

بررسی خواص کششی کامپوزیت الیاف-فلز ناشی از پیر سازی رطوبتی

کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، رفسنجان، ایران،
 mohsen_52001@yahoo.com
 استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، رفسنجان، ایران،
 meisam.mohammadi@vru.ac.ir

محمد جواد رضائی

میثم محمدی*

چکیده

کامپوزیت‌های الیاف-فلز به کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با الیاف گفته می‌شود که حاوی صفحات فلزی باشند. در این پژوهش، خواص کششی کامپوزیت الیاف-فلز CARALL (Carbon Reinforced Aluminum Laminate) با کامپوزیت CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) تحت تاثیر رطوبت به صورت تجربی و اجزاء محدود مقایسه شده است. برای انجام آزمایش کشش، شش نمونه کامپوزیت CARALL و CFRP با استفاده از لایه چینی دستی و طبق استاندارد ASTM-D3039 با الیاف کربن، رزین ۳۰۰۱ و ورق آلومینیوم T6-7075 ساخته شده است و همچنین نمونه‌ها در شرایط خشک و مرطوب به مدت ۱۴ و ۲۵ روز در محیط آزمایشگاهی نگهداری شده است. برای شبیه‌سازی و مقایسه نتایج تجربی از نرم افزار ANSYS استفاده گردید. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که رطوبت باعث کاهش خواص کششی نمونه‌ها شده و همچنین مقدار مدول الاستیسیته در محیط مرطوب نسبت به محیط خشک کاهش پیدا کرده است. مدول الاستیسیته برای نمونه های CFRP و CARALL در محیط مرطوب پس از گذشت ۲۵ روز به ترتیب ۴۷/۳٪ و ۵۶/۸٪ نسبت به محیط خشک کاهش یافت.

واژه‌های کلیدی: کامپوزیت الیاف-فلز، رطوبت، آزمون کشش، الیاف کربن، مدول الاستیسیته.

Investigation of Tensile Properties of FML Composite Due to Moistures Aging

M. J. Ramezani
 M. Mohammadi

Department of Mechanical Engineering, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran
 Department of Mechanical Engineering, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran

Abstract

Fiber-metal composites are polymer composites reinforced with fibers and metal sheets. In this study, the tensile properties of CARALL (Carbon Reinforced Aluminum Laminate with CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) under the influence of moisture are compared and studied experimentally and numerically by finite element (FE) method. According to ASTM-D3039 standard, six samples of CARALL and CFRP composite are made using manual lay-up and carbon fibers, 3001 resin, and T6-7075 aluminum sheet and also, the samples were stored in dry and moisture conditions for 14 and 25 days. ANSYS software is used to simulate and compare the results with experimental tests. Comparison of the results shows that the moisture reduced the tensile properties of the samples. Also, the elasticity modulus for the CFRP and CARALL samples in humid environment during 25 days reduces respectively as 47.3% and 56.8% in comparison with the dry environment.

Keywords: FML Composite, Moisture, Tensile Test, Carbon Fiber, Modulus of Elasticity.

۱- مقدمه

خواص مکانیکی، خواص کششی دارای اهمیت زیاد می‌باشد. داده‌های به‌دست آمده از فرآیند کشش، در انتخاب نوع ماده و ساختار اولیه کامپوزیت می‌تواند بسیار مفید باشد.

تعدادی از پژوهشگران از جمله ترونک و همکاران [1] به مطالعه رفتار کششی کامپوزیت پلیمری تقویت شده با سیم‌های فلزی پرداختند. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که افزایش تعداد لایه های الیاف کربن به طور قابل توجهی سختی اولیه، بار اوج و کرنش فرعی را افزایش می‌دهد. شارما و همکاران [2] پاسخ و شکست کامپوزیت الیاف-فلز در معرض بارگذاری کششی با فشار زیاد را بررسی کردند، نتایج نشان می‌دهد که استحکام لمینت‌های فیبر-فلزی در فشار کرنش بالا افزایش می‌یابد. هاو و همکاران [3] به مطالعه‌ی خواص مکانیکی کامپوزیت FML بر پایه الیاف کربن پرداختند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که استحکام کششی کامپوزیت FML در مقایسه با آلیاژ AZ31 این میزان ۱۰۳٪ افزایش یافته است. چو و همکاران [4] خصوصیات حرارتی و مدل سازی کامپوزیت FML با الیاف شیشه و ورق آلومینیوم را بررسی کردند. بلدینی و همکاران [5] تغییر شکل کامپوزیت‌های پلیمری از جنس فلز را به‌صورت المان محدود مطالعه

