بررسی تجربی استحکام کششی در سازه‌ی شناورهای کامپوزیتی ترمیم شده با تکنیک لایه‌چینی

نصرت‌اله سرلک[۱]، شهروز یوسف‌زاده[۲*]، امیرحسین نصراله براتی[۳]

[۱] کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، واحد الیگودرز، دانشگاه آزاد اسلامی، الیگودرز، nosratsarlak@yahoo.com
[*۲] نویسنده مسئول: استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، واحد الیگودرز، دانشگاه آزاد اسلامی، الیگودرز، sh.yoosefzadeh@gmail.com
[۳] مربی، دانشکده مهندسی مکانیک، واحد الیگودرز، دانشگاه آزاد اسلامی، الیگودرز، amirhosinbarati@gmail.com

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۱/۲۴
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۲/۰۸

کلمات کلیدی:
سازه کامپوزیتی
وصله
شناور دریایی
استحکام کششی

چکیده

امروزه ترمیم یا تعمیر سازه‌ها و صفحات کامپوزیتی ترکدار براساس استانداردهای تعمیر رو به گسترش است. این اتصال باعث کاهش میزان تنش در اطراف آسیب و موجب کاهش و یا توقف رشد ترک شده و در نهایت با هزینه‌ای ناچیز باعث افزایش استحکام یا عمر قطعه می‌شود. در این تحقیق، به بررسی فرایند تعمیر سازه‌ی شناورهای کامپوزیتی بصورت تجربی طبق استانداردهای تعمیر پرداخته شده است. در ابتدا، نمونه‌های کامپوزیتی شبیه به بدنه کامپوزیتی یک شناور دریایی ساخته شدند و پس از ایجاد آسیب روی آن، توسط وصله‌های چندلایه مورد تعمیر قرار گرفتند. سپس آزمایش کشش بر روی نمونه‌ها انجام گرفت و تأثیر پارامترهای مهم بر روی استحکام کششی در تعمیر و اتصال نمونه‌های کامپوزیتی مورد مطالعه قرار گرفت. پارامترهای مورد بررسی عبارتند از: شیب اتصال، نوع رزین، نوع الیاف، چگونگی لایه چینی و درصد ترکیب رزین و خشک کننده. در نهایت، نتایج آزمایش‌ها نشان دادند که شیب اتصال و نحوه لایه چینی تعمیر از مهمترین پارامترهای موثر در استحکام اتصال می‌باشند.

Experimental Study of Tensile Strength in Composite Floats Structure Repaired with Multi-Layer Patches

Nosratollah Sarlak[1], Shahrouz Yousefzdeh[2], Amirhosein Nasrollah Barati[3]

[1]Department of Mechanical Engineering, Aligudarz Branch, Islamic Azad University, Aligudarz, Iran; nosratsarlak@yahoo.com
[2]Department of Mechanical Engineering, Aligudarz Branch, Islamic Azad University, Aligudarz, Iran; sh.yoosefzadeh@gmail.com
[3]Department of Mechanical Engineering, Aligudarz Branch, Islamic Azad University, Aligudarz, Iran; amirhosinbarati@gmail.com

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 13 Apr. 2019
Accepted: 28 Apr. 2020

Keywords:
Composite structures
Patch
Marine float
Tensile strength

ABSTRACT

Repair of cracked composite structural components and plates according to repair standards is increased year on year. Patched repair reduces the stress field near the crack by bridging the stresses between the cracked plate and the composite patch, leads to retardation or complete stoppage of the crack growth, provides high structural efficiency and extends the life of cracked structural components at an economical cost. This study is investigated the repair process of the cracked float composite structures through the experiments. At first, composite specimens are constructed similar to the composite body of a marine float, and after done damage on it, they were repaired by multi-layer patches. Then, the tension test was done on samples and the effect of some parameters on tensile strength was studied. These parameters are bonded angle, resin type, fiber type, lay-up techniques, the percentage of resin compound and hardener. Finally, the results of tests showed that the bonded angel and lay-up techniques are the most important parameters on tensile strength in repaired composite components.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.2.1]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.83]

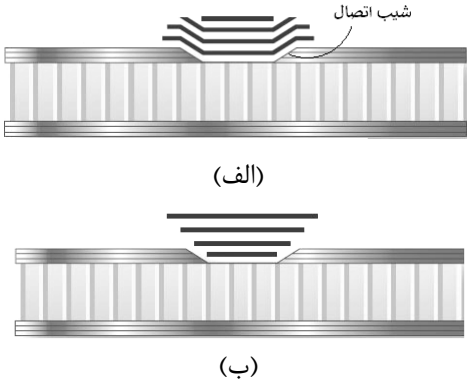
۱- مقدمه

مواد کامپوزیتی در دهه‌های اخیر مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. کامپوزیتها دارای مزایای زیادی نسبت به آلیاژهای فلزی (مخصوصاً در مواردی که استحکام ویژه و سفتی ویژه مدنظر باشد) می‌باشند[۱]. از طرف دیگر، ایجاد و رشد آسیب به ویژه ترک در قطعات و سازه‌ها یک امر اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. عامل وقوع این ترک‌ها می‌تواند نیروهای متناوب وارد بر قطعه، کشیدگی ناشی از عملیات جوشکاری، عیوب و حفره‌های ناشی از ریخته‌گری، تنش-های حرارتی و موارد دیگر باشد. همچنین، با توجه به اینکه تعویض یک قطعه یا قسمتی از سازه شاید به لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نباشد و یا بسیار دشوار و زمان‌بر باشد، پس ارائه‌ی روش‌های تعمیری به جای تعویض قطعات بسیار سودمند ست[۲]. جلوگیری از شروع ترک و گسترش آن برای نگهداری سازه‌های مهندسی و تجهیزات در کنار تشخیص شروع ترک بسیار مهم است. تعمیر ترک با به تأخیر انداختن رشد ترک یا جلوگیری از رشد ترک انجام می‌شود که می‌تواند با کاهش شدت تنش در نوک ترک با استفاده از ایجاد تنش پسماند فشاری یا کاهش تمرکز تنش در نوک ترک صورت گیرد. ترمیم قطعات بـه دو روش امکان‌پذیر است [۳]:

ترمیم مکانیکی با پیچ یا پرچ و ترمیم با چسب از طریق چسباندن فلز یا کامپوزیت به نام وصله در محل خرابی.

روش اول سالیان زیادی است کـه مورد استفاده قرار می‌گیرد و آسان‌تر از ترمیم با چسب است. سادگـی، ارزان بـودن، در دسترس بـودن ترمیم و ابزار جانبـی آن، همچنین یک جنس بـودن و همخوانی ماده ترمیم‌کننده با قطعه و نبود مشکلاتی مانند ضریب انبساط حرارتی متفاوت از مزایای این روش است. اما این روش خرابی‌های دیگری به سازه وارد می‌کند و نقاط تمرکز تنش را بر اثر سوراخ‌کاری برای پیچ یا پرچ افزایش می‌دهد. همچنین در این روش احتمال صدمه رسیدن به سیستم‌های سازه مانند خطوط هیدرولیکی و الکتریکی، برای قطعاتی که باید روی سازه ترمیم شود، وجود دارد. اما در روش دوم خرابی دیگری به سازه اضافه نمی‌شود. توزیع تنش تقریباً یکنواخت روی سازه، میرایی مناسب ارتعاشی، نازکی وصله روی سطح، وزن کم و تأثیر ناچیز روی جریان هوا برای قطعاتی که از لحاظ آیرودینامیکی مهم می‌باشند از مزایای این روش می‌باشد [۴].

اتصال وصله به قطعه معمولاً به دو صورت انجام می‌شود: اول، اتصال یک‌طرفه که معمولاً ارزان‌ترین نوع اتصال است و در مواردی که دسترسی به دو طرف سازه امکان‌پذیر نیست بسیار سودمند است. دوم، اتصال دوطرفه که به علت شکل برابر و متقارن اعمال نیرو، دارای ممان اولیه نمی‌باشد. البته پدیده جدایی می‌تواند براساس نابرابر بودن تنش برشی در بخش انتهایی این نوع اتصال به وجود آید [۵]. همچنین، وصله‌ها می‌توانند بصورت تک لایه یا چند لایه در محل آسیب به کار روند که در حالت چندلایه، طبق استاندارد معمـــولاً از دو تکنیک لایه‌چینـــی کوچـــک به بزرگ (Butted lay-up) و بزرگ به کوچک (Parallel lay-up) می‌توان استفاده کرد. نحوه نصب وصله در تکنیک‌های یاد شده در شکل۱ آمده است.



