



Evaluation of the Effects of Aging under Humidity and Temperature on the Moisture Absorption and Mechanical Degradation of Metal-Composite Adhesive Bonded Joints

Seyed Amir Aboulghasem-Hosseini¹, Mohammad Latifi^{2*}

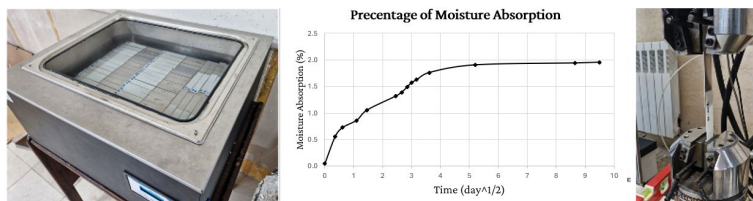
¹ Ph.D. Student, Department of Mechanical Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran

² Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran

HIGHLIGHTS

- In metal-composite adhesive bonded joints, the load is uniformly distributed across the overlapped areas.
- Moisture absorption in adhesive bonded joints reaches a saturation point after a certain period.
- As the aging time increases, the strength of adhesive bonded joints decreases.

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 9 October 2024

Received in revised form: 27 November 2024

Accepted: 1 December 2024

Available online: 1 December 2024

*Correspondence: m.latifi@ihu.ac.ir

How to cite this article:

S.A. Aboulghasem-Hosseini, M. Latifi. Evaluation of the effects of aging under humidity and temperature on the moisture absorption and mechanical degradation of metal-composite adhesive bonded joints. *Journal of Aerospace Mechanics*. 2025; 20(4):1-11.

Keywords:

Composite

Moisture absorption

Metal-composite adhesive joints

Hygrothermal aging

ABSTRACT

Recent advancements in composite manufacturing techniques have enabled the construction of large and complex geometries, in many cases, it is necessary to join composite and non-composite parts to achieve the desired structure. In various industries, examining the mechanical properties of metal-composite joints under different loading conditions, especially in hygrothermal environments, is of particular importance. To evaluate the long-term performance of adhesive bonded joints various aging methods can be applied. In this paper adhesive joints exposed to 70 degrees Celsius temperature water for 90 days to simulate environmental conditions. This study focused on investigating moisture absorption in adhesive joints, comparing the strength of aged samples with those that were unaged. The results showed that metal-composite adhesive bonded joints weakened when exposed to hygrothermal aging conditions about 71 Percent compared to those that were not aged. Moreover, an analysis of the fracture surfaces indicated a shift from adhesive failure to cohesive failure.

This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.





ارزیابی اثر پیرشدگی تحت رطوبت و دما بر جذب رطوبت و افت خواص مکانیکی اتصالات چسبی فلز کامپوزیت

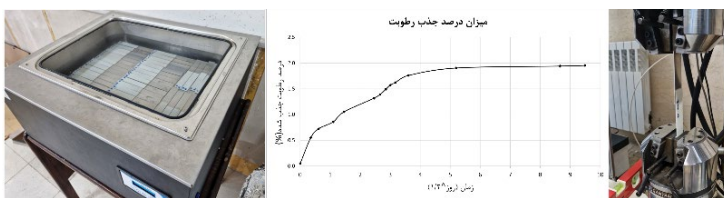
سیدامیر ابوالقاسم حسینی^۱، محمد لطیفی^{۲*}

^۱ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران
^۲ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

چکیده گرافیکی

برجسته‌ها

- در اتصالات چسبی فلز-کامپوزیت بار به صورت یکنواخت در نواحی هم‌پوشانی شده توزیع می‌گردد.
- جذب رطوبت در اتصالات چسبی پس از مدتی به حالت اشباع می‌رسد.
- با افزایش زمان پیرشدگی استحکام اتصالات چسبی کاهش می‌یابد.



مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۱۸

بازنگری: ۱۴۰۳/۰۸/۲۸

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۱۱

ارائه برخط: ۱۴۰۳/۰۹/۱۱

*نویسنده مسئول:

m.latifi@ihu.ac.ir

کلیدواژه‌ها:

کامپوزیت

جذب رطوبت

اتصالات چسبی فلز-کامپوزیت

پیرشدگی رطوبتی گرمایی

چکیده

در بسیاری از صنایع نظیر صنایع دریایی برای تولید سازه‌های مطلوب نیاز به اتصال قطعات کامپوزیتی و غیر کامپوزیتی به یکدیگر وجود دارد. از آنجایی که این اتصالات در شرایط محیطی مختلفی قرار می‌گیرند، بررسی خواص مکانیکی این اتصالات در شرایط رطوبت گرمایی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به منظور تخمین عملکرد طولانی‌مدت اتصالات چسبی فلز-کامپوزیت تک لبه تحت شرایط محیطی رطوبتی گرمایی، نمونه‌ها در بازه‌های زمانی ۵۰، ۷۵ و ۹۰ روزه در آب با دمای ثابت ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند و میزان جذب رطوبت در اتصالات محاسبه شد. طبق مشاهدات صورت گرفته پس از طی یک دوره ۳۰ روزه و به اشباع رسیدن جذب رطوبت، بیشترین میزان جذب رطوبت در اتصالات چسبی ۱/۹۷ درصد اندازه‌گیری شد. در ادامه اتصالات چسبی فلز-کامپوزیت به صورت استاتیکی تحت کشش تک‌محوره قرار گرفتند تا استحکام نهایی آن‌ها به دست آید. با مقایسه بین استحکام نهایی اتصالات چسبی پیرنشده با نمونه‌های پیرشده این نتیجه حاصل شد که پس از قرار گرفتن نمونه‌ها در شرایط محیطی گرم و مرطوب، استحکام آن‌ها ۷۱ درصد کاهش یافت؛ همچنین، با بررسی سطوح شکست مشخص شد که الگوی شکست از حالت چسبی به هم‌چسبی تغییر یافت.



۱- مقدمه

به‌عنوان مثال برخی از نمونه‌های کامپوزیتی هنگام قرارگیری در معرض پیرشدگی حرارتی پخته می‌شوند و استحکام آن‌ها افزایش پیدا می‌کند؛ اما در زمان پیرشدگی بیشتر، استحکام آن‌ها در طول زمان یک روند کاهشی را طی می‌کند.