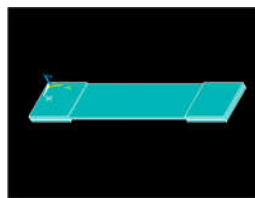
اولین نمونه کامپوزیت الیاف-فلز^۱ در سال ۱۹۸۰ در دانشگاه دلفت^۲ هلند ساخته شده است. کامپوزیت الیاف-فلز موادی هستند که از چسباندن ورق‌های فلز با لایه الیاف به وسیله رزین تشکیل می‌شوند. در این حالت مزیت‌ها و خواص فلز و الیاف کامپوزیتی در ماده جدید به وجود می‌آید. فلزات دارای خواص مکانیکی خوب مقاومت خوب، چقرمگی بالا و نقطه ذوب مناسب و الیاف کامپوزیتی دارای مقاومت در برابر خستگی بالا می‌باشند. کامپوزیت CARALL^۳ یکی از انواع کامپوزیت‌های FML می‌باشد، این نوع کامپوزیت به دلیل خاصیت همانند وزن سبک، مقاومت در برابر خوردگی و تا حدی سازگار با محیط زیست، در کاربردهای مختلف قابل استفاده است.

آزمون کشش یکی از آزمون‌های مخرب است که در این آزمون نمونه تحت نیروی کششی تک بعدی تا نقطه شکست قرار می‌گیرد. در بین

^۱Fiber Metal Laminate (FML)

^۲Delft University of Technology

^۳Carbon reinforced aluminum laminate



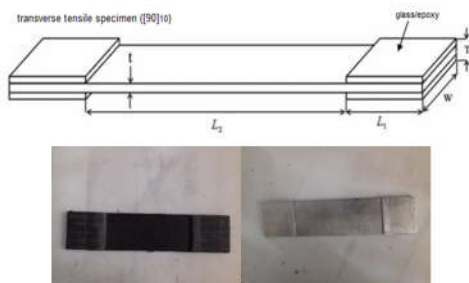
شکل ۱- مدل سازی تست کشش

۳- آزمایش تجربی

۳-۱- ساخت کامپوزیت

در این تحقیق از الیاف کربن QUANTOM Wrap 300 C شرکت رادیاب و ورق آلومینیوم 7075-T6 و همچنین رزین اپوکسی QUANTOM EPR 3001، و استون ۱۰۰٪ و سمباده ضخیم استفاده شده است. آلومینیوم T6 بالاترین حد استحکام تسلیم را در بین آلیاژهای ۷۰۷۵ است. برای ساخت کامپوزیت CARALL و CFRP از روش دستی (hand lay-up) استفاده شده است.

ساخت ورق های کامپوزیتی CARALL و CFRP در شرایط آزمایشگاهی با دمای محیط انجام شده است. ابتدا سطح ورق های آلومینیومی را با دقت، دوبار شسته و سپس توسط استون ۱۰۰ درصد سطح ورق چربی زدایی می شود. برای ایجاد خراش در سطح داخلی ورق آلومینیوم توسط سمباده خشن کاری می شود. برای چربی زدایی ثانویه ورق آلومینیوم به مدت ۲۰ دقیقه در آب جوش قرار می گیرد و پس از سرد شدن ورق، مجدد سطح آن توسط استون پاک می شود، رزین به نسبت ۵۵٪ به ۴۵٪ به هاردنر اضافه می شود و به مدت ۵ دقیقه توسط همزن مخلوط می شود. در نهایت سطح داخلی ورق آلومینیوم را آغشته به رزین کرده و شش لایه الیاف کربن به ابعاد 25×25 cm را جداگانه روی هم قرار داده و به مدت ۲۴ ساعت تحت فشار در دستگاه پرس قرار می گیرد. پس از آماده شدن، رزین های اضافی نمونه ها توسط ابر برش زده شد. لازم به ذکر است که نمونه ها طبق استاندارد ASTM-D 3039 ساخته شده است.



