مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها/ سال ۱۳۹۵/ دوره ۶/ شماره ۱/ صفحه ۱۱۷-۱۲۷

مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها

دانشگاه صنعتی شاهرود

تحلیل تجربی استحکام کمانشی صفحات آلومینیومی دارای شکاف مرکزی تقویت‌شده با وصله‌های کامپوزیتی لایه‌ای الیاف فلزی (FML)

فرامرز آشنای قاسمی[۱،*]، پیام رحمنی[۲]، علی پورکمالی انارکی[۱] و یونس علیزاده وقاصلو[۳]

[۱] دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی، تهران

[۲] کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، داشگاه تربیت دبیر شهید رجائی، تهران

[۳] دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۱/۱۳؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۴/۰۵/۲۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۱/۲۰

چکیده

واماندگی در اثر کمانش، یک پدیده متداول در ورق‌های تحت فشار است. هنگامی که ضخامت ورق نسبت به ابعاد دیگر آن کوچک باشد، این شکل از واماندگی اغلب می‌تواند بر واماندگی در اثر استحکام پیشی گیرد. امروزه یکی از پرکاربردترین انواع تعمیرات در این زمینه، استفاده از وصله‌های کامپوزیتی و چسباندن آن در محل عیب است. این وصله‌ها دارای مزایای مهمی از جمله: استحکام بالا، مقاومت در برابر خوردگی و رطوبت، وزن کم و مقاومت خستگی خوب است. در این پژوهش، به تحلیل تجربی بار بحرانی کمانشی صفحات آلومینیومی شکاف‌دار تعمیر شده توسط وصله‌های کامپوزیتی لایه‌ای الیاف فلزی (FML[۱]) پرداخته شده است که تحت بارگذاری تک محوری فشاری قرار دارند. به این منظور، ورق‌هایی از جنس آلومینیوم Al2024T4 با شکاف‌های مرکزی مورد توجه قرار گرفته است. پارامترهایی که در این تحقیق روی آن‌ها مطالعه شده است، نحوه لایه‌چینی وصله کامپوزیتی، ضخامت و ابعاد وصله‌های کامپوزیتی لایه‌ای الیاف فلزی (FML) است. نتایج، نشان‌دهنده افزایش چشمگیر استحکام کمانشی قطعات تعمیر شده با این نوع وصله‌ها در مقایسه با قطعات شکاف‌دار بدون وصله است. با بهترین نحوه انتخاب پارامترها، استفاده از وصله منجر به ارتقای بار کمانشی قطعات تعمیر شده تا ۴۴/۱۳ درصد می‌شود.

کلمات کلیدی: کمانش؛ شکاف؛ وصله؛ کامپوزیت لایه‌ای الیاف فلزی، FML.

Experimental Analysis of Buckling Strength of Notched Aluminum Plates Reinforced using Fiber Metal Laminate Patches

F. Ashenai Ghasemi[1,*], P. Rahmani[2], A. Pourkamali Anaraki[1], Y. Alizadeh Vaghslou[3]

[1] Assoc. Professor, Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran.

[2] MSc Student, Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran.

[3] Assoc. Professor, Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

Abstract

Buckling failure is a quite common occurrence in plates under compression, in particular, when the plates thickness is small with respect to the other plate sizes. Such a mode of crisis can often precede strength failure. Nowadays one of the most common types of repairs is carried out by attaching composite patches on the defeated surfaces. These patches have important advantages such as high strength and corrosion resistance, while their weight is low. In this work, experimental studies are done on the critical buckling load of the notched plates repaired by the fiber metal laminate (FML) patches subjected to axial compression. For this purpose, the rectangular plates made by 2024T4 aluminum with central notches are considered. The desired parameters involved in this work are the layer sequence, thickness, and dimensions of the FML patches. The results obtained show an increase in the buckling strength of the repaired parts. Smart choosing of the parameters results in an increase in the buckling load up to 44.13%.

Keywords: Buckling; Notch; Patch; Fiber Metal Laminate; FML.

[1] Fiber Metal Laminate

* نویسنده مسئول؛ تلفن و فکس: ۲۲۹۷۰۰۵۲ (۰۲۱)

آدرس پست الکترونیک: f.a.ghasemi@srttu.edu

۱- مقدمه

ورق‌ها اجزایی هستند که در اکثر سازه‌ها به کار می‌روند. کشتی‌ها و سازه‌های دریایی، نمونه‌هایی از سازه‌های جدار نازک پیچیده هستند که از المان‌های ورقی تشکیل و با ترکیب متفاوتی از بارگذاری روبرو هستند. یک سازه جداره نازک کهنه نسبت به انواع مختلف عیب‌ها که نتیجه پدیده‌هایی چون خوردگی یا شکاف خستگی هستند، آسیب‌پذیر است. مطالعه رفتار و تعیین استحکام المان‌های ورقی در حالت بدون عیب و دارای عیب، از اهمیت زیادی برخوردار است.

استفاده از صفحات نازک دارای استحکام بالا، در بسیاری از زمینه‌ها، مثل صنایع فضایی، مکانیکی، برق، کاربردهای مهندسی راه و ساختمان و مانند اینها کاملاً متداول است. از آنجایی که فرآیند طراحی، نیاز به ارزیابی مناسب میزان امنیت سازه دارد، بسیاری از محققان در دهه اخیر به توصیف کمی مود کمانش در شکست تحت فشار یا کشش سازه‌های مختلف پرداخته‌اند. کمانش یک پدیده کاملاً مهم، به خصوص در مواردی است که سوراخ یا شکافی در ورق وجود دارد. در این موارد، ورق‌های تحت فشار به راحتی می‌توانند کمانش یابند و وضعیت پیچیده‌ای از چین و چروک در نواحی تحت فشار در اطراف عیوب در این ورق‌ها ایجاد کنند [۱] .

تعمیر قطعات ترک‌دار در سازه‌های هوایی با استفاده از مواد کامپوزیت استحکام بالا برای اولین بار در سال ۱۹۷۰، در آزمایشگاه تحقیقاتی نیروی هوایی استرالیا ابداع گردید. کارهای بیکر [۲]، جز اولین کارهایی بود که نشان داد ترمیم چسبی، دارای کارایی بسیار بالاتری نسبت به ترمیم مکانیکی است و می‌توان با اطمینان خاطر بیشتری این تکنولوژی را استفاده کرد.

در سال ۱۹۹۵ چو و همکاران [۳]، تحقیقی در مورد تأثیر لایه‌چینی وصله‌های کامپوزیت در تعمیر قطعات وصله شده انجام دادند. آن‌ها از قطعات دارای ترک مرکزی زاویه‌دار استفاده کرده، 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؛ همچنین لایه‌هایی که دارای الیاف موازی با ترک می‌باشند، کمترین نقش را در کاهش انرژی کرنشی در نقاط رأس ترک ایفا می‌کنند.