ماریام و همکاران [۴]، اثرات پیرشدگی تحت رطوبت و گرما را بر روی اتصالات چسبی با چسبنده‌های مختلف آلیاژ آلومینیوم و کامپوزیت اپوکسی تقویت‌شده با الیاف شیشه را بررسی کردند. نمونه‌ها به مدت ۱۲۰ روز در آب ۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند تا پیرشدگی طولانی‌مدت شبیه‌سازی شود. مطابق نتایج کامپوزیت‌ها بیشترین جذب آب را داشتند. استحکام کششی با افزایش زمان پیرشدگی کاهش یافت اما کرنش شکست بیشتر شد. همچنین حالت شکست از چسبی^۱ به هم‌چسبی^۲ تغییر پیدا کرد. کاستا و همکاران [۵]، اثر پیرشدگی چرخه‌ای را بر عملکرد خستگی اتصالات چسبی به‌ویژه تحت تأثیر عوامل محیطی رطوبت و گرما بررسی کردند. یکی از یافته‌های کلیدی این بود که جذب آب به‌طور قابل توجهی بر سطح مشترک و چسب اثر می‌گذارد. این نفوذ سریع رطوبت منجر به زوال محسوس در استحکام اتصال شد و احتمال شکست چسب را افزایش داد. همچنین جذب رطوبت باعث کاهش قابل توجهی در عملکرد خستگی اتصالات شد. استحکام خستگی این اتصالات به‌طور قابل توجهی با قرار گرفتن طولانی‌مدت در شرایط پیرشدگی چرخه‌ای کاهش یافت. همچنین تعدادی از اتصالات پس از قرار گرفتن در معرض پیرشدگی چرخه‌ای، خشک شدند. با این کار مقداری بهبود در استحکام خستگی مشاهده شد. این بهبود پس از اولین چرخه پیرشدگی بیشتر بود و نشان داد که قرار گرفتن در معرض پیرشدگی در چرخه اولیه تأثیر عمیق‌تری داشت که می‌توانست تا حدی با خشک شدن کاهش یابد. باین‌حال، میزان بهبودی با چرخه‌های پیرشدگی بعدی کاهش یافت که نشان می‌داد قرار گرفتن مکرر در شرایط پیرشدگی چرخه‌ای باعث آسیب انباشته و احتمالاً غیرقابل برگشت به اتصالات چسبی می‌شود. ون لونگ و همکاران [۶]، در پژوهشی به بررسی تجربی تأثیرات رطوبت و گرما بر رفتار خستگی

اتصالات چسبی فلز/کامپوزیت در بسیاری از صنایع، از جمله خودروسازی، هوافضا و ساخت‌وساز به‌عنوان روشی پیشرفته برای اتصال قطعات و ساختارها مورد استفاده قرار می‌گیرند. بست‌های سنتی (مفاصل پیچ و پرچ) معمولاً باعث برش الیاف و در نتیجه باعث ایجاد تمرکز تنش می‌شوند. در مقابل، اتصالات چسبی بار را به‌طور یکنواخت توزیع می‌کنند و همچنین دارای مزایایی نظیر نسبت استحکام به وزن بالا و سهولت در طراحی و سهولت ساخت هستند [۱]. از آنجایی که این مواد غیرمشابه خواص فیزیکی و مکانیکی متفاوتی دارند، نمی‌توان آن‌ها را با استفاده از روش جوشکاری معمولی به هم متصل کرد. در چند دهه گذشته از تکنیک‌های مختلفی برای اتصال مواد استفاده شده است. برخی از این روش‌ها شامل: اتصالات چسبی، اتصالات مکانیکی و اتصالات هیبریدی (شامل: پیچ و چسب) است. از روش‌های دیگر اتصالات می‌توان به اتصالات درگیر یا کاملد اشاره کرد که با استفاده از حکاکی سطوح، چسبنده‌های فلزی و کامپوزیتی به یکدیگر متصل می‌شوند [۲].

متأسفانه علی‌رغم دقت زیاد در جزئیات و استفاده از بهترین روش‌های طراحی، قرار گرفتن مواد مختلف به‌ویژه مواد کامپوزیتی زمینه پلیمری پیشرفته و چسب‌های زمینه پلیمری در معرض عوامل محیطی برای مدت طولانی در نهایت موجب ایجاد تغییرات برگشت‌ناپذیری در مشخصات اصلی مصالح گردیده و می‌توانند بر روی خواص و عملکرد این اتصالات تأثیر بگذارند و باعث کاهش استحکام در آن‌ها شوند. به‌طور کلی پیرشدگی با سه مکانیسم اصلی طبقه‌بندی می‌شود: شیمیایی، فیزیکی و مکانیکی. اندرکنش بین این سه حوزه بستگی زیادی به دو متغیر دارد: مشخصات مصالح و محیط پیرشدگی. پیرشدگی مواد می‌تواند موجب تغییرات ساختاری در اجزای قطعات اصلی شود که برای یک سازه هوافضایی می‌تواند آثار فاجعه‌باری هم بر روی وسیله نقلیه و هم بر محموله داشته باشد [۳]. با توجه به نوع مواد، محیط و نوع بارگذاری، مکانیسم‌های سه‌گانه فوق‌الذکر می‌توانند اثرات کاهنده و یا افزایش‌دهی بر روی پیرشدگی داشته باشند.

² Cohesive Failure

¹ Adhesive Failure

به صورت لایه‌لایه شدن و شکست داخل لایه چسبیده کامپوزیت بود. در اتصالات با رطوبت بیشتر شکست در چسبیده مشاهده شد. استحکام و مودهای شکست اتصالاتی که در آب‌نمک غوطه‌ور شده بودند تفاوت قابل توجهی با اتصالاتی که در آب معمولی قرار گرفته بودند، نداشت. به طور کلی تحقیقات متعددی راجع به اثرات پیرشدگی بر روی استحکام نمونه‌ها انجام گرفته و تأثیر محیط مانند رطوبت، گرما و تلفیق این دو بررسی شده است. نقطه مشترک تمامی پژوهش‌ها در این است که با افزایش زمان پیرشدگی استحکام مواد کاهش می‌یابد [۹-۱۱]. به همین دلیل بررسی رفتار و میزان افت خواص مکانیکی در مواد گوناگون از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

