



## بررسی تجربی و عددی اثر شرایط محیطی دمایی بر استحکام کششی اتصالات چسبی، پرچی و ترکیبی کامپوزیت‌های شیشه/اپوکسی

جابر مسائلی<sup>1</sup>، علی داور<sup>2\*</sup>، محسن حیدری بنی<sup>3</sup>، جعفر اسکندری جم<sup>4</sup>

1- دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران  
2- دانشیار، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران  
3- دانشجوی دکتری، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران  
4- استاد، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران  
\* تهران، صندوق پستی 15875-1774، a\_davar@mut.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله:

در این تحقیق با هدف بررسی اثر دما بر عملکرد اتصالات چسبی، پرچی و ترکیبی متصل شونده‌های کامپوزیتی از جنس شیشه/اپوکسی، اقدام به مطالعه پارامترهای تأثیرگذار بر این اتصال شده است. در همین راستا طراحی آزمایشی به روش تاگوچی در نرم‌افزار طراحی آزمایش مینی‌تب انجام پذیرفته است. هدف از انجام بخش تجربی این تحقیق، به دست آوردن اتصالات بهینه با توجه به پارامترها و سطوح تعریف شده جهت معیار قرار دادن و مقایسه با مقادیر بدست آمده پس از انجام آزمون بر روی اتصالات یاد شده تحت اثر دمایی 80 درجه سانتی‌گراد که به مدت چهار ساعت بر نمونه‌ها اعمال شده است، می‌باشد. به منظور نزدیک نمودن نتایج به شرایط صنعتی تعدادی نمونه اتصال چسبی، پرچی و ترکیبی با استفاده از سطوح بهینه پارامترهای تعریف شده برای هر یک از آن‌ها، براساس آرایش زیگزاگ چهار پرچ در راستای پهنای ناحیه اتصال نمودیم که نمونه‌های تعریف شده در این بخش با تکرارپذیری 2 نمونه تحت اثر دو دمایی محیط و 80 درجه سانتی‌گراد مورد ارزیابی قرار گرفتند. از آنجایی که بررسی مبحث اتصالات به خصوص در اتصالاتی که متصل شونده‌های تشکیل‌دهنده آن‌ها از جنس کامپوزیت‌ها می‌باشند، بسیار حائز اهمیت می‌باشد در این تحقیق اقدام به شبیه‌سازی عددی اتصالات ساخته شده در بخش تجربی در نرم‌افزار المان محدود آباکوس نمودیم. نتایج این تحقیق نشان داد که پس از اعمال شرایط محیطی دمایی بر نمونه‌های اتصال استاندارد بهینه در اتصال چسبی 27.61 درصد، اتصال پرچی 11.98 و اتصال ترکیبی 34.68 درصد کاهش استحکام را نسبت به نمونه‌های تحت اثر دمایی محیط شاهد هستیم.

دریافت: 1402/07/22

پذیرش: 1402/08/29

### کلیدواژگان

کامپوزیت شیشه/اپوکسی، استحکام کششی، اتصال ترکیبی، اتصال چسبی، اتصال پرچی، شرایط محیطی دمایی

## Experimental and Numerical Study of the Effect of Environmental Conditions on the Tensile Strength of Adhesive, Riveted and Hybrid Joints of E-Glass/Epoxy Composites

Jaber Masayeli<sup>1</sup>, Ali Davar<sup>1\*</sup>, Mohsen Heydari Beni<sup>1</sup>, Jafar Eskandari Jam<sup>1</sup>

1- Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

\* P.O.B. 1774-15875, Tehran, Iran, a\_davar@mut.ac.ir

### Keywords

Glass/Epoxy Composite,  
Tensile Strength,  
Hybrid joints,  
Adhesive Joints,  
Riveted Joints,  
Environmental Temperature  
Conditions.

### Abstract

Joints are considered as the weakest points in order to integrate the constituent members of a structure to transfer and bear the load. After checking the parameters, preparing the surface of the joint area using sandpaper on two levels using sandpaper with grain numbers of 220 and 400 and also controlling the thickness of the adhesive layer on two levels of 0.13 and 0.26 mm. The meter and the type of drill used to make holes on both surfaces were selected using a saw drill and a wood drill for rivet joint. The integration of selected parameters of two adhesive and riveted joints is considered in order to investigate the combined joint. In this regard, the experimental design using the Taguchi method has been carried out in the Minitab test design software. The purpose of conducting the experimental part of this research, as mentioned in the previous lines, is to obtain optimal joints according to the defined parameters and levels in order to set a standard and compare with the values obtained after performing the test on the mentioned joints under the effect of 80 degree Celsius applied to the samples for four hours. In order to bring the results closer to the industrial conditions, we connected a number of adhesives, riveted and combined samples using the optimal levels of parameters defined for each of them, based on the zigzag arrangement of four rivets along the width of the area, which are the samples defined in this section.

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Masayeli, J., Davar, A., Heydari Beni, M., Eskandari Jam, J., "Experimental and Numerical Study of the Effect of Environmental Conditions on the Tensile Strength of Adhesive, Riveted and Hybrid Joints of E-Glass/Epoxy Composites," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 10, No. 3, pp. 2273-2296, 2024. <https://doi.org/10.22068/JSTC.2023.2012589.1862>

## 1- مقدمه

روسی ورقه‌های CFRP با پارچه‌های بافته شده به انجام رساندند. آن‌ها در این مطالعه بر روی تأثیر میزان زاویه اتصال روسی بر رفتار شکست سازه‌های کامپوزیتی بازیافت شده تمرکز نمودند. پانل کامپوزیتی ساخته شده براساس پیش‌آغشته‌سازهای کربن-اپوکسی ساخته شده و از رویه‌های آماده‌سازی و پخت استاندارد در آن پیروی شده است. آن‌ها اتصالات روسی با زاویه اتصال 1.9، 2.8 و 5.7 درجه را مورد ارزیابی تجربی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد که استحکام کششی با افزایش زاویه اتصال روسی کاهش می‌یابد و همچنین شرایط و نحوه شکست برای هر کدام از زوایای اتصال روسی متفاوت بدست آمد به طوری که، در زاویه اتصال 5.7 درجه شکست در ناحیه الیاف اتفاق افتاد، در زاویه اتصال روسی 2.8 درجه ساختار لایه-لایه بدون آسیب قابل توجهی در ناحیه اتصال دچار شکست می‌شود.

جوزف ال هیج<sup>4</sup> و همکاران [5] در سال 2020 تحقیقاتی بر روی اثر دمایی کوتاه مدت بر رفتار اتصالات دو لایه چسبی با متصل‌شونده کامپوزیتی را انجام رساندند. مجموعه اتصال شیشه اپوکسی دو لایه تحت بارگذاری برشی استاتیکی و سیکلی مورد ارزیابی قرار گرفت و مقاومت برشی استاتیکی و تعداد سیکل‌های نیرویی تا شکست به ترتیب اندازه‌گیری شده است. چسب مورد استفاده در این تحقیق چسب آرالدیت 2031 اپوکسی با دمای شیشه‌ای شدن 65 درجه سانتی‌گراد می‌باشد. در این تحقیق جهت بررسی گذشت زمان و اعمال دما بر نمونه‌ها سه عملیات حرارتی بر روی آن‌ها به صورت، قرارگیری در دمای شیشه‌ای شدن و قرارگرفتن در معرض دمای 10 درجه سانتی‌گراد بیش از دمای شیشه‌ای شدن به مدت یک و دو هفته، که مجموعاً سه شرایط مختلف دمایی را برای اتصالات دو لایه چسبی مورد آزمایش در تحقیق فوق ایجاد می‌کند. بر همین اساس نتیجه‌گیری می‌شود که تا به حال تعداد کمی از مطالعات با توجه به مواد به کار برده شده و شرایط دمایی مورد بررسی طی مدت زمان مد نظر این تحقیق انجام پذیرفته است. از همین رو می‌توان این بار محبت اتصالات چسبی، پرچی و ترکیبی را از نقطه‌نظر این تحقیق مورد بررسی و ارزیابی قرار داد.

دادیان و رهنما [6] در سال 2021 مطالعه‌ای تجربی و عددی به منظور درجه‌بندی عملکرد بهینه اتصالات چسبی برشی لایه‌ای آلومینیوم به GFRP با استفاده از اپوکسی CTBN را انجام رساندند. هدف اصلی آن‌ها از این تحقیق مطالعه عملکرد اتصالات درجه‌بندی شده با عملکرد بهینه (OFGJ) برای به حداکثر رساندن ظرفیت بارگذاری نهایی یک اتصال تک لایه برشی با متصل‌شونده‌های آلومینیوم T6-7075 و کامپوزیت شیشه-اپوکسی بوده است. همچنین این مطالعه قصد داشت با در نظر گرفتن یک استراتژی درجه‌بندی براساس مخلوط کردن یک رزین اپوکسی با مقادیر مختلف لاستیک مایع به منظور به دست آوردن تغییرات خواص به نتایج قابل توجهی دست یابد. آن‌ها ابتدا اتصالات چسبی تکی با خط اتصال یکنواخت و سپس نمونه‌هایی با ناحیه اتصال درجه‌بندی شده با نوارهای مساوی را مورد مطالعه قرار دادند همچنین از یک روش بهینه‌سازی مبتنی بر انطباق با توزیع تنش برشی نرمال شده برای بدست آوردن بهترین خواص در امتداد خط اتصال استفاده نمودند. در مدل‌سازی عددی برای بدست آوردن توزیع تنش و شکست از مدل الاستیک-پلاستیک و مدل آسیب منسجم حالت مخلوط استفاده شد و به این ترتیب پیش‌بینی با درجه‌بندی مقارن ناحیه هم‌پوشانی، توزیع تنش یکنواخت‌تر شده‌ی بار شکست نسبت به نمونه پایه، 206 درصد افزایش می‌یابد. بهینه‌سازی خواص چسب با استفاده از توزیع تنش برشی نرمال شده اثرات

امروزه بررسی اتصالات و شرایط کارکرد آن‌ها بیش از گذشته مورد نیاز صنایع مختلف می‌باشد لذا پرداختن به این بخش از سازه‌ها موضوعی مناسب جهت تحقیق و پژوهش محققان می‌باشد. با پیشرفت صنایع و ساخت ماشین‌آلات چند جزئی و همچنین افزایش هزینه طراحی و ساخت آن‌ها، بشر بیش از پیش به فکر مطالعه دقیق آسیب‌های احتمالی وارده به اجزای این دستگاه‌ها به منظور جلوگیری از هدر رفتن هزینه و زمان صرف شده برای آن‌ها افتاد. یکی از بخش‌های آسیب‌پذیر، اتصالات این ماشین‌آلات می‌باشد. دادیان و همکاران [1] در سال 2019 بهبود استحکام اتصال لایه‌ای کامپوزیت-فولاد با درجه‌بندی ناحیه اتصال به وسیله الیاف کربن و شیشه و همچنین ایجاد درگیری مکانیکی به روش پله معکوس را موضوع پژوهش خود قرار دادند. با مطالعه‌ای که آن‌ها بر روی اتصالات لایه‌ای چسبی انجام دادند دریافتند که، شکست در اتصالات چسبی معمولاً در نتیجه توزیع غیریکنواخت تنش و کرنش است که با مقادیر بیشینه نزدیک به دو انتهای هم‌پوشانی مشاهده می‌شود. دادیان و همکاران در این تحقیق از الیاف کربن به عنوان المان تقویتی در لایه چسب استفاده کردند همچنین جهت بهبود توزیع تنش از درجه‌بندی خواص در طول هم‌پوشانی به صورت متقارن به وسیله الیاف کربن و شیشه بهره برده‌اند. این تحقیق در چند دامنه اتصالات چسبی را مورد بررسی قرار داده است از جمله، ایجاد روش جدید به منظور بررسی تأثیر وجود پله معکوس در اتصال چسبی، مدل‌سازی المان محدود برای بیان نحوه توزیع تنش برشی و پوست‌کنی در لایه چسب و همچنین تحلیل دلایل افزایش استحکام اتصال در نمونه‌های پله‌دار انجام پذیرفته است.

مورگادو<sup>1</sup> و همکاران [2] در سال 2019 مطالعه‌ای با هدف بررسی استحکام اتصالات CFRP به صورت تقویت شده با لایه‌های چسب را آغاز نمودند. آن‌ها با علم بر این موضوع که اثر لایه-لایه شدن کامپوزیت‌های متصل شده به یکدیگر پیش از تحمل بار نهایی شکست باعث شکست پیش از موعد اتصال یعنی قبل از ورود چسب به ناحیه گردنی شدن و تحمل حداکثر کرنش می‌شود سعی کردند تا روشی جهت از بین بردن این اتفاق در اتصالاتی با حضور CFRP ارائه دهند. در همین راستا، آن‌ها نقش حضور یک لایه چسب به عنوان تقویت‌کننده متصل‌شونده‌های کامپوزیتی را به صورت عددی و تجربی مورد مطالعه قرار دادند. در طول تحقیقات چندین پیکربندی مختلف اتصال با چسب تقویت شده از جمله، اتصالات تقویت شده با لایه‌های چسب بین‌لایه‌ای و یک اتصال با لایه چسب سطحی توسعه یافت.

در سال 2019 فرناندز<sup>2</sup> و همکاران [3] اثر ضخامت و ناحیه هم‌پوشانی چسب بر روی اتصالات تک لایه کامپوزیت‌ها را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها مطالعه خود را با بررسی تأثیر ضخامت چسب و طول ناحیه هم‌پوشانی چسبیده بر رفتار اتصالات تک لایه تحت بار کششی با استفاده از مدل المان محدود سه‌بعدی آغاز نمودند. در این تحقیق از مدل‌سازی یک ناحیه منسجم دوخطی برای نشان دادن رفتار چسب استفاده می‌شود و پارامترهای آن به عنوان تابعی از ضخامت چسب توسط آزمون‌های تیر دولبه و خمش نقاط انتهایی بدست آمده است. چسب مورد استفاده MTA-240 نام دارد. در این تحقیق برای محدوده ضخامت‌های چسب در نظر گرفته شده (0.13، 0.26، 0.39 و 0.52 میلی‌متر)، حداکثر تنش برشی و پوست‌کنی با افزایش ضخامت چسب کاهش می‌یابد، در حالی که با افزایش طول هم‌پوشانی افزایش می‌یابد. سونات و اوزرینچ<sup>3</sup> [4] در سال 2020 تحقیقی با عنوان رفتار شکست اتصال

<sup>3</sup> Sonat and Özeriç<sup>4</sup> Joseph El Hage<sup>1</sup> Morgado<sup>2</sup> Fernández

یانگ<sup>۳</sup> و همکاران [10] برای ایجاد زبری سطح، فرناندز<sup>۴</sup> و همکاران [3] به منظور ایجاد ضخامت‌های مختلف استفاده شده است. انتخاب سطوح (2 سطح) از تحقیقات فوق با توجه به نزدیکی خواص چسب آکسون با چسب‌های مورد استفاده از نظر ویسکوزیته و زمان ژل شدن بالا، انتخاب شده است. در جدول 1 پارامترهای انتخاب شده جهت بررسی تأثیر آن‌ها بر روی اتصال چسبی و نیز سطوح آن‌ها، بدست آمده از دو تحقیق یاد شده بیان شده است. همچنین در جدول 2 تعداد آزمایش‌های بدست آمده از نرم‌افزار مینی‌تب<sup>۵</sup> که به روش تاگوچی طراحی شده، نشان داده شده است.

جدول 1 پارامترها و سطوح اتصال چسبی

Table 1 Parameters and levels of adhesive joint

شماره	ضخامت لایه چسب (میلی‌متر)	آماده‌سازی سطح (شماره دانه کاغذ سنباده)
1	0.13	220
2	0.26	400

جدول 2 خروجی طراحی آزمایش مورد بررسی در اتصال چسبی

Table 2 The output of the test design examined in the adhesive joint

شماره آزمون	ضخامت لایه چسب (میلی‌متر)	آماده‌سازی سطح (شماره دانه کاغذ سنباده)
1	1	1
2	2	1
3	1	2
4	2	2

از آنجایی که تحقیق حاضر با محدودیت‌هایی از نظر وسایل و امکانات و... مواجه بود، با توجه به پراکندگی مطالب قابل بررسی در هر کدام از اتصالات چسبی، پرچی و ناکافی بودن زمان انجام این پروژه بر اساس تحقیق خوران و همکاران [11] پارامتر نوع مته مورد استفاده در فرآیند سوراخ‌کاری، به عنوان پارامتر مؤثر در کیفیت نهایی اتصال پرچی، در دو سطح بر طبق جدول 3 با تکرارپذیری دو آزمون، مورد ارزیابی قرار گرفته است. اتصال ترکیبی (چسبی-پرچی) متشکل از پارامترهای تعیین شده برای هر کدام از اتصالات به صورت جداگانه، در دو سطح طی چهار مرحله آزمون طبق جدول 4 مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

جدول 3 سطوح و پارامترهای مورد بررسی در اتصال پرچی

Table 3 Levels and parameters investigated in rivet joint

شماره سطوح	نوع مته
1	مته اره
2	مته چوب

جدول 4 خروجی طراحی آزمایش اتصال ترکیبی

Table 4 Design output of hybrid joint test

شماره آزمون	نوع مته	ضخامت لایه چسب (میلی‌متر)	آماده‌سازی سطح (شماره دانه کاغذ سنباده)
1	1	1	1
2	2	2	1
3	2	1	2
4	1	2	2

مثبتی بر اصلاح توزیع تنش، حذف نیروهای غیربرشی، بهبود سهم تحمل بار، تغییر حالت شکست، و تأخیر در خرابی اتصالات چسب را دارد. بنابراین افزایش در مقاومت نیروی برشی بهینه نمونه درجه‌بندی شده به میزان قابل توجه 299 درصد به وجود می‌آید.

لی<sup>۱</sup> و همکاران [7] در سال 2020، اثر افزودن پین آن هم از جنس کامپوزیت بر اتصالات بین دو متصل‌شونده کامپوزیتی را مورد بررسی و ارزیابی قرار دادند. اساس تحقیق آن‌ها بر مبنای آزمون‌های تجربی و عددی بر روی اتصالات تک لبه کامپوزیتی تقویت شده با پین‌های ساخته شده از الیاف یک‌طرفه تقویت شده از مواد کامپوزیتی پلاستیکی شکل گرفت. آزمون تعریف شده جهت سنجش استحکام این اتصالات، براساس نیروی کشش در یک جهت تعریف شده است، آن‌ها همچنین از پین‌های فلزی جهت مقایسه اتصالات در حضور این ماده با حالت پین کامپوزیتی استفاده نمودند. نتایج این تحقیق نشان داد که در اتصالات تک لبه ترکیبی، چسب با حضور پین کامپوزیتی به طور متوسط افزایش استحکام 19.1 درصدی را شاهد هستیم، در ضمن روشن شد که استفاده از پین فلزی با توجه به این نکته که باعث افزایش بار شکست اتصال می‌شود اما در نهایت مقاومت به خوردگی اتصال و نیز افزایش وزن اتصال را که در حدود 46.9 درصد می‌باشد افزایش می‌دهد. لی و همکاران [8] در سال 2020 مطالعه‌ای پارامتری در مورد خواص کششی اتصال ترکیبی چسب/پیچ و مهره را انجام دادند. متصل‌شونده‌های بکار برده شده از جنس CFRP و فولاد، پیچ و مهره استیل و چسب بکار برده شده از نوع SY14-M می‌باشند. آن‌ها ابتدا اتصالات خود را تحت آزمون کشش قرار دادند و سپس با استفاده از خواص مکانیکی هر یک از مواد بکار گرفته شده در اتصال ترکیبی اقدام به مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار المان محدود نمودند که پس از انطباق نتایج تجربی و عددی به بررسی اثر پارامترهای دخیل در اتصال از جمله مونتاژ اتصال، هندسه اتصال و خواص مواد مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و مشخص شد افزایش مقدار تمامی پارامترهای طراحی اتصال باعث افزایش عملکرد کششی در استحکام، سفتی و انرژی جذب شده دارد به جز پیش‌گشتاور پیچ و مهره، نسبت طول قطعه آزاد S/D و مدول چسب در بردار. همچنین مشخص شد استفاده از چسب با استحکام بالا و مدول کم یک روش کلیدی برای بهبود آسیب اولیه نیرو و استحکام اتصال می‌باشد.

