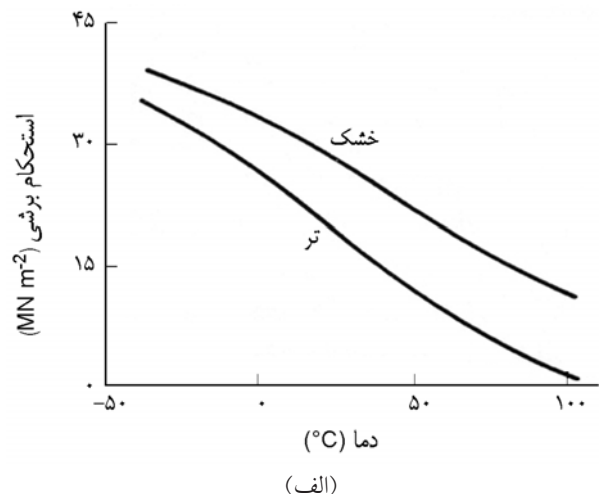
شکل ۱۱- اثر دما و رطوبت بر خواص کششی چسب اپوکسی پخت شده در دمای محیط.

مختلفی بستگی دارد. فرایند انتخاب چسب با مشخص شدن خواص آن در فاز طراحی آغاز می‌شود. سپس، کارایی آن از راه آزمون‌های مختلف بررسی می‌شود. نحوه اعمال چسب، سرعت پخت و هزینه از دیگر عوامل معین‌کننده در انتخاب چسب هستند.

### سازوکارهای شکست

سازوکارهای شکست کامپوزیت‌های پلیمری پیچیده و وابسته به ترکیب ماده و نوع بارگذاری هستند [۲۱-۳]. گرچه ممکن است، اتصال چسبی در برابر تنش‌های کششی، فشاری، برشی، شکافتگی و پوستگی قرار گیرد. اما، اتصال غالباً باید تحت برش و در حالت امکان با تنش فشاری ترکیب شود. شکست اتصالات چسبی کامپوزیت‌های پلیمری ممکن است به چهار شکل اتفاق بیافتد (شکل‌های ۱۲ و ۱۳):

- شکست قطعه که شامل شکست کششی در جهت اعمال نیرو،



شکل ۱۰- اثر دما و رطوبت بر خواص برشی چسب اپوکسی پخت شده در دمای محیط.

جدول ۳ مولفه‌های اصلی انتخاب چسب‌ها را نشان می‌دهد. همان‌طور که انتظار می‌رود، انتخاب چسب ساده نیست و به عوامل

جدول ۳- فهرست تطبیق برای انتخاب چسب.

مناسب‌ترین چسب	استحکام
اپوکسی، نیاز به انعطاف‌پذیری به‌ویژه برای اتصال مواد غیرهمسان	برش
پلی‌یورتان و آکریلیک برای استحکام پوستگی و چقرمگی خوب	کشش - شکافتگی
آکریلیک و پلی‌یورتان انعطاف‌پذیر	ضربه
	ویژگی‌های تغییرشکل
اپوکسی اصلاح نشده	مدول
اپوکسی اصلاح نشده	خزش
	شرایط محیطی
اپوکسی اصلاح نشده	رطوبت - دما

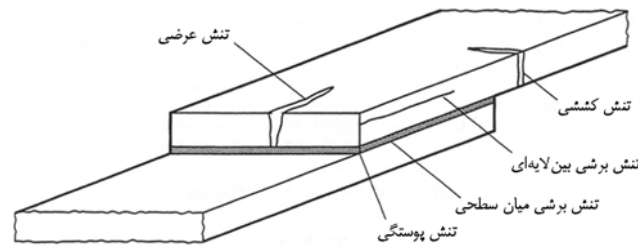
### چیدمان الیاف و فرایندهای ساخت کامپوزیت

مقدار، توزیع و چیدمان الیاف در کامپوزیت‌ها اثر بسزایی بر مناسب بودن آنها برای استحکام قطعه و اتصال چسبی دارد [۲۷-۲۲، ۱۷، ۱۶، ۳]. از نقطه نظر استحکام کششی، الیاف باید در راستای اعمال نیرو قرار گیرند.

البته این روش برای اکثر قطعات که در چند جهت تحت نیرو قرار می‌گیرند، اجرایی نیست. برای کامپوزیت‌های تک‌جهتی معمولاً یک پارچه نازک در سطح قطعه قرار می‌دهند که از شکست در جهت عمود بر الیاف جلوگیری شود.