شکل ۲- نمونه کامپوزیت کربن و کامپوزیت الیاف-فلز

در شکل ۲، L ، w و T به ترتیب نشان دهنده طول، عرض و ضخامت نمونه می باشد. ضخامت ورق های کامپوزیتی CARALL و CFRP به ترتیب ۳/۸، ۴/۸ میلی متر می باشد.

برای بررسی تاثیر رطوبت بر روی کامپوزیت CARALL و CFRP در دو بازه زمانی ۱۴ روز و ۲۵ روز در یک محیط آبی درون ظرف با در نظر گرفتن شرایط آزمایشگاهی و دمای و رطوبت محیط به ترتیب

کردند. سان و همکاران [6] به بررسی مکانیزم شکست استقامت کششی بالا و سختی شکست ورق های کامپوزیتی Ti6Al4V-Ti Al پرداختند. خلیلی و همکاران [7] تاثیر چرخه گرما بر خواص کششی کامپوزیت FML به اتصالات هیبریدی تخریب شده در معرض آب را مطالعه کردند. در این روش ورق کامپوزیتی در آب دریا غوطه ور شده بود.

ساسو و همکاران [8] به بررسی رفتار مکانیکی کامپوزیت FML از جنس کربن با نرخ کرنش بالا پرداختند. در شرایط استاتیکی تغییر شکل ناچیزی بعد شکست اولیه CFRP^۱ رخ می دهد و بلافاصله نمونه به دو قسمت شکسته تبدیل می شود. در شرایط دینامیکی پس از شکست اولیه CFRP کرنش پلاستیک بین لایه های آلومینیوم رخ داد و این لایه لایه شدگی به عنوان شکست اولیه است. چاندرسکار و همکاران [9] به مطالعه خصوصیات مکانیکی و رفتار رطوبتی حرارتی ورقه های الیاف-فلزی بصورت تجربی پرداختند. آن ها از نمونه های CARALL, ARALL, GLARE استفاده کردند.

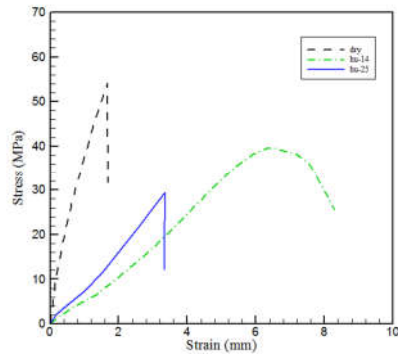
در این پژوهش به بررسی و مقایسه تاثیر رطوبت بر خواص کششی کامپوزیت CARALL و CFRP پرداخته شده است.