## 2- طراحی آزمایش

با توجه به پارامترهای تعیین شده برای هر یک از اتصالات طراحی آزمایش به شرح زیر انجام پذیرفته است. در تحقیق حاضر با توجه به محدودیت‌های هزینه‌ای چسب آکسون<sup>۲</sup> به عنوان متصل‌کننده انتخاب شده است. چسب فوق به دلیل دارا بودن دو خاصیت مهم ویسکوزیته بالا به منظور کنترل ضخامت و عمر مصرف و زمان ژل شدن بالا که در انجام مراحل ساخت اتصالات چسبی و ترکیبی لازم می‌باشند، انتخاب گردیده‌اند. بر همین اساس در کارهای گذشتگان به دنبال پارامترهای مؤثر در ایجاد یک اتصال چسبی مستحکم براساس همین مشخصه ذاتی چسب آکسون بوده‌ایم. برای ایجاد و ساخت یک اتصال چسبی مستحکم براساس کارهای انجام شده تا به امروز و همچنین محدودیت‌های مالی، دو پارامتر آماده‌سازی سطح ناحیه اتصال به وسیله کاغذ سنباده در دو سطح 220 و 400 و ضخامت لایه چسب در دو سطح به اندازه‌های 0.13 و 0.26 میلی‌متر بر طبق کارهای صفری و فراهانی [9] و

<sup>4</sup> Fernandes

<sup>5</sup> Minitab

<sup>1</sup> Li

<sup>2</sup> Axon

<sup>3</sup> Yang

جدول 5 خواص مکانیکی رزین اپوکسی [12] LR520

Table 5 Mechanical properties of LR520 epoxy resin [12]

مدول الاستیک طولی (E1)	ضریب پواسون (ν12)	استحکام نهایی (S1)
1300 (MPa)	0.2	62 (MPa)

در این تحقیق و همچنین با توجه به عرضه بازار، چسب پلیمری پایه اپوکسی آکسون H9940BK انتخاب گردید. چسب فوق ساخت شرکت سیکا آکسون بوده و از شرکت پیشرو مبتکر پیوند خریداری شده است.



Fig. 2 Sika-Axon H9940BK adhesive

شکل 2 چسب سیکا-آکسون H9940BK

### 5- پرچ آلومینیومی

پرچ‌ها در صنایع مختلف به منظور ایجاد اتصالات کاربرد فراوانی دارند. پرچ‌ها در اندازه‌ها و جنس‌های مختلفی در بازار موجود می‌باشند، که از جمله آن‌ها می‌توان به پرچ‌هایی با جنس آهن، آلومینیوم، استیل و... اشاره کرد. با توجه به این نکته که وزن تمام شده محصول نهایی در تمامی صنایع اعم از نظامی و غیرنظامی امری مهم تلقی می‌شود، ما برآن شدیم با توجه به این فاکتور مهم از پرچ‌هایی با جنس آلومینیوم استفاده نماییم. پرچ بکار گرفته شده در پژوهش حاضر از جنس آلومینیوم H38-5050 بوده و ساخت شرکت پرچ سازه می‌باشد (شکل 3).

در شکل 4 نمای شماتیک، جنس مواد به کار رفته و نیز پارامترها ابعادی پرچ مورد استفاده در تحقیق حاضر مشخص می‌باشد. بر همین اساس به معرفی ابعاد هر یک از این پارامترها در این بخش می‌پردازیم. در جدول 6 ابعاد و اندازه‌های پارامترهای زیر بر اساس نیاز تحقیق در محصول شرکت سازنده پرچ جستجو شده است.



Fig. 3 Aluminum rivet

شکل 3 پرچ آلومینیومی

با توجه به پارامترهای مورد نیاز جهت انجام شبیه‌سازی اتصالات، آزمون‌های تعیین انرژی رهاش ترک در مود اول و دوم چسب و رزین و همچنین نمونه دامبل چسب به تعداد آزمون‌های یاد شده در بخش طراحی آزمایش افزوده شده که مجموع آن‌ها را به عدد 66 آزمون می‌رساند.

### 3- مواد اولیه

به منظور ساخت نمونه‌های تحت آزمون بر اساس استانداردهای ASTM در پروژه حاضر، از مواد اولیه از جمله رزین اپوکسی، پارچه الیاف شیشه، چسب آکسون و پرچ آلومینیومی استفاده شده است؛ که به اختصار شرح داده خواهد شد.

### 4- الیاف

در این پژوهش با توجه به تعداد بالای نمونه‌های مورد آزمون، جهت صرفه‌جویی در هزینه‌ها از الیاف شیشه استفاده شده است. الیاف شیشه نسبت به دیگر الیاف از نظر هزینه تهیه مناسب، خواص برشی بالاتر و نیز مزیت‌های رادارگریزی مناسب‌تری دارند. در این پژوهش از پارچه الیاف شیشه 200 گرمی نوع E با زاویه الیاف 0 و 90 درجه جهت ساخت نمونه‌ها، محصول کشور چین که توسط شرکت پیشرو مبتکر پیوند PMP در بازار عرضه می‌شود، استفاده شده است.



Fig. 1 Glass fiber fabric

شکل 1 پارچه الیاف شیشه

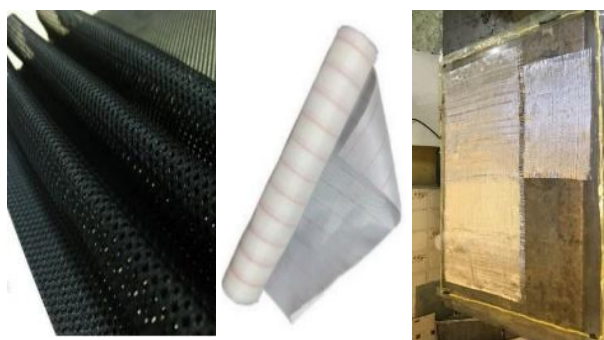
با توجه به دلایل بیان شده و همچنین موجودی بازار، رزین اپوکسی LR520 و عامل پخت HR520 از مجموعه پژوهشگاه پلیمر تهیه و در ساخت قطعات مورد استفاده قرار گرفت. محصول یاد شده قادر به پخت در معرض دمای محیط بوده و می‌توان آن را تا دمای 80 درجه سانتی‌گراد پس پخت نمود. در این رزین از هیچ گونه حلال یا رقیق‌کننده غیر واکنش‌گرا استفاده نشده است. به همین دلیل است که محصول نهایی پس از تکمیل سیکل پخت هیچ گونه تغییرات وزنی یا حجمی را نشان نمی‌دهد. خصوصیات مکانیکی نسبتاً عالی رزین فوق آن را دارای قابلیت استفاده به عنوان لایه محافظتی محیطی، مناسب جهت بارگذاری‌های دینامیکی و استاتیکی نموده است. در جدول 5، خواص مکانیکی رزین LR520 بیان شده است.

جدول 6 مشخصات پرچ مورد نیاز تحقیق بر اساس اطلاعات شرکت سازنده.

Table 6 Rivet specifications required for research based on the manufacturer's company information

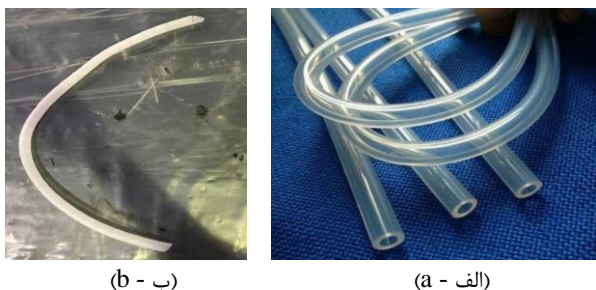
قطر پرچ (D)	طول پرچ (L)	ضخامت قطعه (S)	قطر سوراخ (F)	قطر سر پرچ (H)	ضخامت سر پرچ (E)	قطر میخ (W)
4.9 (میلی‌متر)	8 (میلی‌متر)	3-4.5 (میلی‌متر)	5 (میلی‌متر)	13 (میلی‌متر)	1.5 (میلی‌متر)	2.6 (میلی‌متر)

در مرحله بعد به سراغ برش پارچه‌های الیاف شیشه 0 و 90 درجه، داکرون، پارچه مش تزریق<sup>1</sup> و پلاستیک لازم جهت ایجاد محیط خلأ طبق اندازه‌های مشخص شده می‌رویم. ابعاد در نظر گرفته شده برای ساخت صفحه‌ی شامل؛ نمونه‌های اتصالات، تعیین انرژی شکست مود اول<sup>2</sup> و دوم<sup>3</sup> چسب و چندلایه کامپوزیتی 100×50 سانتی‌متر، نمونه‌های تعیین انرژی شکست در مود اول و دوم رزین 40×30 سانتی‌متر می‌باشد. در شکل 8 پارچه الیاف شیشه برش خورده در دو ابعاد ذکر شده، پارچه داکرون، پارچه مش 3 بعدی نشان داده شده است.

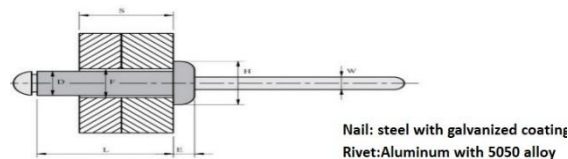


**Fig. 8** (a) glass fiber fabric cut in the two mentioned dimensions, (b) dacron fabric, (c) injection mesh fabric  
**شکل 8** (الف) پارچه الیاف شیشه برش خورده در دو ابعاد ذکر شده، (ب) پارچه داکرون، (ج) پارچه مش تزریق

پارچه داکرون به عنوان لایه جداکننده بر روی آخرین لایه پارچه الیاف شیشه قرار داده می‌شود و از چسبیدن پارچه مش بر سطح کامپوزیت جلوگیری می‌کند. پارچه مش تزریق وظیفه انتقال یکنواخت رزین تزریق شده در داخل محیط خلأ بر روی پارچه‌های الیاف شیشه قرار داده شده بر روی سطح بر عهده دارد. از دیگر لوازم مورد استفاده در این روش ساخت، لوله مارپیچ و لوله پلاستیکی شفاف می‌باشد. وظیفه لوله پلاستیکی شفاف انتقال رزین از منبع به داخل محیط خلأ و خارج کردن رزین اضافی از درون محیط خلأ می‌باشد، همچنین وظیفه لوله مارپیچ تحویل گرفتن و انتقال دادن رزین در تمام طول سطح محیط خلأ می‌باشد. در شکل 9 (الف) لوله پلاستیکی شفاف، (ب) لوله مارپیچ استفاده شده در ساخت صفحات کامپوزیتی نشان داده شده است.



**Fig. 9** (a) Transparent plastic tube, (b) spiral tube used in making composite plates  
**شکل 9** (الف) لوله پلاستیکی شفاف، (ب) لوله مارپیچ استفاده شده در ساخت صفحات کامپوزیتی



**Fig. 4** Blind rivet schematic

شکل 4 شماتیک پرچ کور.

### 6- ساخت چندلایه کامپوزیتی

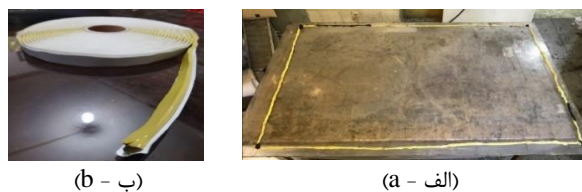
همانطور که در قسمت‌های قبلی شرح داده شد، روش مورد استفاده در ساخت نمونه‌های کامپوزیتی این تحقیق، روش تزریق درون کیسه تحت خلأ می‌باشد. از همین رو به تشریح وسایل لازم جهت اجرای این روش و نیز شرح انجام این روش جهت ساخت نمونه‌ها پرداخته خواهد شد. اولین وسیله مورد نیاز جهت ساخت نمونه‌های کامپوزیتی در این روش و اغلب روش‌های ساخت آن‌ها، قالب مناسب می‌باشد. جهت ساخت نمونه‌های مورد نیاز این تحقیق، از یک صفحه پلکسی مسطح طبق شکل 5 استفاده شده است.

این سطح صاف پس از پاک‌سازی به وسیله کارتک، توسط پارچه نظیف آغشته به محلول استون طی سه مرحله با فاصله زمانی 20 دقیقه به خوبی تمیز می‌شود. پس از پاک‌سازی به وسیله نوار آب‌بند مساحت مورد نیاز از سطح صفحه پلکسی مشخص می‌شود. در شکل 6 (الف) صفحه پلکسی مرزبندی شده به وسیله نوار آب‌بند، (ب) نوار آب‌بند قابل مشاهده است. پس از تعیین مرز سطح مورد استفاده از سطح قالب، سطح مذکور به وسیله واکس جداکننده به خوبی آغشته می‌شود. آغشته سازی سطح قالب در 3 مرحله با فاصله زمانی 40 دقیقه انجام پذیرفته است. در شکل 7 واکس جداکننده و سطح قالب واکس زده شده قابل مشاهده است.



**Fig. 5** Cleaned plexiglass surface

شکل 5 سطح پاک‌سازی شده پلکسی



**Fig. 6** (a) Plexiglas sheet bordered by sealing tape, (b) sealing tape  
**شکل 6** (الف) صفحه پلکسی مرزبندی شده به وسیله نوار آب‌بند، (ب) نوار آب‌بند.



**Fig. 7** Separating wax and waxed mold surface

شکل 7 واکس جداکننده و سطح قالب واکس زده شده

ذکر شده در دستورالعمل مورد پس پخت قرار می‌گیرند. صفحات ساخته شده به روش تزریق در خلأ پس از طی سیکل پخت رزین در دمای محیط به مدت 12 ساعت در دمای 60 درجه سانتی‌گراد درون اتوکلاو موجود در کارگاه کامپوزیت دانشگاه صنعتی مالک اشتر مورد پس پخت قرار گرفته‌اند. در شکل 13 (الف) صفحات کامپوزیتی پس از پخت در دمای محیط، (ب) صفحات کامپوزیتی درون اتوکلاو جهت انجام فرآیند پس پخت نشان داده شده است.

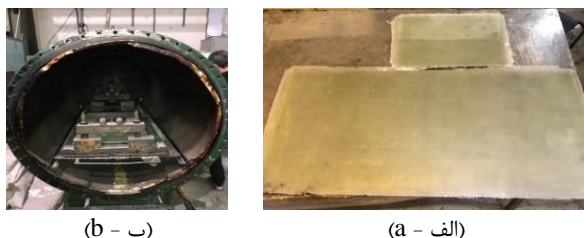


Fig. 13 (a) composite plates after baking at ambient temperature, (b) composite plates in the autoclave to perform the post-baking process.

شکل 13 (الف) صفحات کامپوزیتی پس از پخت در دمای محیط، (ب) صفحات کامپوزیتی درون اتوکلاو جهت انجام فرآیند پس پخت.

آزمون کشش براساس استاندارد ASTM D638 و با دستگاه کشش سننم STM-150 انجام گرفت. در شکل 14 نمونه دامبلی چسب در حال کشش قابل مشاهده می‌باشد.



Fig. 14 sample of adhesive dumbbells being stretched

شکل 14 نمونه دامبلی چسب در حال کشش

### 6- ساخت نمونه‌های اتصال چسبی

به منظور ساخت اتصال چسبی بر طبق پارامترهای تعریف شده برای این اتصال، یعنی آماده‌سازی سطح و ضخامت لایه چسب بر اساس شماره آزمون‌های استخراج شده از نرم‌افزار طراحی آزمایش به روش تاگوچی اقدام به تهیه لوازم مورد نیاز جهت انجام الزامات پارامترهای طرح شده است. سنباده 400، 220 که براساس تحقیق صفری و فراهانی [9]، یانگ<sup>2</sup> و همکاران [10] و همچنین قید و بند مورد نیاز جهت کنترل ضخامت‌های 0.13 و 0.26 میلی‌متر اتصالات چسبی، که ضخامت‌های ذکر شده براساس تحقیق فرناندز<sup>3</sup> و همکاران [3] تعیین شده، تهیه شده است. در شکل 15 (الف) کاغذ سنباده 400 و 220 (ب) قید و بند کنترل ضخامت 0.13 و 0.26 میلی‌متر نشان داده شده است.

دستگاه پمپ خلأ<sup>1</sup> یکی از مهم‌ترین وسایل لازم جهت انجام این روش می‌باشد. در شکل 10 دستگاه پمپ خلأ قابل مشاهده است.



Fig. 10 Vacuum pump device.

شکل 10 دستگاه پمپ خلأ

از آنجایی که کیفیت قطعات کامپوزیتی زمانی بیشترین میزان را دارد که قطعه نهایی عاری از هرگونه حباب هوا باشد، از طرف نشان داده شده در شکل 11 جهت هواگیری رزین آماده شده برای تزریق درون محیط خلأ استفاده شده است. این عمل به وسیله دستگاه پمپ خلأ با ایجاد فشار منفی انجام گرفته است.



Fig. 11 Container for aeration of prepared resin

شکل 11 ظرف جهت هواگیری رزین آماده شده

پس از حصول اطمینان بابت عدم نشت هوا به داخل محیط قالب و بوجود آمدن خلأ در داخل قالب، اقدام به تزریق رزین آماده‌سازی شده به درون قالب می‌کنیم. در شکل 12 رزین در حال جریان درون قالب تحت خلأ نشان داده شده است.

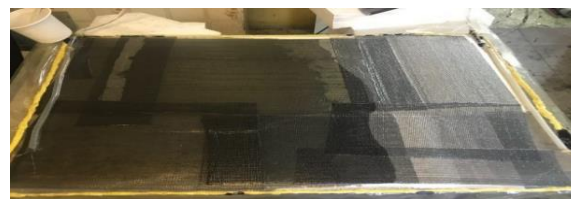


Fig. 12 Resin flowing into the mold under vacuum

شکل 12 رزین در حال جریان درون قالب تحت خلأ

جهت طی نمودن سیکل پخت رزین، پس از آغشته سازی تمام سطح قالب آن را به مدت 24 ساعت در حالت خلأ در دمای محیط قرار می‌دهیم. برای درک بهتر اثر شرایط محیطی بر روی تمامی نمونه‌های ساخته شده در این تحقیق (چسب، کامپوزیت و.....) نمونه‌ها ابتدا با توجه به دستورالعمل شرکت سازنده آن درون دمای محیط پخت شده سپس در دما و به مدت زمان

<sup>3</sup> Fernandes

<sup>1</sup> Vacuum pump

<sup>2</sup> Yang

400 به مدت 2 دقیقه در جهت تصادفی مورد سنباده‌زنی قرار بگیرند. مدت زمان و جهت سنباده‌زنی از تحقیق صفری و فراهانی [9] و یانگ<sup>1</sup> و همکاران [10] بدست آمده است. در شکل 17 دو نمونه اتصال به عنوان نماینده سطوح سنباده‌زنی شده به وسیله هر کدام از کاغذهای سنباده نشان داده شده است.