استحکام نسبتاً ضعیف کامپوزیت‌ها در جهت ضخامت، از مشکلات اساسی آنها به شمار می‌رود. از راه‌های افزایش استحکام، استفاده از الیاف در جهت ضخامت یا استفاده از پارچه‌های سه‌بعدی است. اما این روش‌ها، اغلب مشکل و هزینه‌بر است. از راه‌های غلبه بر محدودیت استحکام در جهت ضخامت، استفاده از اتصالات ترکیبی چسب و اتصال مکانیکی است. در این نوع اتصالات، اعمال تنش فشاری از راه اتصال مکانیکی، از شکست در جهت ضخامت جلوگیری می‌کند.

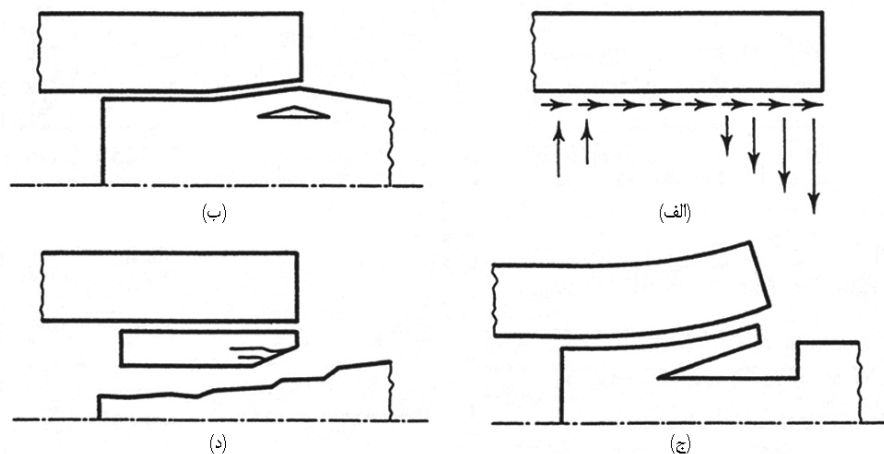
در فرایندهای شکل‌دهی قالب بسته، سطوح قطعات کامپوزیت حاوی آلاینده‌های جداکننده است. این آلاینده‌ها باید با استفاده از روش چربی‌گیری یا سایش مکانیکی از سطح برداشته شوند. نکته دیگر مربوط به کامپوزیت‌های GFRP است. این نوع کامپوزیت‌ها حاوی افزودنی‌های کاهنده جمع‌شدگی و عوامل جلوگیری‌کننده از تبخیر استیرن است. این مواد در سطح تجمع می‌کنند که در این حالت، خواص لایه بیرونی کامپوزیت با داخل آن بسیار متفاوت خواهد بود. بر این اساس، بررسی خواص سطح و اصلاح آن ضروری است.



شکل ۱۲- سازوکارهای احتمالی شکست در اتصال چسبی کامپوزیت‌های پلیمری [۱].

شکست عرضی و شکست برشی بین‌لایه‌ای است.  
- شکست از راه پدیده پوستگی یا شکافتگی به دلیل وجود تنش کششی در جهت ضخامت قطعه است.  
- شکست برشی چسب و  
- جدایش چسب از سطح زیرآیند.

شکست کششی بین‌لایه‌ای در لبه‌های آزاد اتصال رخ می‌دهد (شکل ۱۴). ماهیت نامتقارن بارگذاری موجب ایجاد گشتاور و تمرکز تنش برشی و پوستگی در لبه‌های آزاد می‌شود. هر چه ضخامت قطعه کامپوزیتی بیشتر باشد، تنش‌ها نیز بیشتر می‌شوند. برای اتصال چسبی قطعات کامپوزیت پلیمری، استحکام کششی بین‌لایه‌ای در جهت ضخامت عامل معین‌کننده است. به عبارت دیگر، از آنجا که استحکام پوستگی (کششی) چسب‌های قوی بیشتر از استحکام کششی بین‌لایه‌ای کامپوزیت است، شکست بین‌لایه‌ای رخ می‌دهد. شکست در لایه چسب به ندرت اتفاق می‌افتد، مگر اینکه چسب خیلی شکننده (اپوکسی اصلاح نشده) یا خواص مکانیکی آن خیلی ضعیف باشد. جدایش چسب از سطح زیرآیند به هیچ وجه نباید رخ دهد و در حالت بروز، این مشکل به عدم انجام آماده‌سازی مناسب سطح برمی‌گردد.