در مطالعات پیشین، کاهش خواص مکانیکی و رفتار جذب رطوبت در دماها و بازه‌های زمانی مختلف برای انواع خاصی از اتصالات چسبی با مواد مختلف چسب و چسبیده مورد بررسی قرار گرفته بود. نتایج نشان دادند که کاهش خواص مکانیکی و رفتار جذب رطوبت برای تمامی انواع اتصالات چسبی با مواد مختلف یکسان نبوده و به نوع چسب و چسبیده بستگی دارد. به‌ویژه در مورد اتصالات فلز کامپوزیت میزان افت خواص و میزان جذب رطوبت در اتصال تابعی از نوع رزین، الیاف، شرایط تولید کامپوزیت و نوع چسب مورد استفاده می‌باشد که این امر ضرورت انجام آزمون‌های تجربی جهت تعیین عملکرد این اتصالات را ضروری می‌سازد. در این پژوهش رفتار اتصالات چسبی فلز-کامپوزیت متشکل از فلز آلومینیوم و کامپوزیت ساخته شده از پارچه شیشه و رزین CR82 که با استفاده از چسب اپوکسی به یکدیگر متصل شده‌اند، تحت اثر شرایط پیرشدگی رطوبتی گرمایی بررسی شده است. میزان جذب رطوبت، درصد افت استحکام و تغییر در مودهای شکست اتصالات از جمله موارد بررسی شده در این پژوهش می‌باشند.

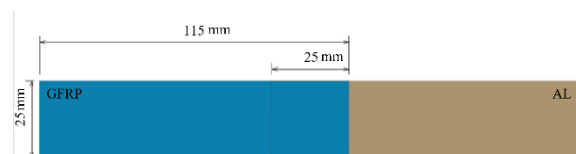
۲- روش‌شناسی

۲-۱- آماده‌سازی اتصالات چسبی

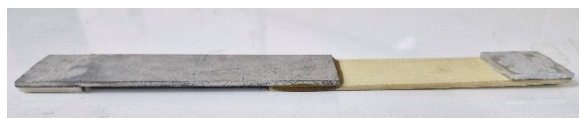
در این بخش، فرآیند ساخت اتصالات چسبی فلز و کامپوزیت مورد بررسی قرار می‌گیرد. کامپوزیت تقویت شده با الیاف

اتصالات چسبی لب‌به‌لب^۱ کامپوزیت تقویت شده با الیاف کربن و آلیاژ آلومینیوم، در دما و دوره‌های پیرشدگی مختلف پرداختند. مطابق با نتایج این پژوهش، با افزایش دما خواص مکانیکی اتصالات چسبی به طور قابل توجهی کاهش یافت، به‌ویژه زمانی که دما نزدیک یا بالاتر از T_g چسب بود. همچنین خواص مکانیکی با افزایش زمان پیرشدگی کاهش یافت و این افت خواص در مراحل اولیه پیرشدگی به وضوح قابل مشاهده بود. همچنین نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که سطوح شکست اتصالات به دلیل کاهش عملکرد چسب در دماهای بالا، از نوع شکست هم‌چسبی می‌باشد. این کاهش عملکرد اتصال در دمای بالا ناشی از تخریب خواص چسب تحت اثر پیرشدگی رطوبتی گرمایی می‌باشد. در پژوهشی دیگر کریمی و همکاران [۷] به بررسی تأثیر پیرشدگی محیطی بر استحکام و رفتار خستگی اتصالات تک لبه پرداختند. در این تحقیق نمونه‌های پیرنشده، نمونه‌های پیرشده تحت گرما و نمونه‌های پیرشده تحت رطوبت و گرما تحت آزمایش خمش سه نقطه‌ای قرار گرفتند. شرایط رطوبتی و حرارتی به طور قابل توجهی بر عملکرد استاتیکی اتصالات چسبی و چسبیده تأثیر گذاشت. همچنین، آن‌ها اثر جذب رطوبت را به دلیل پیرشدگی گرمایی مورد بررسی قرار دادند. بر اساس این مطالعه، بیشترین جذب رطوبت در اتصالات هیبریدی کامپوزیت به کامپوزیت و کمترین جذب رطوبت در اتصالات مکانیکی آلومینیوم به مقاله آلومینیوم اتفاق افتاد. همچنین بر طبق یافته‌های این مقاله شرایط رطوبتی و حرارتی تأثیر قابل توجهی بر خواص استاتیکی نمونه‌ها دارد و این محیط باعث ایجاد تغییرات بازگشت‌ناپذیر در چسب و چسبیده‌ها شد. در مقاله‌ای دیگر که توسط جیونگ و همکاران منتشر شد [۸]، اثر رطوبت و دما بر استحکام اتصالات کامپوزیتی تک لبه مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌ها در آب معمولی و آب‌نمک در دمای ۷۱ درجه سانتی‌گراد برای مدت‌های مختلف تا حداکثر ۳۰۰ روز تحت پیرشدگی قرار گرفتند. در این پژوهش نمونه‌ها با رطوبت و دماهای مختلف مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج آزمایش نشان داد که استحکام اتصالات با پیرشده در مقایسه با اتصالات پیرنشده کاهش یافته بود، اما استحکام اتصالات از پیش اشباع شده افزایش یافت. مودهای شکست اتصالات

¹ Butt Joints



شکل (۱): هندسه و ابعاد اتصالات چسبی فلز کامپوزیت.



شکل (۲): نمونه نهایی اتصال چسبی فلز کامپوزیت.

۲-۲- اعمال شرایط پیرشدگی رطوبتی گرمایی

برای اعمال شرایط پیرشدگی تسریع شده، از یک حمام آب گرم (بن ماری) استفاده شد. این حمام مجهز به دماسنج دیجیتالی و المنت‌هایی برای گرم کردن آب بود. اتصالات به مدت ۵۰، ۷۵ و ۹۰ روز در آب مقطر با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد غوطه‌ور شدند (شکل ۳). روش اندازه‌گیری جذب رطوبت برای تمامی نمونه‌ها مطابق با استاندارد ASTM D5229 [۱۴] انتخاب و اجرا شد. در ابتدای فرآیند که میزان جذب رطوبت بالاست؛ نمونه‌ها در فواصل زمانی کوتاه‌تری وزن‌کشی شدند. پس از گذشت این مرحله و با کاهش نرخ جذب رطوبت، نمونه‌ها به حالت اشباع نزدیک شدند و فواصل زمانی بین وزن‌کشی‌ها افزایش یافت. وزن اولیه نمونه‌ها قبل از قرار گرفتن در شرایط رطوبت-گرمایی اندازه‌گیری و به‌عنوان M_0 ثبت شد. سپس، نمونه‌ها به‌طور متناوب از محیط مرطوب خارج‌شده، با استفاده از دستمال تمیز و بدون پرز خشک شدند و برای مدت کوتاهی در دما و فشار اتاق قرار گرفتند تا رطوبت سطحی آن‌ها از بین برود. وزن نمونه‌های مرطوب در هر مرحله به‌عنوان M_t ثبت گردید. برای اطمینان از دقت بالا در اندازه‌گیری‌ها، از یک ترازوی تحلیلی الکترونیکی با دقت ۰/۱ میلی‌گرم استفاده شد. رابطه درصد جذب رطوبت به‌صورت زیر است:

$$\Delta M(t) = \frac{M_t - M_0}{M_0} \times 100 \quad (1)$$

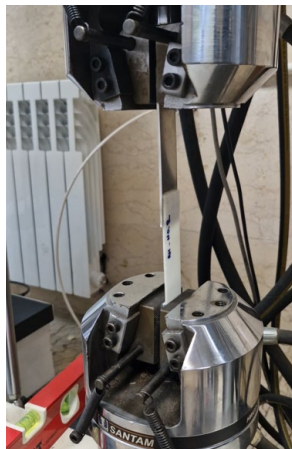
متداول‌ترین رویکرد برای پیش‌بینی و مدل‌سازی انتشار رطوبت در مواد پلیمری، قانون فیک است. قانون فیک می‌تواند رفتار انتشار رطوبت در مواد را بیان کند. همچنین از قانون فیک برای بررسی نحوه انتشار ذرات، مولکول‌ها یا گرما در

شیشه و آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ به‌عنوان مواد اصلی برای این اتصالات انتخاب شدند.

فرآیند ساخت کامپوزیت با استفاده از تکنیک لایه‌چینی دستی تحت خلأ انجام گرفت. برای تولید ورق کامپوزیتی، از ۱۲ لایه پارچه شیشه ریزبافت و رزین CR82 همراه با سفت‌کننده CH80-1 استفاده شد. مطابق دستور شرکت سازنده به ازای هر ۱۰۰ گرم رزین باید ۲۷ گرم هاردنر اضافه می‌شد. رنگ این مخلوط پس از هم زدن بی‌رنگ متمایل به زرد و زمان پخت آن حدود ۵۰ دقیقه تعیین‌شده بود. فرآیند ساخت در یک محیط کاری با دمای تقریبی ۲۰ درجه سانتی‌گراد و با تهویه مناسب صورت گرفت. پس از فرآیند لایه‌گذاری دستی با استفاده از کیسه وکیوم و نوار درزگیر، ورق کامپوزیتی کاملاً آب‌بندی شد. سپس پمپ خلأ با کمک شلنگ که درون کیسه وکیوم قرار گرفته بود به مدت ۷ ساعت عملیات مکش را انجام داد که این امر باعث خروج رزین‌های اضافی و توزیع یکنواخت رزین در تمام سطح ورق کامپوزیتی شد. پس از آن پخت صفحه کامپوزیتی به مدت ۴۸ ساعت در دما و فشار محیط انجام شد.

مطابق با استانداردهای ASTM-D1002 و ASTM-D5868 [۱۲ و ۱۳] برای تولید اتصال، قطعات کامپوزیتی و آلومینیومی با ابعاد ۱۱۵ میلی‌متر در ۲۵ میلی‌متر برش داده شدند (شکل ۱ و ۲). برای ایجاد اتصال بین این دو از چسب اپوکسی دوجزئی استفاده شد. رزین و هاردنر چسب طبق نسبت مشخص‌شده توسط سازنده (۱۰ گرم رزین و ۸ گرم هاردنر) با دقت مخلوط و هم زده شدند تا زمانی که رنگ مخلوط به زرد یکنواخت تبدیل شد. این تغییر رنگ نشان‌دهنده اختلاط کامل اجزای چسب است. سپس چسب به‌طور یکنواخت روی سطوح فلز و کامپوزیت که از قبل با دستمال بدون پرز تمیز شده بودند، اعمال شد تا ناحیه همپوشانی به طول ۲۵ میلی‌متر مطابق با الزامات استاندارد ایجاد شود. به‌منظور اینکه ضخامت ناحیه چسبی در تمامی اتصالات یکسان باشد و چسب به‌طور یکنواخت در ناحیه مذکور پخش شود، از گیره استفاده گردید. مطابق دستورات شرکت سازنده مدت‌زمان پخت چسب ۲۴ ساعت در دمای محیط بود. پس از آماده شدن اتصال ضخامت لایه چسب ۰/۱۵ میلی‌متر اندازه‌گیری شد.

دقیقه انجام شد [۱۲ و ۱۳]. در تمامی نمونه‌های استاندارد تست کشش، استفاده از تب‌ها در محل‌های اعمال نیرو ضروری است. این تب‌ها به منظور جلوگیری از لغزش نمونه‌ها در داخل فک دستگاه حین انجام تست و اعمال نیرو در یک راستا به کار می‌روند (شکل ۴). بر اساس الزامات استانداردهای مذکور، در اتصالات چسبی که از چسبنده آلومینیوم استفاده می‌کنند، از تب‌های کامپوزیتی و در اتصالات با چسبنده کامپوزیت، از تب‌های آلومینیومی استفاده می‌شود. این انتخاب به منظور ایجاد تقارن در نمونه‌ها و بهبود دقت نتایج آزمون می‌باشد. برای اطمینان از نتایج آزمایش‌ها در هر دوره پیرشدگی ۳ نمونه و در مجموع ۱۲ نمونه تحت آزمایش قرار گرفتند. در هر دوره میانگین استحکام نهایی نمونه‌های مذکور جهت ارائه گزارش محاسبه شد.



شکل (۴): قرارگیری اتصالات چسبی داخل فک دستگاه به منظور انجام آزمایش کشش.

طول زمان استفاده می‌شود [۱۵]. برای مسائل تک جهته، نفوذ رطوبت در داخل اکثر کامپوزیت‌ها از قانون فیک مرتبه دو پیروی می‌کنند.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \quad (2)$$

که در آن c غلظت رطوبت نمونه (g/mm^3) رطوبت، t زمان (ثانیه)، z ضخامت نمونه (mm) و D_z ضریب نفوذ در راستای ضخامت (mm^2/sec) می‌باشد. برای یک نوار غوطه‌ور در یک ظرف بی‌نهایت، پاسخ رابطه (۲) به صورت زیر خواهد شد:

$$\frac{M_t}{M_e} = 1 - \exp\left[-7.3 \left(\frac{D_z t}{l^2}\right)^{0.75}\right] \quad (3)$$

در این رابطه M_t جرم جذب‌شده در زمان t و M_e جرم جذب‌شده در حالت تعادل و l ضخامت چسب برحسب میلی‌متر است. در این پژوهش به منظور مقایسه رفتار جذب رطوبت چسب در نمونه‌های حجمی و اتصالات، رفتار جذب رطوبت در نمونه حجمی چسب با در نظر گرفتن ضریب جذب رطوبت برابر با $10^{-12} \times 1/4$ [۱۶] توسط رابطه ۳ ترسیم شده است.