۲- شبیه سازی فرآیند کشش

برای شبیه سازی فرآیند کشش بر روی کامپوزیت FML باید به ترتیب مراحل تعریف هندسه طبق استاندارد ASTM-D 3039 [10]، تعیین خواص مواد، المان بندی و مش بندی، شرایط مرزی و در نهایت حل مسئله را در نرم افزار ANSYS اعمال نمود (شکل ۱). مدل سازی کشش در نرم افزار ANSYS و با استفاده از کد المان محدود MULTI PHYSICS انجام شده است. برای مدل کردن کشش بر روی کامپوزیت ها از المان SHELL 63 در محیط خشک استفاده شده است. این المان قابلیت کشش و خمش و حتی غشایی دارد. در حالت دوم برای اعمال شبیه سازی ورق های کامپوزیتی در محیط مرطوب، ابتدا از قسمت PREFERENCES گزینه THERMAL و سپس از المان Material SOLID 8 NODE 77 استفاده می شود. در قسمت Models دمای محیط، دمای آب و همچنین میزان رطوبت توسط دماسنج اندازه گیری شده است و ضریب انتقال گرما و جریان حرارتی به صورت یکنواخت به سازه وارد شد [11] و همچنین مدت ساعت قرار گیری کامپوزیت در محیط مرطوب را که در ۱۴ روز که معادل ۳۳۶ ساعت و ۲۵ روز که معادل ۶۰۰ ساعت می باشد، وارد شد. برای وارد کردن نیرو و قرار دادن تکیه گاه، از حالت THERMAL با استفاده از SWITCH ELEM TYPE داده های رطوبتی وارد شده به STRUCTURAL منتقل می شود. در نهایت برای انجام تست کشش بر روی کامپوزیت با استفاده از NEW ANALYSIS آنالیز را از حالت TRANSINET به حالت STATIC تغییر داده و سپس مقدار نیرو و همچنین شرایط مرزی به کامپوزیت اعمال شد و در نهایت مسئله حل می شود.

^۱Carbon fiber reinforced polymer

به نمونه‌های در معرض رطوبت دارای خواص کششی بهتری می‌باشد. کامپوزیت CFRP در محیط خشک تحت بارهای کششی بسیار ترد و شکننده‌تر می‌باشند. از طرف دیگر مقدار کرنش برای کامپوزیت CFRP که به مدت ۱۴ روز در معرض رطوبت قرار گرفت برابر ۷ mm و حدود ۳ برابر کرنش در محیط خشک می‌باشد. همچنین مقدار استحکام کششی نمونه در محیط مرطوب در مدت ۱۴ روز ۲۴/۲۲٪ نسبت به محیط خشک کاهش پیدا کرده است.



شکل ۵- نمودار تنش-کرنش کامپوزیت کربن (خط مشکی: محیط خشک، خط سبز: محیط مرطوب به مدت ۱۴ روز، خط آبی: محیط مرطوب به مدت ۲۵ روز)

جدول ۱ مشخصات نقطه شکست کامپوزیت CFRP در محیط خشک و محیط مرطوب

محیط مرطوب	کشیدگی (mm)	زمان (S)	نیرو (N)	تنش (MPa)	انرژی (J)	محیط
خشک	۱/۷۲	۵۲/۰۰	۱۰۳۷۴/۱	۵۱/۸۷	۱۰۵۰۰	خشک
۱۴ روز	۶/۶۲	۱۹۹/۰۳	۹۸۱۰	۳۹/۲۴	۱۷۲۰۰	۱۴ روز
۲۵ روز	۳/۸۰	۱۰۴/۳۴	۹۶۳۸/۳	۲۸/۲۷	۱۵۰۰۰	۲۵ روز

در جدول ۱ داده‌های تجربی از مشخصات نقطه ترک کامپوزیت CFRP در محیط خشک و مرطوب را نشان می‌دهد. مقدار انرژی لازم J ۱۰۵۰۰ و همچنین مقدار کشیدگی ۱/۷۲ mm و زمان برای رسیدن به نقطه ترک کامپوزیت در محیط خشک به دلیل تردی بسیار، کمتر از محیط مرطوب بود. اما در محیط مرطوب مقدار انرژی و همچنین مقدار تنش در نقطه ترک در مدت ۲۵ روز بیشتر از ۱۴ روز می‌باشد. بدین صورت که بیشترین انرژی معادل J ۱۷۲۰۰ برای کامپوزیت در محیط مرطوب می‌باشد، این افزایش انرژی به دلیل مدت زمان طولانی‌تر نمونه تحت آزمایش کشش است.

۲-۴- نتایج کامپوزیت الیاف-فلز CARALL

در شکل ۶ سطح شکست نمونه‌های کامپوزیتی CARALL به صورت چشمی مورد بررسی قرار گرفته است. وجود رطوبت باعث فرسایش در بافت‌های نمونه‌ها شده است و با گذشت زمان میزان آسیب به نمونه بیشتر شده است.

۳۰ °C و ۵٪ قرار گرفتند. لازم به ذکر است که این آزمایش در فصل تابستان در استان کرمان انجام شده است.

