

# بررسی کامپوزیت‌ها و اتصالات آن

کامپوزیت یا مواد مرکب رده‌ای از مواد پیشرفته هستند که در آن‌ها از ترکیب مواد ساده به منظور ایجاد موادی جدید با خواص مکانیکی و فیزیکی برتر استفاده شده است. ساختار سازه‌های کامپوزیتی معمولاً از به هم پیوستن اعضا جهت انتقال و تحمل نیروهای وارده حاصل می‌شود. استفاده از مواد مرکب نیازمند درک صحیحی از این مواد می‌باشد می‌باشد. در این میان محدودیتی برای طراحی و استفاده از این ماده در ساخت قطعات وجود دارد. اتصالات به علت حساسیت زیاد در برابر انتقال بار، تمرکز تنش و ناهمگونی طرفین اتصال، یکی از مهم‌ترین اجزا در سازه‌های کامپوزیتی هستند. اتصالات انواع متفاوتی دارند که هر کدام از این اتصالات دارای نقاط قوت و ضعف می‌باشند که با توجه به آن مورد استفاده قرار می‌گیرند.

واژه‌های کلیدی: مواد مرکب، تمرکز تنش، اتصالات

سارا کی پور سنگسری\*، کارشناس ارشد،  
 دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه سمنان

\*نویسنده مخاطب، آدرس: سمنان، کدپستی:  
 ۱۹۱۱۱-۳۵۱۳۱

sara\_keypour@alum.semnan.ac.ir

## Analysis of Composite Material and Composite Joint

*A composite is commonly defined as a combination of two or more distinct materials, to create a new material with properties that cannot be achieved by any of the components acting alone. The growing use of composites for structural applications has made a thorough understanding of the behavior of composite joints in various applications. Joints are critical elements in composite due to their stress concentration. Composite joint is one of the most important part of structure. There are different types of joint, each of them has its own pros and cons and use in various applications and environments.*

Keywords: composite, stress concentration, joint

S. Keypour\*, M. Sc., Faculty of  
 Aerospace Engineering, Semnan  
 University

\*Corresponding Author, Postal Code:  
 19111-35131, Semnan, IRAN

sara\_keypour@alum.semnan.ac.ir

## مقدمه

مواد مرکب قرن هاست که مورد استفاده قرار می‌گیرد. برخی بر این باورند که اولین بار مصریان از تخته چن‌دلا خمیر کاغذ و کاغذ جهت بالا بردن مقاومت آجرهای گلی استفاده کردند. فلسطینیان نیز ۸۰۰۰ سال قبل از میلاد از نی و حصیر برای ساخت آجر استفاده می‌کردند. به‌طور کلی مواد مرکب یا کامپوزیت<sup>۱</sup> به موادی گفته می‌شود که از مخلوط چند ماده (حداقل دو ماده) با خواص متفاوت تشکیل شده و محصول حاصل ماده‌ای با خاصیت جدید و خواص مناسب‌تر می‌باشد. امروزه مواد مرکب در انواع سازه‌های مهندسی شامل فضاپیماها، هواپیماها، خودروها، مهندسی دریا و کشتی‌سازی به‌کار می‌رود. وجود ویژگی‌هایی چون استحکام مخصوص بالا، سختی مخصوص بالا، عمر خستگی زیاد، وزن کم، مقاومت در برابر ضربه، مقاومت در برابر خوردگی و خواص گرمایی کامپوزیت‌ها، علل کاربرد آنها در صنایع مختلف می‌باشد. کامپوزیت‌ها از دو قسمت اصلی ماتریس<sup>۲</sup> و الیاف<sup>۳</sup> تشکیل شده است. خواص کامپوزیت‌ها به عوامل مختلفی از قبیل نوع مواد تشکیل‌دهنده و ترکیب درصد آنها و نحوه لایه‌چینی بستگی دارد. بسیاری از الیاف‌ها به تنهایی استحکام خوبی از خود نشان می‌دهند، اما برای رسیدن به خواص بهتر، الیاف باید به یک زمینه مناسب پیوند زده شوند. ماتریس از سایدگی و تشکیل عیوب سطحی جدید جلوگیری می‌کند و مانند رابطی الیاف را در محل مناسب نگه می‌دارند. یک ماتریس خوب باید توانایی تغییر شکل تحت بار وارده را داشته، نیرو را به الیاف انتقال داده، تمرکز تنش را توزیع کرده، الیاف را از صدمات محافظت نموده و از رشد ترک در کامپوزیت جلوگیری کند. با توجه به اینکه طیف وسیعی از مواد مرکب وجود دارند، نمی‌توان راجع به خواص مواد مرکب به‌طور کلی و دقیق بحث کرد. چراکه، تمامی مواد مرکب غیرهمگن هستند و دارای خواص غیر متقارن می‌باشند. امروزه استفاده از مواد کامپوزیتی در صنایع پیشرفته مانند هوافضا و صنعت خودرو که نیاز به وزن کم سازه و سفتی و استحکام بالای آن دارد، رو به افزایش است. علاوه بر این، در طول سال‌ها به علت افزایش تجربه ساخت و تکنولوژی تولید، هزینه استفاده از این مواد کاهش پیدا کرده است. معمولاً در سازه‌های کامپوزیتی اتصالات بحرانی‌ترین نقاط سازه محسوب می‌شوند. از این‌رو، این اتصالات بسیار مورد توجه قرار می‌گیرند. اتصالات مواد مرکب پیشرفته مثل کربن-اپوکسی<sup>۴</sup> در هوافضا کاربرد زیادی دارد. معمولاً اتصالات را می‌توان به اتصالات چسبی و