شکل۱- نحوه لایه چینی (الف) از بزرگ به کوچک (ب) از کوچک به بزرگ

در زمینه تعمیر سازه‌ها با وصله مطالعات زیادی انجام شده است که در ادامه به چند مورد اشاره می‌شود: کارهای بیکر [۶] جزء اولین مطالعاتی بود که نشان داد ترمیم چسبی دارای کارایی بسیار بالاتری نسبت به ترمیم مکانیکی می‌باشد و می‌توان با اطمینان خاطر بیشتری این تکنولوژی را استفاده نمود. در سال ۲۰۰۵ کامپیلهو و همکاران [۷] به مطالعه توزیع تنش و تنش پسماند در یک ورق کامپوزیتی تعمیر شده با وصله با استفاده از نرم‌افزار آباکوس پرداختند. آنها تعمیر ورق را بصورت یک طرفه و دو طرفه در نظر گرفتند و با اثر مودهای مختلف شکست را مورد بررسی قرار دادند. حسینی تودشکی و همکاران [۱۱-۸] تأثیر لایه‌چینی و ضخامت وصله بر روی پارامترهای شکست و مسیر رشد ترک را تحت بارگذاری‌های خستگی مورد بررسی قرار دادند. با انجام تست‌هایی که توسط محققان بر روی نمونه‌های حاوی ترک (به صورت نامتقارن) انجام گرفت، مشاهده شد که لبه نوک ترک به صورت منحنی پیشرفت می‌کند.

در سال ۲۰۰۹ خلیلی و همکاران [۱۲] به مطالعه تجربی مقاومت به ضربه ورق‌های ترک‌دار آلومینیومی تعمیر شده با وصله‌های کامپوزیتی پرداختند. آنها در آزمایشات خود از دو نوع وصله کامپوزیتی استفاده کردند. تحقیقات آنها نشان داد که جذب انرژی در نمونه‌ای که با وصله‌ی الیاف کربنی تعمیر شده دو برابر نمونه‌ای است که با الیاف شیشه تعمیر شده است. اکافور و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۰۵ به طراحی و تحلیل عددی-تجربی تعمیرات وصله کامپوزیتی بر روی پانل‌های آلومینیومی هواپیما تحت بار کششی پرداختند. آنها پی بردند که وصله‌های ۶لایه دیرتر از وصله‌های ۵لایه

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.2.1]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.83]

به واماندگی می‌رسند و این امر به دلیل وجود تنش برشی کمتر در چسب وصله‌های ۶لایه می‌باشد.

در سال ۱۹۹۵ چو و همکاران [۱۴] تحقیقی در مورد تأثیر لایه‌چینی وصله‌های کامپوزیتی در تعمیر قطعات وصله شده انجام دادند. آنها از قطعات دارای ترک مرکزی زاویه‌دار استفاده کرده و بارگذاری را به صورت کششی دو محوره در نظر گرفته و تحلیل را در ناحیه الاستیک انجام دادند. آنها نشان دادند که توزیع انرژی کرنشی در مجاورت رأس ترک تقریباً مستقل از ترتیب لایه‌چینی وصله است.

جونز و همکاران [۱۵] یک کد المان محدود براساس پروفیل توزیع تنش برشی در لایه چسب برای حالت ترمیم متقارن تهیه کردند و اثر خمش ناشی از ترمیم نامتقارن را شناسایی نمودند اما نتوانستند مقدار واقعی اختلاف در محاسبه ضریب تنش بین دو حالت ترمیم متقارن و نامتقارن را محاسبه نمایند. ایکسیونگ و شنوی [۱۶] در سال ۲۰۰۸ تاثیر وصله‌های کامپوزیتی بر روی عمر پانل‌های آلومینیومی را بصورت استاتیکی و دینامیکی بررسی کردند. آنها رفتار استاتیکی و خستگی وصله‌های کامپوزیتی با جنس و ضخامت‌های مختلف را مطالعه کردند. آزمایشات آنها نشان داد که استحکام و عمر خستگی قطعات ترکدار به شدت متأثر از ضخامت و جنس وصله‌ها می‌باشد و باعث کاهش تمرکز تنش در نوک ترکها می‌شود. در سال ۱۹۹۶ سان و همکاران [۱۷] مدلی از المان‌های محدود جهت محاسبه ضریب شدت تنش بعد از ترمیم ارائه نمودند. در این روش صفحه دارای ترک و صفحه ترمیم بصورت صفحه میندلین و لایه چسب به صورت فنرهای خطی مدل شدند.

نابولسی و همکاران روشی دیگر موسوم به روش سه‌لایه‌ای را توسعه دادند [۱۸،۱۹]. در این روش هر سه‌لایه ترمیم‌شونده، چسب و ترمیم‌کننده بـه صورت صفحاتی بـا مشخصاتی منطبق بر تئوری میندلین مدلسازی شدند. از نتایج این مطالعه می‌توان به خطی بودن نرخ رشد ترک در منطقه جدایش ترمیم اشاره کرد. نرخ رشد ترک برای حالتی که هیچ جدایشی اتفاق نیفتاده، کمترین مقدار را در مقایسه با دیگر حالات جدایش دارد.

در ادامه، نابولسی و همکاران [۲۰] با استفاده از تئوری مدل سه-لایه‌ای و منظور کردن اثرات غیرخطی هندسی مربوط به تغییر مکان‌های بزرگ و فـرض غیرخطی ماده مربوط بـه رفتار چسب، به مطالعه ترمیم چســـبی پانل‌های آلومینیومی پرداختند. اسکاب [۲۱] مطالعاتش را بر روی تأثیر هندسه و نسبت سختی وصله کامپوزیتی به سختی صفحه ترک‌دار متمرکز نمود. او از پانل‌های ضخیم با ضخامتی در حدود ۳/۱۵ تا ۶/۳۵ میلی‌متر به منظور انجام محاسبات و آزمایشات مورد نظر استفاده کرد. کانلی [۲۲] نیز تلاش نمود با استفاده از دو روش تجربی و عددی عمر پانل‌های ترمیم شده را در وضعیت‌های مختلف به دست آورد. او در مطالعات عددی خود از روش‌های موجود اجزاء محدود استفاده نمود. او نیز به این نتیجه رسید که جدایش بین لایه ترمیم‌شونده و لایه ترمیم‌کننده تأثیر چندانی در عمر پانل ترمیم شده نخواهد داشت.

از مطالعات عددی که در مودهای مختلط شکست صورت گرفته است می‌توان به کار بشیر و همکاران [۲۳] اشاره کرد که با روش اجزای محدود به محاسبه ضریب شدت تنش در مود اول و مود مختلط پرداختند و اثرات ضخامت وصله و چسب را بر ضریب شدت تنش بررسی کردند. از نتایج این مطالعه، مشاهده افزایش ضریب شدت تنش مود اول با افزایش طول ترک است که در طـــول‌های بزرگ‌تر ترک این نرخ افزایشی، رشد بسیار آهسته‌تری نسبت به اوایل رشد ترک دارد. مطالعه تجربی کاملی در مورد تست خستگی صفحات آلومینیومی ترک‌دار در مود مختلط که بصورت نامتقارن ترمیم شده، توسط چانگ و یانگ [۲۴] صورت گرفت.

وگلسان و ولوت [۲۵، ۲۶] در تحقیق جامعی به کاربرد کامپوزیت-های لایه فلزی FML در سازه‌های مدرن هوا-فضا پرداختند. آنها مزایای استفاده از کامپوزیت FML همچون مقاومت در مقابل اشتعال، مقاومت در برابر خوردگی و فرسایش، بهبود رفتار خستگی، کاهش سرعت رشد ترک و مقاومت بالای این پانل‌ها در مقابل فرورفتگی ناشی از ضربه‌های وارد بر بدنه هواپیما را نام بردند [۲۷]. آلدرلیستن و همکارانش [۲۸] کاربرد آلیاژهای منیزیم در پانل‌های FML را بررسی کردند و یک ارزشیابی ابتدایی روی FML بر پایه منیزیم انجام دادند. آن‌ها بیان کردند که در قسمت‌هایی از سازه که در شرایط بار کمانش قرار دارد برای استحکام سازه از پانل‌هایی با ضخامت و وزن بالا استفاده می‌شود. اگر در این قسمت‌ها از FML بر پایه منیزیم استفاده شود، چون افزایش ضخامت منیزیم نسبت به آلومینیوم افزایش وزن کمتری در پی دارد، می‌توان با این روش خواص تحمل بار کمانش را در پانل افزایش داد.