در سال ۲۰۰۰، وجلسنگ و همکاران [۴] ضمن معرفی کامپوزیتی لایه‌ای الیاف فلزی (FML) به عنوان سازه‌هایی کارآمد برای استفاده در بدنه هواپیماها، استحکام خستگی این سازه‌ها را با سازه‌های سنتی مقایسه کردند.

در سال ۲۰۰۵، جیوم‌کی‌پارک و همکاران [۵] به بررسی عددی و تجربی استحکام نهایی المان‌های ورق ترک‌دار فولادی پرداختند که تحت بارگذاری کششی و فشاری تک محوره است. در این تحقیق، کاهش استحکام نهایی المان‌های ورقی به دلیل حضور ترک، با در نظر گرفتن طول متفاوت و مکان‌های گوناگون ترک‌ها، به صورت عددی و تجربی مورد بررسی قرار گرفت. بنابر نتایج عددی و تجربی به دست آمده، مدل‌هایی تئوری برای پیش‌بینی مقاومت نهایی المان‌های ورق ترک‌دار پیشنهاد شد.

در سال ۲۰۰۵، بخشنده و همکاران [۶]، به مطالعه تجربی و عددی رشد ترک در صفحات آلومینیومی تعمیر شده با استفاده از وصله‌های کامپوزیتی که در آن ترمیم صفحات به صورت نامتقارن پرداختند. آنها از صفحات دارای ترک میانی برای تحلیل تجربی استفاده کردند. نیز از المان‌های سه‌بعدی برای صفحه حاوی ترک، چسب و وصله کامپوزیتی استفاده و اثرات پارامترهای مختلفی همچون، ضخامت چسب، ترتیب و تعداد لایه‌چینی وصله‌های کامپوزیتی روی ضرایب شدت تنش استفاده کردند. یکی از تفاوت‌های مدل‌سازی در این تحقیق با سایر تحقیقات انجام شده، در غیرخطی فرض کردن رشد ترک در جبهه ترک بود.

در سال ۲۰۰۸، ژیانگ [۷] تأثیر وصله‌های کامپوزیتی را روی صفحه آلومینیومی ترک‌دار بررسی کرد و دریافت که تأثیر تعمیرات، وابسته به نوع وصله الیاف و چسب مورد استفاده است. علاوه بر این، او متوجه شد که استحکام کششی نمونه‌های وصله‌دار تعمیر شده، بیشتر از نمونه‌های تعمیر نشده است.

در سال ۲۰۰۹، شریفی و همکاران [۸] تحقیقاتی روی تاثیر ترمیم صفحات آلومینیومی ترک‌دار با وصله کامپوزیتی انجام دادند. آنها جنس صفحه ترک‌دار را AL2024-T3 و جنس وصله کامپوزیتی را گرافیت اپوکسی ۱۲ لایه انتخاب کردند. نکته حائز اهمیت در این تحلیل آن است‌که تصور

افزایش استحکام کمانشی به صرف انجام وصله‌کاری غلط بوده و در مواردی، وصله کردن حتی می‌تواند استحکام کمانشی را نسبت به حالت بدون ترمیم کاهش دهد و دلیل این مسئله، به سبب عدم تقارن در وصله‌کاری یک‌طرفه است. آنها نیز مشاهده کردند که استفاده از کامپوزیت بور/ اپوکسی[1]، استحکام کمانشی سازه را تا ۴ برابر بیش از حالت بدون ترمیم افزایش می‌دهد. آنها همچنین دریافتند که با افزایش ضخامت لایه چسب، استحکام نهایی سازه کم می‌شود.

در سال ۲۰۱۰، مظهری و همکاران [۹]، به بررسی رفتار پس‌کمانش صفحات مدور سوراخ‌دار تحت اثر بارگذاری یکنواخت پرداختند. آنها دریافتند که رفتار کمانشی ورق‌ها و ستون‌ها با هم متفاوت است و اینکه ورق‌ها بعد از بار بحرانی، باری به مراتب بزرگتر از باری را تحمل می‌کنند که در آن کمانش آغاز می‌شود.

در سال ۲۰۱۰، کامپیهو و همکاران [۱۰]، استحکام کمانشی ساختار کربن/ اپوکسی تعمیر شده به وسیله پیوندهای چسبی تکی و دوتایی، مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق، از الیاف کربن در وصله استفاده و وصله کامپوزیتی و ورق (ابعاد ورق $50\times70\,cm^2$، ضخامت ۲/۴mm) به وسیله اره الماس برش داده شده‌اند، لایه‌چینی وصله در یک جهت و به روش دستی صورت گرفته، از چسب آرالدیت[2] 2015 جهت چسباندن وصله به ورق آسیب‌دیده استفاده شده است. این کار را از طریق آزمایش و روش المان محدود و با مطالعه تاثیر هم‌پوشانی طولی و ضخامت وصله ارزیابی شده است. آنها نشان دادند که این کمانش در مواد سازگاری به وجود می‌آید که در زمینه به‌کار می‌رود و نیز آنکه، الیاف تقویت‌شده ورق‌ها، بارهای ثابت کوچکتری در فشار نسبت به کششی تحمل می‌کنند و نیز، واماندگی در لایه چسب صورت می‌گیرد و رفتار کمانشی در شکاف بیشتر است. همچنین، واماندگی چسبندگی در نزدیکی لبه وصله شروع می‌شود و سفتی الاستیک K با افزایش L (طول هم‌پوشانی) افزایش می‌یابد. آن‌ها مشاهده نمودند که برای ورق‌های سوراخ‌دار، بار کمانشی به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد و کمانش کلی در المان‌های باریک به احتمال زیاد به سطح مقطع و خصوصیات ارتجاعی بستگی دارد. علاوه بر اینها، شرایط مرزی و بارگذاری نیز در این امر تاثیرگذار است.

در سال ۲۰۱۰، خلیلی و همکاران، مطالعه تجربی روی پاسخ ضربه چارپی نمونه آلومینیومی ترک‌دار تعمیر شده با وصله‌های کامپوزیتی و FML انجام دادند، مشخص شد که وصله‌های FML بسیار موثرتر از وصله‌های CFRP و GFRP در تقویت نمونه‌های شکاف‌دار می‌باشند و نیز آنکه تأثیر وصله‌های FML در انرژی‌های بزرگتر به صورت موثرتر مشخص است. با افزایش طول شکاف، مقدار انرژی جذب شده توسط نمونه تعمیر نشده کاهش می‌یابد. همچنین در وصله‌های مشابه با افزایش طول شکاف، مقدار انرژی جذب شده کاهش می‌یابد. با این حال درصد بهبود انرژی در مقایسه با قطعه ناچدار تعمیر نشده افزایش می‌یابد. در نمونه‌ها با وصله‌های کامپوزیتی مستقل از تعداد لایه‌ها نوع الیاف به کار رفته از اهمیت بالایی در جذب انرژی برخوردار است [۱۱].

