



Experimental Investigation of Adhesively Bonded Composite–Composite Joints under Varied Loading Conditions Using U Shaped Arcan Specimens

Amirhossein Rabiei¹ , Saeed Rahnama^{*2} , Amir Kariman Moghadam³

1. Ph.D. Student, Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran, Birjand, Iran

2. Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran, Birjand, Iran

3. Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Khorasan Institute of Higher Education, Mashhad, Iran

Abstract

This study presents a comprehensive, APA-style summary of an experimental investigation into modified Arcan U-shaped CFRP joints bonded with epoxy and polyurethane adhesives. The objective is to evaluate how loading angle and mode influence joint strength, failure mechanisms, and ultimate performance, with the goal of informing design practices for adhesive-bonded CFRP joints. The methodology entails preparing CFRP specimens with modified Arcan fixtures, subjecting them to loading angles of 0°, 45°, 60°, and 90°, and imposing mode-specific loading conditions (shear, mixed shear–tension, and tension). Key findings indicate systematic variation of strength and failure modes with loading angle, with distinct trends for adhesive/cohesive failures versus fiber-related failures. The results underscore the critical role of loading geometry in governing interfacial behavior, highlight the relevance of Arcan-based testing for evaluating bonded joints, and discuss implications for structural design, safety margins, and future research directions. Limitations include the controlled laboratory setting and specimen-scale constraints, suggesting caution when extrapolating to full-scale structures. The study advances understanding of CFRP joint performance under varied loading and offers practical guidance for engineers designing adhesive-bonded CFRP assemblies.

Keywords

CFRP
Arcan test
Bonded joints
Adhesive
surface treatment
Mode I, Mode II

Received: 19.07.2025

Revised: 27.08.2025

Accepted: 22.09.2025

*Corresponding Author

Saeed Rahnama

Email

srahnama@birjand.ac.ir

1- Introduction

Carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) laminates are increasingly used in aerospace, automotive, and civil structures due to high strength-to-weight ratios and tailorability. Bonded joints, which rely on adhesive interfaces to transfer loads between CFRP members, offer design flexibility but are sensitive to loading configuration, environmental conditions, and surface preparation. The Arcan test configuration enables quasi-static characterization of bonded joints under combined normal and shear stresses, facilitating a more complete understanding

of joint behavior than simple pure-shear or pure-tension tests.

The article investigates how loading angle and corresponding load modes affect the mechanical performance and failure modes of a modified Arcan U-shaped CFRP joint. Specifically, the study seeks to (1) quantify strength variations across loading angles (0°, 45°, 60°, 90°) and load modes (shear, mixed shear–tension, tension), (2) identify dominant failure mechanisms (adhesive vs. cohesive vs. fiber-related), and (3) discuss

How to Cite this Article:

[1] A. Rabiei, S. Rahnama, and A. Kariman Moghadam, "Experimental investigation of adhesively bonded composite–composite joints under varied loading conditions using U shaped Arcan specimens," *Journal of Science and Technology in Mechanical Engineering*, Vol. 4, No. 2, pp. 139–151, 2026. [Online]. Available: <https://doi.org/10.22034/stme.2025.535605.1148> (in Persian)



implications for adhesive selection, surface treatment, and joint geometry in CFRP structures. As shown in Figure 1, the overall test schematic illustrates the typical Arcan setup used to induce mixed-mode loading.

Previous research demonstrates that bond line strength and failure mode depend on stress state at the joint, with higher normal stresses promoting adhesive/cohesive failures and higher shear components influencing fiber tearing or interlaminar debonding. Arcan-based approaches have been shown to capture the interaction of shear and normal stresses, but systematic comparisons across multiple loading angles and joint configurations remain limited. The article situates its contribution within this context by systematically varying loading angles and documenting corresponding mechanical responses and failure narratives.