در سال ۱۳۹۳ آشنای قاسمی و همکاران [۲۹] به تحلیل تجربی استحکام کششی صفحات آلومینیومی با شیار کناری ترمیم شده با وصله‌های کامپوزیتی پرداختند. در تحقیق آنها، ترمیم بصورت یک‌طرفه انجام گرفت و بصورت تجربی اثر نوع لایه‌چینی، ضخامت لایه فلزی و طول وصله کامپوزیتی روی استحکام کششی ورق‌های ترمیم شده بررسی شد. آنها نشان دادند که استحکام کششی قطعات ترمیم شده در مقایسه با قطعات بدون وصله تا ۸۲/۴٪ افزایش یافته است. در سال ۱۳۹۶، یوسف‌زاده و دوستدار [۳۰] به بررسی تجربی استحکام خستگی در ورق‌های ترکدار آلومینیومی ترمیم شده با وصله‌های کامپوزیتی پرداختند. ترمیم به‌صورت چسبی انجام شد تا از معایب اتصال مکانیکی مانند تمرکز تنش، مقاومت کم خستگی، و امکان ایجاد خرابی در قطعه‌ی اصلی جلوگیری شود. نتایج تحقیق آنهانشان داد که افزایش زاویه‌ی ترک از صفر به ۴۵ درجه، عمر قطعات در اثر بار خستگی را افزایش می‌دهد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.2.1]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.83]

در این پژوهش، با توجه به توسعه روزافزون کاربرد کامپوزیتها در ساخت، تعمیر و نگهداری صنایع دریایی و بخصوص کامپوزیتهای FML و رزین‌ها و همچنین عدم شناخت کافی از خواص و توان این نوع کامپوزیتها، میزان تأثیر ترمیم بر روی خواص مکانیکی یک سازه شناور دارای آسیب مورد بررسی تجربی قرار گرفته است. آزمون کشش به عنوان مبنای بررسی قرار داده شده و به‌طور خاص اثر پارامترهای مختلف روی استحکام کششی نمونه‌ها به عنوان هدف نهایی پژوهش قرار گرفته است. در پایان، تأثیر شیب اتصال، نوع رزین، نوع الیاف، چگونگی لایه چینی و درصد ترکیب رزین و خشک کننده بر میزان استحکام کششی قطعات کامپوزیتی تعمیر شده مطالعه شده است.

۲- طراحی آزمایش

۲-۱- آماده‌سازی ورق کامپوزیتی پایه

در گام اول اقدام به ساخت یک صفحه کامپوزیتی با مشخصات شبیه به سازه بدنه شناورهای متداول از لحاظ ماده گرفته شد تا نمونه‌های آزمایش از آن بریده شود. لذا صفحه‌ای کامپوزیتی از جنس الیاف شیشه نوع E-glass که مشخصات آن در جدول۱ نوشته شده ساخته شد. دلیل استفاده از جنس مذکور این است که در اغلب سازه‌های شناورها از این نوع الیاف استفاده می‌گردد.

جدول۱- مشخصات الیاف شیشه مورد استفاده برای ساخت نمونه‌ها

درصد افزایش طول تا پارگی	مدول الاستیسیته	استحکام کششی	چگالی
4. 8	76 GPa	3100 MPa	2. 54 g/cm^3

۲-۲- رزین و الیاف مورد استفاده

در کلیه آزمایش‌ها و تعمیرات، از رزین پلی‌استر که نمونه‌های اصلی از آن ساخته شده به عنوان وصله استفاده گردید. ویژگیهای این نوع رزین در جدول۲ آورده شده است.

جدول۲- مشخصات رزین پلی‌استر مورد استفاده برای وصله

استحکام کششی	50 MPa
استحکام فشاری	120MPa
مدول کششی	3. 35GPa
درصد افزایش طول تا پارگی	4
چگالی	$1.3\frac{gr}{cm^3}$
مقاومت حرارتی	70 C
درصد جمع شدگی	7. 5
ضریب انبساط حرارتی	$7\frac{C}{10^5}$
درصد میزان جذب آب پس از 24 ساعت	0.1- 0. 2

۲-۳- مراحل ساخت ورق کامپوزیتی

برای ساخت نمونه‌های مورد آزمایش مراحل زیر انجام شد:

۱- از آنجا که نیاز به یک سطح کاملاً صیقلی بود از دو شیشه کاملاً مسطح مربعی با ابعاد $1 \times 1\ m$ استفاده گردید. در ابتدا سطح شیشه‌ها از هرگونه گرد و غبار تمیز شد و واکس جداکننده (پلی ونیل الکل) روی آنها مالیده شد.

۲- الیاف دراندازه ابعاد شیشه بریده شد و لایه‌گذاری بر روی شیشه انجام گرفت. لازم به ذکر است در ساخت لایه اول و دوم از الیاف نمدی یا رندم یا سوزنی به علت چسبندگی خوب استفاده گردید (شکل۲).



شکل۲- چیدمان لایه‌های اول و دوم رندم نمدی یا سوزنی

۳- رزین پلی‌استر کبالت خورده با ۱.۵درصد کاتالیزر (متیل اتیل کتون پراکسید) مخلوط و کاملاً بهم زده شد.

۴- لایه‌های الیاف پس از هر بار لایه‌گذاری به مخلوط رزین و خشک کننده آغشته شدند.

۵- به منظور خارج شدن حباب‌ها و خیس شدن کامل الیاف، در هر مرحله از لایه‌گذاری، غلطک‌کاری انجام شد.

۶- لایه سوم یک لایه حصیر با زاویه ۹۰ درجه بود و در هنگام لایه‌گذاری آن، همان عملیات آغشته نمودن و غلطک زدن انجام گرفت. این الیاف در شکل۳ نشان داده شده است (از راست به چپ حصیری و سوزنی).



شکل۳- لایه حصیری و رندم برای لایه‌چینی

۷- لایه چهارم نمدی، پنجم حصیری و لایه‌های ششم و هفتم نیز نمدی می‌باشد که چیدمان آنها مشابه مراحل قبلی انجام شد. پس از لایه هفتم، شیشه دوم که عاری از گرد و غبار و آغشته به واکس

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.2.1]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.83]

جداکننده است روی قطعه ساخته شده قرار گرفت و کمی فشار داده شد (شکل۴).

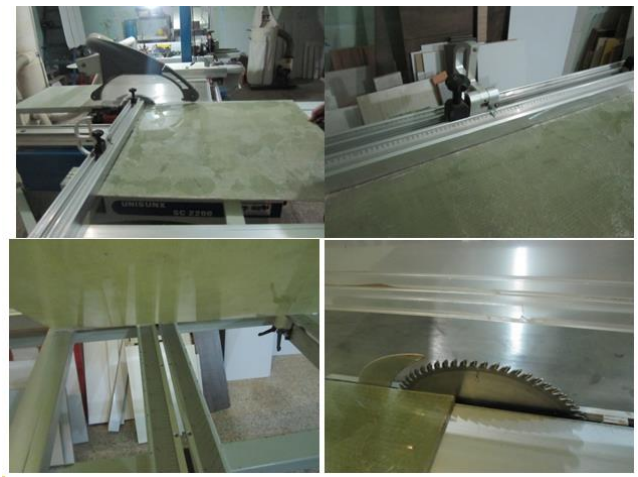


شکل۴- گذاشتن شیشه رویی پس از اتمام لایه‌گذاری.

پس از این کار باید منتظر خشک شدن بود که این امر تقریباً ۳۰ دقیقه زمان نیاز داشت ولی برای اطمینان از خشک شدن کامل کامپوزیت حاصل، پس از ۱۲ساعت اقدام به جداسازی شیشه‌ها گردید.

۲-۴- برش نمونه‌ها

همانطوری که ذکر گردید ورق کامپوزیتی ساخته شده دارای ابعاد $1 \times 1\ m$ و ضخامت ۶/۱ میلی‌متر بود که دارای ۵ لایه رندم یا نمدی و ۲ لایه حصیری با زاویه ۹۰ درجه بود. برای ساخت نمونه‌های آزمایش مطابق با استاندارد ISO3268، نیاز به ابعاد $25 \times 5\ m$ و ضخامت بین ۱ تا ۱۰ میلیمتر بود. این کار توسط یک دستگاه برش کامپوزیت، گونیای مدرج دقیق و یک تیغه الماس انجام گرفت. شکل۵ مراحل این کار را نشان می‌دهد.



شکل۵- دستگاه برش کامپوزیت و مراحل مختلف برش نمونه‌ها

برش‌های طولی به وسیله دستگاه برش و برش‌های عرضی با دستگاه سنگ فرز با یک صفحه برش مویی با ضخامت ۰/۲ میلیمتر انجام شد. اندازه گیری طول، عرض و ضخامت نمونه‌ها با استفاده از کولیس مدرج عقربه‌ای با دقت ۰/۰۱ میلیمتر صورت گرفت.

۲-۵- ایجاد آسیب و انجام تعمیر نمونه‌ها

بیشتر تعمیرات انجام شده بر روی بدنه شناورهای کامپوزیتی بر روی عیوبی است که ناشی از ضربات وارده بر آن است و عملاً منجر به شکستگی، ایجاد ترک‌های عمیق و تورق قابل ملاحظه می‌گردد. در این موارد به طور متداول تعویض قسمت معیوب بهترین راهکار است. لذا مقاومت اتصال سازه جدید از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. در این تحقیق، بر اساس همین دیدگاه، عیوب ایجاد شده و تعمیرات انجام گرفت.