اتصالات مکانیکی شامل پیچ و پرچ و ترکیب آنها تقسیم کرد. اتصالات به علت حساسیت بیشتر در برابر انتقال بار، تمرکز تنش و ناهمگونی جنس، هندسه و شرایط مرزی، یکی از مهم‌ترین و حساس‌ترین اجزا در سازه‌های کامپوزیتی هستند.

## انواع مواد مرکب

تقسیم‌بندی‌های مختلفی در مورد کامپوزیت‌ها انجام گرفته است و خواص کامپوزیت‌ها به عوامل مختلفی از قبیل نوع مواد تشکیل‌دهنده و ترکیب درصد آنها، شکل و آرایش الیاف و اتصال دو جزء به یکدیگر بستگی دارد. انواع متفاوتی از الیاف برای تقویت کردن رزین در مواد مرکب مورد استفاده قرار می‌گیرد که عبارتند از:

۱. شیشه<sup>۵</sup>،
۲. گرافیت یا کربن<sup>۶</sup>،
۳. مواد آلی شیمیایی<sup>۷</sup>،
۴. برن<sup>۸</sup> و
۵. سرامیک<sup>۹</sup>.

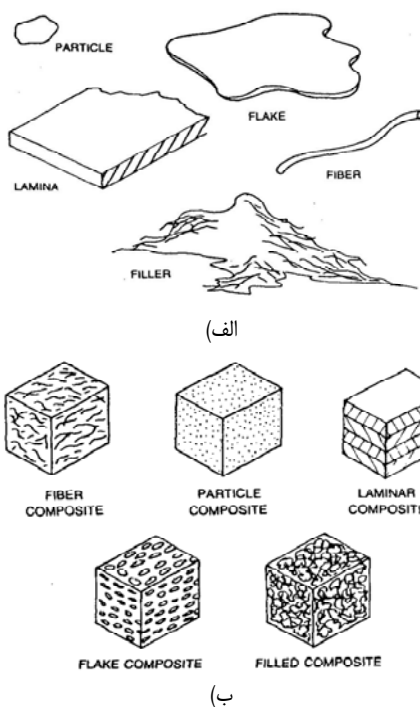
با وجود اینکه، برخی از الیاف مانند گرافیت و آرامید<sup>۱۰</sup> استحکام بیشتری دارند، اما الیاف شیشه به دلیل دارا بودن نسبت استحکام به وزن بالا و ارزان بودن از پرکاربردترین الیاف‌های محسوب می‌شوند. الیاف شیشه دارای مقاومت شیمیایی بسیار خوبی است. این الیاف قابل احتراق نبوده و رطوبت جذب نمی‌کنند. اما استحکام، سختی و مقاومت خزشی شیشه با افزایش دما کاهش می‌یابد. همچنین، به علت خواص دی‌الکتریک خوب الیاف D-Glass در ریدوم<sup>۱۱</sup> هواپیما مورد استفاده قرار می‌گیرد.