**Fig. 17** Two joint samples representing the surfaces sanded by each of the sandpapers

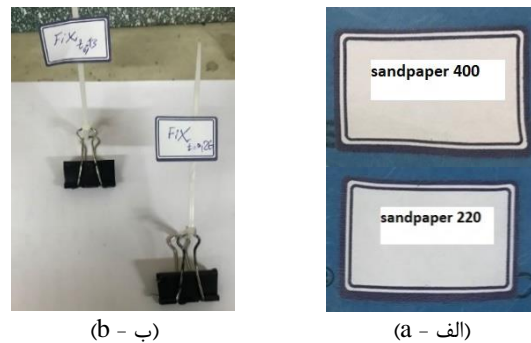
شکل 17 دو نمونه اتصال به عنوان نماینده سطوح سنباده‌زنی شده به وسیله هر کدام از کاغذهای سنباده

با اتمام فرآیند سنباده‌زنی سطوح ناحیه اتصال، با استفاده از دستگاه زبری سنج موجود در کارگاه مواد فلزی دانشگاه صنعتی مملک اشتر پارامترهای قابل اندازه‌گیری ناهمواری سطوح اتصال را اندازه‌گیری می‌کنیم. در شکل 18، دستگاه زبری سنج و سطح استاندارد جهت کالیبره کردن دستگاه نشان داده شده است.



**Fig. 18** Roughness meter and standard surface to calibrate the device  
شکل 18 دستگاه زبری سنج و سطح استاندارد جهت کالیبره کردن دستگاه.

همانطور که در تصویر قبل مشخص است میزان اندازه پارامتر Ra محاسبه شده توسط دستگاه از سطح استاندارد، اختلافی در حدود 0.15 میکرومتر دارد که در تمامی نمونه‌های قرار گرفته در معرض دستگاه زبری سنج این مقدار اضافی باید کسر شود. به منظور اختلاف سنجی دقیق میان زبری سطوح سنباده کاری نشده و نمونه‌های سنباده کاری شده ابتدا نمونه سنباده کاری نشده در معرض دستگاه زبری سنج قرار داده شده است. در شکل 19، نمونه سنباده کاری نشده و دستگاه زبری سنج پس از اندازه‌گیری پارامتر Ra نشان داده شده است.



**Fig. 15** (a) sandpaper 220 and 400 (b) control of thickness 0.13 and 0.26 mm

شکل 15 (الف) کاغذ سنباده 220 و 400 (ب) قید کنترل ضخامت 0.13 و 0.26 میلی‌متر

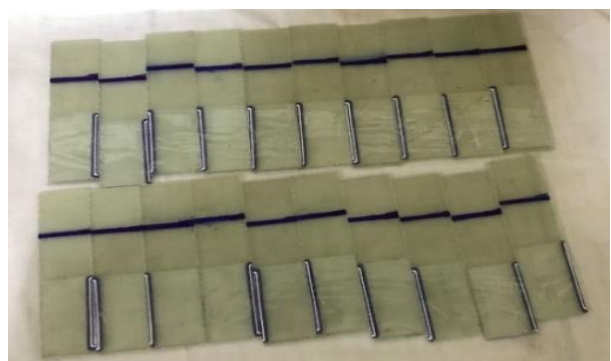
در جدول 7 نام‌گذاری و مشخصات نمونه‌های اتصال چسبی ساخته شده در این قسمت بیان شده است.

جدول 7 نام‌گذاری و مشخصات نمونه‌های اتصال چسبی

**Table 7** Naming and specifications of adhesive joint samples

نام‌گذاری نمونه	تکرارپذیری	تحت اثر دمایی	آماده‌سازی سطح (شماره دانه کاغذ سنباده)	ضخامت لایه چسب (میلی‌متر)
S1111e	1	محیط	220	0.13
S1112e	1	محیط	220	0.26
S1121e	1	محیط	400	0.13
S1122e	1	محیط	400	0.26

پس از تأمین لوازم، ابتدا سطح ناحیه اتصال را بر طبق ابعاد استاندارد این ناحیه یعنی 25×25 میلی‌متر مشخص می‌کنیم (مطابق شکل 16). پس از مشخص نمودن سطح ناحیه اتصال نمونه‌ها، به سراغ پاک‌سازی اولیه سطح مذکور از آلودگی‌ها به وسیله پارچه نظیف آغشته به محلول استون طی سه مرحله با فاصله زمانی 20 دقیقه می‌رویم.



**Fig. 16** Determining the surface of the joint area

شکل 16 مشخص نمودن سطح ناحیه اتصال

در مرحله بعد، عملیات آماده‌سازی سطح اتصال نمونه‌ها را انجام می‌دهیم. برطبق شماره آزمون‌های خروجی طراحی آزمایش دو عدد نمونه تحت آزمون باید توسط سنباده با شماره دانه 220 و دو نمونه دیگر با سنباده شماره دانه

<sup>1</sup> Yang

برطبق اطلاعات موجود در دستورالعمل شرکت سازنده چسب، رزین و سخت‌کننده به میزان 100 به 90 با یکدیگر به خوبی مخلوط می‌شوند. سپس بر روی هر دو سمت سطح ناحیه اتصال به میزان لازم آغشته می‌شوند و در نهایت برای بدست آمدن ضخامت مورد نیاز در سرتاسر ناحیه اتصال بین دو دهانه قید آماده‌سازی شده برای هر کدام از ضخامت‌های 0.13 و 0.26 میلی‌متر مطابق شکل 22 قرار می‌گیرند.



**Fig. 21** The sample was sanded with a 400 sander and a roughness meter after measuring the Ra parameter

شکل 21 نمونه سنباده کاری شده به وسیله سنباده 400 و دستگاه زبری سنج پس از اندازه‌گیری پارامتر Ra

بر طبق اطلاعات درج شده در دستورالعمل شرکت سازنده چسب، برای آغاز سیکل پخت چسب ابتدا به مدت 24 ساعت در معرض دمای محیط قرار می‌گیرد، سپس جهت پخت به مدت 16 ساعت در دمای 70 درجه سانتی-گراد درون آون موجود در کارگاه کامپوزیت دانشگاه صنعتی مالک اشتر طبق شکل 23 قرار داده شده است.



**Fig. 22** Adhesive joint sample after applying adhesive and exposure to thickness control constraints

شکل 22 نمونه اتصال چسبی پس از اعمال چسب و قرارگیری در معرض قید کنترل ضخامت



**Fig. 23** Placing adhesive joint samples to perform adhesive post-baking

شکل 23 قرار دادن نمونه‌های اتصال چسبی جهت انجام پخت چسب



**Fig. 19** The unsanded sample and the roughness meter after measuring the Ra parameter

شکل 19 نمونه سنباده کاری نشده و دستگاه زبری سنج پس از اندازه‌گیری پارامتر Ra

سپس نمونه سنباده کاری شده توسط کاغذ سنباده با شماره دانه 220 در معرض دستگاه زبری سنج قرار داده شده است. در شکل 20، نمونه سنباده کاری شده به وسیله سنباده 220 و دستگاه زبری سنج پس از اندازه‌گیری پارامتر Ra نشان داده شده است.

سومین و آخرین نمونه قرار گرفته در معرض دستگاه زبری سنج، نمونه سنباده کاری شده به وسیله سنباده با شماره دانه 400 می‌باشد. در شکل 21 نمونه سنباده کاری شده به وسیله سنباده 400 و دستگاه زبری سنج پس از اندازه‌گیری پارامتر Ra نشان داده شده است.



**Fig. 20** The sample was sanded with a 220 sander and a roughness meter after measuring the Ra parameter

شکل 20 نمونه سنباده کاری شده به وسیله سنباده 220 و دستگاه زبری سنج پس از اندازه‌گیری پارامتر Ra

پس از اندازه‌گیری ناهمواری سطح ناحیه اتصال، به سراغ ساخت چسب جهت ایجاد اتصال چسبی می‌رویم. برطبق توضیحات داده شده در بخش مواد اولیه، چسب مورد استفاده در این تحقیق آکسون H9940BK می‌باشد.



در شکل 26، نمونه محکم شده بر روی قالب سوراخ‌دار پس از انجام فرآیند سوراخ‌کاری نشان داده شده است.



Fig. 26 The sample fixed on the perforated mold after the drilling process

شکل 26 نمونه محکم شده بر روی قالب سوراخ‌دار پس از انجام فرآیند سوراخ‌کاری

همانطور که در تصویر مشخص می‌باشد نمونه و قالب سوراخ‌دار به وسیله کلمپ جهت جلوگیری از سرخوردن بر روی یکدیگر مهار شده‌اند. پس از طی شدن مرحله سوراخ‌کاری، نوبت به اعمال پرچ می‌رسد. پرچ آلومینیومی به قطر 5 میلی‌متر به وسیله دستگاه پرچ‌کن دو نمونه را جهت ایجاد یک اتصال پرچی به یکدیگر متصل می‌کند. در شکل 27 (الف) دستگاه پرچ‌کن به همراه پرچ آلومینیومی، (ب) اتصال پرچی قابل مشاهده است.



(ب - ب)

(الف - ا)

Fig. 27 (a) Riveting machine for aluminum rivets, (b) rivet joint

شکل 27 (الف) دستگاه پرچ‌کن به همراه پرچ آلومینیومی، (ب) اتصال پرچی

در جدول 8، نام‌گذاری و مشخصات نمونه‌های اتصال پرچی ساخته شده در این قسمت ارائه شده است.

جدول 8 نام‌گذاری و مشخصات نمونه‌های اتصال پرچی

Table 8 Naming and specification of rivet joint examples

نوع مته	تحت اثر دمایی	تکرارپذیری	نام‌گذاری نمونه
اره	محیط	2	S21cd1
چوب	محیط	2	S21cd2

### 8- مدل‌سازی

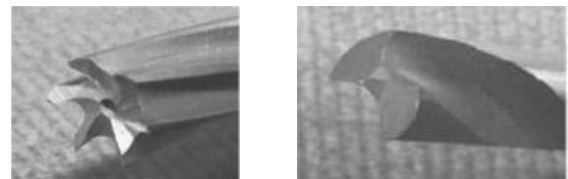
در این پژوهش از روش المان محدود به عنوان یک روش عددی برای حل معادلات حاکم بر مسائل مرتبط با تحلیل سازه‌ای استفاده شده است. عموماً از تحلیل المان محدود برای اعتبار سنجی نتایج مدل‌سازی‌های ریاضی و تجربی استفاده می‌شود. مدل‌سازی اتصالات در نرم‌افزار مدل‌سازی عددی آباکوس<sup>3</sup> 2021 انجام شده است.

<sup>3</sup> Abaqus

### 7- ساخت نمونه‌های اتصال پرچی

ساخت اتصال پرچی را با مشخص کردن ناحیه سطح اتصال به مقدار استاندارد یعنی ابعاد 25×25 میلی‌متر و سپس پاک‌سازی اولیه سطح ناحیه اتصال به وسیله پارچه تمیز آغشته به محلول استون طی سه مرحله با فاصله زمانی 20 دقیقه آغاز می‌نماییم. همانطور که در بخش‌های گذشته عنوان شد، به منظور ایجاد اتصال مکانیکی نیاز به سوراخ‌کاری قطعات می‌باشد. سوراخ‌کاری مواد کامپوزیتی از آن جهت حساس است که، این مواد ذاتی لایه-لایه دارند و باید در هنگام ایجاد سوراخ در آن‌ها دقت لازم را داشت. به منظور کنترل و جلوگیری از آسیب لایه-لایه شدن کامپوزیت‌ها باید سرعت دورانی مناسب ایجاد سوراخ، سرعت پیشروندگی مناسب و همچنین نوع و جنس مته بکار برده شده در انجام این فرآیند انتخاب شوند. به دلیل محدودیت در وسایل کنترل سرعت دورانی و سرعت پیشروندگی مته در قطعه کار، به منظور بررسی اتصال پرچی اثر نوع مته بکار برده شده در فرآیند سوراخ‌کاری به عنوان پارامتر انتخاب شده است. با توجه به موجودی بازار بر اساس تحقیق خوران و همکاران [11] مته اره<sup>1</sup> و مته چوب<sup>2</sup> به منظور بررسی انتخاب شدند. در شکل 24 (الف) مته چوب و (ب) مته اره قابل مشاهده هستند.

از آنجایی که در بررسی اتصال پرچی فقط یک پارامتر در دو سطح مورد بررسی قرار گرفته است، امکان طراحی آزمایش بدلیل ناکافی بودن تعداد پارامترها میسر نبوده و لذا تصمیم بر این شد که دو نمونه مورد آزمون با تکرارپذیری 2 عدد انجام شود. برای بالا بردن کیفیت اتصال و دقت سوراخ‌کاری نیاز به یک قالب از پیش سوراخ‌کاری شده است، به همین منظور ابتدا محل قرارگیری سوراخ را که براساس استاندارد در مرکز ناحیه اتصال قرار دارد به صورت نقشه درآورده، سپس جنس قالب تعیین شده و در نهایت با توجه به ابعاد و اندازه‌های استخراج شده اقدام به تولید قالب سوراخ‌دار می‌نماییم. ابعاد قالب همانند یک نمونه استاندارد اتصال تک لبه در نظر گرفته شده و در همان کارگاه برش CNC و اترجت ماشین‌کاری شده است. با توجه به اندازه قطر مته مقدار قطر سوراخ بر روی قالب برابر 5 میلی‌متر در نظر گرفته شده است. در شکل 25 قالب پلکسی به ضخامت 10 میلی‌متر با سوراخ به قطر 5 میلی‌متر قابل مشاهده است.



(ب - ب)

(الف - ا)

Fig. 24 (a) wood drill and (b) saw drill [8].

شکل 24 (الف) مته چوب و (ب) مته اره [11].



Fig. 25 10 mm thick plexiglass mold with a 5 mm diameter hole

شکل 25 قالب پلکسی به ضخامت 10 میلی‌متر با سوراخ به قطر 5 میلی‌متر

<sup>1</sup> Saw Drill

<sup>2</sup> Candle Stick Drill

ارائه شده  $X_C$  و  $X_T$  مقاومت کششی و فشاری در راستای الیاف  $Y_T$  و  $Y_C$  مقاومت کششی و فشاری در راستای ماتریس است.  $S_T$  و  $S_L$  نیز مقاومت برشی و طولی می‌باشند [13].

جدول 9 معیار دوبعدی هاشین [13]

Table 9 Hashin's two-dimensional criterion [13].

معیار گسیختگی	مود گسیختگی
$F_{ft} = (\sigma_{11} X_T) 2 + 1 SL (\sigma_{212} + \sigma_{213}) \leq 1$	$\sigma_{11} \geq 0$
$F_{Ft} = \frac{\sigma_{11}}{-X_C} \leq 1$	$\sigma_{11} < 0$
$F_{mt} = \left(\frac{\sigma_{22}^2}{Y_T}\right) + \left(\frac{\sigma_{22}^2}{Y_T}\right) \leq 1$	$\sigma_{22} + \sigma_{33} \geq 0$
$F_{mc} = \left(\frac{\sigma_{22}^2}{2S_T}\right)^2 + \left[\left(\frac{Y_C}{2S_T}\right)^2 - 1\right] \frac{\sigma_{22}}{Y_C} + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_L}\right)^2 \leq 1$	$\sigma_{22} < 0$

به منظور ایجاد تماس بین دیگر لایه‌های کامپوزیت و نیز بین سطوح آخرین لایه متصل شونده‌ها، از قید پیوند دادن<sup>4</sup> استفاده شده است.

برای لایه چسب یک المان منسجم سه‌بعدی با 8 گره (COH3D8) جهت دانه‌بندی مدل ایجاد شده در نظر گرفته شده است. تعداد المان‌های بدست آمده لایه چسب پس از تکمیل دانه‌بندی برابر 864 عدد بدست آمده است.

دانه‌بندی مدل شبیه‌سازی شده تک لایه‌های کامپوزیتی به صورت یک پوسته پیوسته چهارضلعی با 8 گره در صفحه، یکپارچگی کاهش‌یافته<sup>4</sup> با کنترل باریک شونده‌گی<sup>5</sup> و کرنش‌های غشایی محدود (SC8R) در نظر گرفته شده است. تعداد المان‌های ایجاد شده برای تک لایه کامپوزیتی 1062 و برای 12 لایه برابر 12744 عدد المان بدست آمده است که البته برای هر دو زیرآیند اتصال ترکیبی برابر 25488 عدد می‌باشد.

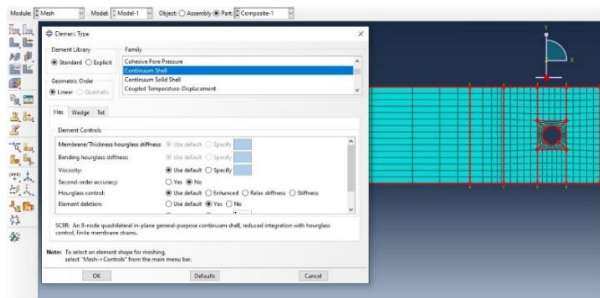


Fig. 28 The window related to the specifications of single-layer composite joint granulation

شکل 28 پنجره مربوط به مشخصات دانه‌بندی تک لایه کامپوزیتی اتصال کامپوزیتی

آخرین جزء اتصال ترکیبی پرچ آلومینیومی می‌باشد، که برای آن یک بلوک خطی 8 گره‌ای با کاهش یکپارچگی و کنترل باریک شونده‌گی (C3D8R) در نظر گرفته شده است. تعداد المان‌های ایجاد شده برای پرچ آلومینیومی برابر 1144 عدد بدست آمده است.

در این بخش به منظور تعیین تعداد المان مناسب از تحلیل الاستیک اتصال بهره گرفته شده است. در شکل 29 همگرایی تعداد دانه انتخاب گردیده است.

## 9- مدل ناحیه چسبنده<sup>1</sup>

مزیت‌های این مدل برای مدل‌سازی آسیب مکانیکی باعث شده است تا استفاده از آن روز به روز افزایش یابد. از مزیت‌های مهم این روش، قابلیت شروع و رشد آسیب در قالب یک مدل واحد است. این روش نیاز به ترک اولیه ندارد و آسیب درون اتصال، بدون دخالت کاربر، پیشرفت می‌کند. از مدل ناحیه چسبنده به طور وسیعی برای تحلیل شکست در اتصالات چسبی، مواد فلزی، کامپوزیتی و سرامیکی استفاده شده است. مدل ناحیه چسبنده، بر پایه مفاهیم مکانیک شکست، آسیب مکانیکی را مدل‌سازی می‌کند. اساس روش مدل ناحیه چسبنده، بر پایه معرفی رابطه ساختاری نرم‌شونده در ناحیه‌ی آسیب دیده اطراف نوک ترک است. المان‌هایی که از این روش تبعیت می‌کنند را المان‌هایی با پسوند COH در برنامه آباکوس تشکیل می‌دهند. المان‌های مدل ناحیه چسبنده، در محل وقوع آسیب قرار می‌گیرند. این دسته‌ی المانی از قانون کشش-جدایش پیروی می‌کنند. در استفاده از مدل ناحیه چسبنده می‌توان به صورت اعمال خواص مکانیکی بر یک پوسته و یا اعمال بر روی سطح اتصال استفاده کرد.