۳-۲- آزمون کشش

دستگاه تست کشش STM-1000 از شرکت سنتام دارای دو گیره می‌باشد (شکل ۳). با توجه به ضخامت‌های ورق کامپوزیتی از گیره‌های متفاوت استفاده می‌شود، که گیره‌ی پایین ثابت و گیره‌ی بالا متحرک بوده است. سرعت آزمون طبق استاندارد کشش ASTM-D 3039، ۲mm/min است. این دستگاه نیز دارای سنسورهای دقیق می‌باشد که بیش از ۱۰۰۰ داده را ثبت می‌کند و نمودار تنش-کرنش مربوط به سازه مورد نظر را می‌دهد.



شکل ۳- دستگاه تست کشش

۴- نتایج

آزمون کشش در دو محیط خشک و مرطوب برای ورق‌های کامپوزیتی CFRP و CARALL انجام شده است. در ابتدا مقطع شکست و نمودار تنش-کرنش و همچنین مشخصات نقطه Peak که شکست در نمونه‌ها رخ می‌دهد، بررسی می‌شود و در نهایت مدول الاستیسیته در محیط مرطوب با محیط خشک مقایسه می‌شود.

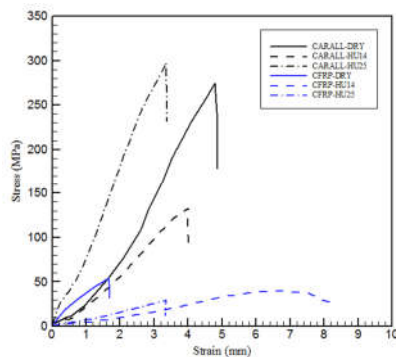
۴-۱- نتایج کامپوزیت CFRP

در این قسمت به بررسی نتایج خواص کششی مربوط به ورق‌های کامپوزیتی CFRP پرداخته شده است. در شکل ۴ سطح شکست نمونه‌ها بصورت چشمی برای نمونه‌های CFRP بررسی شده است، قرار گیری نمونه‌ها در معرض رطوبت منجر به آسیب جدی در الیاف و رزین‌ها شده است.



شکل ۴- شکست قطعه کامپوزیت کربن در شرایط مختلف (الف) محیط خشک (ب) محیط مرطوب ۱۴ روز (ج) محیط مرطوب ۲۵ روز

در نمودار شکل ۵ نتایج حاصل از آزمون کششی برای نمونه‌های CFRP مشاهده می‌شود. نمونه کامپوزیت CFRP در محیط خشک دارای بالاترین مقدار استحکام کششی ۵۱/۷۸ MPa می‌باشد و نسبت



شکل ۸- نمودار تنش- کرنش نمونه های کامپوزیت CFRP و CARALL

جدول ۳-مدول الاستیسیته کامپوزیت CFRP و CARALL

محیط	روش	CFRP (MPa)	CARALL (MPa)	درصد اختلاف (%)
خشک	تجربی	۳۳۳۱۲/۲۹	۸۶۳۶۹/۹۹	۱۵۹،۲۷
	عددی	۳۱۲۷۵/۶۷	۷۹۷۲۱/۴۸	۱۵۴،۸۹
۱۴ روز مرطوب	تجربی	۲۴۵۹۶/۱۶	۶۴۳۲۴/۶۳	۱۶۱،۵۲
	عددی	۲۳۷۳۱/۲۷	۶۲۰۴۳/۱۵	۱۶۱،۴۴
۲۵ روز مرطوب	تجربی	۱۷۵۳۱/۰۹	۳۷۲۸۹/۹۸	۱۱۲،۷۰
	عددی	۱۵۹۸۴/۷۴	۳۵۹۸۱/۷۸	۱۲۵،۱۰