الیاف جدید مقاوم از جنس برن، آرامید و کربن، نقطه عطف دیگری در پیشرفت کامپوزیت‌ها است. الیاف کربن دارای استحکام و سختی بالا به همراه وزن کم و ویژگی‌های استثنایی مقاومت در برابر خوردگی می‌باشند. مقاومت مکانیکی در دمای بالا، خنثی بودن از لحاظ شیمیایی و ویژگی ضربه‌پذیری بالا نیز از دیگر مزایای این الیاف می‌باشد. در مقایسه با الیاف شیشه، کربن از نظر صلابت و سبکی به مراتب بهتر بوده گرچه انرژی شکست آن کمتر است [۱]. اجزای سازه‌های ماهواره‌ها، سازه‌های داخلی هواپیماهای مسافربری اعم از پنل صندلی‌های کربنی، میزهای کربنی و سایر پوشش‌های کربنی، دماغه هواپیماهای مافوق صوت، قطعات حساس موتور هواپیماها همگی از

5. Glass  
6. Graphite  
7. Organic  
8. Boron  
9. Ceramic  
10. Aramid  
11. Radome

1. Composite  
2. Matrix  
3. Fibers  
4. Carbon-Epoxy

- ۱- کامپوزیت‌های الیافی: که شامل الیاف محاط شده در ماتریس هستند. فاز تقویت‌کننده در این مواد رشته‌ای شکل هستند.
- ۲- کامپوزیت‌های لایه‌ای: که شامل لایه‌هایی از موادی که بر روی هم قرار گرفته‌اند.
- ۳- کامپوزیت‌های ذره‌ای: که شامل ذرات محاط شده در ماتریس هستند.
- ۴- کامپوزیت‌های پولکی: ساخته شده از پولک با یا بدون ماتریس.
- ۵- کامپوزیت‌های حجمی: ماتریس یک فاز پیوسته که به وسیله ماده دیگری (فاز تقویت‌کننده) پر شده تشکیل می‌شوند [۳، ۴].



شکل ۲- الف) اجزا کامپوزیت، ب) انواع کامپوزیت [۴]

### اتصالات

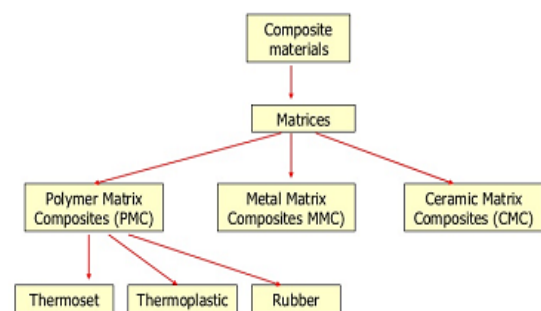
یکی از مهم‌ترین مسائل در ساخت سازه‌های کامپوزیتی توانایی اتصال و مونتاژ آنهاست. ساختار سازه‌ها معمولاً از به هم پیوستن اعضا جهت انتقال و تحمل نیروهای وارده حاصل می‌شود. از به هم پیوستن اعضای سازه مانند پوسته‌ها، قاب‌ها و تیرهای سازه هواپیما شکل می‌گیرد. معمولاً اتصالات را می‌توان به اتصالات چسبی، اتصالات مکانیکی شامل پیچ و پرچ یا مجموع دو روش تقسیم کرد.

پیچ و پرچ قدیمی‌ترین و محبوب‌ترین روش اتصال قطعات فلزی سازه‌های هواپیماست. این نوع اتصالات در هواپیماهای بزرگ، هواپیما حمل و نقل (که در آن تعداد پرچ به میلیون‌ها می‌رسد)، جنگنده‌های سبک، هواپیماهای حمل بار و

نمونه‌های الیاف کربن در صنایع هوافضا می‌باشد. یکی از مهم‌ترین مواد کامپوزیت پیشرفته، کامپوزیت‌های تقویت شده با فیبر کربن مورد استفاده در صنایع هوافضا است. این مواد به دلیل دارا بودن وزن کم، مقاومت و استحکام بالا و همچنین قابلیت شکل‌پذیری قطعات کامپوزیت به شکل‌های منحنی و پیچیده در کاربردهای نظامی، مورد نیاز است. کامپوزیت‌ها از زمان معرفی به طور متوسط ۲۵ درصد وزن هواپیما را تشکیل می‌دهند. پیشرفت‌های اخیر در طراحی هواپیما، که در بعضی از سری‌های بمباردر<sup>۱۲</sup>، ایرباس ای ۳۸۰<sup>۱۳</sup> و هواپیماهای بوئینگ بی ۷۸۷<sup>۱۴</sup> دیده می‌شود، منجر به افزایش قابل ملاحظه‌ای در استفاده از کامپوزیت‌ها شده است [۲].