شکل ۱۳- سازوکار شکست بین‌لایه‌ای کششی در اتصال چسبی کامپوزیت‌های پلیمری [۱].

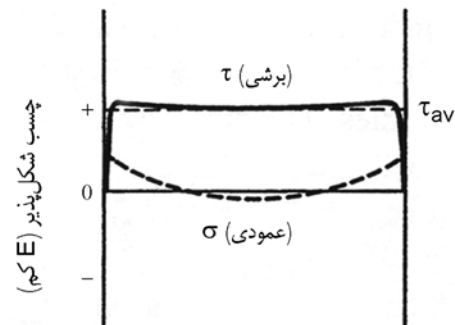
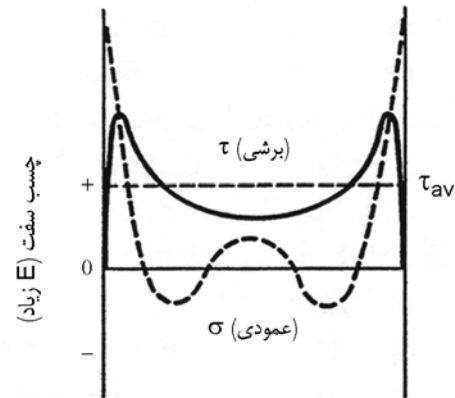
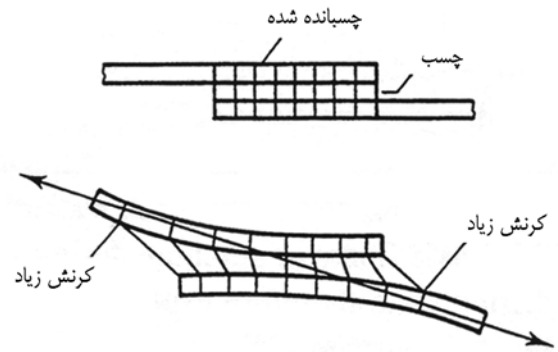
اعمال شده در انتهای لبه‌ها موجب تمرکز تنش می‌شود (شکل ۱۴). مقدار تمرکز تنش بستگی به سفتی چسب و کامپوزیت دارد. در حالت استفاده از چسب‌های چقرمه از قبیل آکریلیک و پلی‌یورتان، تمرکز تنش برشی و پوستگی در لبه‌ها محدود و توزیع آنها یکنواخت است. گرچه این مزیت به قیمت از دست دادن برخی خواص دیگر از قبیل مدول است.

بزرگی تنش‌ها در اتصالات چسبی به عوامل زیر بستگی دارد:

- مدول برشی چسب،  $G_a$ ،
- طول اتصال،  $d$ ،
- خواص کامپوزیت،  $G_{xy}$ ،  $x_{y0}$ ،  $E_x$ ،  $E_y$ ،
- ضخامت کامپوزیت،  $d_h$ ،
- ضخامت لایه چسب،  $t$  و
- ظرفیت کرنش پلاستیک چسب.

تمرکز تنش در تحلیل کشسان برای اتصال چسبی تک‌لبه با زیرآیندهای همسان را می‌توان با معادله  $G_p I^2 / Eht$  نشان داد [۲۹-۲۷، ۳]. همان‌طور که از شکل ۱۵ مشخص است، استحکام اتصال تک‌لبه با عرض اتصال ارتباط خطی دارد. ولی این مسئله در باره طول آن صدق نمی‌کند. در اتصالات واقعی لبه آزاد دارای چسب اضافی است که موجب کاهش تمرکز تنش می‌شود (شکل ۱۶). افزون بر این، تغییر شکل پلاستیک در نواحی تمرکز تنش موجب رهاسازی مقدار تنش می‌شود.