## 10- بررسی استحکام اتصال

به منظور بررسی استحکام و روند تخریب چسب، در اتصال تک‌لایه چسبی و ترکیبی بین قطعات کامپوزیت شیشه/اپوکسی از مدل ناحیه چسبناک و قانون کشش-جدایش استفاده شده است. با توجه به اینکه در شبیه‌سازی عددی و داده‌های بررسی شده در مقالات، تنش‌های وارد شده به چسب ترکیبی از برشی و پوست‌کنی است، از معیار شروع آسیب مربعات تنش اسمی رابطه 1 برای تعیین شروع استفاده شد:

$$\left\{ \frac{\sigma_n}{T_n} \right\}^2 + \left\{ \frac{\sigma_s}{T_s} \right\}^2 + \left\{ \frac{\sigma_t}{T_t} \right\}^2 = 1 \quad (1)$$

در این رابطه  $\sigma_n$ ،  $\sigma_s$ ،  $\sigma_t$  به ترتیب مؤلفه‌های تنش در راستای عمودی و برشی داخل صفحه و خارج صفحه و  $T_n$ ،  $T_s$ ،  $T_t$  به ترتیب مؤلفه‌های تنش بحرانی در راستای عمودی و برشی داخل و خارج صفحه هستند. علامت < > گروه شده بوده و به معنی عدم شروع آسیب در تنش فشاری است. طبق رابطه 1 هر سه مؤلفه‌ی تنش در شروع آسیب دخالت دارند. رشد آسیب با استفاده از انرژی شکست کنترل می‌شود و قسمت نزولی نمودار کشش‌جدایش به صورت خطی در نظر گرفته می‌شود. برای تحلیل مود ترکیبی رشد آسیب می‌توان از هر یک از دو معیار توانی و بزرگ-کنان استفاده نمود همچنین به منظور کاهش داده‌ها بهتر است که از معیار BK استفاده شود.

## 11- معیار هاشین<sup>2</sup>

در این تحقیق، به منظور بررسی شروع آسیب در چندلایه‌های کامپوزیتی و همچنین تقویت‌کننده‌ها، از معیار هاشین دوبعدی استفاده شده است [13]. این معیار برای کامپوزیت‌های تک‌جهته مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به حضور دو فاز متفاوت در کامپوزیت، آسیب به صورت مدهای مختلف روی می‌دهد. معیار هاشین، به علت سادگی پیاده‌سازی در مدل‌های المان محدود در صنعت کاربرد فراوانی دارد. جدول 9 معیار هاشین را برای حالت دوبعدی که در نرم‌افزار آباکوس بصورت پیش‌فرض وجود دارد نشان می‌دهد. در روابط

<sup>4</sup> Reduced integration

<sup>5</sup> Hourglass Control

<sup>1</sup> Cohesive zone model

<sup>2</sup> Hashin

<sup>3</sup> Tie

امکان طراحی آزمایش برای آن فراهم نشد و لذا در این بخش به آن اشاره‌ای نشده است. در جدول 11، خروجی طراحی آزمایش به روش تاگوچی برای اتصال ترکیبی براساس سه پارامتر ناهماری سطح، ضخامت لایه چسب و نوع مته در دو سطح و نیز مؤلفه محاسبه شده پس از انجام آزمون استاندارد اتصال تک لبه (SLS) تحت دمای محیط به نمایش درآمده است.

جدول 11 خروجی طراحی آزمایش اتصال ترکیبی به روش تاگوچی

Table 11 The design output of the combination test of Taguchi method

شماره آزمون	آماده‌سازی سطح	ضخامت لایه چسب (میلی‌متر)	نوع مته	Tt & Ts (MPa)
1	220	0.13	اره	12.763
2	220	0.26	چوب	10.269
3	400	0.13	چوب	13.013
4	400	0.26	اره	12.386

#### 14- بررسی اثر پارامترها

به منظور بررسی اثر هر یک از پارامترهای مورد استفاده در استحکام بدست آمده از اتصالات چسبی و ترکیبی آزموده شده در این تحقیق از فاکتور واریانس استاندارد و اثر سیگنال به نویز با بهره‌گیری از حالت بیشترین مقدار بهترین، نمودارهایی در نرم‌افزار طراحی آزمایش مینی‌تب<sup>1</sup> ایجاد شده که در ادامه به آن‌ها اشاره خواهد شد. در شکل 30 و 31 به ترتیب نمودارهای مربوط به اثر پارامترهای تعریف شده اتصال چسبی و ترکیبی بر استحکام آن‌ها نشان داده شده است.

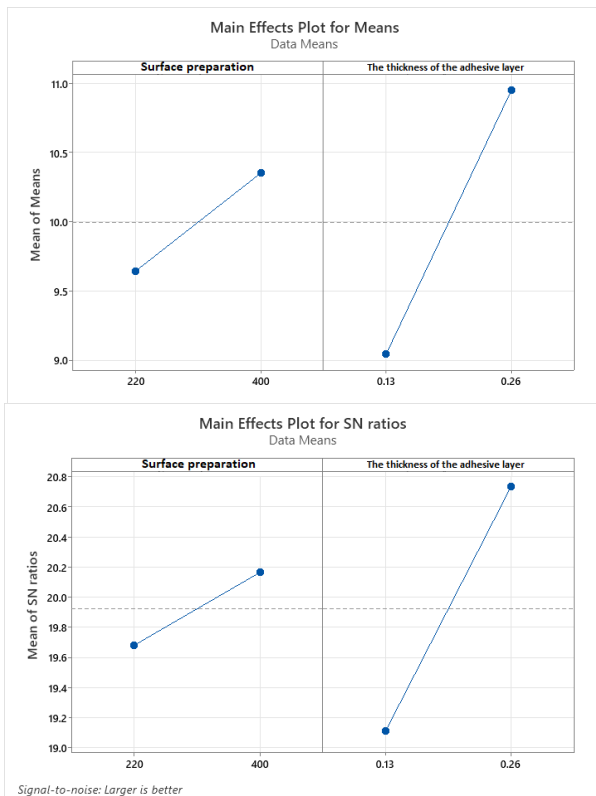


Fig. 30 Diagrams related to the effect of the defined parameters of the adhesive joint on its strength

شکل 30 نمودارهای مربوط به اثر پارامترهای تعریف شده اتصال چسبی بر استحکام آن

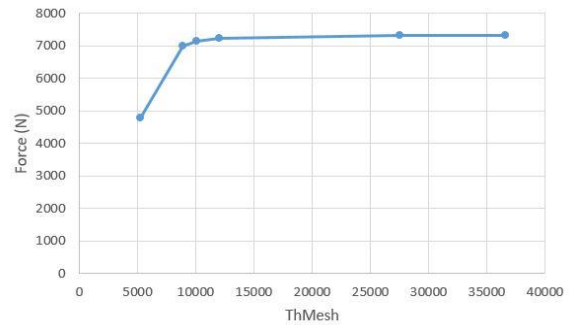


Fig. 29 Convergence of mesh number

شکل 29 همگرایی تعداد دانه

#### 12- نتایج و بحث

در این بخش به ارائه نتایج حاصل از خروجی آماری طراحی آزمایش، آزمون‌های تجربی خواص مواد شامل دامبلی چسب در دمای 80 درجه سانتی‌گراد، نمونه‌های کامپوزیتی شیشه/اپوکسی تحت اثر دمای محیط و دمای 80 درجه سانتی‌گراد، نمونه‌های اتصال چسبی، پرچی و ترکیبی ساخته شده براساس طراحی آزمایش تحت اثر دمای محیط، نمونه‌های اتصال چسبی، پرچی و ترکیبی بهینه تحت دمای 80 درجه سانتی‌گراد، اتصالات چسبی، پرچی و ترکیبی توسعه داده شده براساس آرایش زیگزاگ چهار پرچ به صورت افقی در ناحیه اتصال تحت اثر دمای محیط و 80 درجه سانتی‌گراد، تعیین انرژی شکست در مود اول (DCB)، تعیین انرژی شکست در مود دوم (ENF)، مدل‌سازی عددی اتصالات چسبی، پرچی و ترکیبی (چسبی-پرچی) تحت اثر دمای محیط و دمای 80 درجه با آرایش استاندارد و زیگزاگ، و در نهایت مقایسه نتایج آزمون‌های تجربی اتصالات با مدل‌های شبیه‌سازی شده متناظرشان در نرم‌افزار المان محدود آباکوس پرداخته شده است.

#### 13- تحلیل و بررسی آزمون‌های طراحی شده به روش تاگوچی

یکی از مؤلفه‌های مهم در مبحث اتصالات، استحکام برشی آن‌ها می‌باشد که تا به اینجای کار پارامترهای مؤثر در ایجاد این مؤلفه برشمرده شد و کارهای انجام شده تاکنون حتی‌الامکان مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق از روش تاگوچی به منظور طراحی آزمایش بهره برده شده است. در جدول 10، خروجی طراحی آزمایش به روش تاگوچی برای اتصال چسبی بر اساس دو پارامتر آماده‌سازی سطح (شماره دانه کاغذ سنباده) و ضخامت لایه چسب در دو سطح و نیز مؤلفه محاسبه شده پس از انجام آزمون استاندارد اتصال تک لبه (SLS) تحت دمای محیط قابل مشاهده است.

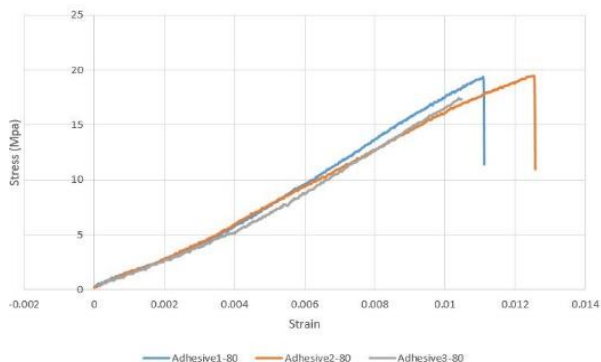
جدول 10 خروجی طراحی آزمایش اتصال چسبی به روش تاگوچی

Table 10 The design output of Taguchi's adhesive bonding test

شماره آزمون	آماده‌سازی سطح	ضخامت لایه چسب (میلی‌متر)	Tt & Ts (MPa)
1	220	0.13	9.542
2	220	0.26	9.739
3	400	0.13	8.544
4	400	0.26	12.158

همانطور که پیش از این اشاره شد، با توجه به محدودیت‌های موجود به منظور ایجاد اتصال پرچی تنها یک پارامتر در دو سطح در نظر گرفته شد که

<sup>1</sup> Minitab



**Fig. 32** Stress-strain diagram of adhesive under the effect of temperature of 80 degrees Celsius

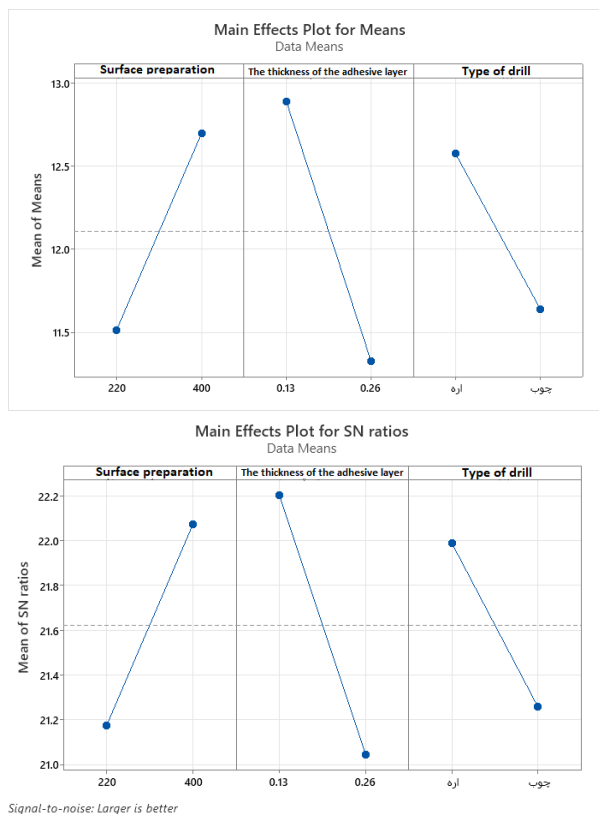
شکل 32 نمودار تنش- کرنش چسب تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد



**Fig. 33** Dumbbell samples made to check the mechanical properties under the effect of temperature of 80 degrees Celsius

شکل 33 نمونه‌های دامبلی ساخته شده جهت بررسی خواص مکانیکی تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد

نمونه‌های دامبلی چسب تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد پس از تخریب در شکل 34 قابل مشاهده می‌باشند. همانطور که مشاهده می‌شود، محل شکست در سه نمونه متفاوت می‌باشد. در نمونه شماره 2 محل ایجاد شکست نسبت به دو نمونه دیگر به محل ایده‌آل (مرکز نمونه) ایجاد شکست در نمونه‌ها، نزدیک‌تر می‌باشد. با مطالعه استاندارد مربوط به این آزمون و پژوهش‌های انجام گرفته در مواجهه با چنین شکست‌هایی در نمونه‌های تحت آزمایش، عملیاتی به منظور اصلاح مقادیر نیرو و جابجایی بدست آمده از آزمایش صورت گرفته بر روی این نمونه‌ها انجام می‌دهیم. ابتدا فاصله محل ایجاد شده از شکست نمونه‌ها تا نزدیک‌ترین لبه آن‌ها را اندازه می‌گیریم. سپس فاصله تا لبه بدست آمده نمونه شماره 2 را به عنوان مرجع بررسی اختلاف فاصله شکست از لبه نمونه‌ها قرار دادیم. از آنجایی که دو نمونه دیگر (1 و 3) محل شکست نامتعارفی دارند و سطح نیروی به نسبت کمتری از نمونه شماره 2 تحمل نموده‌اند لذا برای جلوگیری از ایجاد افت بیش از حد مقدار میانگین پارامترهای استخراج شده از این آزمون اقدام به اصلاح نیرو و جابجایی بدست آمده از آزمون بر روی دو نمونه 1 و 3 به روش بیان شده پرداختیم. برای این منظور اختلاف بدست آمده از فاصله محل شکست نمونه‌های 1 و 3 نسبت به نمونه 2 محاسبه می‌کنیم. میزان درصد انحراف نسبت به مقدار مرجع را محاسبه نموده و در مقادیر نیرو-جابجایی متناظر هریک از نمونه‌ها ضرب می‌نماییم و حاصل بدست آمده را با مقادیر پایه نیرو-



**Fig. 31** Diagrams related to the effect of the defined parameters of the composite joint on its strength

شکل 31 نمودارهای مربوط به اثر پارامترهای تعریف شده اتصال ترکیبی بر استحکام آن

### 15- نتایج تجربی

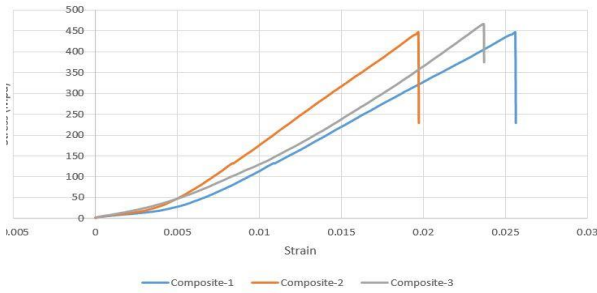
نتایج تجربی بر اساس آزمون‌های استانداردهای، ASTM D638، ASTM، ASTM D7905 و ASTM D5528، که به وسیله دستگاه تست کشش سنتام STM-150 موجود در کارگاه کامپوزیت دانشگاه صنعتی مالک اشتر مورد آزمایش قرار گرفته‌اند، به شرح زیر می‌باشد:

### 16- خواص مکانیکی چسب

برای استخراج خواص مکانیکی چسب، طبق استاندارد ASTM D638 سه نمونه دامبلی با ابعاد تعریف شده در استاندارد آماده‌سازی شده و پس از پایان فرآیند آماده‌سازی و بررسی کنترل کیفی و طی کردن سیکل پخت در دمای محیط و پس‌پخت، سه نمونه پس از قرار دادن در دمای 80 درجه سانتی‌گراد به مدت 4 ساعت ایجاد گردید. هدف از انجام آزمون استاندارد کشش چسب، تعیین استحکام کششی و مدول الاستیک در دمای 80 درجه سانتی‌گراد می‌باشد و با توجه به وجود نمودارهای تنش - کرنش چسب در دمای محیط در کار انجام شده [14] از ساخت نمونه‌های مربوط به آن خودداری شده است و نتایج آن در جدول 12 نمایش داده شده است. در شکل 32، نمودار تنش - کرنش مربوط به نمونه‌های دامبلی چسب پس از اعمال دمای 80 درجه سانتی‌گراد به آن‌ها نشان داده شده است.

در شکل 33 نمونه‌های دامبلی ساخته شده جهت بررسی خواص مکانیکی تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد قابل مشاهده است.

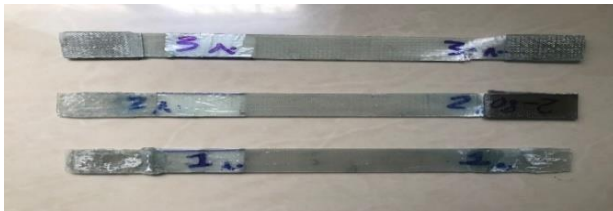
همانطور که در شکل 34 قابل مشاهده است تمامی نمونه‌ها از ناحیه‌ای در نزدیکی محل اعمال تب دچار آسیب شده‌اند.



**Fig. 35** Stress-strain diagram of composite multilayers under the effect of ambient temperature

شکل 35 نمودار تنش- کرنش چندلایه کامپوزیتی تحت اثر دمای محیط

در شکل 36 نمونه‌های چندلایه کامپوزیتی تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد پس از انجام آزمون کشش نشان داده شده است.



**Fig. 36** Multi-layered composite samples under the effect of 80°C temperature after tensile test

شکل 36 نمونه‌های چندلایه کامپوزیتی تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد پس از انجام آزمون کشش

همانطور که در شکل 36 قابل مشاهده است تخریب به وجود آمده در این نمونه‌ها به مانند نمونه‌های تحت اثر دمای محیط می‌باشد. مکانیسم شکست رخ داده در نمونه‌های این آزمون با توجه به متن استاندارد آزمون از نوع جانبی<sup>1</sup> در محل قرارگیری تب‌فک دستگاه آزمون<sup>2</sup> (LAT) دستگاه کشش رخ داده است. شکل 37 شماتیک بیان شده در متن استاندارد را نشان می‌دهد.