آرامید، ترکیب آلی حلقوی از کربن، هیدروژن، اکسیژن و نیتروژن می‌باشد. دانسیته کم و استحکام کششی بالا در این الیاف، موجب تشکیل یک ساختار مقاوم به ضربه با سفتی حدود نصف الیاف کربن می‌شود. جلیقه ضدگلوله از موفقیت‌آمیزترین کاربردهای الیاف آرامید می‌باشد. همان‌طور که گفته شد ماده زمینه و یا ماتریس وظیفه نگهداری اجزا ماده در کنار هم، انتقال نیروی وارده و محافظت از ماده تقویت‌کننده در برابر سایش و خوردگی را بر عهده دارد.

همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است کامپوزیت‌ها براساس نوع زمینه‌ای که تقویت‌کننده را احاطه نموده است و آنها را به هم اتصال می‌دهد به سه گروه عمده کامپوزیت‌های با زمینه سرامیکی<sup>۱۵</sup>، کامپوزیت‌های با زمینه پلیمری<sup>۱۶</sup> و کامپوزیت‌های با زمینه فلزی<sup>۱۷</sup> تقسیم می‌شوند. زمینه‌های پلیمری خود به دسته‌های گرما نرم<sup>۱۸</sup> و گرما سخت<sup>۱۹</sup> تقسیم می‌شوند [۳].



شکل ۱- انواع کامپوزیت [۳]

کامپوزیت‌ها را طبق شکل ۲ می‌توان بر مبنای شکل مواد داخل کامپوزیت، به پنج نوع تقسیم کرد:

12. Bombardier
13. Airbus A380
14. Boeing B787
15. Ceramic Matrix Composites
16. Polymer Matrix
17. Metall Matrix Composites
18. Thermoplastic
19. Thermoset

- کشش، فشار یا برش قطعات دو طرف اتصال،
  - برش یا جدایی در چسب لایه‌ها،
  - برش یا جدایی در نزدیکی سطح آزاد چندلایه‌ها،
  - برش یا جدایی در لایه‌هایی که رزین زیاد جذب کرده‌اند و
  - گسیختگی چسب بین قطعات مرکب یا فلزی.
- برای این نوع اتصالات باید یک ضریب اطمینان در نظر گرفته شود و نباید این نقاط ضعیف طراحی شوند. پارامترهایی که در طراحی باید در نظر گرفته شود عبارتند از:
- مقاومت و سختی قطعات دو طرف اتصال،
  - مدول‌های برشی، مقاومت تسلیم و کرنش شکست چسب،
  - ضرایب انبساط حرارتی در قطعات دو طرف اتصال،
  - اندازه و راستای نیروهای اعمالی،
  - طول گیرایی قطعات دو طرف اتصال،
  - ضخامت قطعات دو طرف اتصال و
  - ضخامت چسب.

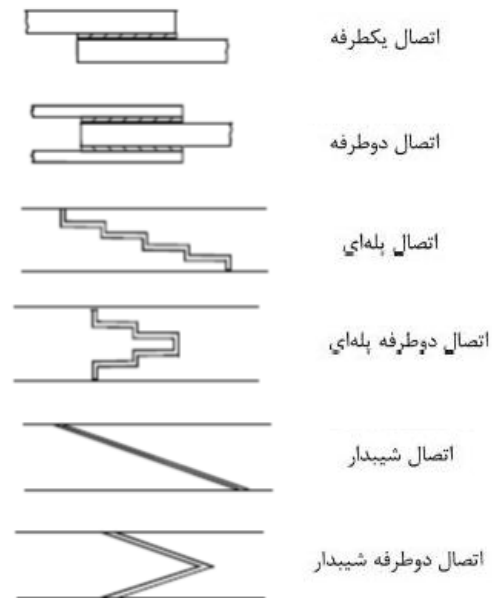
شکل ۴ ظرفیت باربری اتصالات مختلف را به صورت شماتیک نشان می‌دهد. اتصال یک طرفه ساده، معمولاً ارزان‌ترین نوع اتصال است. البته، به علت خروج از مرکزیت نیروهای وارد به دو طرف اتصال، یک ممان قابل توجه در این اتصال به وجود می‌آید که نتیجه آن ایجاد تنش‌های جدایی قابل توجهی می‌باشد. بنابراین، از این اتصال در بارهای بسیار کم استفاده می‌شود و به عبارت دیگر با افزایش ضخامت صفحات دو طرف، ظرفیت باربری این اتصال زیاد نمی‌شود.