شکل (۳): قرار گرفتن نمونه‌ها در حمام آب گرم و ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۱ میلی‌گرم.

۳- نتایج و بحث

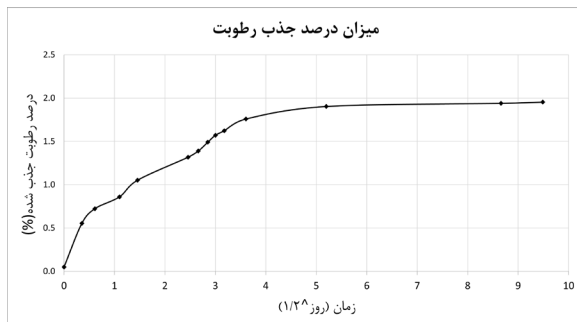
۳-۱- جذب رطوبت

رفتار جذب رطوبت در اتصالات چسبی پس از قرار گرفتن به مدت حداکثر ۹۰ روز در آب گرم ۷۰ درجه در شکل ۵ قابل مشاهده است. افزایش میزان جذب رطوبت در اتصالات، نتیجه چندین عامل است. یکی از علل اصلی این افزایش، نفوذ تدریجی مولکول‌های آب به ساختار چسب و کامپوزیت در طول زمان است. در شرایطی که نمونه‌ها تحت دما و رطوبت بالا قرار دارند، مولکول‌های آب می‌توانند از طریق منافذ و ترک‌های ریز موجود در ساختار چسب نفوذ کنند. این نفوذ

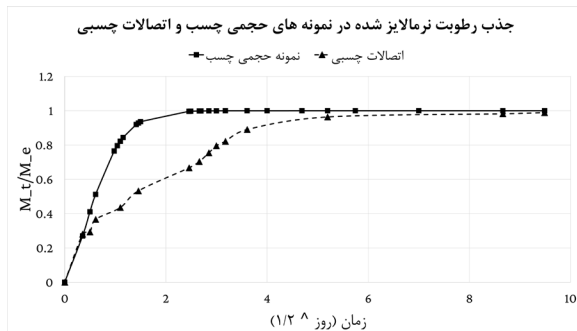
۳-۲- آزمایش کشش استاتیکی

پس از پیرشدگی رطوبتی گرمایی طی دوره‌های ۵۰، ۷۵ و ۹۰ روزه، اتصالات چسبی جهت ارزیابی استحکام مکانیکی تحت آزمون کشش تک‌محوری قرار گرفتند و با استحکام نمونه‌های پیرنشده مقایسه شدند. برای این منظور از دستگاه تست مکانیکی هیدرولیکی سنتام مدل SAF-50 استفاده شد. تست کشش نمونه‌ها بر اساس دو استاندارد معتبر ASTM D1002 و ASTM D5868 و سرعت ۱/۳ میلی‌متر بر

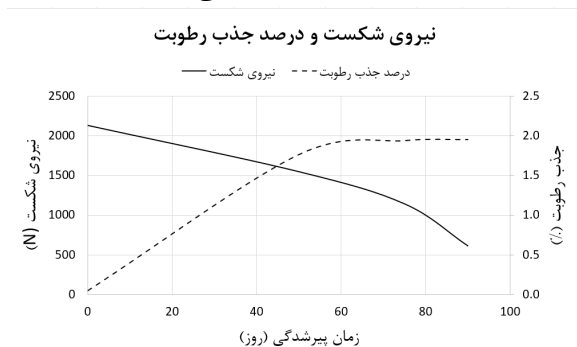
در شکل ۷ رابطه بین نیروی شکست و درصد جذب رطوبت در طول زمان پیرشدگی قابل مشاهده است. همان طور که مشاهده می شود با گذشت زمان، نیروی شکست به صورت پیوسته کاهش یافته است؛ اما درصد جذب رطوبت ابتدا با افزایش زمان پیرشدگی افزایش می یابد تا به یک حالت اشباع نزدیک شود.



شکل (۵): میزان جذب رطوبت در اتصالات چسبی تحت پیرشدگی گرمایی در دمای ۷۰ درجه سانتی گراد.



شکل (۶): میزان جذب رطوبت نرمالایز شده در اتصالات چسبی و نمونه های حجمی چسب تحت پیرشدگی گرمایی در دمای ۷۰ درجه سانتی گراد.



شکل (۷): مقایسه نیروی شکست و روند جذب رطوبت در اتصالات چسبی تحت پیرشدگی.

رطوبت منجر به تورم چسب و ایجاد تغییرات در ساختار مولکولی آن می شود. درعین حال، چسب به مرور زمان دچار تخریب شیمیایی می شود که موجب کاهش خواص مکانیکی آن و افزایش جذب رطوبت می گردد.

پس از گذشت زمان، سرعت جذب رطوبت به تدریج کاهش می یابد و منحنی به سمت یک مقدار ثابت میل می کند. این رفتار نشان دهنده رسیدن اتصالات به حالت اشباع است. مطابق با داده های ارائه شده، اتصالات پس از حدود ۳۰ روز به حالت اشباع و حداکثر ظرفیت خود برای جذب رطوبت یعنی ۱/۹۷ درصد رسیدند؛ این مقدار نسبتاً قابل توجه است و می تواند تأثیرات مهمی بر خواص مکانیکی و عملکردی اتصال داشته باشد. جذب رطوبت در این حد می تواند منجر به تغییراتی در ساختار پلیمری چسب و یا کامپوزیت شود که ممکن است بر استحکام اتصال و دوام آن در طول زمان تأثیر بگذارد.