از آنجا که شناورهای دریایی در بیشتر موارد دو جداره هستند و در موارد تک جداره نیز تجهیزات مانع از تعمیر دو طرفه می‌گردد، لذا در این تحقیق از تعمیر یک طرفه بهره گرفته شد. علاوه بر این چون هم سطح بودن اتصال از اهمیت زیادی برخوردار است لذا نمی‌توان در اتصال از لایه‌های بیشتر از لایه‌های نمونه اصلی استفاده نمود. به همین دلیل به تعداد لایه‌های کامپوزیت از لایه‌های رزین پلی‌استر در تعمیر نمونه‌های آسیب دیده استفاده گردید. برای این کار نمونه‌ها از وسط جدا شد و به صورت‌های مختلف با انجام شیب مناسب، مجدداً به صورت لایه‌گذاری دستی به همدیگر متصل شدند. جزییات اتصال با توجه به نوع آزمایش تغییر کرده و در هر مرحله ذکر می گردد.

۲-۶- انجام تست غیر مخرب

قبل از انجام آزمایش، از روش‌های غیر مخرب برای ارزیابی وضعیت نمونه‌ها استفاده شد. از جمله بازرسی چشمی، استفاده از میکرسکوپ، ذره‌بین، ضربه، رادیوگرافی. در این مرحله، رادیوگرافی نتوانست جواب مناسبی بدهد و روش آلتراسونیک نیز به دلیل هزینه بالا مقدور نبود اما با استفاده از روش‌های ساده، نمونه‌هایی که به هر دلیل از جمله وجود حباب، ترک و پرزینی قابل مشاهده بودند کنار گذاشته شد و نمونه‌های سالم جایگزین گردید.

۳- آزمایش کشش

برای آزمایش کشش، از استاندارد ISO3268 استفاده گردید. برای احتیاط، هنگام انجام آزمایش کشش، دو طرف نمونه آزمایشی با یک سری تقویت‌کننده محکم شد[۳۱]. تقویتی‌ها باید با یک چسب اپوکسی محکم به انتهای نمونه چسبانده می‌شدند و یا اینکه به یکدیگر پرچ می‌شدند (شکل۶). بنابراین لازم بود دست کم پنج نمونه آزمایشی با اره الماسی و یا جت آب با فشار بالا از نمونه اصلی تهیه می‌شد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.2.1]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.83]



شکل۶- دستگاه آزمایش کشش

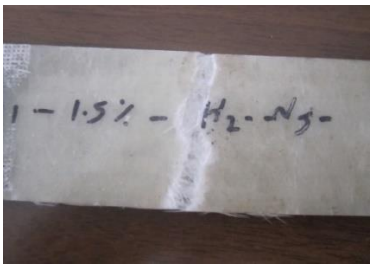
نمونه‌ها به طول ۲۵۰ میلیمتر و عرض ۵۰ میلیمتر و ضخامت ۶میلیمتر می‌باشند. همانطور که قبلاً ذکر گردید، درصد اختلاط رزین با خشک کننده ۱.۵درصد می‌باشد و از کبالت و خشک کننده متیل اتیل کتون پراکسید برای خشک‌کننده و از رزین مصرفی پلی استر استفاده گردید. در شکل۱۰ نمایی از این نمونه‌ها دیده می‌شود.

اولین مرحله آزمایش کشش برای بدست آوردن مقادیر مقاومت کششی روی نمونه‌های سالم انجام گرفت. این آزمایش مطابق با استاندارد و دستورالعمل‌های ذکر شده انجام گردید. در این آزمایش مقادیر مقاومت کششی، تنش کششی و کرنش و نیروها بر روی پنج نمونه سالم اندازه‌گیری شد که دو نمونه آن به دلیل شکستن در فک رد شد و ۳ نمونه دیگر با موفقیت آزمایش شد. نمونه‌ها با A1، A2و A3 نام‌گذاری شد که همان‌طور که در مرحله ساخت ذکر گردید دارای ۲ لایه حصیری و ۵ لایه نمدی هستند.



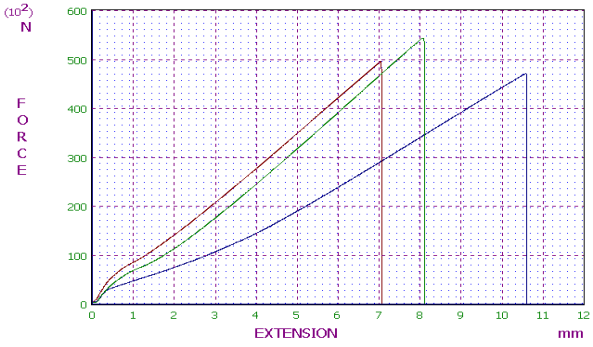
شکل۱۰- نمونه‌های سالم

نتایج به دست آمده از آزمایش‌هایی که در آن‌ها نمونه‌ها در گیره جابه‌جا می‌شدند و یا می‌شکستند و یا در فاصله کمتر از 10 میلی‌متری انتهای نمونه شکسته می‌شدند قابل قبول نبودند. از آنجا که استحکام قسمت تعمیری کمتر از قسمت‌های دیگر بود، شکست‌ها اغلب در وسط نمونه‌ها اتفاق افتادند. شکل۱۱ نشان می‌دهد که نمونه‌ها از وسط و عمود بر محور نمونه برش خورده است.

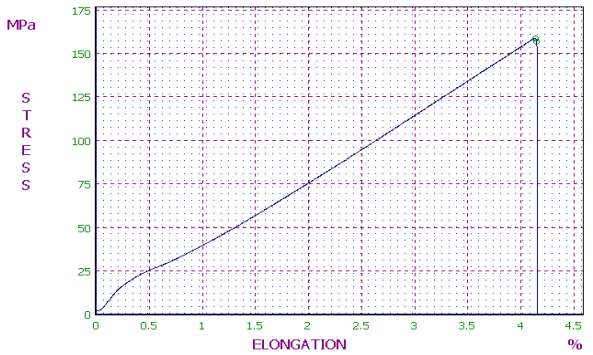


شکل۱۱- نحوه شکست نمونه‌ها

مقادیر نیروی ماکزیمم، مقدار میانگین تنش شکست و دیگر نتایج در شکل۱۲ و جدول۳ به نمایش در آمده است. با توجه به این نتایج مقدار میانگین تنش شکست در این حالت 156MPa می‌باشد.



(الف)



(ب)

شکل۱۲- (الف)- نمودار نیرو بر حسب جابجایی و (ب)- نمودار میانگین تنش-کرنش نمونه‌های سالم

جدول۳- اندازه‌ها و نتایج نمونه‌های اصلی

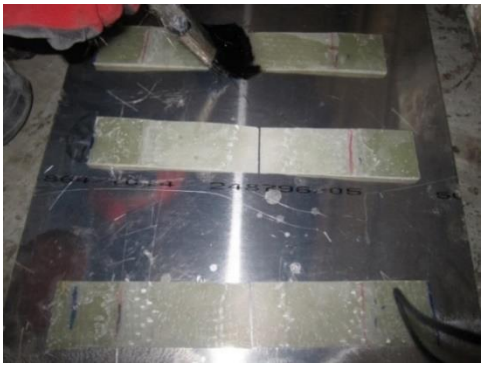
نام نمونه	مساحت موثر mm^2	تنش نهایی MPa	مقدار نیروی نهایی (N)
A1	310. 2	151	47011
A2	319	155	49558
A3	329. 2	161	53157

۳-۱- آزمایش انتخاب شیب مناسب برای تعمیر یا اتصال

در این مرحله ابتدا نمونه‌های سالم از وسط برش زده شد و مجدداً با همان اندازه تعمیر گردید. این مرحله شامل سه قسمت بود که هر بار با انتخاب شیب جدید عوض می‌شد. البته بقیه پارامترها بدون تغییر ماندند و تنها متغیر مساله شیب اتصال بود. این کار برای شیب‌های به ترتیب $\frac{1}{6}$، $\frac{1}{12}$ و $\frac{1}{18}$ انجام شد.

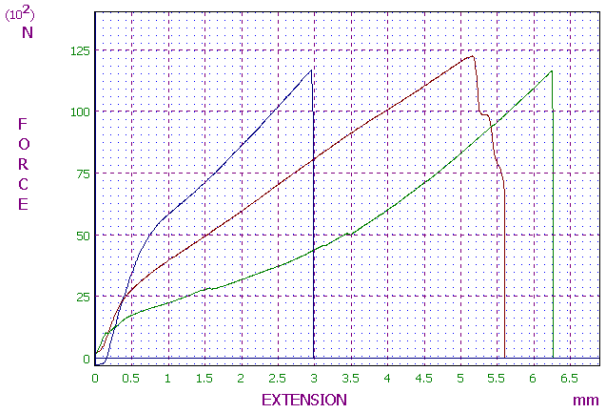
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.2.1]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.83]

الف) شیب $\frac{1}{6}$: در این قسمت نمونه‌ها (سه نمونه) پس از برش از وسط، با شیب $\frac{1}{6}$ و با الیاف فقط نمدی یا رندم به تعداد ۷ لایه و به صورت لایه‌گذاری از کوچک به بزرگ و خشک کننده ۱/۵درصد با همان مواد اولیه و به صورت لایه‌گذاری دستی متصل یا تعمیر شدند و مورد آزمایش کشش قرار گرفتند. در شکل۱۳ مراحل انجام این تعمیر نمایش داده شده است.