در اتصالات دولبه، گشتاور نیرو در مقایسه با اتصال تک‌لبه کمتر است، اما همچنان وجود دارد. در برخی دستورکارهای طراحی کامپوزیت‌ها [۲۶] توصیه شده است تا برای اتصال قطعات



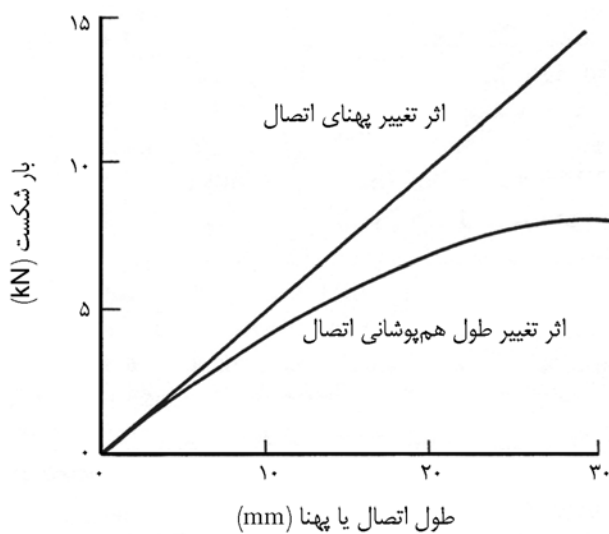
شکل ۱۴- توزیع نوعی تنش‌ها در لایه چسب اتصال تک‌لبه تحت نیرو با چسب‌های مدول زیاد و کم [۳].

### طراحی اتصالات چسبی

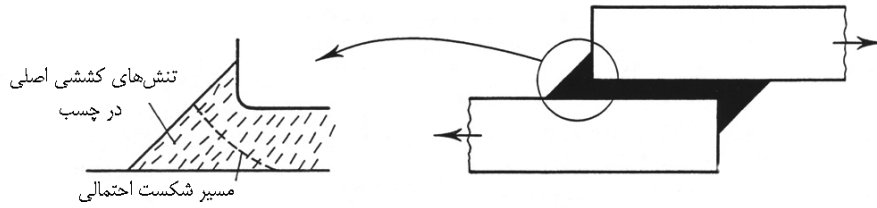
جنبه‌های مختلف طراحی شامل شکل هندسی اتصال، انتخاب چسب، دانش خواص چسب و کامپوزیت و تحلیل تنش‌هاست. موارد زیر در طراحی باید لحاظ شود:

- ضخامت یکنواخت لایه چسب، حدوداً بین ۰/۵ mm تا ۱/۵ mm،
- اعمال نیروی برش (در حالت امکان نیروی فشاری) روی اتصال،
- به حداقل رساندن تنش پوستگی و شکافتگی در اتصال و
- اتصال با ویژگی خودمکان‌یابی هنگام پخت چسب.