در اتصالات دو طرفه عواملی چون طول گیرایی، تأثیر پلاستیسیته چسب روی مقاومت اتصال، تأثیر سختی اتصال روی مقاومت ماکزیمم، تأثیر ضخامت چسب، تأثیر متفاوت بودن جنس صفحات اتصال، تأثیر تفاوت ضریب انبساط حرارتی روی مقاومت، تأثیر همزمان سختی و انبساط نابرابر، حد تنش جدا شدن روی مقاومت و روش‌های کم کردن آن تأثیرگذار است. اتصال دو طرفه به علت شکل برابر و متقارن اعمال نیرو، دارای ممان اولیه نمی‌باشد. البته تنش جدایی می‌تواند براساس نابرابر بودن تنش برشی در انتهای قسمت اتصال به وجود آید. اگرچه شکل این اتصال باعث کاهش قابل ملاحظه در تنش جدایی می‌شود ولی به هر حال نسبت به مقدار به وجود آمده، ضخامت صفحات اتصال دارای محدودیت می‌باشند. تنش‌های جدایی یا برشی در این محدوده با باریک کردن قسمت انتهایی کاسته می‌شوند. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، ظرفیت مقاومت اتصال دو طرفه معمولی بسیار بیشتر از یک

هلیکوپترها (که در آن پیچ و پرچ روش اولیه پیوستن اجزای فلز است)، مورد استفاده قرار می‌گیرد. ایجاد سوراخ یک ضرورت برای اتصالات مکانیکی است. در این نواحی تمرکز تنش بالا بوده لذا، محدودیت‌هایی برای بار اعمالی به کل هواپیما ایجاد می‌شود. در اتصالات چسبی بار وارده به صورت یکنواخت‌تری توزیع می‌شود. علاوه بر این، استفاده از این نوع اتصالات باعث کاهش وزن سازه می‌شود. از معایب اصلی اتصالات چسبی در برخی موارد می‌توان به هزینه‌های بالای آن که به واسطه شرایط مونتاژ، به عنوان مثال شرایط سطح، رطوبت، درجه حرارت و غیره اشاره کرد. اتصالات مکانیکی با توجه به حساسیت کم به اثرات زیست محیطی، برای دهه‌ها به عنوان اتصالات قابل اعتماد مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۵، ۶].

### اتصالات چسبی

در این نوع اتصالات نیرو از یک المان به المان دیگر و به صورت برشی انتقال می‌یابد. در این نوع اتصال نیرو از طریق سطوح تماس در بین لایه‌ها منتقل می‌شود. طبقه‌بندی اتصالات چسبی سازه‌های هوا فضایی طبق شکل ۳ نشان داده می‌شود. برای کم کردن هزینه ساخت می‌توان از اتصالات ساده‌تری مانند اتصالات یکطرفه و دوطرفه استفاده کرد.



شکل ۳- اتصالات چسبی [۵]

در اتصالات چسبی باید به خصوصیات قطعات دو طرف اتصال مثل هندسه، ابعاد، نحوه ساخت، ضرایب انبساط حرارتی و رطوبتی، اندازه و طبیعت نیرو، شرایط محیطی و مدهای گسیختگی واقعی توجه شود. این مدها به دلایل زیر ایجاد می‌شوند:

این چسب‌ها از یک جزء تشکیل شده‌اند و بهتر است حداکثر تا دمای ۶۶ درجه سانتی‌گراد مورد استفاده قرار گیرند مانند چسب چوب.