در سال ۲۰۱۱، سیفی و همکاران [۱۲]، تحقیقاتی را روی کمانش صفحات مستطیلی ترک‌دار از جنس آلیاژ آلومینیوم انجام دادند. آنها این صفحات را تحت بارگذاری‌های مختلف قرار داده، همچنین زاویه ترک را از۰ تا ۹۰ درجه تغییر دادند، طول ترک نیز از دیگر پارمترهای این تحقیق است. آنها نشان دادند که با افزایش طول ترک، بار کمانش کاهش، و با افزایش زاویه ترک از ۰ تا ۹۰ درجه و ازدیاد ضخامت صفحه، بار کمانشی افزایش می‌یابد.

در سال ۲۰۱۱، آشنای قاسمی و همکاران [۱۳]، رفتار ضربه‌ای صفحات آلومینیومی ترک‌دار ترمیم شده با وصله‌های کامپوزیتی ساده و از نوع FML را بررسی کردند. آنها با انجام آزمایش ضربه دریافتند که با افزایش نسبت طول ترک، هم برای نمونه‌های تعمیرشده و هم برای نمونه‌های تعمیر نشده، استحکام نمونه‌ها کاهش پیدا می‌کند. همچنین نشان دادند که ترتیب لایه‌گذاری در افزایش مقاومت به ضربه تأثیرگذار بوده، این افزایش تابع نوع ترک نیست.

در سال ۲۰۱۲، پورکمالی و همکاران [۱۴]، رفتار کششی ورق آلومینیومی ترک‌دار تعمیر شده با وصله‌های کامپوزیتی لایه‌ای الیاف فلزی را به صورت تجربی بررسی کردند. آنها در ساخت وصله FML از ورق AL1035 به عنوان وصله‌های

[1] Boron/Epoxy
[2] Araldite

لایه‌ای الیاف فلزی و از الیاف شیشه و رزین اپوکسی LY5052 به عنوان لایه‌ای کامپوزیت معمولی استفاده کردند. برای اتصال وصله فلزی به ورق پایه نیز، از چسب آرالدیت 2015 استفاده کردند. متغیرهای این تحقیق، طول شکاف، زاویه ترک و لایه‌چینی بودند. نشان داده شد، رفتار کششی قطعه آلومینیومی بدون ترک رفتاری نرم است، درحالی‌که رفتار کششی قطعات ترک‌دار تقریباً ترد است. این رفتار به دلیل رشد ناپایدار و ناگهانی ترک بر اثر افزایش نیرو است. تغییر در زاویه ترک، بیشترین تأثیر را بر تغییر در بار کششی نهایی خواهد داشت، همچنین با افزایش زاویه ترک، بار نهایی قطعات به میزان چشمگیری افزایش خواهد یافت. آنها نشان دادند که استحکام کششی قطعات وصله‌کاری شده، در حالتی که لایه آلومینیومی وصله، دور از سطح تعمیر باشد، بیشترین میزان و در موقعی که وسط دو لایه کامپوزیتی باشد، به کمترین میزان خود می‌رسد.

در سال ۲۰۱۳، آکپینار [۱۵] خواص مکانیکی اتصالات دو طرفه را با بررسی تأثیر مواد وصله و جهت‌گیری زوایای لایه‌ها بر بار نهایی و نحوه توزیع تنش در قطعه آلومینیومی وصله شده، مورد تجزیه و تحلیل تجربی و عددی قرار داد. در این تحقیق شش نمونه مختلف وصله شامل، یک نمونه وصله از جنس فلز پایه و پنج نمونه وصله کامپوزیتی ۱۶ لایه از جنس کربن/ اپوکسی، با جهت‌گیری متفاوت زوایه لایه‌ها در هر وصله به کار گرفته شد. او نشان داد که لایه‌چینی وصله و زوایای مختلف لایه‌ها در هر وصله، تأثیر چشمگیری بر توزیع تنش و حالت شکست دارد.

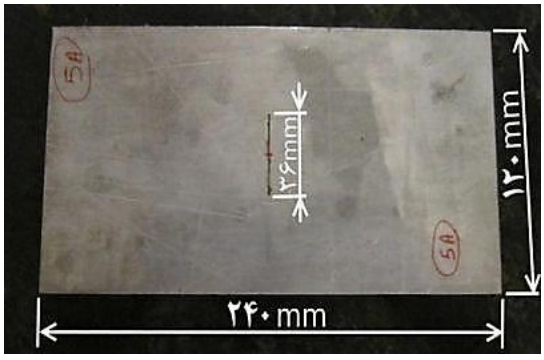
با توجه به اینکه استفاده از وصله‌های کامپوزیتی به خصوص وصله FML، در صنایع هواپیمایی روز به روز در حال افزایش است و همچنین عدم شناخت کامل فواید و مزایای وصله FML، در پژوهش حاضر، به بررسی برخی از ویژگی‌های مکانیکی این وصله‌ها پرداخته شده است. یکی از خصوصیات مهم این مواد، استحکام کمانشی و دریافت میزان تحمل مواد در برابر بار فشاری آنهاست. البته استحکام کمانشی وصله‌های FML به خودی خود آنچنان اهمیت ندارد بلکه، مقاومت کمانشی قطعاتی که توسط این نوع وصله تعمیر می‌یابند، حائز اهمیت است. در اکثر کارهای انجام شده در این زمینه، ترک حالت مرکزی داشته، نوع ترمیم نیز به صورت دوطرفه متقارن بوده است؛ در حالی که در شرایط واقعی، به دلیل عدم دسترسی آسان به هر دو طرف قطعه در سازه‌های هوایی، ترمیم یک‌طرفه، حتی با وجود ایجاد ممان خمشی در قطعه، معقول و کاربردی‌تر به نظر می‌رسد.

با توجه به دلایل ذکر شده، در این پژوهش رفتار قطعات شکاف‌دار تعمیر نشده، همچنین تعمیر شده توسط وصله‌های لایه‌ای الیاف فلزی تحت بار فشاری بررسی شده است. سه متغیری که در این تحقیق مورد مطالعه قرار گرفته‌اند، عبارتند از ابعاد، ضخامت و ترتیب لایه‌چینی وصله. قطعات وصله شده توسط دستگاه کشش آزمایش شده، نتایج به صورت نمودارهای بار- جابجایی استخراج شده است.