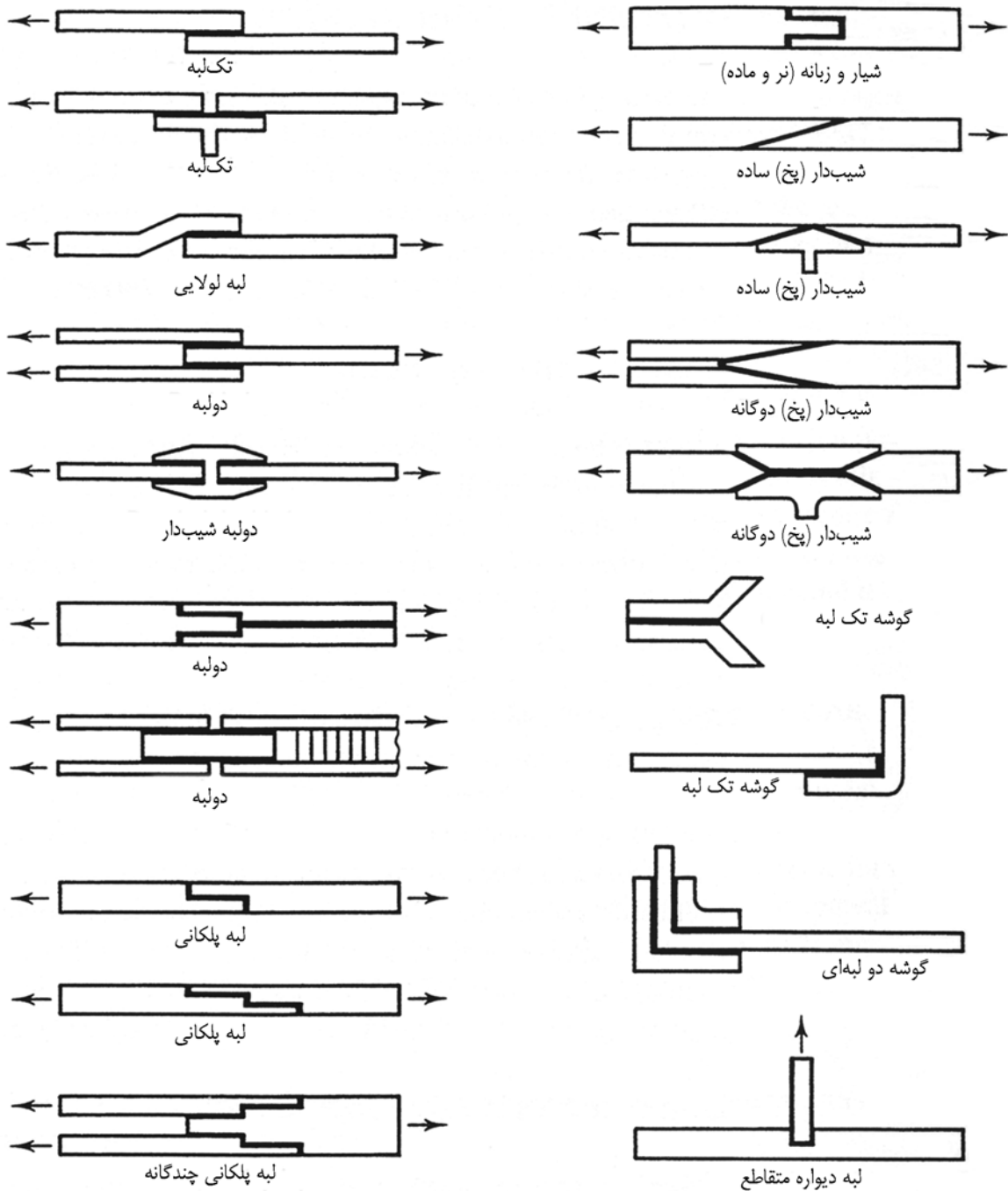
متداول‌ترین و در عین حال ساده‌ترین نوع اتصال چسبی، اتصال چسب برشی تک‌لبه است. در همه اتصالات چسبی لبه‌ای نیروی



شکل ۱۵- اثر طول و عرض لایه چسب بر استحکام اتصال تک‌لبه [۳].



شکل ۱۶- شکل هندسی لایه چسب در لبه اتصال و سازوکار احتمالی ترک خوردن آن [۱].



شکل ۱۷- انواع اتصالات چسبی برشی.

## نتیجه‌گیری

اتصالات چسبی مناسب‌ترین روش برای متصل کردن کامپوزیت‌های پلیمری هستند. همانند سایر روش‌ها این فناوری نیز دارای محدودیت‌هایی است. بر این اساس، به منظور دستیابی به خواص مناسب و کاهش مشکلات مرتبط با اتصالات چسبی، کلیه مراحل آن باید به‌طور دقیق اجرا شود. فعالیت‌های پژوهشی گسترده‌ای در حال انجام است. از زمینه‌های نوظهور، پژوهش در جهت دستیابی به چسب‌های چندمنظوره و هوشمند است. در این راستا توسعه چسب‌های ساختاری خودترمیم شونده، از ضرورت‌های لازم است. با توجه به نوع سازه و شرایط کاربرد، استفاده از اتصالات ترکیبی از قبیل چسب و اتصال مکانیکی قابل بررسی است.

ضخیم‌تر از 5 mm از اتصالاتی به‌غیر از تک‌لبه یا دولبه استفاده شود. در این موارد پیشنهاد شده است تا از اتصال شیب‌دار (پخ‌دار)، پله‌ای و شیار و زبانه (نر و ماده) استفاده شود (شکل ۱۷). این نوع اتصالات توزیع تنش یکنواختی را به‌وجود می‌آورند، اما این مسئله مستلزم طراحی و ماشین‌کاری دقیق قطعات است. از چالش برانگیزترین جنبه‌ها، طراحی اتصالات مربوط به مواد ناهمسان است.

در این حالت شرایط ناسازگاری کرنش در اتصال به‌وجود می‌آید که باید برای آن چاره‌اندیشی شود. در چنین شرایطی توصیه می‌شود، از چسب‌های نرم با انعطاف‌پذیری مناسب استفاده شود. همچنین، با فراهم کردن چسب اضافی در لبه اتصال تمرکز تنش کاهش می‌یابد.