**Fig. 37** Schematic expressed in standard text (LAT) [15].

شکل 37 شماتیک بیان شده در متن استاندارد [15] (LAT).

با توجه به وجود محدودیت‌های این پژوهش امکان انجام آزمون فوق با تکرارپذیری بیش از این میسر نشد. با مطالعه متن استاندارد آزمون کشش چندلایه این اجازه داده شده است برای موارد این چنینی که ماکزیمم نیروی بدست آمده پایین‌تر از مقدار مورد انتظار بدست آمده است، می‌توان 25 الی 50 درصد ماکزیمم نیروی بدست آمده را به آن اضافه نمود. در شکل 38 نمودار تنش-کرنش چندلایه کامپوزیتی تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد نشان داده شده است.

جابجایی هر یک از نمونه‌های آزمایش شده جمع کرده‌ایم. به دلیل محدودیت‌های مالی و کمبود مواد اولیه قادر به تکرار و انجام این آزمون با تعداد نمونه‌های بیشتر نشدیم و برای همین از روش‌های اصلاح مقادیر بدست آمده برای بازسازی آزمون صورت گرفته بر روی نمونه‌ها استفاده نمودیم.

**جدول 12** خواص مکانیکی چسب تحت اثر دمای محیط [14].

**Table 12** Mechanical properties of adhesive under the effect of ambient temperature [14].

خواص چسب	نماد	واحد	مقادیر تجربی
مدول الاستیک طولی	E1	MPa	2660
ضریب پواسون	$\nu$ 12	-	0.35
استحکام نهایی	S1	MPa	22.7

**جدول 13** خواص مکانیکی چسب تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد

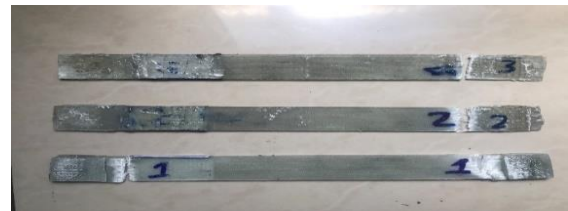
**Table 13** Mechanical properties of adhesive under the effect of temperature of 80 degrees Celsius

خواص چسب	نماد	واحد	مقادیر تجربی
مدول الاستیک طولی	E1	MPa	1702.6
ضریب پواسون	$\nu$ 12	-	0.35
استحکام نهایی	S1	MPa	18.65

پس از محاسبه مقادیر خواص مکانیکی چسب پس از انجام آزمون کشش نمونه‌های دامیلی مشخص شد که، مقادیر خواص مکانیکی چسب مورد استفاده پس از تأثیرپذیری دمای 80 درجه سانتی‌گراد کاهش می‌یابند که علت رخ دادن این پدیده می‌تواند عبور از حداکثر دما و زمان تشکیل پیوندهای مستحکم و منظم در پلیمر فوق باشد.

### 17- خواص مکانیکی چندلایه کامپوزیتی

جهت استخراج خواص مکانیکی چندلایه کامپوزیتی طبق استاندارد ASTM D3093 نمونه‌ها آماده گردید. تعداد کل نمونه‌ها 6 عدد شامل، 3 عدد نمونه در دمای محیط و همچنین 3 نمونه دیگر پس از قرارگرفتن در دمای 80 درجه سانتی‌گراد به مدت 4 ساعت، آزمون کشش با سرعت 3 میلی‌متر بر دقیقه انجام گرفت. در شکل‌های 34 و 35 به ترتیب نمونه‌های چندلایه کامپوزیتی تحت اثر دمای محیط پس از انجام آزمون کشش و نیز نمودار تنش-کرنش مربوط به آن نشان داده شده است.



**Fig. 34** Multi-layer composite samples under the effect of ambient temperature after tensile test

شکل 34 نمونه‌های چندلایه کامپوزیتی تحت اثر دمای محیط پس از انجام آزمون کشش

<sup>2</sup> At grip/Tab

<sup>1</sup> Lateral

اتصال آن‌ها نشان داده شده است. Ra یکی از پارامترهای در نظر گرفته شده به منظور بررسی اتصالات چسبی و ترکیبی می‌باشد، در جدول 16 مقادیر بدست آمده پارامتر Ra از سطوح اتصال در حالت‌های بدون اعمال سنباده بر سطح اتصال، اعمال کاغذ سنباده با شماره دانه 220 و 400 بیان شده است. دو نکته قابل ذکر است، یک اندازه‌گیری زبری سطح برای نمونه سنباده‌زنی نشده صرفاً جهت معیار قرار دادن این سطح نسبت به سطوح سنباده‌زنی شده می‌باشد و دومین نکته، مقادیر وارد شده در جدول 16 برای پارامتر یاد شده با کسر میزان انحراف مقدار بدست آمده از مقدار سطح معیار دستگاه می‌باشد.

جدول 16 مقادیر زبری سطوح اتصال

Table 16 The roughness values of the joint surfaces

Ra (میکرومتر)	نوع سطح
6.78	سنباده کاری نشده
3.96	سنباده کاری با کاغذ 220
3.53	سنباده کاری با کاغذ 400

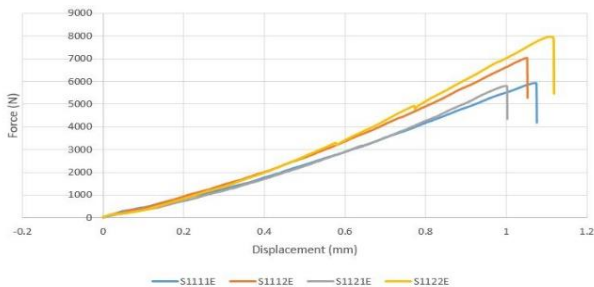


Fig. 39 Diagram of force-displacement of adhesive joints under the effect of ambient temperature

شکل 39 نمودار نیرو-جابجایی اتصالات چسبی تحت اثر دمای محیط

با نگاه بر نمودارهای رسم شده در شکل 39 مشخص می‌شود که نمونه S1122e، به عنوان نمونه بهینه اتصال چسبی با بیشترین نیروی قابل تحمل بدست آمده است. در شکل 40 نواحی اتصالات چسبی ساخته شده در این بخش که پس از قرارگیری در معرض دمای محیط آزمایش شده‌اند، قابل مشاهده است.

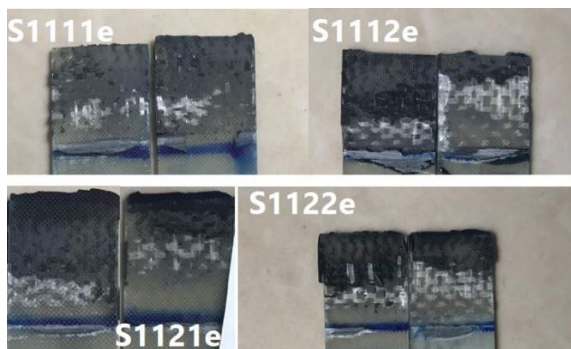


Fig. 40 Areas of adhesive joints under the effect of ambient temperature after failure

شکل 40 نواحی اتصالات چسبی تحت اثر دمای محیط پس از شکست

با مشاهده نواحی اتصالات چسبی پس از شکست شکل 40 مشاهده می‌شود، که با توجه به کیفیت ساخت یکسان نمونه‌های کامپوزیتی که نقش متصل شونده را ایفا می‌کنند، مکانیسم‌های شکست به صورت تقریبی مشابه

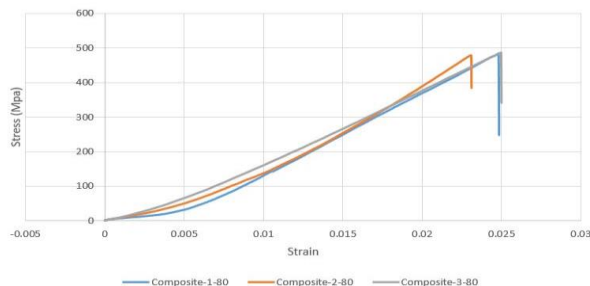


Fig. 38 Stress-strain diagram of composite multilayers under the effect of temperature of 80°C

شکل 38 نمودار تنش- کرنش چندلایه کامپوزیتی تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد

با در نظر گرفتن میانگین نتایج به دست آمده از نمودارها خواص مکانیکی چندلایه‌های کامپوزیتی تعیین می‌گردد. جدول‌های 14 و 15 مقادیر میانگین خواص مکانیکی تعیین شده را نشان می‌دهد.

جدول 14 مقادیر خواص مکانیکی چندلایه کامپوزیتی تحت اثر دمای محیط

Table 14 Values of mechanical properties of composite multilayers under the effect of ambient temperature

مقدار	واحد	نماد	خواص کامپوزیت
19907.3	MPa	E1	مدول الاستیک طولی
19907.3	MPa	E2	مدول الاستیک عرضی
0.2	-	$\nu_{12}$	ضریب پواسون
443.26	MPa	S1	استحکام نهایی شکست

جدول 15 مقادیر خواص مکانیکی چندلایه کامپوزیتی تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد

Table 15 Values of mechanical properties of composite multilayers under the effect of temperature of 80 degrees Celsius

مقدار	واحد	نماد	خواص کامپوزیت
20886.6	MPa	E1	مدول الاستیک طولی
20886.6	MPa	E2	مدول الاستیک عرضی
0.2	-	$\nu_{12}$	ضریب پواسون
483.19	MPa	S1	استحکام نهایی شکست

با بررسی مقادیر بدست آمده خواص مکانیکی کامپوزیت‌های شیشه اپوکسی مشخص شد که، این خواص پس از اعمال دمای 80 درجه سانتی‌گراد به مدت 4 ساعت افزایش می‌یابند. با توجه به سیکل پخت در نظر گرفته شده برای این نمونه‌ها می‌توان نتیجه گرفت که علت رخ دادن این پدیده در این نمونه‌ها شکل‌گیری بهتر زنجیره‌های پیوندی بین مولکولی پلیمری رزین مورد استفاده در ساخت این قطعات بوده است. به این معنا که رزین مورد استفاده پس از طی سیکل پخت و اعمال دمای بیان شده همچنان در مسیر بهبود زنجیره‌های پیوندی بین مولکولی قرار داشته است.

### 18- نتایج آزمون اتصالات تک لبه (SLS)

در شکل‌های 39، 40، 41، 42، 43 و 44 به ترتیب نمودارهای نیرو-جابجایی اتصالات چسبی تحت اثر دمای محیط و سطح اتصال آن‌ها، نمودارهای نیرو-جابجایی اتصالات پرچی تحت اثر دمای محیط و سطح اتصال آن‌ها و نیز نمودارهای نیرو-جابجایی اتصالات چسبی تحت اثر دمای محیط و سطح

با بررسی نمودارهای رسم شده در شکل 43 مشخص شد که نمونه S31212، با بیشترین نیروی متحمل شده پیش از شکست به عنوان نمونه بهینه در اتصال ترکیبی بدست آمده است. در شکل 44 سطوح نواحی اتصال ترکیبی پس از شکست نمایش داده شده است.

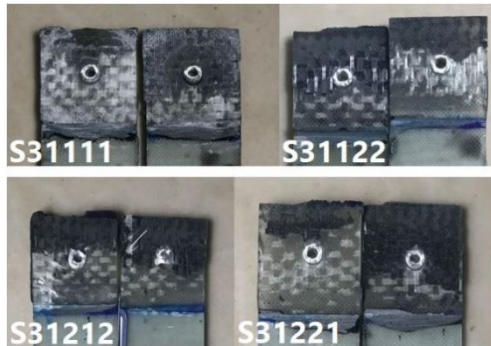


Fig. 44 Surfaces of composite bonding areas under the effect of ambient temperature after fracture

شکل 44 سطوح نواحی اتصال ترکیبی تحت اثر دمای محیط پس از شکست

با نگاهی به شکل 44 می‌توان دریافت که مکانیسم شکست در اتصال ترکیبی با شروع و رشد آسیب در لایه چسب از سمت لبه اتصال بوده است و هنگام رسیدن به مرکز اتصال متصل‌کننده مکانیکی را وادار به تحمل نیرو نموده و پس از شکسته شده آن اتصال از هم گسیخته شده است. با دقت بر روی نواحی اتصال آسیب در سطح متصل شونده‌ها مکانیکی به صورت سبک و مربوط به لایه‌های نزدیک به سطح درگیر با لایه چسب می‌باشد. استحکام اتصال برشی  $T_t$  و  $T_s$  برای نمونه‌های اتصال چسبی، پرچی و ترکیبی تحت اثر دمای محیط محاسبه می‌گردد، که در جدول 17 بیان گردیده است.

جدول 17 خواص بدست آمده اتصالات تحت اثر دمای محیط

Table 17 Obtained properties of joints under the effect of ambient temperature

$T_t$	$T_s$	نمونه آزمون اتصال تک لبه
12.158	12.158	اتصال چسبی
2.6405	2.6405	اتصال پرچی
13.013	13.013	اتصال ترکیبی

سپس با استخراج سطوح بهینه پارامترهای تعریف شده برای هر یک از اتصالات، اتصال بهینه ساخته شده پس از قرارگیری در دمای 80 درجه سانتی‌گراد در مدت زمان 4 ساعت مورد آزمون کشش تک لبه براساس استاندارد فوق قرار داده شده است. نتایج آزمون کشش تک لبه نمونه‌های اتصال چسبی بهینه تحت دمای 80 درجه سانتی‌گراد به صورت منحنی‌های نیرو-جابجایی و سطح اتصال آن‌ها پس از شکست در شکل‌های 45، 46 نشان داده شده است.

همانطور که در شکل 46 مشخص است، تمامی مکانیسم‌های شکست در این اتصالات همانند اتصالات مشابه تحت اثر دمای محیط می‌باشد. در شکل‌های 47 و 48 نمودار-جابجایی اتصالات پرچی بهینه تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد و نیز سطوح اتصال آن‌ها پس از شکست به نمایش در آمده است.

یکدیگرند و نوع تخریب متصل شونده کامپوزیتی، تخریب در لایه‌های سبک و نزدیک به محل تماس با چسب می‌باشند. همچنین تخریب چسب به عنوان عامل ایجادکننده اتصال بر طبق انتظار با شروع و رشد آسیب از لبه‌های اتصال به مرکز آن کشیده شده و شکست رخ داده است.

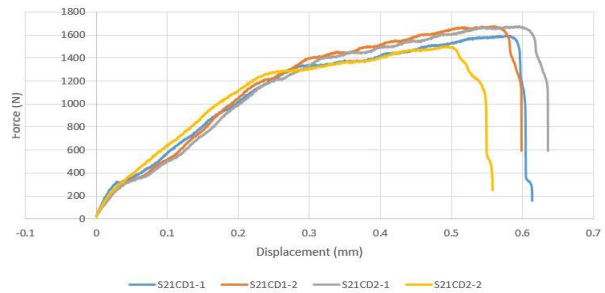


Fig. 41 Diagram of force-displacement of rivet joint under the effect of ambient temperature

شکل 41 نمودار نیرو-جابجایی اتصال پرچی تحت اثر دمای محیط

پس از بررسی نمودارهای رسم شده در شکل 41 مشخص شد نمونه S21cd2-1، نمونه بهینه بدست آمده می‌باشد. در شکل 42 نواحی اتصال پرچی پس از شکست قابل مشاهده است.

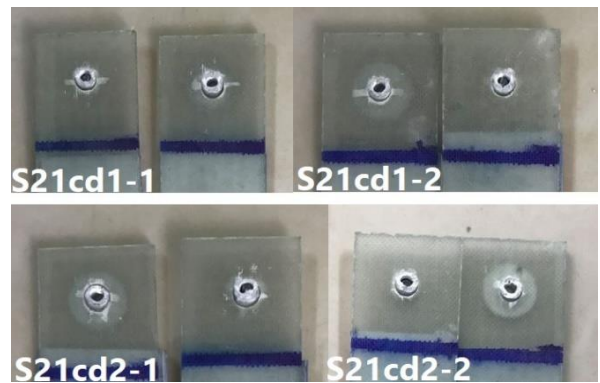


Fig. 42 Rivet joint areas under the effect of ambient temperature after failure

شکل 42 نواحی اتصال پرچی تحت اثر دمای محیط پس از شکست

با بررسی انجام گرفته بر روی نواحی اتصال نمونه‌های پرچی شکل 42 مشاهده می‌شود، با توجه به جنس ماده تشکیل‌دهنده پرچ مورد استفاده در این نوع اتصال آسیب‌هایی بسیار جزئی در سطوح سوراخ ایجاد شده بر روی متصل شونده‌های کامپوزیتی وجود آمده است و تمامی اتصالات از ناحیه متصل شونده یعنی پرچ در راستای برش دچار شکست شده‌اند.

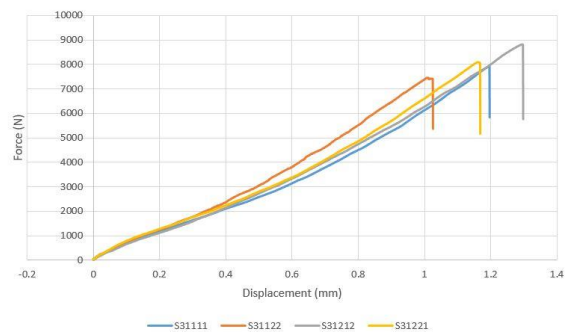
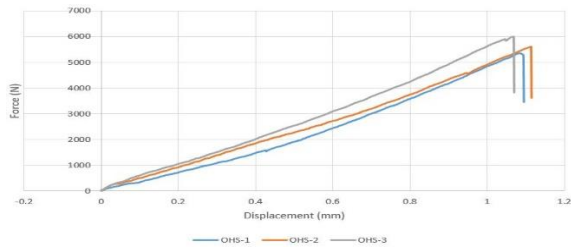


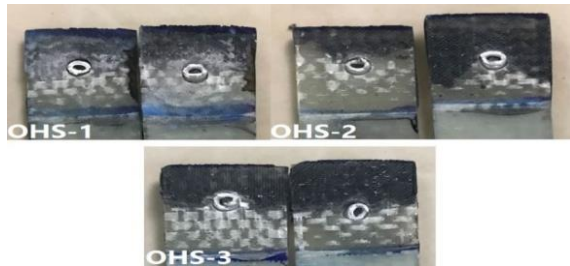
Fig. 43 Force-displacement diagram of composite joint under the effect of ambient temperature

شکل 43 نمودار نیرو-جابجایی اتصال ترکیبی تحت اثر دمای محیط



**Fig. 49** Force-displacement diagram of composite joint under the effect of temperature of 80°C

شکل 49 نمودار نیرو-جابجایی اتصال ترکیبی تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد



**Fig. 50** Optimum composite joint surface under the effect of 80°C temperature after fracture

شکل 50 سطح اتصالات ترکیبی بهینه تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد پس از شکست

با مقایسه سطح اتصالات ترکیبی بهینه تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد پس از شکست شکل 50 و سطح اتصالات مشابه تحت اثر دمای محیط مشخص می‌شود که تقریباً هیچ تفاوت محسوسی بین حالت‌های شکست این دو اتصال هم در متصل شونده و همچنین در متصل کننده وجود ندارد.