۲- فرایند تجربی

۲-۱- آماده‌سازی ورق آلومینیومی شکاف‌دار

برای آماده‌سازی نمونه‌های آلومینیومی، ورقی به اندازه ابعاد مورد نظر (ابعاد ورق $۱۲۰\times۲۴۰\ cm^۲$، ضخامت ۲/۵mm) برش داده شد. نمونه‌ها توسط دستگاه واترجت و با بریدن ورق مزبور، به تعداد و اندازه مورد نظر، ایجاد شدند. برای ایجاد شکاف در نمونه‌ها نیز، از دستگاه واترجت استفاده شد. از آنجایی‌که شکاف مورد نظر در این نمونه‌ها از نوع شکاف‌هایی بود که ابتدا و انتهای آنها داخل نمونه‌ها قرار داشت، با دستگاه‌هایی نظیر وایرکات امکان ایجاد آنها وجود نداشت. لذا از دستگاه واترجت استفاده گردید تا تنش پسماند حرارتی نیز در نمونه‌ها ایجاد نشود. پهنای شکاف ایجاد شده ۱mm و طول آن ۳۶mm بود. شکل ۱، نمونه آلومینیومی را پس از ایجاد شکاف نشان می‌دهد.



شکل۱- نمونه آلومینیومی پس از ایجاد شکاف توسط دستگاه واترجت

۲-۲- وصله‌های کامپوزیتیFML

وصله‌های لایه‌ای الیاف فلزی در مقایسه با آلومینیوم، خواص خستگی و مکانیکی مناسبی داشته و در عین حال وزنشان نیز پایین است، این مواد خواص آلیاژهای آلومینیوم و مواد مرکب را به طور همزمان دارا می‌باشند. مقاومت به خستگی عالی و استحکام بالای آنها در کنار کم بودن وزنشان، سبب شده که از این نوع وصله در این تحقیق استفاده شود.

وصله FML، متشکل از دو لایه الیاف، یک لایه فلز و رزین متصل‌کننده آنها به یکدیگر است و به سه حالت، لایه‌چینی می‌شوند؛ MFF (هنگامی که لایه فلزی در وصله به سطح تعمیری چسبیده باشد)، FMF (هنگامی که لایه کامپوزیت الیافی ما بین دو لایه الیاف در وصله قرار می‌گیرد) و FFM (هنگامی که لایه فلزی در وصله در دورترین حالت نسبت به سطح تعمیری باشد). مهم‌ترین جزء به‌کار رفته در وصله، لایه‌های الیافی است، با توجه به کاربرد روز افزون الیاف کربن در سازه‌های هوا- فضا و همچنین استحکام بالای این نوع الیاف، در این تحقیق از پارچه الیاف کربن (T300-3k 200 g⁄sq.m) استفاده شده که از نوع بافته شده دو جهته با زاویه ۹۰ درجه است. فلز به کار رفته در ساختار وصله، از جنس فسفربرنز است که دارای ضخامت‌های ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ میلی‌متر است. ضخامت لایه الیافی به همراه رزین ۰/۲۵ میلی‌متر است. رزین اپوکسی با نام تجاری اپوکسی[1] LY5052 به همراه هاردنر (سفت‌کننده) آرادور[2] 5052 انتخاب گردید. جهت انتخاب چسب برای اتصال وصله FML به فلز آلومینیوم با توجه به اطلاعات شرکت سازنده، چسب با نام تجاری آرالدیت 2011 انتخاب شد [۱۶].

۲-۳- ساخت وصله کامپوزیتی FML

برای ساخت وصله‌های کامپوزیتی از روش لایه‌چینی دستی[3] استفاده شده، در مرحله نخست ورق‌های فلزی بکار برده شده در وصله‌های FML در اندازه مورد نظر بریده شدند. پس از این مرحله، سطوح این نمونه‌ها از حالت صاف و صیقلی خارج شدند تا برای لایه‌چینی آماده شوند. برای این کار، نمونه‌ها توسط سنباده‌هایی با شماره ۸۰ و ۱۸۰ در دو جهت عمود بر هم سابیده شدند. جهت ساخت وصله‌ها، ابتدا ورق‌های نازک فلزی توسط استون شستشو و چربی‌زدایی شده، سپس ورق‌ها توسط آب گرم شستشو داده شدند تا هرگونه ذرات و گرد و غباری از روی آن‌ها پاک شود. در مرحله آخر نیز، سطح فلز توسط ماده MEKP (که پخت در دمای محیط را میسر می‌کند) جهت چربی‌زدایی نهایی شستشو و آماده‌سازی شد [۱۷]. جهت لایه‌چینی، بستر کار وصله توسط یک لایه پلاستیک پوشانده شده، حباب‌های زیر آن خارج شد.

در این مرحله، رزین اپوکسی LY5052 مطابق نکات زیر آماده شد:

۱) قبل از استفاده، رزین باید به آرامی هم‌زده شود تا به صورت کاملاً یکنواخت و همگنی درآید.

۲) حدود هفت الی هشت ساعت قبل از مصرف، رزین باید به مدت ۴۵ دقیقه در دمای ۶۰ الی ۷۰ درجه سلسیوس نگه‌داری شود تا گازهای زائد آن خارج و رزین به صورت همگن درآید.

۳) هنگام استفاده، رزین روی گرمای ملایم قرار داده شود تا فرآیند آغشته‌سازی الیاف بهتر صورت گیرد.

۴) نسبت اختلاط رزین به سفت‌کننده (هاردنر) ۱۰۰:۳۸ وزنی است که می‌توان توسط ترازوی دیجیتال با دقت هزارم گرم نسبت به اختلاط آنها اقدام کرد.

۵) هاردنر باید به آرامی داخل رزین ریخته شود تا مخلوطی کاملاً شفاف و عاری از رگه‌های رزین مشاهده شود.

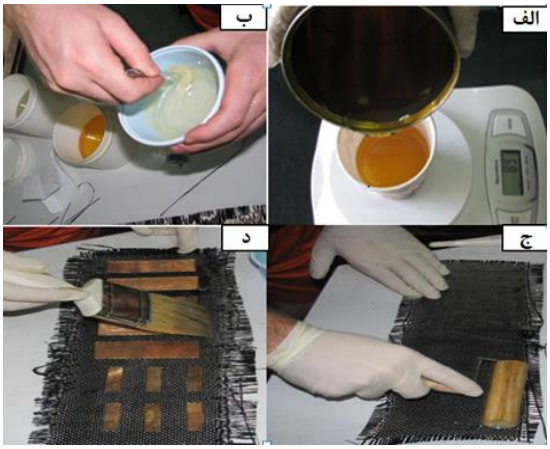
۶) زمان مفید مصرف رزین در لایه‌چینی کامپوزت، در حدود ۳۰ دقیقه است. پس از این زمان فرایند آغشته‌سازی الیاف با مشکل روبه‌رو شده، باعث افزایش درصد وزنی رزین در سازه می‌شود.