در جدول ۲ مدول الاستیسیته در نقطه peak نمونه های کامپوزیتی برای حل تجربی و اجزاء محدود بررسی شده است. بیشترین مدول الاستیسیته برای کامپوزیت CFRP مربوط محیط خشک می باشد که معادل ۳۳۳۱۲/۲۹ MPa است که ۲/۵ برابر کوچکتر از مقدار آن در کامپوزیت CARALL می باشد و وجود ورق های آلومینیوم منجر به افزایش و رشد ۱۶۱ درصدی در این نمونه شد و همچنین رطوبت تاثیر مستقیم بر خواص کششی نمونه ها گذاشت به طوری که با مقایسه نمونه محیط خشک با محیط مرطوب در مدت ۲۵ روز برای کامپوزیت CARALL و CFRP مقدار مدول الاستیسیته ۵۴٪ و ۴۷/۷۴٪ کاهش یافته است. همچنین در مقایسه نتایج درصدی بدلیل وجود خطاهای آزمایشگاهی از جمله روش ساخت و وجود حفره و حباب ها موجود بین لایه ها اختلاف بین نتایج حل عددی و تجربی وجود دارد.

در جدول ۳ مدول الاستیسیته برای نمونه های CARALL و CFRP در دو محیط خشک و مرطوب بررسی شده است. مدول الاستیسیته CFRP در حالت خشک برابر ۳۳۳۱۲/۲۹ MPa است و زمانی که در محیط مرطوب طی ۱۴ و ۲۵ روز قرار می گیرد، مدول الاستیسیته نمونه به ترتیب ۲۶/۱۶٪ و ۴۷/۳۷٪ کاهش می یابد. همچنین مدول الاستیسیته CARALL در محیط خشک برابر ۸۶۳۶۹/۹۹ MPa است که با قرارگیری در محیط مرطوب در دو بازه زمانی ۱۴ و ۲۵ روز به ترتیب ۲۵/۵۲٪ و ۵۶/۸۲٪ کاهش می یابد و برابر با ۶۴۳۲۴/۶۳ MPa و ۳۷۲۸۹/۹۸ MPa می شود.

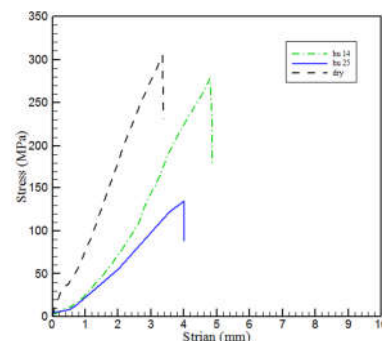
در حالت کلی، وجود ورق های آلومینیومی در نمونه کامپوزیتی CARALL منجر به افزایش ۱۵۹/۲۵٪ مدول الاستیسیته نسبت به CFRP در محیط خشک شده است.

در شکل ۹ و ۱۰ مربوط به توزیع تنش در دو حالت مذکور در زمانی که نمونه ها تحت حداکثر نیروی کششی است، آورده شده است.



شکل ۶- شکست قطعه کامپوزیت الیاف-فلز در شرایط مختلف (الف) محیط خشک (ب) محیط مرطوب ۱۴ روز (ج) محیط مرطوب ۲۵ روز

شکل ۷ نمودارهای تنش-کرنش را برای نمونه های مختلف کامپوزیت CARALL نشان می دهد. به وسیله این منحنی ها، تنش حد نهایی و مساحت زیر منحنی تنش-کرنش برای هر نمونه محاسبه شده است. وجود ورق آلومینیوم در نمونه ها منجر به افزایش مقدار تنش حد نهایی در نمونه ها شد به طوری که بیشترین مقدار برای نمونه در محیط خشک برابر ۳۰۸/۶۰ MPa می باشد که سطح زیر منحنی آن ۳/۴۳ میلی متر است که نشان از تردی و شکننده بودن ورق آلومینیوم در کشش می دهد و همچنین نسبت به کامپوزیت CFRP مقدار تنش حد نهایی و مساحت زیرمنحنی درصد قابل توجهی رشد کرد.