• ترموست

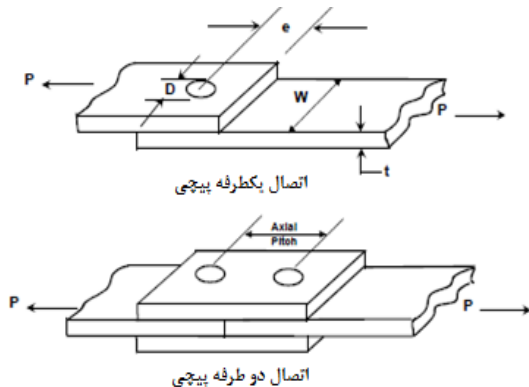
این دسته از چسب‌ها پس از سفت شدن قابلیت ذوب شدن را ندارند و برای واکنش شیمیایی نیاز به حرارت دارند برخی نیز در دمای اتاق کار می‌کنند. همچنین، برخی از این چسب‌ها برای عمل کردن نیاز به فشار دارند. معمولاً این نوع چسب‌ها در دمای ۹۳ تا ۲۶۰ درجه سانتی‌گراد مورد استفاده قرار می‌گیرند مانند اپوکسی.

• چسب‌های الاستومریک

این چسب‌ها بر پایه پلیمر بوده و بیشتر در نوع لایه نازک مورد استفاده می‌باشد. استحکام این نوع چسب‌ها پایین می‌باشد، اما انعطاف‌پذیری خوبی دارند. معمولاً در قسمت‌های پرتنش از این چسب استفاده می‌شود. این نوع چسب‌ها در دمای بین ۶۶ تا ۲۰۴ درجه سانتی‌گراد مورد استفاده قرار می‌گیرند [۸].

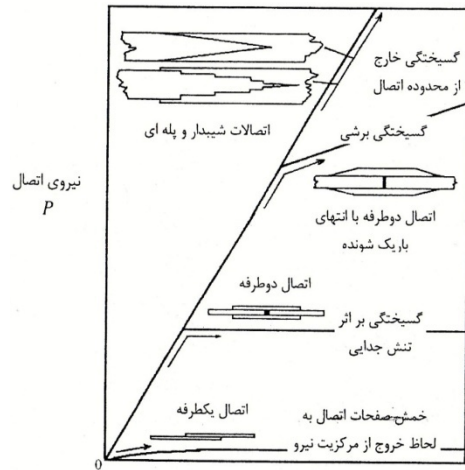
اتصالات مکانیکی

اتصالات مکانیکی کاربرد وسیعی در صنعت به خصوص سازه‌های هوایی دارد. از این‌رو، در زمینه‌های مختلف بسیار مورد توجه قرار می‌گیرد. تعیین مقاومت نهایی و نوع گسیختگی اتصال، تحلیل تنش را در محل قرارگیری پین که دارای تمرکز تنش بالایی است، ضروری می‌نماید. اتصالات از این نوع را می‌توان در قسمت‌هایی که بارهای گریز از مرکز به آنها وارد می‌شود مثل پرده‌های فن کمپرسور به کار برد. این نوع اتصالات به دلیل وجود پرچ و سوراخکاری دارای تمرکز تنش بالایی در آن نقاط هستند. این تمرکز تنش باعث تورق و تنش کششی و برشی در راستای ضخامت می‌شود. همچنین، وجود رطوبت باعث خوردگی سازه در شکاف‌ها می‌شود [۶، ۹]. نمونه‌ای از اتصالات مکانیکی در شکل ۶ نشان داده شده است.



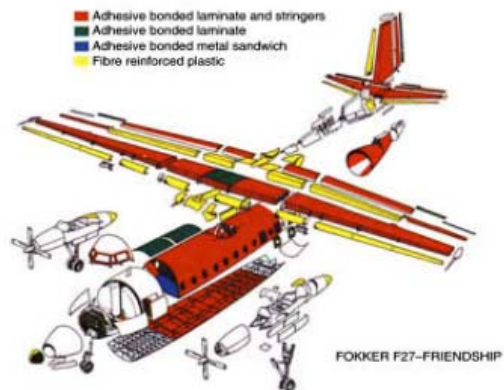
شکل ۶- اتصالات مکانیکی [۹]

طرفه می‌باشد و با باریک کردن انتهای صفحات، این ظرفیت افزایش چشمگیری پیدا می‌کند که در صفحات ضخیم به راحتی می‌توان از این نوع اتصال استفاده نمود [۵].



شکل ۴- ظرفیت اتصال در اتصالات چسبی و انتخاب بهترین هندسه بر اساس نیروی اعمالی [۵]

در اتصالات شیبدار و پله‌ای، در صورت طراحی مناسب، می‌توان از تنش‌های جدایی صرف نظر نمود. به عبارت دیگر، در صورت نداشتن محدودیت‌های اجرا، محدودیت ضخامت در این اتصالات وجود ندارد. شکل ۵ اجزای کامپوزینی و اتصالات چسبی به کار رفته در هواپیما فوکر را نشان می‌دهد [۷].