۷) پس از آغشته‌سازی توسط قلم مو، از غلطک استفاده می‌شود تا رزین به صورت یکنواختی پخش شود. با این کار لایه‌های کامپوزیت به هم فشرده شده، گازهای موجود در بین آن‌ها خارج می‌شود.

۸) با توجه محل قرارگیری لایه کامپوزیت الیافی یا فلز، فرآیند لایه‌چینی انجام می‌شود. باید دقت کرد که لبه‌های پارچه‌ها بیرون‌تر از لایه فلز قرار گیرند تا هنگام برش تورق[4] صورت نگیرد.

[1] Epoxy
[2] Aradur
[3] Hand Lay-up
[4] Delamination

پس از اتمام لایه‌چینی، لایه پلاستیک آغشته به ماده چرب‌کننده روی کامپوزیت FML قرار داده شده و لایه پلاستیکی دیگری روی آن گذاشته می‌شود. شکل ۲، نحوه لایه‌چینی انجام شده برای ایجاد وصله کامپوزیتی FML را نشان می‌دهد. جهت خارج شدن رزین‌های اضافی و همچنین اتصال بهتر بین لایه‌های کامپوزیت، باید وزنه‌هایی روی آن قرار داده شود تا عملیات پخت[1] صورت گیرد. عملیات پخت در دمای ۲۵°C در حدود ۸ الی۱۶ ساعت است. با قرار دادن وصله‌ها در کوره در دمای ۶۰°C، می‌توان این زمان را به ۱ الی ۲ ساعت کاهش داد.



شکل۲- الف) تعیین درصد وزنی اختلاط، ب) به هم زدن مخلوط، ج) پخش یکنواخت رزین توسط غلطک و د)آغشته سازی با قلم مو

پس از اتمام عملیات پخت، رزین و الیاف اضافی که از اطراف لایه فلز بیرون‌زده است، توسط قیچی برش داده می‌شود. باید توجه داشت که در این مرحله، عملیات برش به دقت صورت گیرد تا تورق بین لایه‌های کامپوزیت ایجاد نشود با این کار عملیات ساخت وصله به پایان می‌رسد. سپس باید با توجه به جدول طراحی آزمایش هر وصله را به نمونه شکاف‌دار مورد نظر چسباند. البته قبل از مرحله چسباندن، باید سطح لایه فلز پایه را جهت اتصال قوی آماده کرد.

۲-۴- فرایند آماده‌سازی سطح

برای آماده‌سازی سطح نمونه‌های شکاف‌دار جهت اتصال وصله به آن‌ها، مراحل زیر انجام شده است[۱۸]:

۱- سنباده زدن سطح مورد نظر در دو جهت افقی و عمودی

۲- شستشوی سطح توسط استون

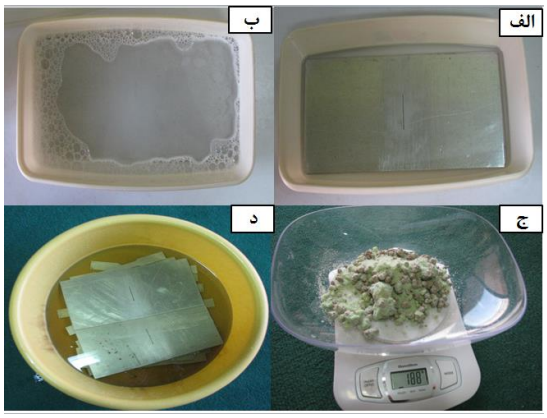
۳- شستشوی مجدد توسط آب گرم

۴- تهیه محلول اچ شامل مواد زیر:

- آب
- اسید سولفوریک
- سولفات فریک

۵- قطعه به مدت ۱۰ الی ۱۲ دقیقه در محلول اچ قرار داده شده، به آرامی توسط همزن شیشه‌ای همه سطوح آن در محلول غوطه‌ور می‌شود. دمای محلول باید ۶۵°C-۶۰ باشد. سپس قطعات خارج شده، ابتدا توسط آب سرد و سپس توسط آب گرم شستشو و خشک می‌شوند. شکل ۳، نمونه‌های شکاف‌دار را در حال اچ شدن نشان می‌دهد.

پس از اتمام مراحل فوق، سطح کاملاً براق و تمیزی روی قطعه ظاهر می‌شود که پس از آن سطح کاملاً آماده اتصال وصله به فلز پایه است.



شکل۳- الف) شستشو با محلول استون، ب) شستشو با آب گرم و پودر، ج) تهیه اسید سولفوریک و د) نمونه‌های شکاف‌دار در حال اچ شدن

۲-۵- اتصال وصله FML به ورق شکاف‌دار

پس از تولید وصله‌های کامپوزیتی FML جهت چسباندن آن به قطعه آلومینیومی ترک‌دار از چسب با نام تجاری Araldit ۲۰۱۱ استفاده شده است. دلیل انتخاب آن، چسبندگی خیلی

[1] Cure

خوب آن به فلزات و کامپوزیت است (شکل ۴) [۱۶]. این چسب از دو بخش رزین و هاردنر تشکیل شده است و از لحاظ ظاهری، یک چسب خمیری رنگ است.

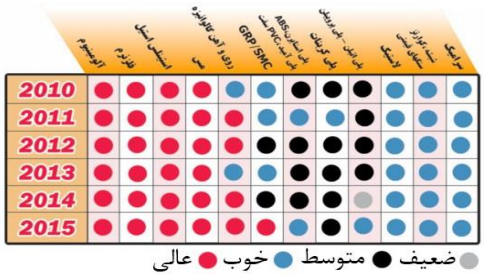
به منظور چسباندن وصله FML به ورق شکاف‌دار، رزین و هاردنر به نسبت ۱:۱ مخلوط و توسط قلم چوبی یا همزن شیشه‌ای خوب به هم زده می‌شوند تا مخلوطی کاملاً یک‌دست ایجاد شود. اکنون با آغشته شدن سطح فلز و وصله، آنها به هم پیوند زده می‌شوند. عمل چسباندن روی چند نمونه به صورت آزمایشی انجام شد، تا میزان ضخامت چسب به صورت تجربی تنظیم شود. پس از برقراری اتصال، نمونه‌ها به مدت سی‌وپنج دقیقه در دمای $70^{\circ}C$ در کوره قرار گرفتند [۱۱]. آزمون نمونه‌ها حداقل پس از گذشت سه هفته انجام گردید تا اتصال به خوبی ایجاد شده باشد. در شکل ۵، یک نمونه ترمیم شده پس از طی مراحل فوق نشان داده شده است.