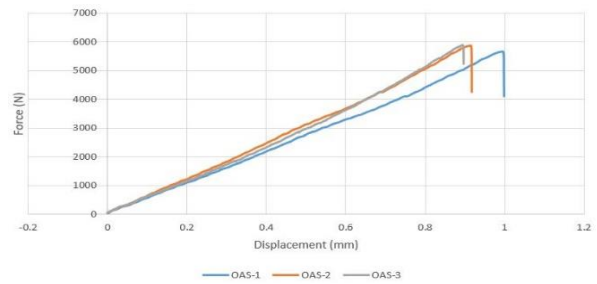
در جدول 18 استحکام اتصال برشی  $T_t$  و  $T_s$  برای نمونه‌های اتصالات بهینه تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد بیان شده است.

جدول 18 خواص بدست آمده اتصالات تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد

**Table 18** The obtained properties of joints under the effect of temperature of 80 degrees Celsius

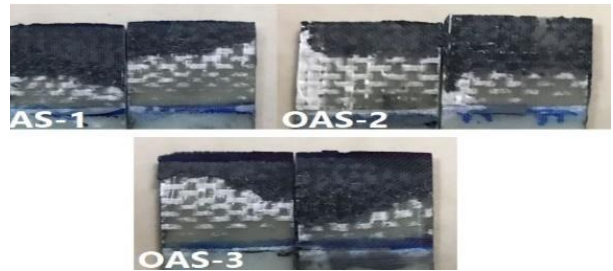
واحد	$T_t$	$T_s$	نمونه آزمون اتصال تک لبه
MPa	8.883	8.883	اتصال چسبی
MPa	2.324	2.324	اتصال پرچی
MPa	8.449	8.449	اتصال ترکیبی

در شکل‌های 51، 52، 53، 54، 55 و 56 به ترتیب نمودار نیرو-جابجایی اتصالات چسبی براساس آرایش زیگزاگ چهار پرچ تحت اثر دمای محیط و سطح اتصال آن‌ها پس از شکست، نمودار نیرو-جابجایی اتصالات پرچی براساس آرایش زیگزاگ چهار پرچ تحت اثر دمای محیط و سطح اتصال آن‌ها پس از شکست و نیز نمودار نیرو-جابجایی اتصالات ترکیبی براساس آرایش زیگزاگ چهار پرچ تحت اثر دمای محیط و سطح اتصال آن‌ها پس از شکست، نشان داده شده است.



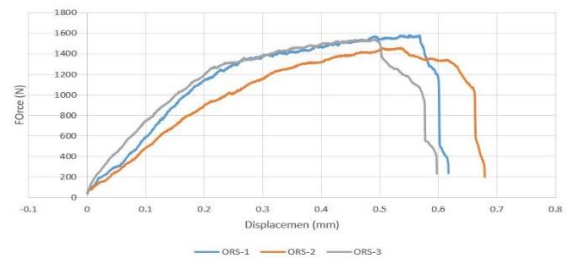
**Fig. 45** Diagram of force-displacement of adhesive joint under the effect of temperature of 80 degrees Celsius

شکل 45 نمودار نیرو-جابجایی اتصال چسبی تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد



**Fig. 46** Optimum adhesive joint surface under the effect of 80°C temperature after failure

شکل 46 سطح اتصالات چسبی بهینه تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد پس از شکست



**Fig. 47** Diagram of force-displacement of rivet joint under the effect of temperature of 80 degrees Celsius

شکل 47 نمودار نیرو-جابجایی اتصال پرچی تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد

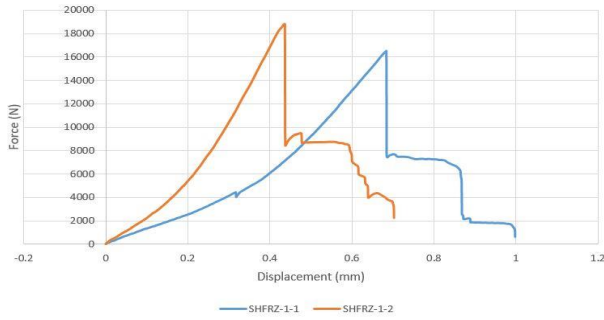


**Fig. 48** Optimum surface of rivet joints under the effect of temperature of 80°C after failure

شکل 48 سطح اتصالات پرچی بهینه تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد پس از شکست

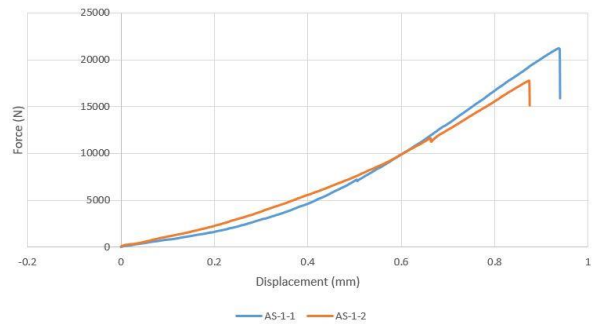
با مشاهده شکل 48 می‌توان نتیجه گرفت که مراحل و رخداد‌های شکست در اتصالات فوق تفاوت محسوسی با اتصالات تحت اثر دمای محیط ندارد. در شکل‌های 49 و 50 به ترتیب نمودارهای نیرو-جابجایی اتصالات ترکیبی بهینه تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد و نیز سطح اتصال آن‌ها پس از شکست نشان داده شده است.





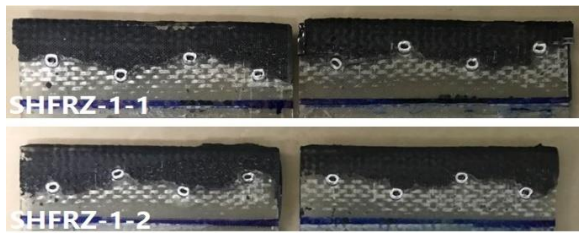
**Fig. 55** Force-displacement diagram of composite joint under the effect of ambient temperature

شکل 55 نمودار نیرو-جابجایی اتصال ترکیبی تحت اثر دمای محیط



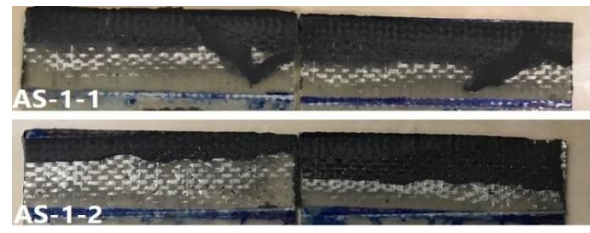
**Fig. 51** Diagram of force-displacement of adhesive joint under the effect of ambient temperature

شکل 51 نمودار نیرو-جابجایی اتصال چسبی تحت اثر دمای محیط



**Fig. 56** The surface of composite joints based on the zigzag arrangement of four rivets under the effect of ambient temperature after failure

شکل 56 سطح اتصالات ترکیبی براساس آرایش زیگزاگ چهار پرچ تحت اثر دمای محیط پس از شکست



**Fig. 52** The surface of adhesive joints based on the zigzag arrangement of four rivets under the effect of ambient temperature after failure

شکل 52 سطح اتصالات چسبی براساس آرایش زیگزاگ چهار پرچ تحت اثر دمای محیط پس از شکست

جدول 19 استحکام اتصال برشی  $T_s$  و  $T_t$  برای نمونه‌های فوق را دربردارد.

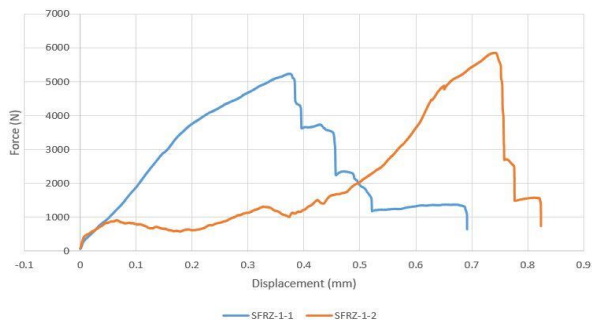
جدول 19 خواص بدست آمده اتصالات تحت اثر دمای محیط

**Table 19** Obtained properties of joints under the effect of ambient temperature

واحد	$T_t$	$T_s$	نمونه آزمون اتصال تک لبه
MPa	6.052	6.052	اتصال چسبی
MPa	1.618	1.618	اتصال پرچی
MPa	5.161	5.161	اتصال ترکیبی

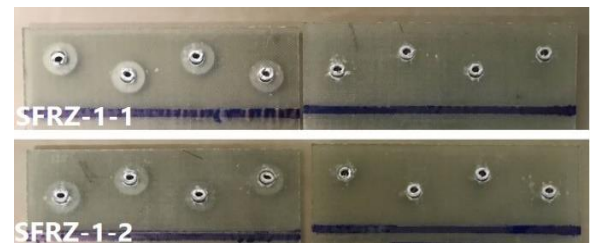
همانطور که در شکل‌های مربوط به سطوح اتصالات چسبی، پرچی و ترکیبی این بخش مشاهده می‌شود، مکانیسم‌های تخریب در تمامی اتصالات همانند شرایط بوجود آمده در اتصالات ساخته شده استاندارد می‌باشد. البته با توجه به نحوه آرایش پرچ‌ها در اتصالات پرچی و ترکیبی که به صورت زیگزاگ در نظر گرفته شده است مشاهده می‌شود که پرچ‌هایی که بیشترین فاصله تا محل فک متحرک دستگاه کشش را دارند بلافاصله پس از تخریب چسب، نیروی وارده را تحمل می‌کنند و به همین ترتیب پرچ‌های نزدیک‌تر درگیر در تحمل این نیرو می‌شوند.

در شکل‌های 57، 58، 59، 60، 61 و 62 به ترتیب نمودار نیرو-جابجایی اتصالات چسبی براساس آرایش زیگزاگ چهار پرچ تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد و سطح اتصال آن‌ها پس از شکست، نمودار نیرو-جابجایی اتصالات پرچی براساس آرایش زیگزاگ چهار پرچ تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد و سطح اتصال آن‌ها پس از شکست و نیز نمودار نیرو-جابجایی اتصالات ترکیبی براساس آرایش زیگزاگ چهار پرچ تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد و سطح اتصال آن‌ها پس از شکست نشان داده شده است.



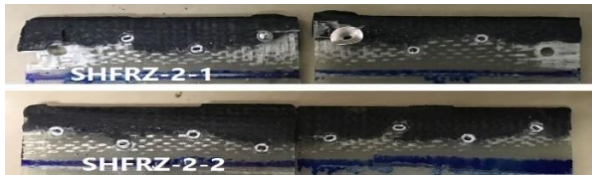
**Fig. 53** Diagram of force-displacement of rivet joint under the effect of ambient temperature

شکل 53 نمودار نیرو-جابجایی اتصال پرچی تحت اثر دمای محیط



**Fig. 54** The surface of rivet joints based on the zigzag arrangement of four rivets under the effect of ambient temperature after failure

شکل 54 سطح اتصالات پرچی براساس آرایش زیگزاگ چهار پرچ تحت اثر دمای محیط پس از شکست



**Fig. 62** Surface of composite joints based on zigzag arrangement of four rivets under the effect of temperature of 80°C after failure  
 شکل 62 سطح اتصالات ترکیبی براساس آرایش زیگزاگ چهار پرچ تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد پس از شکست

جدول 20 استحکام اتصال برشی Ts و Tt برای نمونه‌های فوق را دربردارد.

جدول 20 خواص بدست آمده اتصالات تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد

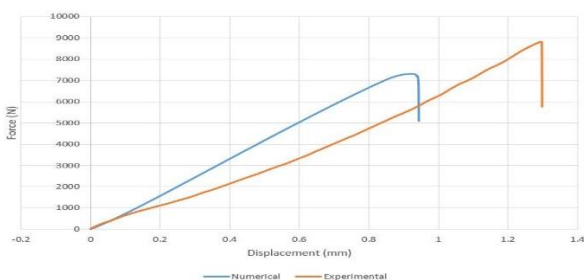
**Table 20** The obtained properties of joints under the effect of temperature of 80 degrees Celsius

واحد	Tt	Ts	نمونه آزمون تک لبه
MPa	5.558	5.558	اتصال چسبی
MPa	1.493	1.493	اتصال پرچی
MPa	4.903	4.903	اتصال ترکیبی

با مشاهده تصاویر مربوط به سطوح اتصالات چسبی، پرچی و ترکیبی ساخته شده براساس آرایش زیگزاگ چهار پرچ که تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند، می‌توان نتیجه گرفت که تقریباً تفاوت محسوسی در حالت‌های شکست این نمونه‌ها با سایر نمونه‌ها به وجود نیامده است. البته این نکته شایان ذکر است که در نمونه‌های اتصال پرچی و ترکیبی، در قسمت‌هایی از گوشه‌های متصل‌شونده‌های کامپوزیتی شاهد کاهش ضخامت هستیم که در این نواحی متصل‌شونده در محل ایجاد سوراخ دچار پارگی شده است و به همین دلیل متصل‌کننده مکانیکی اعمال شده در آن قسمت، دچار آسیب نهایی نگردیده است.

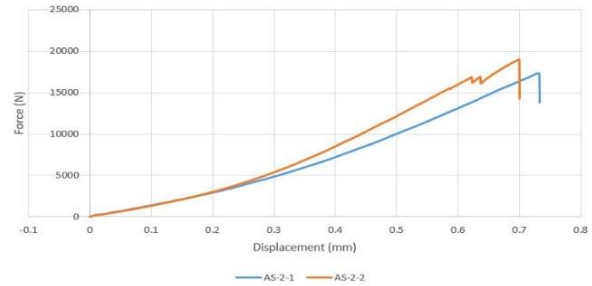
### 19- مقایسه تحلیلی اتصالات چسبی، پرچی و ترکیبی

پس از انجام آزمون‌های استاندارد مختلف و بررسی خواص چسب، کامپوزیت و رزین متأثر از دمای محیط و 80 درجه سانتی‌گراد و مقایسه نتایج اتصالات مد نظر طراحی آزمایش نمونه با بیشترین میزان استحکام به عنوان نمونه تجربی بهینه انتخاب شد و در ابتدا با توجه به مقادیر فاکتورهای بهینه از هر کدام 3 عدد نمونه تجربی ساخته شد و تحت دمای 80 درجه سانتی‌گراد قرار گرفت سپس براساس مقادیر بدست آمده از آزمایش مواد تشکیل‌دهنده اتصالات در دمای محیط و دمای 80 درجه سانتی‌گراد شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار المان محدود آباکوس صورت گرفت. در شکل (63) مقایسه نتیجه عددی و تجربی اتصال بهینه ترکیبی استاندارد به عنوان نماینده شبیه‌سازی‌های صورت گرفته نشان داده شده است.



**Fig. 63** Numerical and experimental results of hybrid joint

شکل 63 نتایج عددی و تجربی اتصال ترکیبی



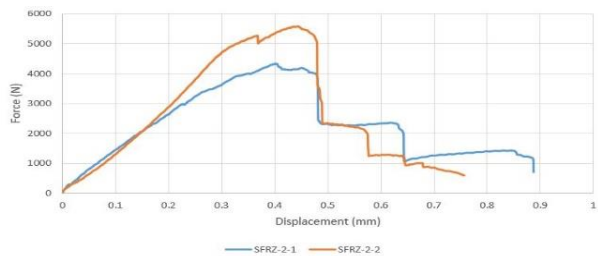
**Fig. 57** Force-displacement diagram of adhesive joint under the effect of temperature of 80 degrees Celsius

شکل 57 نمودار نیرو-جابجایی اتصال چسبی تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد



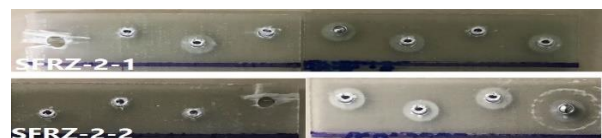
**Fig. 58** The surface of adhesive joints based on the zigzag arrangement of four rivets under the effect of temperature of 80 °C after failure

شکل 58 سطح اتصالات چسبی براساس آرایش زیگزاگ چهار پرچ تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد پس از شکست



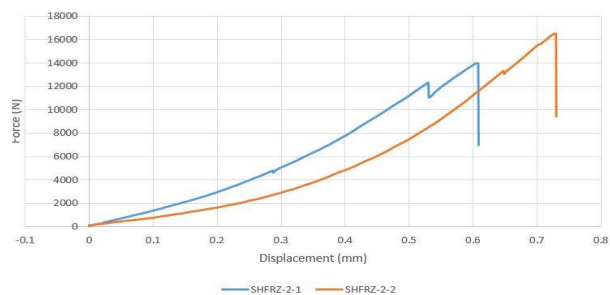
**Fig. 59** Force-displacement diagram of rivet joint under the effect of temperature of 80 degrees Celsius

شکل 59 نمودار نیرو-جابجایی اتصال پرچی تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد



**Fig. 60** The surface of rivet joints based on the zigzag arrangement of four rivets under the effect of temperature of 80 °C after failure

شکل 60 سطح اتصالات پرچی براساس آرایش زیگزاگ چهار پرچ تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد پس از شکست



**Fig. 61** Force-displacement diagram of composite joint under the effect of temperature of 80°C

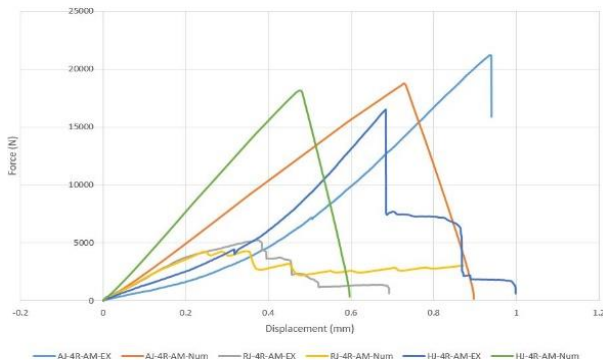
شکل 61 نمودار نیرو-جابجایی اتصال ترکیبی تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد

**جدول 22** نیروی بیشینه اتصالات چسبی، پرچی و ترکیبی تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد

**Table 22** The maximum strength of adhesive, riveted and combined joints under the effect of temperature of 80 degrees Celsius

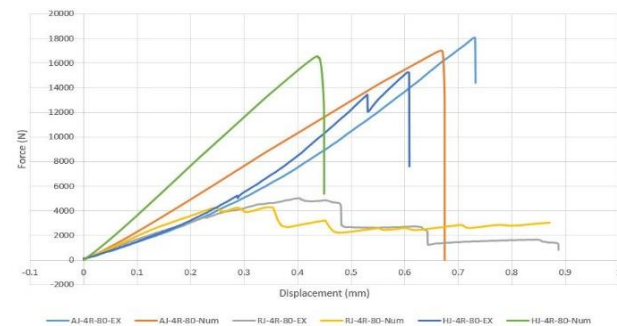
درصد اختلاف (%)	نیروی بیشینه تجربی (N)	نیروی بیشینه عددی (N)	نمونه
13.01	6051.96	5264.1	اتصال چسبی
8.51	1511.93	1640.6	اتصال پرچی
15.47	5826.03	6727.79	اتصال ترکیبی

در شکل‌های 66 و 67 و جدول‌های 23 و 24 به ترتیب نمودارها و مقادیر نیروی بیشینه نمونه اتصالات چسبی، پرچی و ترکیبی در نمونه‌های تجربی و عددی با آرایش زیگزاگ چهار پرچ نشان داده شده است. نام‌گذاری این نمونه‌ها همانند نمونه‌های استاندارد بوده با این تفاوت که پسوندی به صورت عددی و حروفی به منظور معرفی استفاده از آرایش چهار پرچ در طراحی ناحیه اتصال افزوده می‌شود.