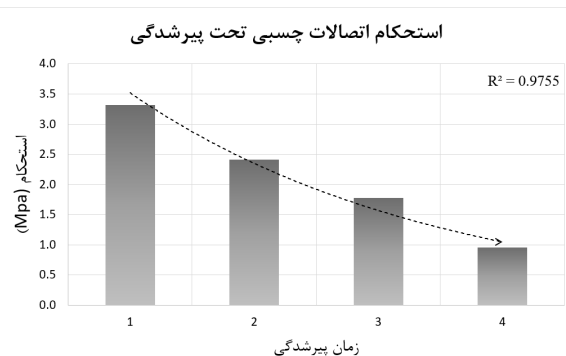
مقایسه بین رفتار جذب رطوبت چسب (با استفاده از رابطه ۳) و رفتار جذب رطوبت اتصالات چسبی در شکل ۶ دیده می شود. همان طور که مشاهده می شود اتصالات چسبی در جذب رطوبت رفتار فیزیکی ندارد. این مطلب با یافته های سایر محققان منطبق می باشد [۱۷-۲۰].

۳-۲- آزمون کشش

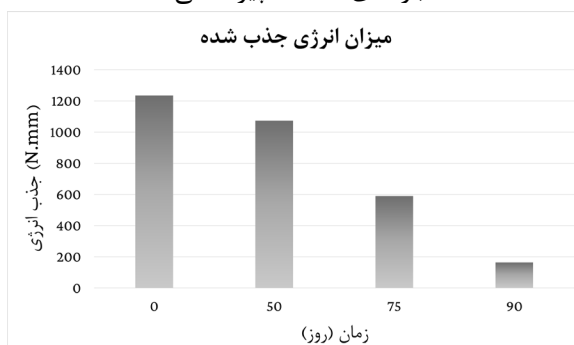
استحکام اتصالات چسبی با استفاده از نتایج تست کشش استاتیکی محاسبه شد. پس از انجام آزمون ها، نتایج به دست آمده استخراج و در جدول ۱ گزارش شدند.

جدول (۱): داده های تجربی تغییرات استحکام کششی نهایی در یک دوره پیرشدگی ۹۰ روزه

زمان پیرشدگی	میانگین بار شکست (N)	میانگین استحکام (Mpa)	میزان جذب انرژی (N.mm)
۰ روز	۲۱۳۱/۷	۳/۳۱۹۰	۱۲۳۴/۳۱
۵۰ روز	۱۵۴۸/۷۵	۲/۴۱۱۳	۱۰۷۲/۸۱
۷۵ روز	۱۱۴۴	۱/۷۸۱۲	۵۸۹/۸۳
۹۰ روز	۶۱۴/۶۶	۰/۹۵۷۰	۱۶۴/۸۹



شکل (۸): روند کاهش استحکام اتصالات چسبی در بازه‌های مختلف پیرشدگی.



شکل (۹): میزان جذب انرژی در اتصالات چسبی تحت پیرشدگی گرمایی.

در شکل‌های ۱۰ تا ۱۳ مودهای شکست در تست شبه استاتیکی قابل مشاهده است. در نمونه‌های پیر نشده که تحت بارگذاری استاتیکی قرار گرفتند، شکست‌ها عمدتاً به صورت چسبی بوده است. در این حالت، چسب از سطح آلومینیوم جدا شده که نشان‌دهنده عدم توانایی چسب در تحمل تنش‌های متمرکز در این نواحی است. با گذشت زمان و قرارگیری نمونه‌ها در محیط مرطوب و گرم، تغییراتی در مکانیسم شکست مشاهده شد. استحکام نمونه‌ها به خصوص کامپوزیت کاهش یافت و نوع شکست از حالت چسبی به هم‌چسبی تغییر پیدا کرد. این تغییر نوع شکست به دلیل تخریب شیمیایی و کاهش استحکام چسبنده‌ها تحت تأثیر عوامل محیطی رخ داده است. در این حالت بخشی از چسب و لایه کامپوزیتی به آلومینیوم متصل باقی می‌ماند که نشان‌دهنده کاهش استحکام چسبنده در اثر پیرشدگی است. تغییر رنگ چسب در طول زمان پیرشدگی نیز یکی دیگر از نشانه‌های تخریب شیمیایی چسب است که می‌تواند به عنوان شاخصی برای تشخیص میزان آسیب در اتصالات چسبی

نمودار واقع در شکل ۸ تغییرات استحکام اتصالات چسبی تحت پیرشدگی را نمایش می‌دهد. در روز صفر، اتصالات دارای بیشترین استحکام هستند که نشان‌دهنده مقاومت بالای اولیه اتصال در برابر نیروهای اعمالی است. با افزایش زمان پیرشدگی، استحکام اتصالات به تدریج کاهش می‌یابد و این روند کاهشی به‌طور پیوسته تا روز ۹۰ به صورت نمایی (کاهشی) نمایش داده شده که نشان‌دهنده اثرات مخرب پیرشدگی بر خواص مکانیکی اتصالات چسبی است. این کاهش استحکام می‌تواند به علت تخریب سطح اتصال، کاهش چسبندگی و تغییرات شیمیایی در ماده چسب به دلیل شرایط محیطی باشد. به‌طور کلی می‌توان گفت که پیرشدگی به‌طور قابل توجهی استحکام اتصالات چسبی را کاهش می‌دهد و طی یک دوره پیرشدگی ۹۰ روزه استحکام ۷۱/۱۷٪ کاهش یافت. در شکل ۹ تغییر در میزان جذب انرژی قابل مشاهده است. با گذشت زمان و طی شدن روند پیرشدگی نمونه‌ها، میزان جذب انرژی (چقرمگی) کاهش یافت. علت اصلی این امر کاهش متوسط استحکام نهایی و کرنش شکست بود. به‌طور کلی در یک دوره پیرشدگی ۹۰ روزه، چقرمگی با کاهش ۸۶/۶۴ درصدی مواجه شد.