۲-۶- نحوه انجام آزمون

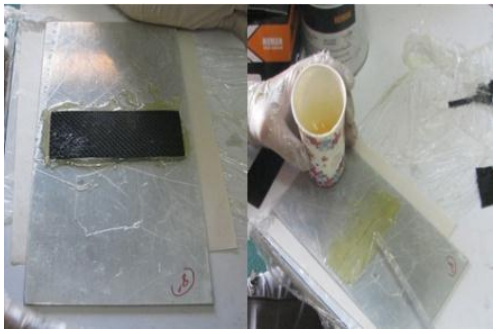
برای انجام آزمون کمانش، برای اینکه بتوان ورق را تحت نیروی فشاری قرار داد، باید یک فیکسچر متناسب با اندازه‌ها و شرایط دستگاه آزمایش و نیز هماهنگ با ابعاد ورق‌های مورد آزمایش طراحی کرد. از طرفی باید هندسه فیکسچر، توانایی نگه‌داشتن ورق‌ها و نیز اتصال مناسب به دستگاه را دارا باشد. برای ساخت فیکسچر مورد نظر ابتدا طرحی برای آن تهیه و سپس با استفاده از دستگاه تراش فیکسچر مربوطه ساخته شد (فیکسچر طراحی شده از نوع فیکسچر ثابت است) (شکل ۶ و ۷).

۳- نتایج و بحث

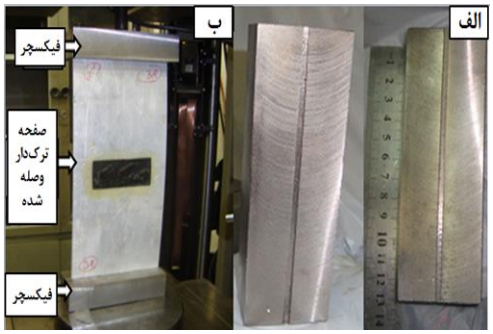
برای مشخص شدن صحت نتایج بایستی هر کدام از آزمایش‌ها حداقل سه بار اجرا شود، در این تحقیق، از هر نمونه، ۴ قطعه ساخته شده، هنگامی که بین نتایج پراکندگی وجود دارد، هر ۴ قطعه ساخته شده مورد آزمایش قرار گرفت. مقدار پراکندگی داده‌ها در بدترین حالت در حدود ۲٪ است. برای راحتی بحث روی نتایج، نمونه‌ها کدگذاری می‌شوند. متغیرهای این تحقیق، عبارتند از: ترتیب لایه چینی، ضخامت وصله و ابعاد وصله کامپوزیتی و در سه سطح تعیین گردیدند.



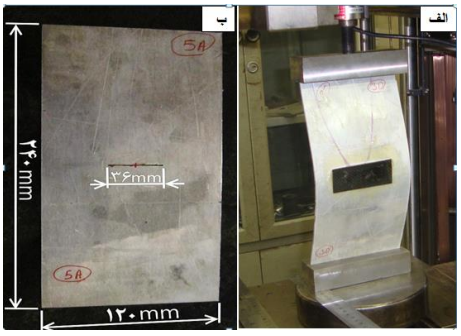
شکل۴- عملکرد چسب‌های Araldite در اتصال به مواد مختلف



شکل۵- مراحل چسباندن وصله به صفحه شکاف‌دار



شکل۶-الف) فیکسچر و ب) قرار دادن ورق در بین فیکسچر



شکل۷- الف) نمونه تحت بارگذاری و ب) ابعاد و هندسه ورق و شکاف

اگر جهت لایه چینی از پایین به سمت بالا در نظر گرفته شود، متغیر لایه چینی در جدول ۱ از (چپ به راست)، ترتیب لایه‌چینی را نشان می‌دهد. در حالت اول، کد لایه‌چینی MFF در حالت دوم به صورت FMF و در نهایت در حالت سوم، به لایه‌چینی وصله‌ها به ترتیب FFM است. در اینجا F، نشان دهنده لایه کامپوزیت الیافی و M نشان‌دهنده لایه فلز موجود در ساختار وصله است. قابل ذکر است که پایین‌ترین لایه وصله به بخش شکاف‌دار ورق آلومینیومی چسبانده می‌شود.

الگوی کدگذاری براساس جدول ۱ است. به عنوان مثال کد ۲۳۶ مربوط می‌شود، به وصله با لایه‌چینی نوع FMF، ضخامت ۰/۸mm و ابعاد (۴۰×۱۰۰mm^2). نتایج حاصل از آزمون کمانش تمامی نمونه‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. نام‌گذاری نمونه‌ها در جدول ۲، با توجه به کدهای جدول و بر اساس روش طراحی آزمایش رویه پاسخ صورت پذیرفته است. با مشاهده جدول ۲، مشخص می‌شود که بیشترین تأثیر روی بار کمانشی را نمونه ۳۲۶ با ۴۴/۱۳ درصد افزایش بار و کمترین تأثیر را نمونه ۲۱۲ با ۴/۷۹ درصد افزایش بار دارد؛ این در حالی است که در تحقیقی مشابه که در آن بجای استفاده از وصله‌های کامپوزیتی FML از وصله کامپوزیتی CFRP استفاده شده بود، بیشترین افزایش استحکام تنها برابر با ۲۵ درصد گردیده بود [۱۰].

با توجه به شکل ۸ و مقایسه رفتار کمانشی نمونه‌های تعمیر شده با وصله کامپوزیتی FML، مشخص می‌شود که مدول الاستیسیته همه قطعات تقریباً یکسان است. این نشان‌دهنده آن است که مدول الاستیسیته خاصیتی است که به جنس مواد بستگی دارد، نه به شکل یا نوع بارگذاری، اما رفتار کمانشی قطعات متفاوت است. همچنین مشاهده می‌شود که تعمیر قطعات شکاف‌دار با وصله کامپوزیتی، باعث افزایش استحکام کمانش نمونه تعمیر شده می‌شود؛ زیرا استفاده از وصله، باعث محدود و بسته شدن نواحی نوک شکاف می‌شود و از شدت تنش در نمونه شکاف‌دار می‌کاهد و در نتیجه سبب افزایش استحکام قطعه می‌شود.

با توجه به شکل ۸ مشاهده می‌شود که بار کمانشی در تمامی نمونه‌های تعمیر شده با وصله کامپوزیتی به صورت ناگهانی مقداری افت کرده است، زیرا زبری سطح آلومینیوم، باعث می‌شود، چسب به خوبی نتواند روی سطح آلومینیوم بچسبد و نیروی کمانش را به آرامی به وصله انتقال دهد. این افت نیرو ممکن است، در اثر جدایش وصله از قطعه آسیب‌دیده باشد که این جدایش ممکن است، بر اثر نامناسب بودن چسب و تفاوت در دمای پخت چسب و دمای محیط‌کاری باشد. البته پایین بودن تنش برشی و استحکام برشی چسب در مقایسه با بار وارده بر آن، در این رابطه دخیل هستند.