**Fig. 66** Comparison of curves of experimental results and numerical simulation of joints based on zigzag arrangement of four rivets under the effect of ambient temperature

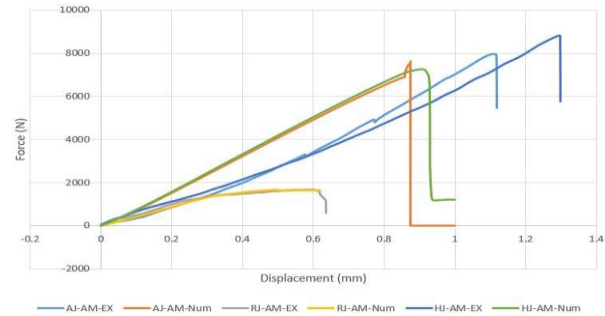
شکل 66 مقایسه منحنی‌های نتایج تجربی و شبیه‌سازی عددی اتصالات براساس آرایش زیگزاگ چهار پرچ تحت اثر دمای محیط.



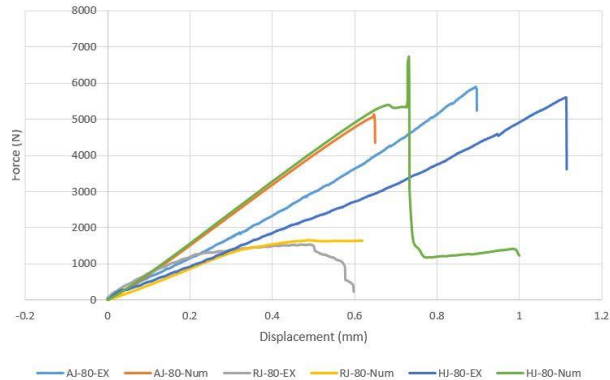
**Fig. 67** Comparing the curves of experimental results and numerical simulation of joints based on zigzag arrangement of four rivets under the effect of temperature of 80 degrees Celsius

شکل 67 مقایسه منحنی‌های نتایج تجربی و شبیه‌سازی عددی اتصالات بر اساس آرایش زیگزاگ چهار پرچ تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد.

در شکل‌های 64 و 65، نمودارهای مربوط به مقایسه صورت گرفته بین نتایج تجربی و عددی شبیه‌سازی شده اتصالات چسبی، پرچی و ترکیبی استاندارد تحت اثر دو دمای محیط و 80 درجه سانتی‌گراد نشان داده شده است. نام‌گذاری هریک از نمودارها به صورت حروف ابتدایی اتصال چسبی<sup>1</sup>، اتصال پرچی<sup>2</sup> و اتصال ترکیبی<sup>3</sup> با پسوندهایی که به ترتیب معرف دمای مورد نظر، دمای محیط<sup>4</sup> و دمای 80 درجه سانتی‌گراد و نیز مشخص نمودن نوع تجربی<sup>5</sup> و عددی<sup>6</sup> بودن منحنی می‌باشد. جدول 21 و 22، نیروی بیشینه نمونه اتصالات چسبی، پرچی و ترکیبی در حالت تجربی و عددی را نشان می‌دهد.



**Fig. 64** Comparison of curves of experimental results and numerical simulation of standard joints under the effect of ambient temperature  
شکل 64 مقایسه منحنی‌های نتایج تجربی و شبیه‌سازی عددی اتصالات استاندارد تحت اثر دمای محیط



**Fig. 65** Comparison of the curves of experimental results and numerical simulation of standard joints under the effect of temperature of 80 degrees Celsius

شکل 65 مقایسه منحنی‌های نتایج تجربی و شبیه‌سازی عددی اتصالات استاندارد تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد

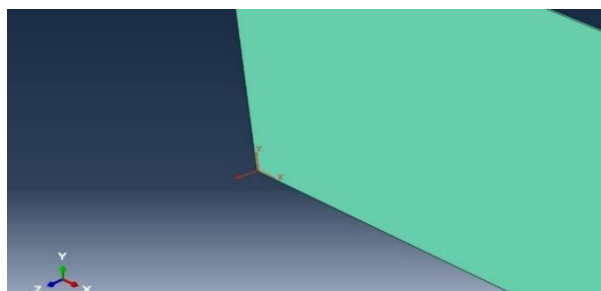
**جدول 21** نیروی بیشینه اتصالات چسبی، پرچی و ترکیبی تحت اثر دمای محیط  
**Table 21** The maximum strength of adhesive, riveted and combined joints under the effect of ambient temperature

درصد اختلاف (%)	نیروی بیشینه تجربی (N)	نیروی بیشینه عددی (N)	نمونه
3/4	7946.1	7604.2	اتصال چسبی
1.23	1620.65	1640.6	اتصال پرچی
17.03	8814.3	7312.94	اتصال ترکیبی

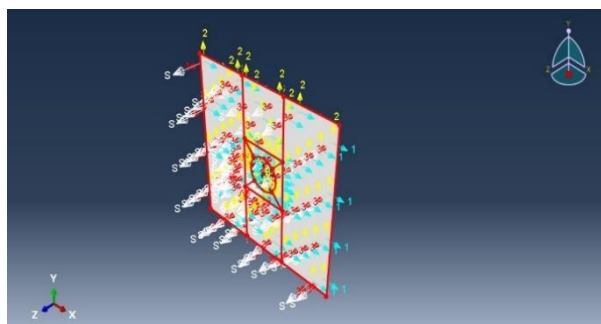
<sup>4</sup> Ambient  
<sup>5</sup> Experimental  
<sup>6</sup> Numerical

<sup>1</sup> Adhesive joint  
<sup>2</sup> Riveted joint  
<sup>3</sup> Hybrid joint

برای مشخص شدن نوع خروجی‌های استخراج شده از شبیه‌سازی عددی در شکل 68 (الف) مختصات تعریف شده برای یک تک لایه کامپوزیتی، (ب) مختصات معرفی شده برای لایه چسب در مدل‌های شبیه‌سازی شده اتصالات به نمایش در آمده است.



(الف - ا)



(ب - ب)

**Fig. 68** (a) Coordinates defined for a single composite layer, (b) Coordinates introduced for the adhesive layer in the simulated joint models.

شکل 68 (الف) مختصات تعریف شده برای یک تک لایه کامپوزیتی، (ب) مختصات معرفی شده برای لایه چسب در مدل‌های شبیه‌سازی شده اتصالات.

مطابق شکل 68 دستگاه مختصات  $(X, Y, Z)$  برای تک لایه کامپوزیتی و دستگاه مختصات  $(1, 2, 3)$  برای لایه چسب شبیه‌سازی شده در نظر گرفته شده است. محورهای دستگاه‌های مختصات تعریف شده برطبق نوشتار، از چپ به راست دو به دو با یکدیگر متناظرند و در یک راستا قرار دارند.

براساس دستگاه‌های مختصات تعریف شده مؤلفه تنش برشی در صفحه  $(1, 2)$  که متناظر صفحه  $(X, Y)$  می‌باشد، قرار دارد. پس از بررسی‌های صورت پذیرفته بر روی مدل‌های شبیه‌سازی شده اتصالات مشخص شد مقدار بیشینه هر یک از پارامترها (تقریبی) مربوط به نزدیک‌ترین لایه کامپوزیتی شبیه‌سازی شده به متصل‌کننده می‌باشد. زمان و محدوده انتخاب شده برای بررسی مقادیر تغییرات در تمامی مؤلفه‌های استخراج شده از مدل‌های شبیه‌سازی شده در محدوده الاستیک  $(Step\ Time=0.2)$  نمودارهای نیرو-جابجایی متناظر هر یک از اتصالات شبیه‌سازی شده می‌باشد. علت انتخاب ناحیه الاستیک این است که اتصال در آن، در محدوده ایمن خود قرار دارد (پیش از بروز هرگونه ترک) و بهینه‌سازی‌ها معمولاً در این محدوده از تغییرات مکانیکی اعمال می‌شود. در شکل 69 مسیر انتخاب شده جهت استخراج مؤلفه تنش برشی S12 از سطح تک لایه کامپوزیتی در ناحیه اتصال نشان داده شده است.

ناحیه سطح اتصال نشان داده شده در شکل 69، مربوط به اتصال چسبی استاندارد تحت اثر دمای محیط می‌باشد که به عنوان نماینده اتصالات شبیه‌سازی شده آورده شده است. علت انتخاب لبه متصل شونده در بخش

**جدول 23** نیروی بیشینه اتصالات چسبی، پرچی و ترکیبی براساس آرایش زیگزاگ چهار پرچ تحت اثر دمای محیط

**Table 23** The maximum strength of adhesive, riveted and combined joints based on the zigzag arrangement of four rivets under the effect of ambient temperature

نمونه	نیروی بیشینه عددی (N)	نیروی بیشینه تجربی (N)	درصد اختلاف (%)
اتصال چسبی	18559.7	19263.75	3.65
اتصال پرچی	4265.63	5231.2	18.45
اتصال ترکیبی	18104.6	17492.45	3.49

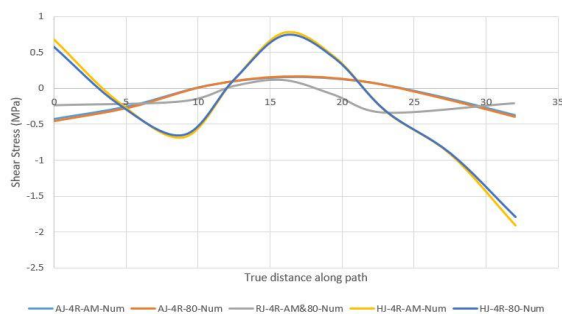
**جدول 24** نیروی بیشینه اتصالات چسبی، پرچی و ترکیبی براساس آرایش زیگزاگ چهار پرچ تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد.

**Table 24** The maximum strength of adhesive, riveted and combined joints based on the zigzag arrangement of four rivets under the effect of temperature of 80 degrees Celsius

نمونه	نیروی بیشینه عددی (N)	نیروی بیشینه تجربی (N)	درصد اختلاف (%)
اتصال چسبی	16940.5	18163.85	6.73
اتصال پرچی	4265.63	4879.85	12.58
اتصال ترکیبی	16552.9	15237.4	8.63

با توجه به نتایج بدست آمده از آزمون‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی، اتصال ترکیبی بیشینه بار و در نهایت استحکام بیشتری نسبت به دو اتصال چسبی و پرچی به صورت تکی از خود نشان می‌دهد. لذا این موضوع نشان‌دهنده اهمیت و اعتبار این اتصال نسبت به آن دو می‌باشد. همانطور که در جدول‌های 21، 22، 23 و 24 قابل مشاهده است، پس از شبیه‌سازی‌های انجام گرفته اختلافاتی میان بیشینه نیروی قابل تحمل اتصالات در بررسی تجربی و عددی مشهود است. این اختلاف در هر یک از اتصالات قابل بررسی می‌باشد. در اتصال چسبی (AJ یا AJ-4R) این میزان اختلاف می‌تواند ناشی از ناکافی بودن تعداد دانه‌بندی لایه چسب در شبیه‌سازی عددی باشد که با توجه به محدودیت سخت‌افزاری سیستم اجرای نرم‌افزار آباکوس، اجتناب‌ناپذیر بوده است. همچنین اختلافی که میان سایر عناصر مؤثر در افزایش استحکام اتصال چسبی در بررسی تجربی از جمله طول ناحیه اتصال، ضخامت لایه چسب و... باشد که با توجه به در دسترس نبودن قید و بند استاندارد به وجود آمده است. این نکته قابل ذکر می‌باشد که تفاضل‌های بیان شده کمتر از میزانی است که نتایج این آزمون‌ها را فاقد اعتبار نماید. در اتصال پرچی (RJ یا RJ-4R) یکی از دلایل ایجاد اختلاف میان پاسخ بیشینه نیروی قابل تحمل در بخش عددی و تجربی می‌تواند از نقطه‌نظر تعداد دانه‌بندی در تحلیل عددی و پیش‌نیروی که در هنگام اعمال پرچ در بررسی تجربی در نظر گرفته نشده است، باشد. مجموع دلایل فوق می‌تواند دلایل ایجاد اختلاف میان نتایج عددی و تجربی اتصال ترکیبی (HJ یا HJ-4R) باشد. با توجه به حجم وسیع و گسترده خروجی‌هایی که می‌توان از شبیه‌سازی‌های به دست آمده در نرم‌افزار المان محدود آباکوس استخراج نمود سعی شده تا خروجی‌های با اهمیت ویژه از شبیه‌سازی‌های انجام گرفته استخراج شود.

مختصات در نظر گرفته شده مؤلفه S22 معرف این پارامتر می‌باشد. با بررسی سطوح نواحی اتصال به طور مثال شکل 72 مشاهده می‌شود که تخریب در سطح ناحیه اتصال متصل شونده‌ها به علت کیفیت بالای قطعات ساخته شده به صورت تخریب الیاف سبک و سطحی می‌باشد، از همین رو جهت بررسی تغییرات مؤلفه تنش‌های پوست‌کنی سطح اتصال نزدیک‌ترین تک لایه کامپوزیتی به متصل‌کننده‌ها به عنوان محل بررسی انتخاب شده است. در شکل 73، مسیر انتخاب شده بر روی ناحیه اتصال متصل‌شونده کامپوزیتی جهت بررسی تغییرات تنش پوست‌کنی نشان داده شده است.

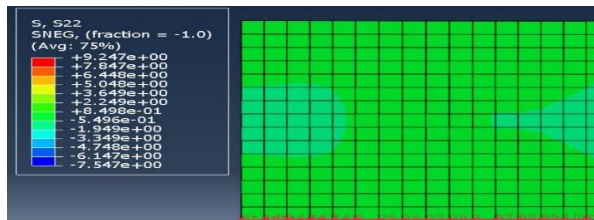


**Fig. 71** Diagrams related to the shear stress component S12 of the simulated samples based on the zigzag arrangement of four rivets  
 شکل 71 نمودارهای مربوط به مؤلفه تنش برشی S12 نمونه‌های شبیه‌سازی شده براساس آرایش زیگزگ چهار پرچ



**Fig. 72** Joint area of the experimental sample

شکل 72 ناحیه اتصال نمونه تجربی.



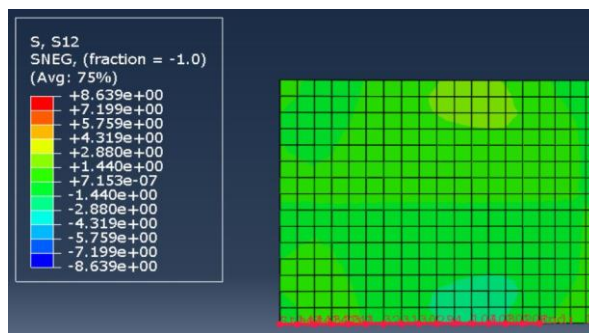
**Fig. 73** The path chosen to extract the S22 peeling stress component from the composite single layer surface in the joint area

شکل 73 مسیر انتخاب شده جهت استخراج مؤلفه تنش پوست‌کنی S22 از سطح تک لایه کامپوزیتی در ناحیه اتصال

ناحیه سطح اتصال نشان داده شده در شکل 73 مربوط به اتصال چسبی استاندارد تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد می‌باشد که به عنوان نماینده اتصالات شبیه‌سازی شده آورده شده است. در شکل 74 نمودارهای مربوط به مؤلفه تنش پوست‌کنی S22 اتصالات شبیه‌سازی شده استاندارد براساس نام‌گذاری معرفی شده در بخش خروجی بیشینه نیروی قابل تحمل هر یک از اتصالات نشان داده شده است.

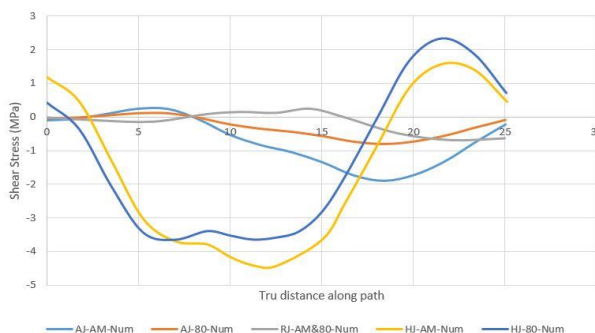
با مشاهده نمودارهای رسم شده در شکل 74 می‌توان نقاط بحرانی در فواصل مختلف از لبه متصل شونده‌ها و نوع تنش وارده با توجه به علامت مثبت (کششی) و منفی (فشاری) آن‌ها را مشخص نمود. در شکل 75 نمودار مربوط به مؤلفه تنش پوست‌کنی S22 اتصالات شبیه‌سازی شده براساس آرایش زیگزگ چهار پرچ بیان شده است.

طول ناحیه اتصال به عنوان مسیر بررسی تغییرات مؤلفه‌های تنش محاسبه شده در نرم‌افزار المان محدود آباکوس بیشینه بودن مقادیر این مؤلفه‌ها در این ناحیه از متصل شونده‌ها می‌باشد. در شکل 70 نمودارهای مربوط به مؤلفه تنش برشی S12 اتصالات شبیه‌سازی شده استاندارد براساس نام‌گذاری معرفی شده در بخش خروجی بیشینه نیروی قابل تحمل هر یک از اتصالات نشان داده شده است.



**Fig. 69** The path chosen to extract the S12 shear stress component from the composite single layer surface in the joint area

شکل 69 مسیر انتخاب شده جهت استخراج مؤلفه تنش برشی S12 از سطح تک لایه کامپوزیتی در ناحیه اتصال

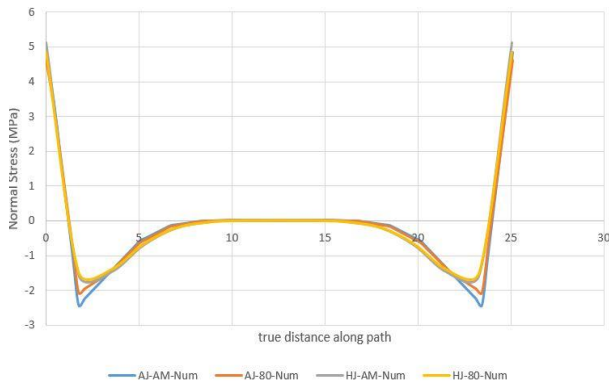


**Fig. 70** Diagrams related to shear stress component S12 of simulated joints

شکل 70 نمودارهای مربوط به مؤلفه تنش برشی S12 اتصالات شبیه‌سازی شده

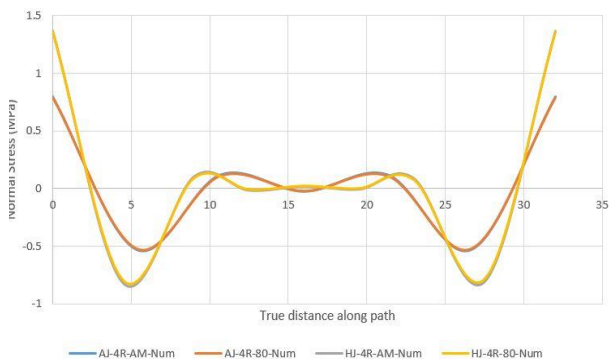
همانطور که در شکل‌های 69 و 70 مشخص است، محدوده در نظر گرفته شده برای بررسی تغییرات مؤلفه تنش برشی از لبه آزاد تک لایه کامپوزیتی به سمت انتهای داخلی لبه سطح ناحیه اتصال متصل شونده‌ها می‌باشد. با مشاهده نمودارهای شکل 70 می‌توان تفسیری از نوع مؤلفه تنش‌های برشی وارده بر هر یک از قسمت‌های سطح ناحیه اتصال متصل شونده‌ها داشت به طوری که مقادیر منفی مؤلفه‌های تنش نشان‌دهنده نوع فشاری آن بوده و مقادیر مثبت حکایت از کششی بودن این مؤلفه‌ها در نقطه اثر متناظرشان بر روی سطح اتصال دارند. در شکل 71 نمودارهای مربوط به مؤلفه تنش برشی S12 نمونه‌های شبیه‌سازی شده براساس آرایش زیگزگ چهار پرچ نشان داده شده است.