۳-۳- سطوح شکست

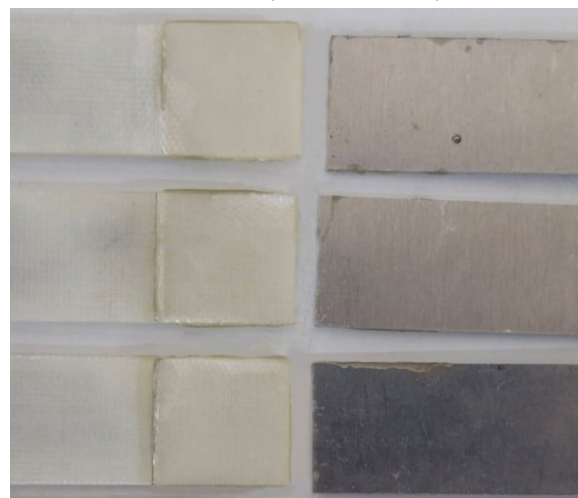
شکست در اتصالات چسبی یکی از مهم‌ترین موضوعاتی است که در بررسی عملکرد این نوع اتصالات تحت بارگذاری‌های مختلف باید مورد توجه قرار گیرد. اتصالات چسبی، به دلیل وابستگی زیاد به ویژگی‌های سطحی و محیطی، حساسیت بالایی به نحوه اعمال بار و شرایط پیرامونی دارند. در این نوع اتصالات، تمرکز تنش‌ها عمدتاً در لبه‌های ناحیه اتصال مشاهده می‌شود که به‌عنوان نقاط بحرانی شکست شناخته می‌شوند. این نواحی معمولاً محلی هستند که آسیب‌های اولیه در آنجا شروع می‌شوند. مکانیسم شکست می‌تواند به دو صورت عمده رخ دهد: شکست چسب و شکست هم‌چسبی. شکست چسب زمانی اتفاق می‌افتد که چسب به‌طور کامل از سطح یکی از چسبنده‌ها جدا می‌شود، در حالی که در شکست هم‌چسبی، بخشی از چسبنده از چسب جدا می‌شود و بخشی دیگر همچنان به چسب متصل باقی می‌ماند.

نمونه‌ها به مدت ۹۰ روز در شرایط پیرشدگی گرمایی قرار گرفتند تا تأثیرات بلندمدت این شرایط بر خواص مکانیکی آن‌ها بررسی شود. نتایج کلی را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

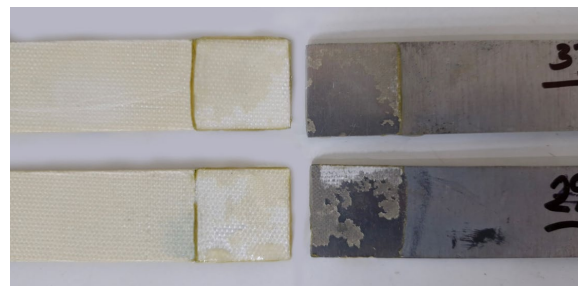
- نتایج جذب رطوبت نشان دادند که با افزایش مدت زمان پیرشدگی، میزان جذب رطوبت نمونه‌ها افزایش یافت و پس از مدتی این میزان به حالت اشباع رسید. روند افزایشی جذب رطوبت تقریباً به مدت ۳۰ روز ادامه یافت و پس از آن تا پایان دوره پیرشدگی، جذب رطوبت به حالت اشباع رسید و تغییر قابل توجهی در آن مشاهده نشد. بیشترین میزان جذب رطوبت ۱/۹۷ درصد بود.
- استحکام کششی اتصالات پس از ۹۰ روز پیرشدگی به طور قابل توجهی کاهش یافت. در حالی که نمونه‌های پیر نشده دارای استحکام کششی بالاتری بودند، نمونه‌های پیر شده با کاهش متوسط ۰/۷۱٪ در استحکام مواجه شدند. این کاهش استحکام می‌تواند به دلیل تخریب ساختار چسب و کاهش اتصال بین فلز و کامپوزیت ناشی از نفوذ رطوبت و حرارت باشد.
- بررسی سطوح شکست نشان داد که شکست اتصالات چسبی معمولاً از لبه‌های چسب نزدیک به ناحیه اتصال آغاز می‌شود، جایی که تمرکز تنش بالا است. در نمونه‌های پیر نشده، شکست عمدتاً به صورت چسبی رخ داد، یعنی چسب از سطح یکی از چسبنده‌ها جدا شد؛ اما با افزایش زمان پیرشدگی، نوع شکست به ترکیبی از شکست چسبی و هم‌چسبی تغییر یافت. این تغییرات نشان‌دهنده تخریب شیمیایی چسب و کاهش استحکام چسبنده‌ها به دلیل نفوذ رطوبت و حرارت است. در مواردی، تغییر رنگ چسب نیز مشاهده شد که می‌تواند نشان‌دهنده تخریب و تغییر در خواص فیزیکی و شیمیایی چسب باشد.

در پژوهش‌های آینده، می‌توان با افزودن نانو ذرات به چسب و پرداخت بر روی سطوح چسبنده‌ها، تغییرات در استحکام اتصالات چسبی را در شرایط پیر نشده و پیر شده مورد بررسی قرارداد. همچنین، استفاده از ژل کت برای پوشش اتصالات می‌تواند به کاهش میزان جذب رطوبت کمک کند. این امر امکان ارزیابی دقیق‌تری از تأثیر رطوبت بر کاهش استحکام

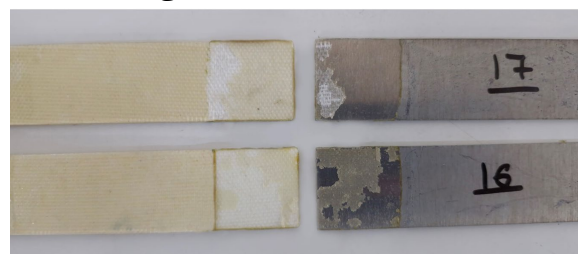
مورد استفاده قرار گیرد. این تغییر رنگ که احتمالاً ناشی از واکنش‌های شیمیایی درون ساختار چسب است، می‌تواند به کاهش استحکام و تغییر مکانیسم شکست منجر شود.



شکل (۱۰): سطوح شکست نمونه‌های پیر نشده در تست استاتیکی.



شکل (۱۱): سطوح شکست نمونه‌های تحت پیرشدگی ۵۰ روزه در آزمایش شبه‌استاتیکی.



شکل (۱۲): سطوح شکست نمونه‌های تحت پیرشدگی ۷۵ روزه در آزمایش شبه‌استاتیکی.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی تأثیر پیرشدگی رطوبتی گرمایی بر روند جذب رطوبت و خواص مکانیکی اتصالات چسبی فلز-کامپوزیت پرداخته شده است. برای دستیابی به این هدف،

[5] da Costa JA, Akhavan-Safar A, Marques EAS, Carbas RJC, da Silva LFM. The influence of cyclic ageing on the fatigue performance of bonded joints. *International Journal of Fatigue*. 2022;161:106939.

DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.106939>.

[6] Mu W-L, Xu Q-H, Na J-X, Wang H, Tan W, Li D-F. Influence of temperature and humidity on the fatigue behaviour of adhesively bonded CFRP/aluminium alloy joints. *The Journal of Adhesion*. 2022;98(10):1358-76.