جدول۱- نحوه کدگذاری نمونه‌ها

(نحوه لایه‌چینی وصله)A	(ضخامت وصله)B	(ابعاد وصله)C
۱ (MFF[1])	۱ (t=۰/۶mm)	۲(۲۰×۵۰mm۲)
۲ (FMF)	۲ (t= ۰/۷mm)	۴ (۳۰×۷۵mm۲)
۳ (FFM)	۳ (t= ۰/۸mm)	۶ (۴۰×۱۰۰mm۲)

جدول۲- نتایج آزمون کمانش تمام نمونه‌های آزمایش شده

ردیف	نام نمونه	مقدار بار کمانشی حاصل از آزمایش برای نمونه (N)	درصد افزایش بار نمونه نسبت به نمونه شکاف‌دار بدون ترمیم (%)
۱	سالم	۴۶۱۲	-
۲	بدون وصله	۲۹۰۰	-
۳	۱۱۴	۳۴۰۹	۱۷/۵۵
۴	۳۱۴	۳۷۰۰	۲۷/۵۸
۵	۱۳۴	۳۷۷۲	۳۰/۰۶
۶	۳۳۴	۳۹۴۲	۳۵/۹۳
۷	۱۲۲	۳۱۹۸	۱۰/۲۷
۸	۳۲۲	۳۳۸۸	۱۶/۸۲
۹	۱۲۶	۳۷۳۳	۲۸/۷۲
۱۰	۳۲۶	۴۱۸۰	**۴۴/۱۳**
۱۱	۲۱۲	۳۰۳۹	**۴/۷۹**
۱۲	۲۳۲	۳۳۳۳	۱۴/۹۳
۱۳	۲۱۶	۳۷۱۴	۲۸/۰۶
۱۴	۲۳۶	۳۹۳۳	۳۵/۶۲
۱۵	۲۲۴	۳۶۳۵	۲۵/۳۴

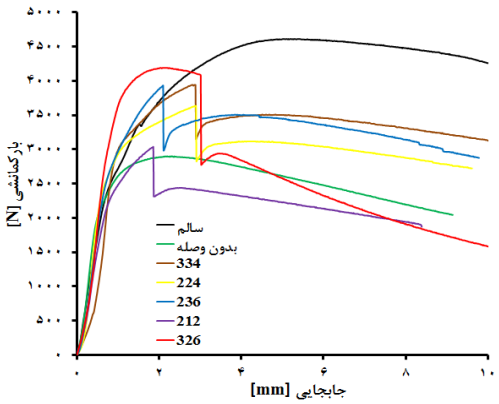
[1] هنگامی که لایه الیاف فلزی در وصله به سطح تعمیری چسبیده باشد.

با توجه به شکل ۹ می‌توان دریافت که افزایش ابعاد وصله، سبب افزایش ناحیه الاستیک می‌شود. استحکام کمانشی با افزایش ناحیه الاستیک افزایش می‌یابد. هر چه ابعاد وصله بزرگتر باشد، نیروی بیشتری نیاز است تا نمونه وامانده شود. در نتیجه، استحکام نمونه تعمیر شده با وصله افزایش می‌یابد.

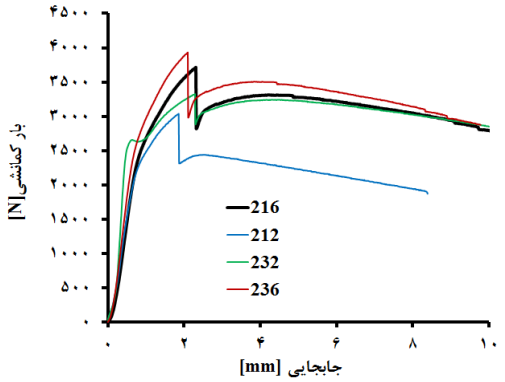
با توجه به بیشتر بودن استحکام الیاف کربن نسبت به فسفر/ برنز، با چسباندن آن به سطح تعمیر، استحکام نمونه تعمیر شده بیشتر می‌شود، از طرفی، قرار دادن لایه فلزی (به علت سفتی بیشتر نسبت به لایه الیاف) در دورترین قسمت نسبت به سطح تعمیر، از خم شدن نمونه جلوگیری می‌کند (شکل ۱۰). ضخامت وصله نیز، باعث افزایش سفتی الاستیک می‌شود. بار کمانشی با توان سوم ضخامت ورق نسبت مستقیم دارد، در نتیجه با افزایش ضخامت وصله نیز بار کمانشی بیشتر می‌شود.

با مقایسه نتایج و تحلیل شکل ۱۱ می‌توان به این نتیجه رسید که هر چه ضخامت وصله FML بیشتر شود، بار کمانشی افزایش می‌یابد، اما از شدت شیب صعودی آن کاسته می‌شود. در تولید انبوه باید بهینه‌ترین حالت را در نظر گرفته شود، تا هم از لحاظ اقتصادی و هم افزایش وزن مقرون به صرفه باشد، چرا که در صنایع هوایی وزن سازه از مهمترین فاکتورهای انتخاب سازه است.

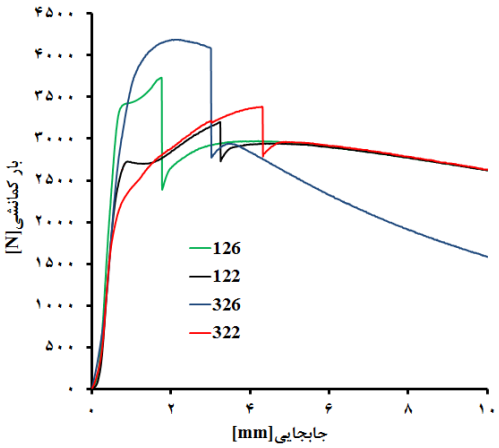
بیشترین تاثیر وصله هنگامی است که نسبت ضخامت وصله کامپوزیتی FML به ضخامت ورق آلومینیومی ۰/۲۸ باشد.