شکل ۷- نمودار تنش-کرنش کامپوزیت الیاف-فلز (خط مشکی: محیط خشک، خط سبز: محیط مرطوب به مدت ۱۴ روز، خط آبی: محیط مرطوب به مدت ۲۵ روز)

جدول ۲- مشخصات نقطه شکست کامپوزیت CARALL در محیط خشک و محیط مرطوب

کشیدهی (mm)	زمان (S)	نیرو (N)	تنش (MPa)	انرژی (J)	محیط
۳/۴۳	۱۳۹/۰۱	۷۴۰۶/۶	۳۰۸/۶۰	۲۱۵۰۰	خشک
۴/۷۶	۱۶۷/۰۶	۸۵۲۷۳/۴	۲۸۴/۲۴	۲۱۹۰۰۰	۱۴ روز
۳/۹۹	۱۳۹/۴۱	۱۱۷۸۰	۱۳۵/۱۴	۲۰۵۰۰	۲۵ روز

در شکل ۸ نمودار تنش-کرنش کلی برای شش نمونه ورق کامپوزیتی CFRP و CARALL بررسی شده است.

۳- از مقایسه نمونه‌های کامپوزیت CARALL می‌توان نتیجه گرفت که خواص کششی نمونه در معرض رطوبت نسبت به محیط خشک حدود ۲۵٪ کاهش داشته است. بطوریکه مقدار مدول الاستیسیته در محیط مرطوب در بازه زمانی ۱۴ و ۲۵ روز نسبت به محیط خشک به ترتیب ۲۵/۵۲٪ و ۵۶/۸۲٪ کاهش یافته است.

۴- انرژی جذب شده در کامپوزیت CARALL بیشتر از کامپوزیت CFRP است به طوری که تحت بار کششی انرژی جذب شده این کامپوزیت در محیط خشک بیش از ۲ برابر و در محیط مرطوب بیش از ۱/۵ برابر می‌باشد.

۵- ورق کامپوزیتی CARALL به دلیل وجود ورق آلومینیوم تردتر می‌باشد که ناحیه پلاستیک و تغییر شکل کمی دارد و اکثراً رفتار خطی دارند و در ناحیه الاستیک دچار شکست می‌شوند.

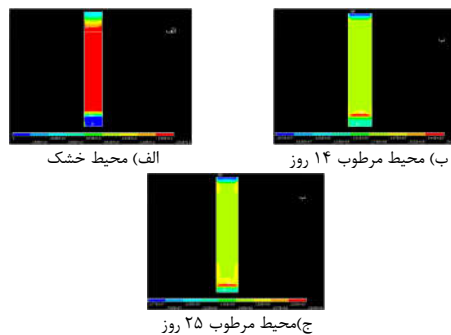
۶- در مقایسه مدول الاستیسیته نقطه شکست در حل تجربی و اجزاء محدود درصدی اختلاف وجود دارد که به دلیل خطاهای موجود در روش آزمایشگاهی از جمله وجود حفره های ریز^۱ در نمونه‌ها می‌باشد که در روش اجزاء محدود لحاظ نشده است.