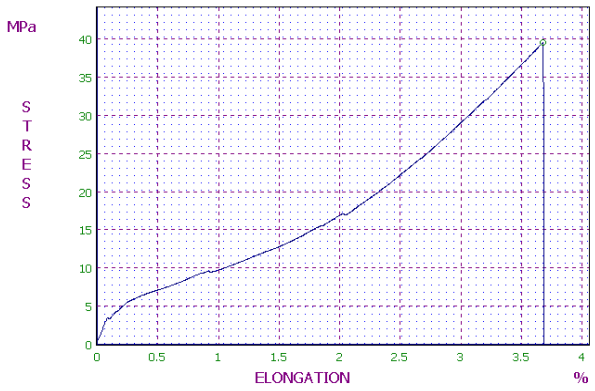


شکل۱۳- نمونه‌ها پس از شیب زدن و آماده‌سازی برای تعمیر

مقادیر تنش ماکزیمم و نیروی ماکزیمم برای شکست نمونه‌ها در جدول۴ نگاشته شده است و نمودار شکل۱۴ این موضوع را نشان می‌دهد.



(الف)



(ب)

شکل۱۴- (الف)- نیرو بر حسب جابجایی و (ب)- میانگین تنش-کرنش نمونه‌های تعمیر شده با شیب $\frac{1}{6}$

جدول۴- اندازه‌ها و نتایج نمونه‌های تعمیر شده با شیب $\frac{1}{6}$

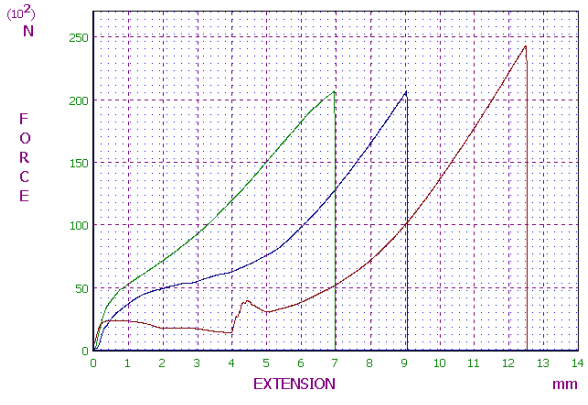
نام نمونه	مساحت موثر mm^2	تنش نهایی MPa	مقدار نیروی نهایی (N)
D1	273. 67	43	11670
D2	307	38	11648
D3	295. 5	38	11369

نتایج این مرحله نشـــان می‌دهد که تنش متوســـط موردنیاز برای شکست اتصال نمونه‌ها، حدود ۲۵ درصد مقادیر سالم آن به دست آمد و با توجه به شکل شکست، همه نمونه‌ها از همان نقطه اتصال و با شیب $\frac{1}{6}$ جدا شدند. این موضوع در شکل۱۵ آمده است.



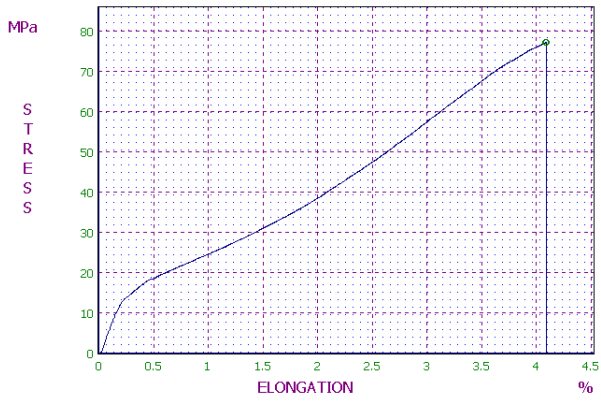
شکل۱۵- نحوه شکست نمونه‌ها با شیب $\frac{1}{6}$

(ب) شیب $\frac{1}{12}$: در این مرحله، با ثابت نگه داشتن همه پارامترها در قسمت (الف) تنها به تغییر شیب پرداخته شد و شیب اتصال در نمونه‌ها به $\frac{1}{12}$ رسانده شد و آزمایش کشش انجام شد. مقادیر تنش ماکزیمم و نیروی ماکزیمم برای شکست نمونه‌ها در جدول۵ و شکل۱۶ و نحوه شکست آنها در شکل۱۷ نشان داده شده است.



(الف)

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.2.1]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.83]



(ب)

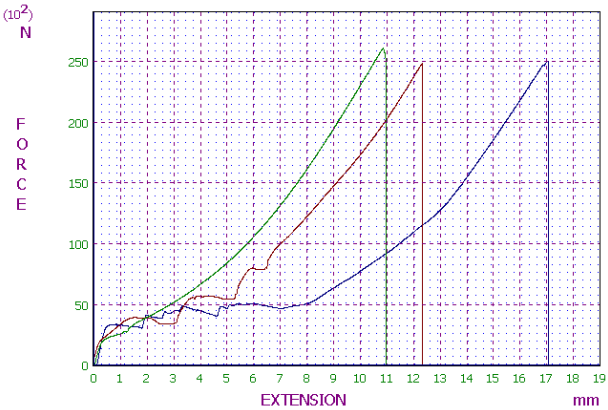
شکل۱۶-(الف)- نیرو بر حسب جابجایی و (ب)- میانگین تنش کرنش نمونه‌های تعمیر شده با شیب $\frac{1}{12}$

جدول۵- اندازه‌ها و نتایج نمونه‌های تعمیر شده با شیب $\frac{1}{12}$

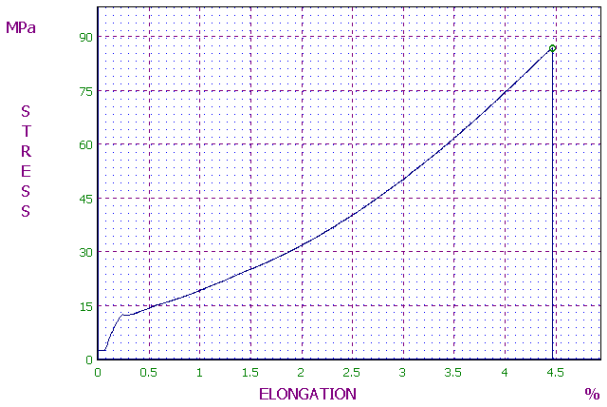
نام نمونه	مساحت موثر mm^2	تنش نهایی MPa	مقدار نیروی نهایی (N)
B1	257. 2	80	20694
B2	289	84	24295
B3	267	77	20685

در این حالت نیز نمونه‌ها از محل اتصال و با شیب $\frac{1}{12}$ جدا شدند. نتایج جدول۵ نشان می‌دهد که استحکام کششی این اتصال نسبت به شیب $\frac{1}{6}$ افزایش قابل توجهی داشته است و به بالای ۵۰٪ مقدار تنش متوسط نمونه‌های سالم رسیده است.

ج) اتصال با شیب $\frac{1}{18}$: در این قسمت، همانند مرحله (ب) با ثابت نگه داشتن همه پارامترها تنها به تغییر شیب پرداخته شد. در این قسمت شیب اتصال به $\frac{1}{18}$ تغییر داده شد. مقادیر تنش ماکزیمم و نیروی ماکزیمم برای شکست نمونه‌ها در جدول۶ نگاشته شده است و شکل۱۷ نمودار این نتایج را نشان می‌دهد.



(الف)



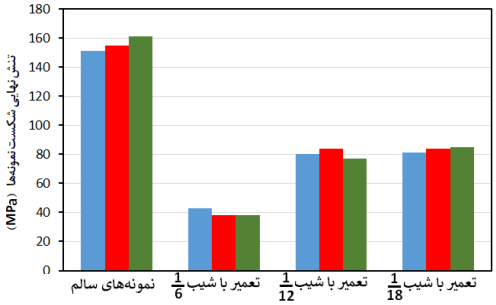
(ب)

شکل۱۷ (الف)- نمودار نیرو بر حسب جابجایی و (ب)- میانگین تنش- کرنش برای نمونه‌های تعمیر شده با شیب $\frac{1}{18}$

جدول۶- اندازه‌ها و نتایج نمونه‌های تعمیر شده با شیب $\frac{1}{18}$

نام نمونه	مساحت موثر mm^2	تنش نهایی MPa	مقدار نیروی نهایی (N)
E1	310	81	25029
E2	295	84	24828
E3	302	85	25670

در این قسمت نتایج نشان می‌دهد اگرچه این شیب نسبتاً بهتر از شیب $\frac{1}{12}$ است و تنش بیشتری را تحمل می‌کند اما اختلاف آنها آنقدر کم است که از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نیست. شکل۱۸ نشان دهنده این موضوع است.