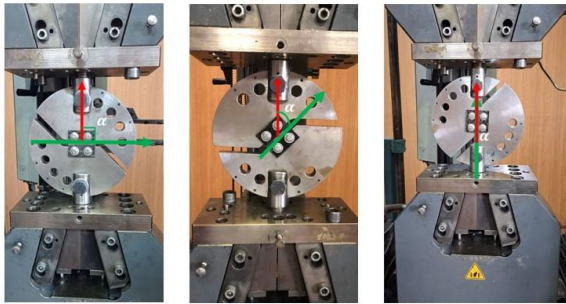


Figure 1: Conceptual schematic of the Arcan joint test setup for CFRP bonding, illustrating the mixed-mode loading path and boundary conditions



Figure 2: Steps in producing U-shaped adhesives

2- Research Methods

- **Joint geometry:** Modified Arcan U-shaped CFRP joints were fabricated by bonding CFRP laminates with selected adhesives. Surface preparation included standard cleaning and sanding to enhance adhesion, followed by curing per manufacturer guidelines. As shown in Figure 2
- **Materials:** CFRP laminates with specified ply layups were used. Two adhesive systems were examined: epoxy-based and polyurethane-based formulations, each with distinct modulus, toughness, and environmental durability characteristics. As shown in Table 1

Table 1: Mechanical properties of adhesives

$\nu_{12}=\nu_{13}=\nu_{23}$	E_{33} (GPa)	E_{22} (GPa)	E_{11} (GPa)
0.29	7.43	7.43	94.5

- **Surface treatment:** Surface pretreatment protocols (e.g., sanding grit, primer if applicable) were applied to promote consistent bonding quality across specimens.
- **Loading angles:** Specimens were tested at 0° , 45° , 60° , and 90° , representing a progression from predominantly shear (0°) to predominantly normal/tensile (90°) loading.
- **Loading modes:** Tests encompassed pure shear, mixed shear–tension, and pure tension, enabling the assessment of how mode composition interacts with angle to influence strength and failure. As shown in Table 2
- **Data acquisition:** Load-displacement data were recorded throughout each test, alongside observations of failure initiation and propagation. Key metrics included ultimate joint strength, stiffness, and failure mode categorization.

Table 2: Arcan Test Loading modes

Loading modes	Sample naming	Sample number
Pure shear	S	S1
		S2
		S3
Mixed shear-tension	ST	ST1
		ST2
		ST3
Pure tension	T	T1
		T2
		T3

3- Results

- 0° loading (shear-dominated)
 - Strength: Moderate ultimate strength observed, with failure modes leaning toward interfacial decohesion and potential fiber-related initiation depending on adhesive system.
 - Failure modes: Predominantly adhesive or adhesive-cohesive in nature, with some specimens exhibiting fiber surface damage adjacent to the bondline.
- 45° loading
 - Strength: Notable changes in strength relative to 0°, with the mixed-mode loading introducing complex stress states at the bondline.
 - Failure modes: Mixed characteristics, with both adhesive/cohesive failures and occasional fiber-related damage.
- 60° loading
 - Strength: Further evolution of strength depending on adhesive system and laminate orientation; both adhesives showed sensitivity to angled loading.
 - Failure modes: A shift toward more cohesive failures within the adhesive or fiber-related mechanisms in certain configurations.
- 90° loading (tension-dominated)

- Strength: Distinct behavior with higher normal stress at the bondline; failure often initiated at the adhesive–substrate interface or within the adhesive layer itself.