۶- مراجع

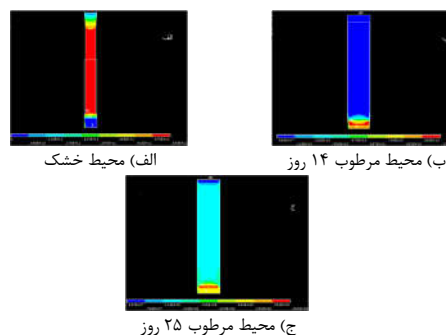
- [1] Truong, G.T. and Choi, K.K., Tensile behavior of hybrid composites of carbon fibers—steel wire mesh reinforced polymer. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 28(2), pp.154-166, 2021.
- [2] Sharma, A.P., Khan, S.H. and Parameswaran, V., Response and failure of fiber metal laminates subjected to high strain rate tensile loading. *Journal of Composite Materials*, 53(11), pp.1489-1506, 2019.
- [3] Hao, X., Nie, H., Ye, Z., Luo, Y., Zheng, L. and Liang, W., Mechanical properties of a novel fiber metal laminate based on a carbon fiber reinforced Zn-Al alloy composite. *Materials Science and Engineering: A*, 740, pp.218-225, 2019.
- [4] Chow, Z.P., Ahmad, Z., Wong, K.J. and Israr, H.A., Thermo-mechanical characterisation and modelling of GFRP laminated aluminium. *Composites Part B: Engineering*, 173, p.106971, 2019.
- [5] Boldini, A. and Porfiri, M., Plane-strain deformations of ionic polymer-metal composites. In *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) XXI* (Vol. 10966, p. 109662V). International Society for Optics and Photonics, 2019.
- [6] Sun, Wei, Fenghai You, Fantao Kong, Xiaopeng Wang, and Yuyong Chen., "Fracture mechanism of a high tensile strength and fracture toughness Ti6Al4V-TiAl laminated composite", *Journal of Alloys and Compounds*, pp.153088, 2019.
- [7] Khalili, S.M.R., Sharafi, M., Eslami, Farsani, R. and Saeedi, A., "Effect of thermal cycling on tensile properties of degraded FML to metal hybrid joints exposed to sea water". *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 79, pp. 95-101, 2017.
- [8] Sasso, M., Mancini, E., Dhaliwal, G.S., Newaz, G.M. and Amodio, D., Investigation of the mechanical behavior of CARALL FML at high strain rate. *Composite Structures*, 222, p.110922, 2019.
- [9] Chandrasekar, M., et al. "An experimental review on the mechanical properties and hygrothermal behaviour of fibre metal laminates." *Journal of Reinforced Plastics and Composites* Vol. 36, No. 1, pp. 72-82, 2017.
- [10] ASTM D3039 / D3039M-17, Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, www.astm.org.
- [11] Welty, J., Rorrer, G.L. and Foster, D.G., *Fundamentals of momentum, heat, and mass transfer*. John Wiley & Sons, 2020.

¹ Void

همانطور که بر اساس هندسه تغییر شکل نمونه‌ها انتظار می‌رفت، سطح میانی نمونه‌ها در حالت خشک، دارای بیشترین مقدار تغییر شکل و تنش می‌باشد. بطوریکه بیشترین میزان آسیب الیاف و ماتریس در این ناحیه می‌باشد. در حالت مرطوب مقدار توزیع تنش در قسمت پایین نمونه مشاهده شده است و از روی این توزیع تنش در این قسمت، منجر به آسیب و شکست در نمونه‌ها شده است.



شکل ۹- توزیع تنش وارد شده بر کامپوزیت کربن (CFRP) در شرایط مختلف (الف) محیط خشک (ب) محیط مرطوب ۱۴ روز (ج) محیط مرطوب ۲۵ روز



شکل ۱۰- توزیع تنش وارد شده کامپوزیت الیاف-فلز در شرایط مختلف (الف) محیط خشک (ب) محیط مرطوب ۱۴ روز (ج) محیط مرطوب ۲۵ روز

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی رفتار و خواص کامپوزیت توسط آزمون کشش در دو محیط خشک و مرطوب برای کامپوزیت CFRP و CARALL پرداخته شده است. همچنین شش نمونه برای انجام آزمایش کشش طبق استاندارد ASTM- D3039 ساخته شد و نمونه‌ها در محیط خشک و مرطوب در دو حالت ۱۴ روز و ۲۵ روز قرار داده شد. نتایج زیر از حل تجربی و المان محدود به دست آمده است.

۱- بررسی خواص کششی کامپوزیت، بهبود استحکام کششی را در محیط خشک نسبت به محیط مرطوب نشان می‌دهد. رطوبت منجر به پیرسازی و از بین رفتن تدریجی الیاف و رزین اپوکسی نمونه‌ها و همچنین کاهش مدول الاستیسیته شد.

۲- وجود ورق آلومینیوم منجر به افزایش مدول الاستیسیته شد، و همچنین مقدار مدول برای کامپوزیت CARALL در محیط خشک برابر $۸۶۳۶۹/۹۹$ MPa می‌باشد که نسبت به کامپوزیت CFRP حدود ۱۵۹٪/۲۵ افزایش یافته است.