شکل۱۸- مقایسه نتایج شیب تعمیر

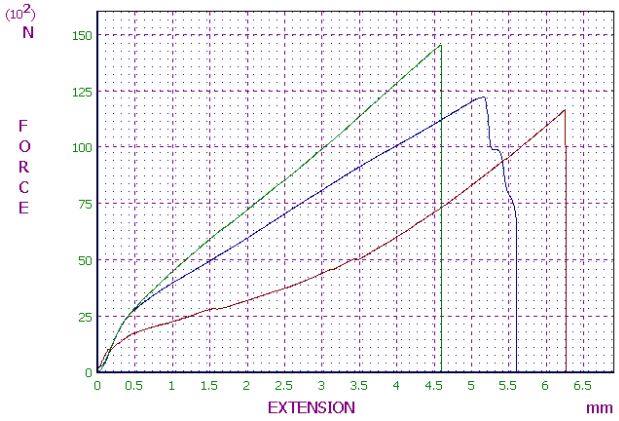
۳-۲- مرحله تغییر نوع رزین

در مرحله سوم با ثابت نگه داشتن شیب به اندازه $\frac{1}{12}$ به بررسی تغییر پارامتر نوع رزین پرداخته شد. لذا به جای رزین پلی‌استر از رزین اپوکسی استفاده شد. البته باید از خشک کننده مخصوص یعنی رزین استفاده نمود. در این مرحله پارامترهای دیگر مثلاً نوع الیاف، نوع لایه چینی بدون تغییر باقی ماندند. مقادیر تنش ماکزیمم و نیروی ماکزیمم در جدول۷ و شکل۱۹ آمده است.

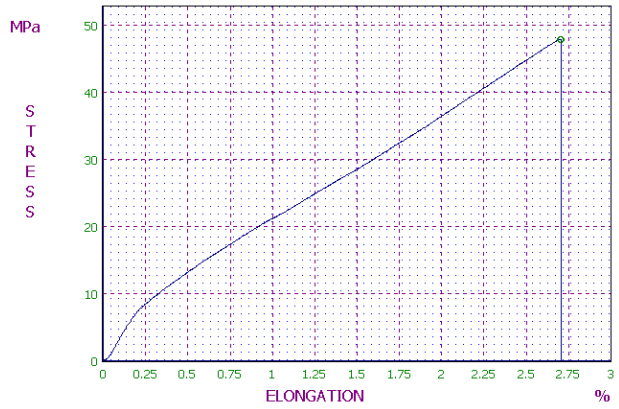
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.2.1]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.83]

جدول۷- نتایج آزمایش نمونه‌های تعمیر شده با رزین اپوکسی

نام نمونه	مساحت موثر mm^2	تنش نهایی MPa	مقدار نیروی نهایی (N)
G1	307. 2	40	12240
G2	295. 5	39	11648
G3	303	41	12528



(الف)



(ب)

شکل۱۹- (الف)- نیرو برحسب جابجایی و (ب)- میانگین تنش-کرنش نمونه‌های تعمیر شده یا اتصال با رزین اپوکسی

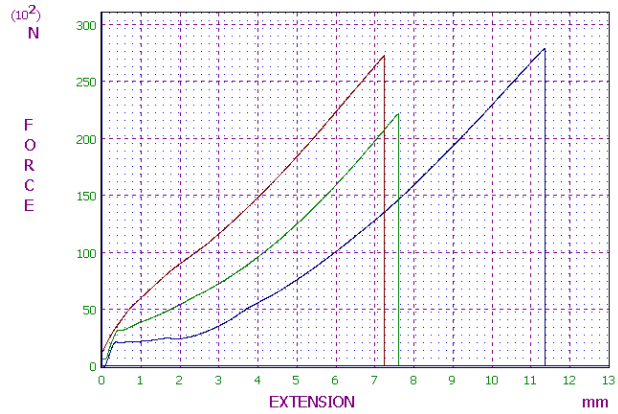
در این آزمایش علیرغم اینکه مقاومت کششی رزین اپوکسی بیشتر از رزین پلی استر است، اما مقادیر نیروی کششی برای اتصال کمتر از ۲۶٪ نمونه‌های سالم به دست آمد و تمام نمونه‌ها نیز از محل اتصال شکسته شدند.

۳-۳- بررسی تاثیر چیدمان لایه‌ها در استحکام تعمیر

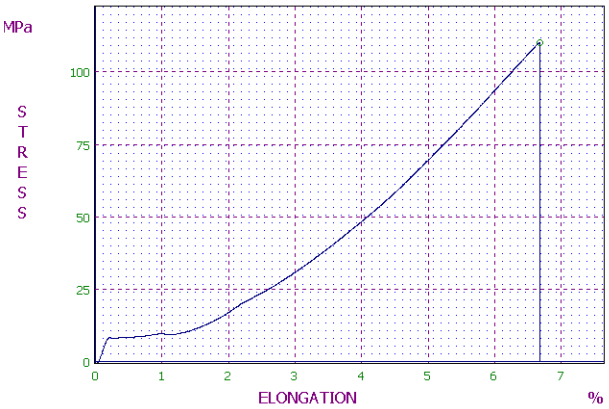
در این بخش به جای اینکه چیدمان لایه‌های تعمیر در قسمت اتصال از کوچک به بزرگ باشد بصورت برعکس آن انجام شد یعنی ابتدا لایه بزرگتر سپس به ترتیب لایه‌های کوچک‌تر قرار گرفتند. لذا لایه‌چینی طبق حالت (ب) شکل۱انجام شد. مقادیر تنش ماکزیمم و نیروی ماکزیمم استخراج شده در جدول۸ و شکل۲۰ نشان داده شده است.

جدول۸- اندازه‌ها و نتایج نمونه‌های تعمیر شده با تکنیک parallel lay-up

نام نمونه	مساحت موثر mm^2	تنش نهایی MPa	مقدار نیروی نهایی (N)
F1	253. 2	110	27913
F2	268. 5	102	27302
F3	254. 6	87	22145



(الف)



(ب)

شکل۲۰- (الف)- نمودار نیرو-جابجایی و (ب)- متوسط تنش-کرنش برای نمونه‌هایی که به روش parallel lay-up تعمیر شده‌اند.

نتیجه مهمی که در این تحقیق به دنبال آن بودیم در این قسمت اتفاق می‌افتد یعنی مقادیر نیرو برای شکست در اتصال به بالاترین مقدار خود یعنی۶۳٪ مقدار شکست نمونه‌های اصلی می‌رسد و در بیشتر نمونه‌ها شکست از وسط اتفاق می‌افتد که این موضوع نشان دهنده چسبندگی مناسب لایه‌های تعمیر شده با سطح شیب نمونه در قسمت اتصال است.

۴-۳- تاثیر مقدار خشک کننده بر استحکام کششی

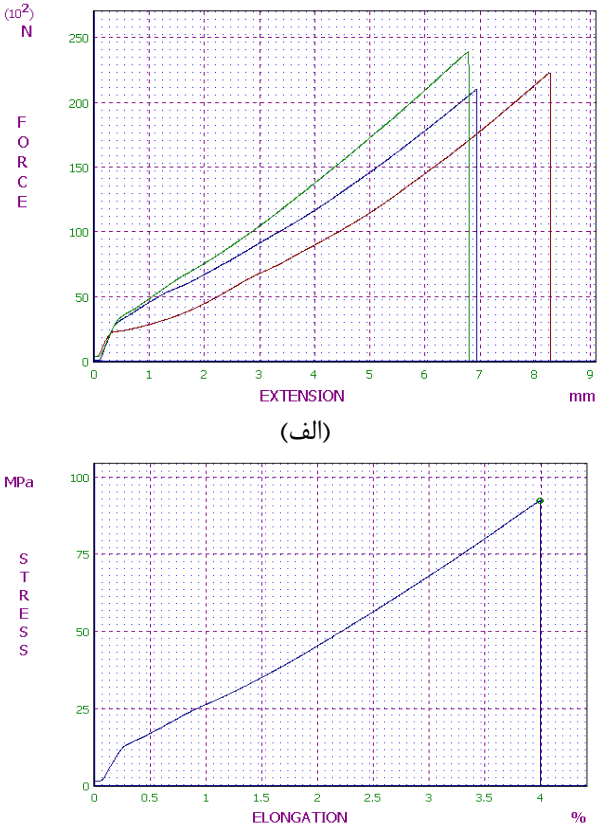
در این مرحله با تغییر مقدار خشک کننده (متیل اتیل کتون پراکسید) به تأثیر آن در استحکام کششی پرداخته شد. برای این منظور، مقدار خشک کنندهاز ۱/۵درصد به ۳درصد رسانده شد و نحوه لایه‌چینی و نوع الیاف مشابه قبل ۷لایه نمدی یا رندم بوده و دیگر پارامترها نیز بدون تغییر در نظر گرفته شدند. مقادیر تنش

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.2.1]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.83]

ماکزیمم و نیروی ماکزیمم استخراج شده از آزمایش کشش این نمونه‌ها در جدول۹ و نمودارهای نیرو-جابجایی و متوسط تنش-کرنش در شکل۲۱ به نمایش درآمده است.