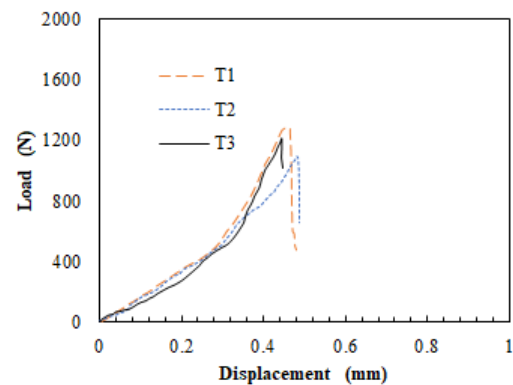
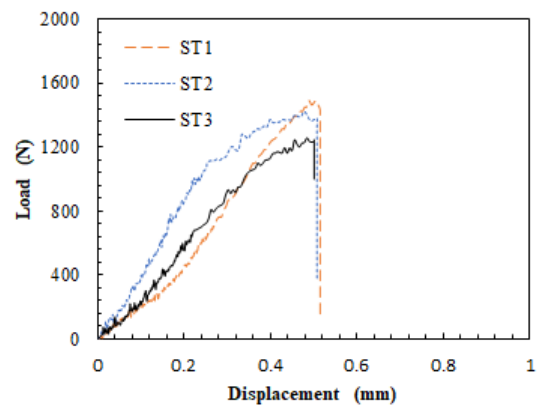
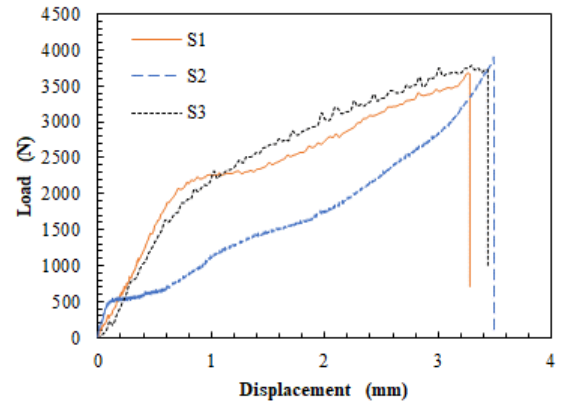


Figure 3: Force-displacement curves with different loading modes

Failure modes: Predominantly adhesive cohesive failures or interfacial debonding, with occasional fiber tearing in the CFRP laminate if the bond was particularly weak.

4- Conclusion

- Loading angle and mode significantly influence the strength and failure mode of modified Arcan CFRP joints. Higher angles tend to shift failure toward adhesive-related mechanisms, while certain angles in conjunction with specific adhesives can produce different failure pathways, including fiber-related damage.
- The Arcan test configuration proves effective for revealing the interplay between shear and normal stresses in bonded CFRP joints, informing material selection, joint geometry, and bonding processes.
- Future research should explore a broader range of adhesives, surface treatments, and CFRP layups to generalize findings across more structural configurations.
- Investigations under environmental conditions (temperature, humidity) and long-term aging would provide insight into durability and service life.
- Finite element modeling of the Arcan joint under these loading angles could complement experimental results and help predict behavior for complex geometries.




Table 3: Stress values obtained from the Arcan test

Loading modes	Sample number	Stress (MPa)	Standard deviation (MPa)	Average Stress (MPa)
Pure shear	S1	8.38		
	S2	8.94	0.29	8.60
	S3	8.50		
Mixed shear-tension	ST1	3.41		
	ST2	3.16	0.28	3.41
	ST3	2.85		
Pure tension	T1	2.96		
	T2	2.54	0.21	2.75
	T3	2.76		

5- References

- [1] R. Ciardiello, L. Greco, M. Miranda, F. Di Sciullo, and L. Goglio, "Experimental investigation on adhesively bonded U-shaped metallic joints using the Arcan test," *Journal of Advanced Joining Processes*, Vol. 1, p. 100010, Mar. 2020, doi: [10.1016/j.jajp.2020.100010](https://doi.org/10.1016/j.jajp.2020.100010)
- [2] A. Benelli, R. Ciardiello, C. Boursier Niutta, and L. Goglio, "Experimental and numerical characterization of adhesive joints with composite substrates by means of the Arcan test," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 122, p. 103321, Feb. 2023, doi: [10.1016/j.ijadhadh.2022.103321](https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2022.103321)
- [3] E. Ç. Kavdir and M. D. Aydin, "Experimental and numerical study on the mechanical behaviours of adhesively bonded joints," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 184, p. 107725, Mar. 2020, doi: [10.1016/j.compositesb.2019.107725](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107725)