## مراجع

- Kinloch A.J., *Adhesion and Adhesives: Science and Technology*, Springer, 1987.
- Minford J.D., *Handbook of Adhesive Bonding*, Marcel Dekker, 1993.
- Adams R.D., Comyn J., and Wake W.C., *Structural Adhesive Joints in Engineering*, Springer, 2nd ed., 1997.
- Handbook of Adhesive Technology*, Pizzi A. and Mittal K.L. (Eds.), Marcel Dekker, 2003.
- Handbook of Adhesion*, Packham D.E. (Ed.), Wiley, 2nd ed., 2005.
- Comyn J., *Adhesion Science*, The Royal Society of Chemistry, 1997.
- Dillingham G.L., Aviation Safety - Status of FAA's Actions to Oversee the Safety of Composite Airplanes, United States Government Accountability Office, 2011.
- Wingfield J.R.J., Treatment of Composite Surfaces for Adhesive Bonding, *Inter. J. Adhesion Adhes.*, **13**, 151-156, 1993.
- Pocius A.V., *Adhesion and Adhesives Technology: An Introduction*, Hanser Gardner, 2002.
- Wegman R.F. and van Twisk J., *Surface Preparation Techniques for Adhesive Bonding*, William Andrew, 2012.
- Bowditch M.R. and Stannard K.J., Adhesive Bonding of GRP, *Composites*, **13**, 298-304, 1982.
- Hart-Smith L.J., A Peel-type Durability Test Coupon to Assess Interfaces in Bonded, Co-bonded, and Co-cured Composite Structures, *Inter. J. Adhesion Adhes.*, **19**, 181-191, 1999.
- Kanerva M. and Saarela O., The Peel Ply Surface Treatment for Adhesive Bonding of Composites: A Review, *Int. J. Adhesion Adhes.*, 2013.
- Cheshire E.J., Bonding Large GRP Skinned Sandwich Panels, *Proceedings of 18th International BPF Composites Congress*, Manchester, UK., British Plastics Federation, **137-141**, 1992.
- Anon CATS, *Adhesive Selector Programme*. Centre for Adhesive Technology, TWI, Abington, Cambridge, UK, 1995.
- Matthews F.L. *Joining Fibre-Reinforced Plastics*, Elsevier, 1987.
- Kairouz K.C. and Matthews F.L., Strength and Failure Modes of Bonded Single Lap Joints Between Cross-ply Adherends, *Composites*, **24**, 475-484, 1993.
- Da Silva L.F.M. and Ochsner A., *Modeling of Adhesively Bonded Joints*, Springer, 2008.
- Banea M.D. and da Silva L.F.M., Adhesively Bonded Joints in Composite Materials: An Overview, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part L, *J. Mater. Design Appl.*, **223**, 1-18, 2009.
- Advances in Structural Adhesive Bonding*, Dillard D. (Ed.), CRC, 2010.
- Purimpat S., Jérôme R., and Shahram A., Effect of Fiber Angle

- Orientation on a Laminated Composite Single-lap Adhesive Joint, *Adv. Compos. Mater.*, 1-11, 2013.
22. Eckold G.C., *Design and Manufacture of Composite Structures*, Woodhead, 1994.
23. Hancox N.L. and Mayer R.M., *Design Data for Reinforced Plastics: A Guide for Engineers and Designers*, Chapman & Hall, 1994.
24. Ashcroft I.A., Hughes D.J., and Shaw S., Adhesive Bonding of Fibre Reinforced Polymer Composite Materials, *Assembly Automation*, **20**, 150-161, 2000.
25. Hart-Smith L.J., Adhesive Bonding of Composite Structures: Progress to Date and Some Remaining Challenges, *J. Compos. Technol. Res.*, **24**, 133-151, 2002.
26. *Structural Design of Polymer Composites: EUROCOMP Design Code and Background Document*, Clarke J.L. (Ed.), Taylor & Francis, 2003.
27. Cheng J., Li G., and Pang S.S., *Smart Adhesively Bonded Composite Joints: Analysis and Design*, Nova Science, 2009.
28. Da Silva L.F.M. and D Adams R., Techniques to Reduce the Peel Stresses in Adhesive Joints with Composites, *Inter. J. Adhesion Adhes.*, **27**, 227-235, 2007.
29. Zhao G.H., Shu Q.L., and Huang B.S., Effect of Geometry on Stress Distribution of Spew Fillet of Co-Cured Composite Single Lap Joint, *Adv. Mater. Res.*, **368**, 179-182, 2012.