جدول۹- اندازه‌ها و نتایج نمونه‌های تعمیر شده با خشک‌کننده ۳درصد

نام نمونه	مساحت موثر mm^2	تنش نهایی MPa	مقدار نیروی نهایی (N)
T1	255. 4	94	23924
T2	254. 3	88	22283
T3	259. 3	80	20685



(الف)

(ب)

شکل۲۱- (الف)- نمودار نیرو-جابجایی و (ب)- متوسط تنش-کرنش برای نمونه‌های تعمیر شده با ۳درصد خشک کننده

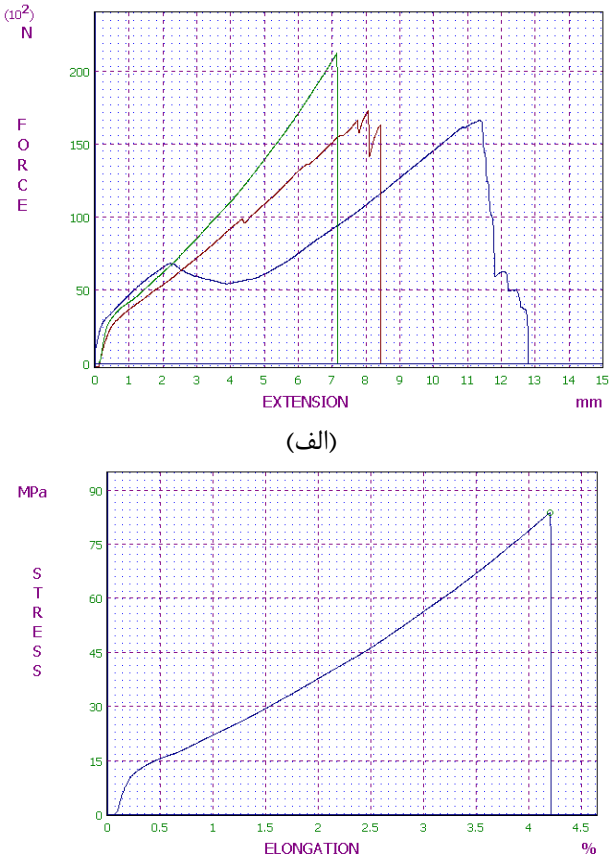
بررسی دقیق نتایج به دست آمده از این آزمایش نشان می‌دهد که استحکام کششی به میزان کمی افزایش یافته است. به عبارت دیگر نتیجه می‌گیریم که خشک کننده زیادتر چسبندگی را بیشتر می‌کند اما مقدار بیشتر از ۴ یا ۵ درصد خشک کننده نمی‌توان مخلوط کرد چرا که مخلوط حاصل به حدی سریع خشک می‌شود که فرصت تعمیر را از ما می‌گیرد. لذا استفاده از خشک کننده ۱.۵تا ۲ درصد پیشنهاد می‌شود.

۳-۵- تاثیر نوع الیاف

در این مرحله به بررسی تاثیر نوع الیاف استفاده شده در تعمیر بر روی استحکام اتصال پرداخته می شود.نمونه‌های استفاده شده در این بخش دارای لایه‌هایی از الیاف حصیری هستند که در بین لایه‌های نمدی قرار گرفته‌اند ترتیب لایه چینی تعمیر مانند لایه چینی روش ساخت می‌باشد. شیب تعمیر همان $\frac{1}{12}$ و مقدار خشک کننده ۱.۵درصد و نوع رزین نیز همان پلی‌استر می‌باشد. لایه‌گذاری نیز به صورت از کوچک به بزرگ می باشد مقادیر تنش ماکزیمم و نیروی ماکزیمم استخراج شده در جدول۱۱ و نمودار شکل۲۲ نشان داده شده است.

جدول۱۱- مشخصات و نتایج نمونه‌های تعمیر شده با الیاف حصیری

نام نمونه	مساحت موثر mm^2	تنش نهایی MPa	مقدار نیروی نهایی (N)
C1	253	66	16667
C2	265	65	17276
C3	254. 3	83	21216



(الف)

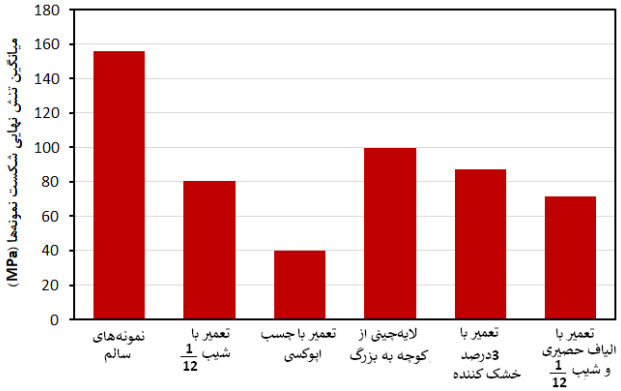
(ب)

شکل۲۲- (الف)- نیرو برحسب جابجایی و (ب)- متوسط تنش-کرنش برای نمونه‌های تعمیر شده با الیاف حصیری۲ لایه از ۷ لایه

در این قسمت نیز علیرغم اینکه الیاف حصیری استحکام کششی خیلی بیشتری نسبت به الیاف نمدی دارد اما در نتایج آزمایش دیده می‌شود که استحکام کمتری از خود نشان می‌دهد چون عدم چسبندگی مناسب لایه‌ها در قسمت‌هایی که از الیاف حصیری استفاده شده سبب ایجاد حباب در تعمیر می‌شود. همچنین،

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.2.1]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.83]

اســـتفاده از الیاف حصـــیری قابلیت وجود تورق در لایه‌ها را نیز افزایش می‌دهد. تست ضربه این موضوع را به خوبی نشان می‌دهد. با مقایســه تنشــهای نهایی در شــکل۲۳ می‌توان این پژوهش را به صورت زیر جمع بندی نمود.



شکل۲۳- مقایسه میانگین تنش نهایی در نمونه‌ها

الف) در قسمت انتخاب شیب نتایج نشان می‌دهد شیب $\frac{1}{6}$ شیب مناسبی جهت تعمیر نمی‌باشد چرا که استحکام کششی نمونه‌های تعمیر شده در اتصال کمتر از ۲۵درصد نمونه اولیه سالم است. در شــیب $\frac{1}{12}$ اســتحکام کشــشــی نمونه تعمیری به حدود ۵۱ درصــد نمونه اولیه و در شــیب $\frac{1}{18}$ به حدود ۵۳ درصــد می‌رســد. اگرچه شیب $\frac{1}{18}$ به نسبت بهتر از شیب $\frac{1}{12}$ است و تنش بیشتری را تحمل می‌کند اما این مقدار بقدری ناچیز اســت که از لحاظ اقتصــادی و سختی کار برای ایجاد شیب مقرون به صرفه نسبت به شیب $\frac{1}{12}$ نیســت. لذا شــیب $\frac{1}{12}$ بهترین شــیب در اتصــال اینگونه لایه‌چینی کامپوزیتی می‌باشد.

ب) در انتخاب رزین اگرچه رزین اپوکسی دارای اســتحکام کشــشــی بیشــتری نســبت به پلی‌اســتر می‌باشــد اما در تعمیرات اینگونه کامپوریت‌ها نتوانست نقش خوبی را در اســتحکام کشــشــی ایفا کند. به نظر می‌رسد چسبندگی ضعیف این رزین با الیاف شیشه و رزین پلی اســتر عامل اصــلی این موضــوع باشــد. لذا بهترین رزین همان رزین اولیه خود سازه یعنی پلی‌استر می باشد.

ج) در چیدمان لایه‌ها روش لایه‌چینی بزرگ به کوچک بهترین روش برای لایه‌گذاری می‌باشد چرا که این روش مقاومت کششی را به بیش از ۶۴ درصد می‌رساند این در حالی است که لایه‌گذاری به روش کوچک به بزرگ نتیجه‌ای حدود ۵۱ درصــد را به ما می‌دهد.

د) خشک کننده بیشتر از ۲ درصد به دلیل خشک شدن سریع در تعمیرات فرصــت کافی برای تعمیرات را از ما می‌گیرد لذا خشــک کننده ۱ تا ۲ درصد انتخاب مناسبی جهت تعمیر می‌باشد. هر چند که در این تستها نتایج تفاوت چندانی ندارد.

و) در انتخاب الیاف اســتفاده از الیاف حصــیری باعث وجود حباب و عدم چســبندگی مناســب لایه‌ها می‌شــود. بنابراین بهترین الیاف نمدی یا رندم می‌باشــد که چســبندگی مناســبی را بین الیاف تعمیری ایجاد می‌کند و وجود تورق را کاهش می‌دهد.