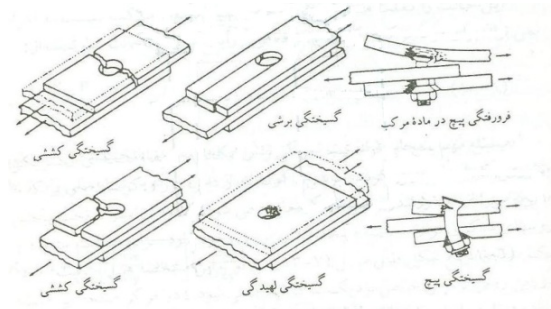


شکل ۵- اجزای کامپوزیتی و اتصالات چسبی در هواپیما فوکر [۷]

استفاده از استحکام بالای چسب‌ها به عنوان یک روش کاربردی گسترده به منظور اتصال اعضای کامپوزیتی یک ساختار کاملاً شناخته شده است. اتصالات چسبی نه تنها باعث بهبود فرایند اجرای اتصالات می‌شوند، بلکه در برخی موارد هزینه تولید را نیز کاهش می‌دهند. چسب‌ها را می‌توان به چند دسته کلی تقسیم کرد که عبارتند از:

• ترموپلاستیک

شکل ۶ حالات مختلف گسیختگی اتصالات مکانیکی صفحات مرکب را نشان می‌دهد. در کشش، حالات بحرانی شامل گسیختگی کششی در سطح مقطع خالص صفحات اتصال، لهیدگی و گسیختگی برشی می‌باشند. همچنین، حالات گسیختگی می‌توانند به صورت ترکیبی اتفاق بیافتند. یکی از گسیختگی‌های مهم در چند لایه‌های مرکب کندگی ناشی از کلاگی پیچ‌ها یا پرچ‌های نوع مخروطی می‌باشد که در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷- حالات عمده گسیختگی صفحات مرکب در اتصالات مکانیکی [۵]

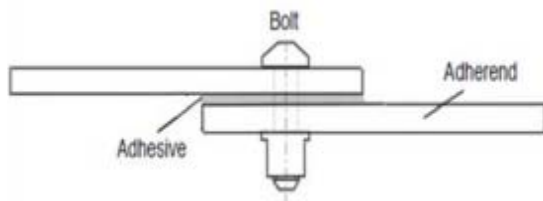
تنش‌های مجاز در هر یک از حالات گسیختگی، تابعی از شرایطی می‌باشند که عبارتند از:

- هندسه اتصال و نیز ضخامت آن،
- قطر و فواصل سوراخ‌ها و نیز سطح لهیدگی برای پرچ‌های مخروطی،
- نیروی اتصال و یک برشه یا دو برشه بودن اتصال،
- توالانس اجرایی قطعات اتصال و اندازه سوراخ‌ها،
- سطح کلاگی و مهره و نیز فشار وارد از آنها به صفحات،
- جهات الیاف و چیدمان لایه‌ها،
- درصد رطوبت و درجه حرارت بهره‌برداری و تنش‌های ثانویه ناشی از تغییرات محیطی و
- نوع تنش‌ها شامل کششی، فشاری، برشی یا لهیدگی [۵].

تحقیقات نشان داده که وجود لایه‌چینی مختلف در کامپوزیت باعث تغییر استحکام اتصالات پیچی می‌شود. یکی از کاربردهای اتصالات پینی<sup>۲۰</sup> ساخت سازه‌های کامپوزیتی تقویت شده است. این اتصالات به دلیل تمرکز تنش یکی از مشکلات بالقوه طراحی محسوب می‌شود. میزان استحکام این سازه‌ها وابسته به استحکام اتصالات می‌باشد. از این‌رو، اتصالات محوری باعث جلب توجه بسیاری از محققان می‌شود. وجود سوراخ‌های پیچ و پرچ و مناطق تحت فشارهای بالا در سازه هوابیما باعث گسترش ترک‌های خستگی می‌شود [۱۰].