DOI:

<https://doi.org/10.1080/00218464.2021.1896362>.

[7] Karimi S, Ahmadi M, Klenin AI, Hossein A, Zhu M. An experimental investigation on the influence of environmental ageing on strength and fatigue behavior of different single lap joints. *Composite Structures*. 2023;322:117423.

DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.117423>.

[8] Jeong M-G, Kweon J-H, Choi J-H. Effect of various hygrothermal environments on the failure of adhesively bonded composite single-lap joints. *Journal of Composite Materials*. 2013;47(17):2061-73.

DOI:

<https://doi.org/10.1177/0021998312453357>.

[9] Khoramishad H, Abbasi Z. Numerical study of the effect of moisture-induced swelling stresses on damage behavior of adhesive joints under static loading. *Modares Mechanical Engineering*. 2015;15(3):189-98.

DOR:

<http://dorl.net/dor/20.1001.1.10275940.1394.15.3.2.2>.

[10] Masaali J, Davar A, Heydari Beni M, Eskandari Jam J. Experimental and numerical study of the effect of environmental conditions on the tensile strength of adhesive, riveted and hybrid joints of E-glass/epoxy composites. *Journal of Science and Technology of Composites*. 2023;10(3):2273-96.

DOI:

<https://doi.org/10.22068/jstc.2023.2012589.1862>.

[11] Hirulkar NS, Jaiswal PR, Reis PNB, Ferreira JAM. Effect of hygrothermal aging and cyclic thermal shocks on the mechanical performance of single-lap adhesive joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2020;99:102584.

DOI:

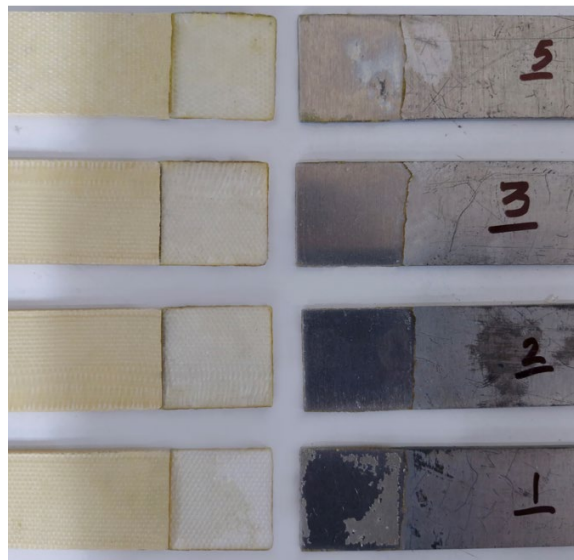
<https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2020.102584>.

[12] D5868-01 A. Standard Test Method for Lap Shear Adhesion for Fiber Reinforced Plastic (FRP) Bonding.

DOI: <https://doi.org/10.1520/D5868-01R14>.

[13] D1002-10 A. Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal). **DOI:** <https://doi.org/10.1520/D1002-10R19>.

مکانیکی را فراهم خواهد کرد و می‌تواند راهکارهای نوینی برای بهبود عملکرد اتصالات چسبی در شرایط محیطی چالش‌برانگیز ارائه دهد.



شکل (۱۳): سطوح شکست نمونه‌های تحت پیرشدگی ۹۰ روزه در آزمایش شبه‌استاتیکی.

۵- مراجع

[1] da Silva LFM, Öchsner A, Adams RD. Introduction to Adhesive Bonding Technology. In: da Silva LFM, Öchsner A, Adams RD, editors. *Handbook of Adhesion Technology*. Cham: Springer International Publishing; 2018. p. 1-7. **DOI:** https://doi.org/10.1007/978-3-319-55411-2_1.

[2] Hosseini R, Yeganeh Sarcheshmeh M, Saberi Moghaddam M, Zeynalbeyk M. Experimental investigation of tensile strength of metal-composite hybrid joints using new inserts in comeld process. *Journal of Aerospace Mechanics*. 2023;19(1):29-43.

DOR:

<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455323.1402.19.1.3.8>.

[3] Gates T. 1 - The physical and chemical ageing of polymeric composites. In: Martin R, editor. *Ageing of Composites*: Woodhead Publishing; 2008. p. 3-33. **DOI:** <https://doi.org/10.1533/9781845694937.1.3>.

[4] Mariam M, Afendi M, Abdul Majid MS, Ridzuan MJM, Azmi AI, Sultan MTH. Influence of hydrothermal ageing on the mechanical properties of an adhesively bonded joint with different adherends. *Composites Part B: Engineering*. 2019;165:572-85. **DOI:** <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.02.032>.

- [14] D5229 A. Standard Test Method for Moisture Absorption Properties and Equilibrium Conditioning of Polymer Matrix Composite Materials. DOI: https://doi.org/10.1520/D5229_D5229M-20.
- [15] Comyn J. Diffusion of Water in Adhesives. In: da Silva LFM, Sato C, editors. Design of Adhesive Joints Under Humid Conditions. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2013. p. 1-19. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-37614-6_1.
- [16] Zanni-Deffarges MP, Shanahan MER. Diffusion of water into an epoxy adhesive: comparison between bulk behaviour and adhesive joints. International Journal of Adhesion and Adhesives. 1995;15(3):137-42. DOI: [https://doi.org/10.1016/0143-7496\(95\)91624-F](https://doi.org/10.1016/0143-7496(95)91624-F).
- [17] Katsivalis I, Feih S. Prediction of moisture diffusion and failure in glass/steel adhesive joints. Glass Structures & Engineering. 2022;7(3):381-97. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40940-022-00194-w>.
- [18] Viana G, Costa M, Banea MD, da Silva LFM. A review on the temperature and moisture degradation of adhesive joints. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications. 2016;231(5):488-501. DOI: <https://doi.org/10.1177/1464420716671503>.
- [19] Alirezvani H, Davar A, Heydari Beni M, Eskandari Jam J, Eskandari Shahraki M. A dynamic stability analysis of composite grid-stiffened cylindrical shells under harmonic loads using the donnelly theory. Journal of Aerospace Mechanics. 2022;17(4):55-79. DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455323.1400.14.4.5.3>.
- [20] Mirzababaie Mostofi T, Sayah Badkhor M, Babaei H. The Behavior of quadrangular plates under impulsive loading: a dimensional analysis. Journal of Aerospace Mechanics. 2020;16(4):85-99. DOR: <https://dor.isc.ac/dor/dor:20.1001.1.26455323.1399.16.4.7.7>.