ه) وجود الیاف حصــیری اگر چه اســتحکام کشــشــی ســازه را بالا می‌برد، اما به دلیل عدم چســبندگی مناســب با لایه‌های دیگر احتمال تورق و جدایش لایه‌ها را افزایش می‌دهد.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، میزان تأثیر ترمیم بر روی استحکام کششی یک سازه شناور دارای آسیب مورد بررسی تجربی قرار گرفت. آزمون کشش به عنوان مبنای بررسی قرار داده شد و به‌طور خاص اثر ترمیم وصله‌های مختلف روی استحکام کششی قطعات به عنوان هدف نهایی پژوهش قرار گرفت. در نهایت تأثیر شیب اتصال، نوع رزین، نوع الیاف، چگونگی لایه‌چینی و درصد ترکیب رزین و خشک کننده بر میزان استحکام کششی قطعات تعمیر شده مطالعه شد. موارد زیر به عنوان نتایج این تحقیق گزارش می‌گردد:

۱- از بین سه شیب اتصال مورد آزمایش، شیب $\frac{1}{12}$ شیبی مناسب برای تعمیر و اتصال کامپوزیت‌ها می‌باشد.

۲- تکنیک اتصــال وصــله از بزرگ به کوچک بهترین روش برای لایه‌گذاری رزین می‌باشد.

۳- رزینِ مناسب تعمیر باید از جنس خود سازه باشد.

۴- خشک کننده‌ی زیاد، نقش چندانی در استحکام کششی ندارد و بیشــتر از ۳ درصــد به دلیل خشــک شــدن ســریع فرصــت تعمیر مناسب را می‌گیرد لذا مقدار ۱تا۲ درصد ترجیح داده می‌شود.

۵- الیاف حصیری به دلیل عدم چسبندگی مطلوب لایه‌ها مناسب برای تعمیر نمی‌باشد و الیاف نمدی به دلیل چسبندگی مناسب لایه‌ها این نقش را برای تعمیرات به خوبی ایفا می‌کند.

۵- مراجع

[1] Sinmazçelik, T., Avcu, E., Bora, M. Ö., & Çoban, O. (2011). A review: Fiber metal laminates, background, bonding types and applied test methods, Materials & Design, Vol. 32, p.3671-3685.

[2] Hu, F. Z., and Soutis, C. (1997), Strength prediction and design optimization for external patch repairs in composite structures. In International conference on deformation and fracture of composites, p.609-618.

[3] Avram, J. B. (2001). Fatigue response of thin stiffened aluminum cracked panels repaired with bonded composite patches (No. afit/gms/eny/01m-01). air force inst of tech wright-patterson afb oh school of engineering and management.

[4] E. W. Therall, (1979), Failure in Adhesively Bonded Structures, Bonded Joints and Preparation for Bonding, AGARD-CP-102.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.2.1]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.83]

and imperfectly composite patches. Theoretical and applied fracture mechanics, 28(1), 13-28.

[19] Sabelkin, V., Mall, S., & Avram, J. B. (2006). Fatigue crack growth analysis of stiffened cracked panel repaired with bonded composite patch. Engineering Fracture Mechanics, 73(11), 1553-1567.

[20] Naboulsi, S., & Mall, S. (1998). Nonlinear analysis of bonded composite patch repair of cracked aluminum panels. Composite Structures, 41(3-4), 303-313.

[21] Schubbe, J. J. (1997). Thickness effects on a cracked aluminum plate with composite patch repair. AIR FORCE INST OF TECH WRIGHT-PATTERSON AFB OH.

[22] Conley, D. S. (1999). Fatigue response of repaired thick aluminum panels with bond-line flaws (No. AFIT/GAE/ENY/99M-03). AIR FORCE INST OF TECH WRIGHT-PATTERSONAFB OH.

[23] Bouiadjra, B. B., Belhouari, M., & Serier, B. (2002). Computation of the stress intensity factors for repaired cracks with bonded composite patch in mode I and mixed mode. Composite Structures, 56(4), 401-406.

[24] Chang, P. Y., Yeh, P. C., & Yang, J. M. (2008). Fatigue crack initiation in hybrid boron/glass/aluminum fiber metal laminates. Materials Science and Engineering: A, 496(1-2), 273-280.

[25] Vogelesang, L. B., & Vlot, A. (2000). Development of fibre metal laminates for advanced aerospace structures. Journal of Materials Processing Technology, 103(1), 1-5.

[26] Vogelesang, L. B., Schijve, J., & Fredell, R. (1995). Fibre-metal laminates: damage tolerant aerospace materials. Paper in: Case studies in manufacturing with advanced materials. Vol. 2 (A. Demaid and JHW de Wit, Eds).

[27] Vogelesang, L. B., & Vlot, A. (2000). Development of fibre metal laminates for advanced aerospace structures. Journal of Materials Processing Technology, 103(1), 1-5.

[28] Alderliesten, R., Rans, C., & Benedictus, R. (2008). The applicability of magnesium based fibre metal laminates in aerospace structures. Composites Science and Technology, 68(14), 2983-2993.

[29] F. Ashenai Ghasemi, Gh. Bagheri, A. Pourkamali Anaraki, Experimental analysis of tensile strength of lateral notched aluminum plates reinforced by the Fiber metal laminate (FML) patches, Modares Mechanical Engineering Vol. 15, No. 3, pp. 1-8, 2015 (In Persian)

[30] Sh. Yousefzadeh, M.M. Doostdar, Experimental investigation of fatigue life in cracked Aluminum plates repaired by composites patches, Sharif Mechanical Engineering, Vol. 33, No. 2, pp. 123-132, 2017 (In Persian)

[31] Czichos, H., & Saito, T. (2006). Springer handbook of materials measurement methods (Vol. 978). L. Smith (Ed.). Berlin: Springer.

[5] Baker, A. A., Rose, L. F., & Jones, R. (Eds.). (2003). Advances in the bonded composite repair of a metallic aircraft structure. Elsevier.

[6] Denney, J. J. (1995). Fatigue Response of Cracked Aluminum Panel With Partially Bonded Composite Patch (No. AFIT/GAE/ENY/95D-7). AIR FORCE INST OF TECH WRIGHT-PATTERSON AFB OH.

[7] Campilho, R. D., De Moura, M. F. S. F., & Domingues, J. J. M. S. (2005). Modelling single and double-lap repairs on composite materials. Composites Science and Technology, 65(13), 1948-1958.

[8] Hosseini-Toudeshky, H., Mohammadi, B., & Daghyani, H. R. (2006). Mixed-mode fracture analysis of aluminium repaired panels using composite patches. Composites Science and Technology, 66(2), 188-198.

[9] Hosseini-Toudeshky, H., Bakhshandeh, S., Mohammadi, B., & Daghyani, H. R. (2006). Experimental investigations on fatigue crack growth of repaired thick aluminum panels in mixed-mode conditions. Composite Structures, 75(1-4), 437-443.

[10] Hosseini-Toudeshky, H., & Mohammadi, B. (2009). Mixed-mode numerical and experimental fatigue crack growth analyses of thick aluminum panels repaired with composite patches. Composite Structures, 91(1), 1-8.

[11] Hosseini-Toudeshky, H., Saber, M., & Mohammadi, B. (2009). Finite element crack propagation of adhesively bonded repaired panels in general mixed-mode conditions. Finite Elements in Analysis and Design, 45(2), 94-103.

[12] Khalili, S. M. R., Ghadjar, R., Sadeghinia, M., & Mittal, R. K. (2009). An experimental study on the Charpy impact response of cracked aluminum plates repaired with GFRP or CFRP composite patches. Composite Structures, 89(2), 270-274.

[13] Okafor, A. C., Singh, N., Enemuoh, U. E., & Rao, S. V. (2005). Design, analysis and performance of adhesively bonded composite patch repair of cracked aluminum aircraft panels. Composite structures, 71(2), 258-270.

[14] Chue, C. H., & Liu, T. J. C. (1995). The effects of laminated composite patch with different stacking sequences on bonded repair. Composites engineering, 5(2), 223-230.

[15] Jones, R., Callinan, R. J., & Aggarwal, K. C. (1983). Analysis of bonded repairs to damaged fibre composite structures. Engineering Fracture Mechanics, 17(1), 37-46.

[16] Xiong, J. J., & Shenoi, R. A. (2008). Integrated experimental screening of bonded composites patch repair schemes to notched aluminum-alloy panels based on static and fatigue strength concepts. Composite Structures, 83(3), 266-272.

[17] Sun, C. T., Klug, J., & Arendt, C. (1996). Analysis of cracked aluminum plates repaired with bonded composite patches. AIAA journal, 34(2), 369-374.

[18] Naboulsi, S., & Mall, S. (1997). Fatigue crack growth analysis of adhesively repaired panel using perfectly

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.2.1]

[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.83]