## اتصالات ترکیبی

اتصال ترکیبی<sup>۲۱</sup> یک روش ترکیبی شامل اتصال چسب و اتصال مکانیکی است. این اتصال یکی از بهترین انواع اتصالات به شمار می‌رود، زیرا خاصیت مهم هر دو نوع اتصال را دارا می‌باشد. در اتصالات مکانیکی وجود پیچ و پرچ باعث افزایش وزن سازه می‌شود. اما، وجود اتصال از نوع ترکیبی باعث استحکام اتصال می‌شود. یک نمونه از اتصال ترکیبی در زیر نشان داده شده است. اتصال ترکیبی در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸- اتصالات ترکیبی

طول ناحیه چسب، ضخامت چسب و گیره مکانیکی از پارامترهای مهم نوع اتصالات ترکیبی می‌باشند [۱۱]. معمولاً استفاده از ترکیب چسب و بست‌های مکانیکی جهت کاهش ضعف‌های ناحیه چسبیده است که ممکن است بعضاً باعث خرابی زود هنگام و یا یک مکانیسم شکست نامناسب در اتصال شود. مطالعات پیشین نشان داده است که رفتار اتصالات مکانیکی و ترکیبی در برابر نیروی کششی به نسبت نیروی فشاری مناسب‌تر بوده است.

## جمع‌بندی

در این مقاله، انواع کامپوزیت و اتصالات آن مورد بررسی قرار گرفته شد. مواد کامپوزیتی به علت بروز ویژگی‌های چون نسبت قابل توجه سفتی و سطح تنش تسلیم به وزن و همچنین مقاومت بالا در برابر خوردگی، امروزه کاربردهای فراوانی را در صنایع مختلف دارند، همچنین در ترمیم و تقویت سازه‌ها بسیار کاربرد دارند. اما در این میان محدودیتی برای طراحی و استفاده از این ماده در ساخت قطعات وجود دارد. یکی از ضعیف‌ترین و بحرانی‌ترین قسمت‌ها اتصالات کامپوزیتی به شمار می‌رود. با توجه به افزایش روزافزون استفاده از مواد کامپوزیتی، نیاز به مطالعه و درک صحیح از این مواد احساس می‌شود. با توجه به مزایا و معایب هر کدام از انواع اتصالات می‌توان هزینه و وزن سازه را به طور چشمگیری کاهش داد.

## مراجع

- [1] Javidfar, F., Mahmoodi, A., Mirkhani, H., Analysis and Design of Composite Structures, Cultural Publishing Ayah Foundation, 2003.  
[2] Stuart Milne (2014) Nanocomposites in Aerospace, Available at: <https://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=3258> (Accessed: ).

- [8] Soliman, G.N., Adhesive Overlap Joints, Master of Engineering (Hons.) thesis, Department of Civil and Mining Engineering, University of Wollongong, 1995. <http://ro.uow.edu.au/theses/2417>
- [9] Composite Joining and Joints, Available, [on Line]: [www.cirmib.ing.unitn.it/Compositi/textbookCOMP/19.pdf](http://www.cirmib.ing.unitn.it/Compositi/textbookCOMP/19.pdf) (Accessed: ).
- [10] Alaattin, A. and Husnu Dirikolu, M., "The effect of stacking sequence of carbon epoxy composite laminates on pinned-joint strength," *Composite Structures*, Vol. 62, No. 1, 2003, pp. 107-111.
- [11] Majid, M., Afendi, M., Lieh, W. and Hafizan, K., "Strength of Composites Hybrid Joint" *ARPJN Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 11, No. 1, 2016, pp. 216-221.
- [3] Jawed, A., "Presentation on Composite," Available: [on Line]: <https://www.slideshare.net/aqibjawed/composites-60981354>(Accessed), 2016.
- [4] Veinthal, Renno. "Application of Materials," Available: [on line], [https://www.ttu.ee/public/s/Sustainable\\_Energetics/materials/Applications\\_of\\_Materials/Application\\_of\\_Materials-Veinthal.pdf](https://www.ttu.ee/public/s/Sustainable_Energetics/materials/Applications_of_Materials/Application_of_Materials-Veinthal.pdf)
- [5] Mohseni Shakib, M., "Analysis & Design of laminate composite structures," *Imam Hossein University*, 1993.
- [6] Puchała, K., Szymczyk, E. and Jachimowicz, J., "About Mechanical Joints Design in Metal-Composite Structure," *Journal of KONES*, Vol.19, 2012, pp. 381-390.
- [7] Asgari Mehrabadi, F., Fracture Analysis in Adhesive Composite Material/Aluminum Joints, (Thesis M. Sc.), Tabriz University, 2011.