بررسی تجربی رفتار اتصال چسبی کامپوزیت-کامپوزیت تحت شرایط بارگذاری مختلف با استفاده از نمونه U شکل آرکان

امیر حسین ربیعی^۱ , سعید رهنما^{۲*} , امیر کریمان مقدم^۳ 

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

۳- استادیار، مؤسسه آموزش عالی غیرانتفاعی خراسان، مشهد، ایران

چکیده

کلمات کلیدی

کامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقویت‌شده با الیاف کربن
اتصال چسبی
آزمون آرکان
سطح شکست
شرایط بارگذاری

در این پژوهش، رفتار مکانیکی اتصالات چسبی کامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقویت‌شده با الیاف کربن (CFRP) تحت شرایط مختلف بارگذاری با استفاده از نمونه اصلاح‌شده آرکان با هندسه U شکل مورد بررسی قرار گرفت. تک‌لایه‌های CFRP با آرایش لایه‌ای [۹۰/۰] ساخته شده و با استفاده از چسب اپوکسی دوجزئی به یکدیگر متصل شدند. آزمایش‌ها در سه زاویه بارگذاری صفر درجه (برش خالص)، ۴۵ درجه (ترکیبی برش-کشش) و ۹۰ درجه (کشش خالص) انجام شد. پاسخ‌های نیرو-جاب‌جایی، مقادیر بیشینه تنش، و مکانیزم‌های شکست مورد تحلیل قرار گرفتند. نتایج نشان داد که بالاترین استحکام اتصال با مقدار میانگین ۸/۶۰ درصد در حالت برش خالص رخ می‌دهد که ناشی از وقوع شکست الیاف در ناحیه چسبندگی است. در مقابل، در حالت کشش خالص تنها شکست چسبی مشاهده شد و اتصال کمترین مقاومت را با مقدار میانگین ۲/۷۵ درصد از خود نشان داد. تغییر شرایط بارگذاری از برش به کشش منجر به کاهش بیش از ۶۰ درصدی در استحکام اتصال گردید. طراحی نمونه اصلاح‌شده آرکان به گونه‌ای است که شکست به ناحیه چسب محدود شده و هیچ‌گونه آسیب یا شکست در صفحات CFRP مشاهده نشد. این روش می‌تواند به عنوان روشی کارآمد برای ارزیابی دقیق عملکرد اتصالات چسبی در سازه‌های کامپوزیتی مورد استفاده قرار گیرد و یافته‌های این تحقیق می‌تواند در بهینه‌سازی اتصالات چسبی در صنایع پیشرفته‌ای نظیر هوافضا و خودروسازی کاربرد داشته باشد.

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۴/۲۸

بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۶/۰۵

پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۶/۳۱

*نویسنده مسئول

سعید رهنما

ایمیل

srahnama@birjand.ac.ir

۱- مقدمه

پانل‌های بدنه بهره می‌برد. در مهندسی عمران مقاوم‌سازی و بهسازی سازه‌ها متکی بر کامپوزیت‌های الیاف کربن است که دوام و مقاومت لرزه‌ای را افزایش می‌دهند [۲].

سازه‌های سبک وزنی که بیشتر در صنعت استفاده می‌شوند، از جنس کامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقویت‌شده با الیاف کربن، آلیاژهای سبک یا ترکیبی از آنها هستند که معمولاً با چسب‌های ساختاری اپوکسی پرمصرف به یکدیگر متصل می‌شوند. امروزه، اتصالات چسبی به طور فزاینده‌ای برای مونتاژ سازه‌ها در تمام

کامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقویت‌شده با الیاف کربن (CFRP) به دلیل نسبت استحکام به وزن و سفتی عالی، به طور گسترده در صنایع هوافضا، خودروسازی و مهندسی عمران استفاده می‌شوند [۱]. پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف کربن در صنایع هوافضا، به طراحی سبک‌وزن قطعات هواپیما مانند بدنه و بال‌ها کمک می‌کند و موجب بهبود بازدهی سوخت و عملکرد می‌شود. صنعت خودروسازی با کاهش وزن خودرو، افزایش بازدهی سوخت و تقویت ایمنی از طریق استفاده از کامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقویت‌شده با الیاف کربن در شاسی و

¹ Carbon Fiber Reinforced Polymer

How to Cite this Article:

[1] A. Rabiei, S. Rahnema, and A. Kariman Moghadam, "Experimental investigation of adhesively bonded composite-composite joints under varied loading conditions using U shaped Arcan specimens," *Journal of Science and Technology in Mechanical Engineering*, vol. 4, no. 2, pp. 139-151, 2026. [Online]. Available: <https://doi.org/10.22034/stme.2025.535605.1148> (in Persian)



می‌توان اتصال را تحت بار برشی ترکیب شده با کشش یا فشار با استفاده از دستگاه آزمایش کشش معمولی قرارداد [۸]. کریک‌کدک^۴ و همکارانش از نمونه آزمون آرکان اصلاح شده از جنس فولاد برای بررسی رفتار اتصال چسبی در شرایط بارگذاری برشی - کششی و برشی-فشاری استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان دهنده بررسی مناسب رفتار اتصال چسبی با نمونه پیشنهادی بوده است [۹]. آلفانسو^۵ و همکارانش از نمونه اصلاح شده آزمون آرکان برای بررسی رفتار اتصال چسبی فلز-فلز و کامپوزیت - کامپوزیت در شرایط مختلف بارگذاری استفاده کردند. آن‌ها همچنین تأثیر پارامترهای مهم بر رفتار اتصال چسبی، مانند شرایط سطحی کامپوزیت‌ها، جهت الیاف، رطوبت و وجود گریس را بررسی کردند [۱۰]. سیردیلو^۶ و همکارانش پخت چسب به روش کاتافورز^۷ بر رفتار اتصال چسبی در شرایط بارگذاری با زوایای مختلف را با نمونه U شکل آزمون آرکان با چسبدهای آلومینیومی بررسی کردند. آن‌ها از دو دما برای فرآیند پخت کاتافورز استفاده کردند. آزمون آرکان برای مشخص کردن رفتار مکانیکی اتصالات چسب با استفاده از پنج زاویه بارگذاری مختلف صفر درجه (شرایط برشی)، ۳۰ درجه، ۴۵ درجه، ۶۰ درجه (برشی-کشش ترکیبی) و ۹۰ درجه (کشش) انجام شده بود. آزمایش‌های تجربی نشان داده بود که چرخه‌های پخت اتخاذ شده در دمای ۱۹۰ درجه سلسیوس برای ۱۶ دقیقه و ۱۶۰ درجه سلسیوس برای ۴۵ دقیقه، هر دو قادر به پخت کامل چسب هستند [۱۱]. بنلی^۸ و همکارانش تأثیر نرمی چسبدها بر عملکرد مکانیکی اتصالات چسبی تحت سه شرایط بارگذاری مختلف (برش خالص، بار برشی-کششی ترکیبی و کشش خالص) از طریق آزمون آرکان را بررسی کردند. چسبدهای U شکل از جنس کامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقویت شده با الیاف کربن با ضخامت نهایی ۱ میلی‌متر و ۲ میلی‌متر با چسب‌های اپوکسی سفت و پلی اورتان چسباننده شده بودند. نتایج آن‌ها نشان‌دهنده مناسب بودن این نوع آزمون برای توصیف کامل اتصال چسبی بوده است [۱۲].