همانطور که در شکل 71 قابل مشاهده است، نمودارهای متناظر هم (اتصالات مشابه) اختلافات ناچیزی دارند اما این نکته به طور ثابت رعایت شده است که مقادیر مؤلفه تنش در هر دو شکل 70 و 71 برای اتصالات در دمای محیط بیشتر از مقادیر در فواصل در نظر گرفته شده از لبه متصل شونده‌های کامپوزیتی متناظر در دمای 80 درجه سانتی‌گراد می‌باشد. یکی دیگر از خروجی‌های مهم، تنش پوست‌کنی می‌باشد که با توجه به دستگاه‌های



**Fig. 77** Diagrams of changes in normal stress component S33 at the edge of adhesive layers of simulated standard joints

شکل 77 نمودارهای تغییرات مؤلفه تنش نرمال S33 در لبه لایه‌های چسب اتصالات استاندارد شبیه‌سازی شده



**Fig. 78** Diagrams related to the changes in the normal stress component S33 in the adhesion layer of simulated joints based on the zigzag arrangement of four rivets.

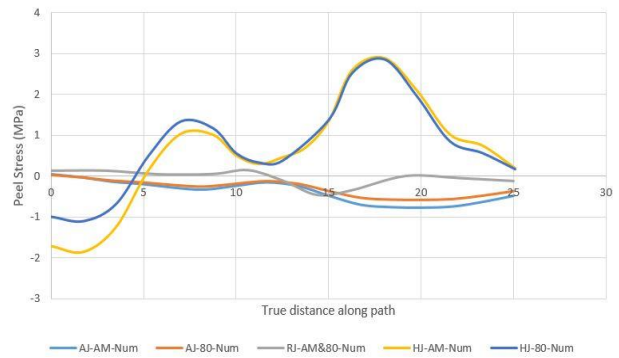
شکل 78 نمودارهای مربوط به تغییرات مؤلفه تنش نرمال S33 در لایه چسب اتصالات شبیه‌سازی شده براساس آرایش زیگزاگ چهار پرچ

پس از بررسی و تجزیه و تحلیل صورت گرفته بر روی نمودارهای مربوط به مؤلفه‌های تنش S12، S22 که از سطح ناحیه اتصال نزدیک‌ترین تک لایه متصل‌شونده کامپوزیتی شبیه‌سازی شده نسبت به متصل‌کننده استخراج شده است و همچنین مؤلفه تنش S33 که مربوط به بررسی صورت گرفته از لایه چسب مدل شده می‌باشد، مشخص شد که تمامی مؤلفه‌های تنش مورد بررسی در نمونه‌های تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد نسبت به نمونه‌های تحت اثر دمای محیط با توجه به کاهش بیشینه نیروهای قابل تحمل، کاهش پیدا کرده‌اند.

**20- نتیجه‌گیری**

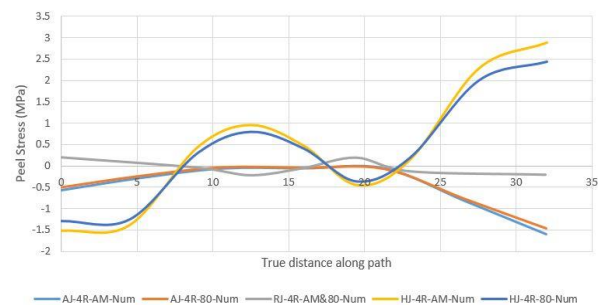
در این مقاله به بررسی تجربی و عددی اثر شرایط محیطی دمایی بر استحکام کششی اتصالات چسبی، پرچی و ترکیبی کامپوزیت‌های شیشه/اپوکسی پرداخته شد. نتایج حاکی از آن است که:

- 1- در آنالیز صورت گرفته در نرم‌افزار طراحی آزمایش مینی‌تب براساس روش تاگوچی، مشخص شد که بیشترین اثر در استحکام اتصال چسبی و ترکیبی مربوط به تغییرات ضخامت لایه چسب می‌باشد. ضخامت‌های در نظر گرفته شده برابر 0.13 و 0.26 میلی‌متر می‌باشد که در اتصال چسبی نمونه دارای ضخامت لایه چسب 0.26 میلی‌متر به عنوان نمونه بهینه و نیز در



**Fig. 74** S22 Peeling Stress Component Diagrams of Standard Simulated Joints

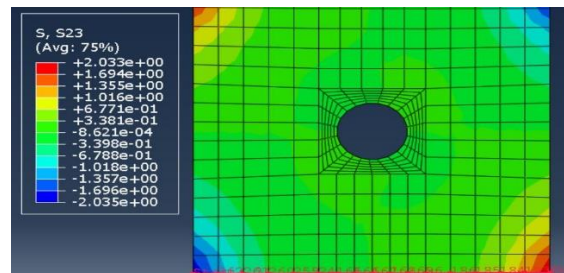
شکل 74 نمودارهای مربوط به مؤلفه تنش پوست‌کنی S22 اتصالات شبیه‌سازی شده استاندارد



**Fig. 75** Diagram related to the peeling stress component S22 of the simulated joints based on the zigzag arrangement of four rivets

شکل 75 نمودار مربوط به مؤلفه تنش پوست‌کنی S22 اتصالات شبیه‌سازی شده براساس آرایش زیگزاگ چهار پرچ

مؤلفه تنش نرمال S33 هم یکی از پارامترهای مهم و قابل بررسی می‌باشد. از همین رو تغییرات تنش نرمال در مسیر نشان داده شده در شکل 76 مربوط به لایه چسب مدل اتصالات شبیه‌سازی شده استخراج نموده‌ایم. در شکل 77 نمودارهای تغییرات تنش نرمال در لبه لایه‌های چسب اتصالات استاندارد شبیه‌سازی شده قابل مشاهده است. با مشاهده و بررسی نمودارهای رسم شده در شکل 77 به راحتی می‌توان نقاط بحرانی لایه چسب از نقطه‌نظر مقادیر بیشینه مؤلفه تنش نرمال در سرتاسر طول ناحیه اتصال و مکان متناظر آن‌ها را شناسایی کرد و در جهت کنترل و بهینه‌سازی آن‌ها در پژوهش‌های آتی تلاش نمود. در شکل 78 نمودارهای مربوط به تغییرات مؤلفه تنش نرمال S33 در لایه چسب اتصالات شبیه‌سازی شده براساس آرایش زیگزاگ چهار پرچ قابل مشاهده می‌باشد.



**Fig. 76** The path chosen to extract the normal stress component S33 from the surface of the adhesive layer

شکل 76 مسیر انتخاب شده جهت استخراج مؤلفه تنش نرمال S33 از سطح لایه چسب

10.94 و 11.18 کاهش را نسبت به مقادیر بدست آمده در دمای محیط از خود نشان می‌دهند. میزان انحراف پارامترهای یاد شده در اتصال ترکیبی با اعمال چهار پرچ با آرایش زیگزاگ پس از اعمال دمای 80 درجه سانتی‌گراد نسبت به دمای محیط به ترتیب برابر 12.89 و 4.99 درصد به صورت کاهشی از خود نشان داده است.

6- در طی بررسی‌های صورت گرفته مشخص شد که در اتصالات جدید تعریف شده براساس نمونه‌های استاندارد، با طی مراحل یکسان برای هر دو حالت استاندارد و تعریف شده (آرایش زیگزاگ 4 پرچ در ناحیه اتصال)، کمترین میزان افت خواص مابین حالت بررسی شده در دمای محیط و 80 درجه سانتی‌گراد را در نمونه‌هایی که براساس آرایش زیگزاگ چهار پرچ در راستای پهنای ناحیه اتصال ساخته شده است را شاهد هستیم.

7- پس از بررسی و محاسبات انجام شده بر روی داده‌های خروجی آزمون انرژی شکست در مود اول (DCB) مشخص شد مقدار انرژی شکست چسب و رزین در مود اول پس از اعمال شرایط دمایی 80 درجه سانتی‌گراد به مدت 4 ساعت به ترتیب 45.74 درصد کاهش و 11.67 درصد افزایش را از خود نشان داده است.

8- با انجام محاسبات و مقایسه بین خروجی‌های آزمون انرژی شکست در مود دوم (ENF) مشخص شده که انرژی شکست چسب و رزین در مود دوم پس از اعمال شرایط دمایی 80 درجه سانتی‌گراد به مدت 4 ساعت به ترتیب 34.75 درصد کاهش و 19.9 درصد افزایش را از خود نشان داده‌اند.

9- پس از انجام شبیه‌سازی عددی اتصالات چسبی، پرچی و ترکیبی در نرم‌افزار المان محدود آباکوس و ایجاد خروجی ماکزیمم نیروی لقیل تحمل و مقایسه آن با مقدار همین پارامتر در نمونه‌های تجربی و محاسبه اختلاف بین آن‌ها مشخص شد که مدل‌های شبیه‌سازی شده قابل اعتماد می‌باشند.

10- پس از انجام سیر این تحقیق مشخص شد که بیشترین تأثیر در ایجاد یک اتصال ترکیبی (چسبی-پرچی) مستحکم وابسته به تغییرات ضخامت لایه چسب می‌باشد و پس از آن آماده‌سازی سطح بیشترین اثر را خواهد داشت.

11- پس از اعمال دما مورد نظر در اتصالات چسبی، پرچی و ترکیبی مشخص شد که در تمامی موارد شاهد کاهش استحکام هستیم اما این کاهش در هر کدام از اتصالات به صورت جداگانه قابل بررسی است. در اتصال چسبی و ترکیبی نشان می‌دهد که چسب اعمال شده در ناحیه اتصال پس از طی کردن سیکل پخت و پس پخت به حداکثر توان خود رسیده و پس از آن دچار افت خواص می‌شود که با توجه به نتایج آزمون کشش چسب منطقی به نظر می‌رسد، اما در اتصال پرچی با توجه به افت استحکام که به میزان ناچیز (کمتر از 15 درصد) رخ داده است و بر طبق این نکته که پیشتر اعلام شد، خواص آلومینیوم به کار برده شده در پرچ در دماهای بالا تغییراتی را از خود بروز می‌دهند، می‌توان نتیجه گرفت که مقادیر بدست آمده ثابت و بدون تغییر بوده‌اند.

## 21- مراجع

- [1] Dadian, R. and Zulfiqari, A. "Improving the strength quality of composite-steel edge joint by grading the joint area using carbon and glass fibers and also creating a possible conflict using the reverse step method," Composite science and technology, Vol. 6, No. 3, 393-400, 2019.
- [2] Morgado, M. A., Carbas, R. J. C., Dos Santos, D. G., & Da Silva, L. F. M. "Strength of CFRP joints reinforced with adhesive

اتصال ترکیبی نمونه دارای ضخامت لایه چسب 0.13 میلی‌متر به عنوان نمونه بهینه شناخته شدند.

2- در بررسی‌های صورت گرفته در آزمون کشش نمونه دامبل چسب آکسون در دمای محیط و دمای 80 درجه سانتی‌گراد مشخص شد که، مدول الاستیک و استحکام نهایی نمونه‌های تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد به ترتیب 18.93 و 11.19 درصد کاهش نسبت به مقدار بدست آمده از نمونه‌های متأثر از دمای محیط را از خود نشان می‌دهد. این کاهش خواص نشان از آن دارد که پس از پس پخت انجام گرفته شده بر روی چسب اعمال دمای 80 درجه سانتی‌گراد به مدت زمان 4 ساعت در دامنه تضعیف ساختار پلیمری چسب اثرگذار بوده است.

3- در بررسی انجام گرفته در تعیین خواص چندلایه کامپوزیتی (شیشه/اپوکسی) مشخص شد که مدول الاستیک و استحکام نهایی آن پس از اعمال دمای 80 درجه سانتی‌گراد به مدت 4 ساعت نسبت به دمای محیط به ترتیب به میزان 4.91 و 9 درصد افزایش را از خود نشان می‌دهد. این افزایش را می‌توان از دو منظر مورد بررسی قرار داد اول آنکه می‌توان نتیجه گرفت که اعمال دمای 80 درجه سانتی‌گراد به مدت 4 ساعت هیچ اثر تخریبی بر روی الیاف تشکیل‌دهنده چندلایه نمی‌گذارد و دوم آنکه پس از انجام عملیات پس‌پختی که بر روی نمونه‌های چندلایه کامپوزیتی صورت گرفته است، دمای اعمال شده، 80 درجه سانتی‌گراد به مدت 4 ساعت در راستای شکل‌گیری هرچه بهتر زنجیره‌های پلیمری رزین مورد استفاده در این تحقیق عمل نموده است.

4- برطبق مقایسه انجام شده بر روی بیشترین نیروی قابل تحمل و استحکام برشی اتصالات چسبی، پرچی و ترکیبی (استاندارد) در دو دمای محیط و دمای 80 درجه سانتی‌گراد مشخص شد که، در اتصال چسبی بهینه این مقادیر پس از اعمال دمای 80 درجه سانتی‌گراد به مدت 4 ساعت به ترتیب به میزان 23.8 و 27.61 درصد کاهش را نسبت به مقادیر بدست آمده برای این اتصال در دمای محیط را از خود نشان می‌دهد همچنین مقدار پارامترهای یاد شده در اتصال پرچی پس از اعمال دمای 80 درجه سانتی‌گراد به مدت 4 ساعت، به میزان 3.86 و 11.98 درصد کاهش را در مقابل مقادیر بدست آمده در شرایط دمای محیط از خود نشان دادند. در نهایت در اتصال ترکیبی بهینه مقادیر بیشترین نیروی قابل تحمل، استحکام برشی اتصالات پس از اعمال دمای 80 درجه سانتی‌گراد به مدت 4 ساعت به ترتیب 31.92 و 34.68 درصد کاهش نسبت به مقادیر بدست آمده در دمای محیط را از خود نشان می‌دهد.

5- پس از انجام آزمون‌های کشش بر روی اتصالات چسبی، پرچی و ترکیبی در حالت استاندارد آن‌ها، در این تحقیق اقدام به تعریف ساختار اتصال بر مبنای اعمال چهار پرچ با آرایش زیگزاگ در پهنای ناحیه اتصال نمودیم و نمونه‌هایی جهت آزمون کشش در دو شرایط دمای محیط و 80 درجه سانتی‌گراد مهیا شد. هدف از این کار ایجاد یک بررسی و مقایسه میان حداکثر نیروی قابل تحمل، استحکامات برشی اتصالات در حالت استاندارد و حالت ایجاد شده متأثر از آرایش زیگزاگ پرچ در راستای پهنای ناحیه اتصال بوده است. به همین منظور پارامترهای حداکثر نیروی قابل تحمل، استحکام برشی در اتصال چسبی در حالت تعریف شده در دمای 80 درجه سانتی‌گراد 5.7 و 8.16 درصد کاهش را نسبت به مقادیر بدست آمده در دمای محیط از خود نشان می‌دهد، همچنین در اتصال پرچی با اعمال چهار پرچ با آرایش زیگزاگ در راستای پهنای ناحیه اتصال مقادیر حداکثر نیروی قابل تحمل، استحکام برشی بدست آمده از نمونه‌های تحت اثر دمای 80 درجه سانتی‌گراد به ترتیب

- layers". *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 97, 102475, 2020.
- [3] Fernández-Cañadas, L. M., Ivañez, I., Sanchez-Saez, S., & Barbero, E. J. "Effect of adhesive thickness and overlap on the behavior of composite single-lap joints". *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, Vol. 28, No. 11, 1111-1120, 2021.
- [4] Sonat, E., & Özeriç, S. "Failure behavior of scarf-bonded woven fabric CFRP laminates". *Composite Structures*, 258, 113205, 2021.
- [5] Hage, J. E., Challita, G., Capelle, J., Gilgert, J., & Alhussein, A. "Influence of short-time thermal ageing on the behaviour of double lap composite adhesively bonded joints". *SN Applied Sciences*, 2, 1-12, 2020.
- [6] Dadian, A., & Rahnama, S. "Experimental and numerical study of optimum functionally graded Aluminum/GFRP adhesive lap shear joints using Epoxy/CTBN". *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 107, 102854, 2021.
- [7] Li, W., Guo, S., Giannopoulos, I. K., He, S., & Liu, Y. "Strength enhancement of bonded composite laminate joints reinforced by composite Pins". *Composite Structures*, 236, 111916, 2020.
- [8] Li, X., Cheng, X., Guo, X., Liu, S., & Wang, Z. "Tensile properties of a hybrid bonded/bolted joint: parameter study". *Composite Structures*, 245, 112329, 2020.
- [9] Farahani & Safari. "Studying the effects of sanding process on the strength of adhesive joints". *Amirkabir Mechanical Engineering Journal*. Vol. 50, No. 3, 619-626, 2018.
- [10] Yang, G., Yang, T., Yuan, W., & Du, Y. "The influence of surface treatment on the tensile properties of carbon fiber-reinforced epoxy composites-bonded joints". *Composites Part B: Engineering*, 160, 446-456, 2019.
- [11] Khoran, M., Amirabadi, Safari, H., H &, Habibullah. "Investigating the drilling of composites with a drill". *mechanical engineering*. Vol. 24, No. 5, 69-78, 2015.
- [12] Ali Arefi Asgoi/Ali Davar. "Optimizing the width, thickness and cell size of carbon/epoxy mesh composite plate in order to increase flexural strength. Master's thesis", *Mechanical Engineering (Composite Materials), Research Institute of Materials and Manufacturing Technologies, Malik Ashtar University of Technology*, 1400, 2021.
- [13] Bagci, M. "Determination of solid particle erosion with Taguchi optimization approach of hybrid composite systems". *Tribology International*, 94, 336-345, 2016.
- [14] Ezzine, M. C., Amiri, A., Tarfaoui, M., & Madani, K. "Damage of bonded, riveted and hybrid (bonded/riveted) joints, Experimental and numerical study using CZM and XFEM methods". *Advances in aircraft and spacecraft science*, Vol. 5, No. 5, 595, 2016.
- [15] ASTM. ASTM D638-14: "Standard test method for tensile properties of plastics". ASTM, 2014.