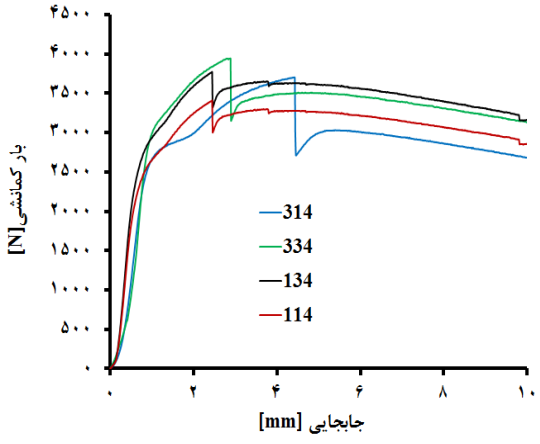
شکل۸- مقایسه رفتار کمانشی نمونه سالم و نمونه شکاف‌دار بدون وصله با نمونه‌های تعمیرشده



شکل۹- مقایسه رفتار کمانشی نمونه‌ها با کدهای ۲۱۶، ۲۱۲، ۲۳۲ و ۲۳۶



شکل۱۰- مقایسه رفتار کمانشی کدهای ۳۲۶، ۱۲۲، ۱۲۶ و ۳۲۲



شکل۱۱- مقایسه رفتار کمانشی نمونه‌ها با کدهای ۱۱۴، ۱۳۴، ۳۱۴ و ۳۳۴

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، به تحلیل تجربی بار بحرانی کمانشی صفحات آلومینیومی شکاف‌دار تعمیر شده توسط وصله‌های FML که تحت بارگذاری تک محوری فشاری قرار دارند، پرداخته شده است. به این منظور، ورق‌هایی از جنس آلومینیوم Al2024T4 با شکاف‌های مرکزی استفاده شده است. پارامترهایی که در این تحقیق روی آن‌ها مطالعه شده است، نحوه لایه‌چینی، ضخامت وصله و ابعاد وصله‌های FML است. نتایج حاصل به شرح زیر است:

- نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که وصله با ترتیب لایه‌چینی F-F-M در بهترین حالت، ۱۶ درصد استحکام کمانشی را نسبت به حالت M-F-F بیشتر افزایش می‌دهد (مقایسه بین کد ۱۲۶ با ۳۲۶).

- هر چه ابعاد وصله FML بیشتر گردد، استحکام کمانشی نمونه‌های ترمیم شده بیشتر می‌شود که در بیشترین حالت، ۲۸ درصد با حالت M-F-F تفاوت دارد (مقایسه بین کد ۳۲۲ با ۳۲۶).

- با افزایش ضخامت وصله FML، استحکام کمانشی نمونه‌های ترمیم شده بیشتر می‌شود. در بیشترین حالت، ۱۲/۵ درصد با حالت M-F-F تفاوت دارد (مقایسه بین کد ۱۱۴ با ۱۳۴).

- قسمت صعودی نمودار نیرو- جابجایی نمونه‌های مختلف، به دلیل مدول الاستسیته برابر، یکسان است؛ ولی قسمت نزولی نمودارها، به دلیل مکانیزم عملکرد متفاوت وصله‌ها، با یکدیگر فرق دارد.

- بیشترین تأثیر افزایش بار مربوط به کد ۳۲۶، با ۴۴/۱۳٪ افزایش و کمترین آن متعلق به وصله‌هایی با کد ۲۱۲، با ۴/۷۹٪ افزایش بار است؛ این در حالی است که حداکثر افزایش استحکام پیشتر گزارش شده، در حالتی که از وصله‌های کامپوزیتی CFRP استفاده شده، ۲۵٪ بوده است [۱۰].

۵- مراجع

[1] Forrest PJ (1962) Fatigue of Metals. Addision-Wesly, London.

[2] Baker A, Rose M, Jones K (2002) Advances in bonded composite repair of metallic. Aircr Struct 1: 145-153.

[3] Chue L, Liu CT (1995) The effects of laminated composite patch with different stacking sequences on bonded repair. Compos Eng 5(2): 223-230.

[4] Vogelesang LB, Vlot A (2000) Development of Fiber Metal Laminates for Advanced Aerospace. MATER PROC TECHNOL 103: 1-5.

[5] Paik JK, Kumar YV, Lee JM (2005) Ultimate strength of cracked plate element under axial compression or tension. Thin Wall Struct 43: 237-272.

[6] Bakhshandeh A (2005) Experimental studing grow crack of the aluminum plate by composite patching. Amir Kabir Univercity of Technology, Tehran. (In Persian)

[7] Xiong JJ, Shenoi RA (2009) Integrated experimental screening of bonded composites patch repair schemes to notched aluminum-alloy panels based on static and fatigue strength concepts. Compos Struct 83(3): 266-272.

[8] Sharifi MM, Khedmati MR, Hosseini Todeshki H (2009) Eigenvalue buckling fractured aluminum plates repaired with composite patches. Eighth Conference of Iranian Aerospace Society, Iranian Aerospace Society, Isfahan, Iran. (In Persian)

[9] Mazhari E, Shahidi AR (2011) Analysis of post buckling behavior of circular plates under uniform loading using rayleigh – ritz method. Mathematical Modelling, Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology 35(7): 3136-3153.

[10] Campilho RD, Moura MF, Ramantani DA, Morais JJ, Domingues J (2010) Buckling strength of adhesively-bonded single and double-strap repairs on carbon-epoxy structures. Compos Sci Technol 70(2): 371-379.

[11] Khalili SMR, Ghadjar R, Sadeghinia M, Mittal RK (2010) An experimental study on the Charpy impact response of cracked aluminum plates repaired with GFRP or CFRP composite patches. Compos Struct 89(2): 270- 274.

[12] Seifi R, Khodayari N (2011) Exprimental and numerical studies on buckling of crack thin- plates under full and partial comprission edge loading. Thin Wall Struct 49(12): 1504-151.

[13] Ashenai Ghasemi F, Mozafari Vanani L, Pourkamali Anaraki A (2011) A study on the Charpy impact response of the cracked aluminum plates repaired with FML composite patches. in

The 4th European Conference For Aerospace Sciences (Eucass).

[14] Pourkamali A, Payganeh GH, Ashenai ghasemi F, Fallah A (2012) An experimental study on the tensile behavior of the cracked aluminum plates repaired with FML composite patches. International Conference on Aerospace, Mechanical,Automotiveand Materials Engineering.

[15] Akpinar S (2013) Effects of laminate carbon/epoxy composite patches on the strength of double-strap adhesive joints: experimental and numerical analysis. Materials and Design, Department of Mechanical Engineering 51: 501-512.

[16] Huntsman advanced materials data sheet for Araldite 2011, Aw 106- Hy 953. 2007. http://www.huntsman.com/advanced/materials. (accessed April 10, 2013).

[17] Fallah Rahmatabadi A (2012) Numerical and experimental analysis of tensile behaviour of Aluminum panels repaired with FML composite patches (M.S. Thesis). Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran. (In Persian)

[18] ASM International Handbook Committee (1990) Properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose materials. Vol 2. American Society for Metals (ASM) International, Ohio, USA.