در این تحقیق، با طراحی نمونه U شکل اصلاح‌شده از جنس کامپوزیت زمینه پلیمری تقویت شده با الیاف کربن به‌جای چسبدهای فلزی متداول در مطالعات پیشین، روشی دقیق برای ارزیابی رفتار مکانیکی اتصال چسبی در شرایط مختلف بارگذاری ارائه شده است. تمرکز شکست در ناحیه چسب و عدم خرابی چسبدها،

کاربردهای مهندسی، به عنوان مثال، خودروسازی، هوافضا، پروتزهای پزشکی، مهندسی عمران و وسایل ورزشی استفاده می‌شود. در مقایسه با روش‌های مکانیکی اتصال، مثل پرچکاری و پیچ و مهره، اتصال چسبی مزایایی از جمله: توزیع یکنواخت تنش، کاهش وزن، زمان فرآیند کمتر، کاهش خوردگی، عایق صوتی و تضعیف ارتعاش را ارائه می‌دهد [۳ و ۴]. اگرچه چسب‌ها عمدتاً برای تحمل تنش‌های برشی طراحی شده‌اند، اما اجزای مکانیکی معمولاً شرایط بارگذاری و زوایای متفاوتی را در طول عمر خود حین سرویس‌دهی تجربه می‌کنند. بنابراین، نیاز به یک توصیف دقیق‌تر وجود دارد که خواص مکانیکی اتصالات چسب را تحت زوایای بارگذاری مختلف در نظر بگیرد. آزمون آرکان^۱ که تجهیزات آن برای اولین بار به عنوان روشی برای تولید حالت‌های تنش صفحه‌ای یکنواخت با کاربرد در مواد تقویت شده با الیاف توسعه داده شد [۵]، همچنین به طور گسترده برای توصیف اتصالات چسبی استفاده شده است.

فریدون و همکارانش تأثیر نانولوله‌های کربنی بر استحکام چسبندگی بین کامپوزیت الیاف شیشه/اپوکسی و آلیاژ آلومینیوم را با استفاده از نمونه تک لبه بررسی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند افزودن این نانوساختارها به ماتریس اپوکسی می‌تواند انتقال تنش را بهبود داده، نقش پل زنی در فصل مشترک کامپوزیت و فلز ایفا کرده و در نهایت استحکام چسبندگی سیستم را افزایش دهد [۶]. استامولیس^۲ و همکارانش رفتار شکست اتصالات فلزی چسبی دارای ترک اولیه با استفاده از تجهیز آرکان را بررسی کردند. هدف اصلی، ارزیابی چقرمگی شکست چسب در شرایط بارگذاری ترکیبی کششی-برشی (مدهای I و II) و همچنین بارگذاری فشاری-برشی بود. روش‌های سنتی مانند آزمایش‌های تیر یکسرگیردار دولبه (DCB) و نمونه خمشی انتها ترکدار (ENF) محدودیت‌هایی در اندازه‌گیری دقیق طول ترک و درک رفتار تحت بارگذاری ترکیبی و فشاری-برشی دارند. تجهیز آرکان، با قابلیت تنظیم زاویه بارگذاری، به عنوان روشی جایگزین برای اندازه‌گیری خواص شکست چسب‌ها معرفی شده بود [۷].

داسیلوا^۳ و همکارانش روش‌شناسی آزمون آرکان را با سایر روش‌های آزمایشی مانند آزمون اتصال تک لبه، آزمون برش چسبده ضخیم، آزمون تیر یکسرگیردار دولبه و آزمون پوسته‌کنی T شکل مقایسه کردند و نشان دادند که با استفاده از روش آزمون آرکان،

⁵ Alfonso

⁶ Ciardiello

⁷ Cataphoresis

⁸ Benelli

¹ Arcan Test

² Stamoulis

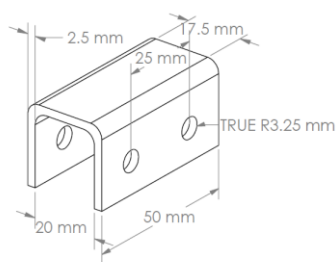
³ Da Silva

⁴ Créac'hcadec

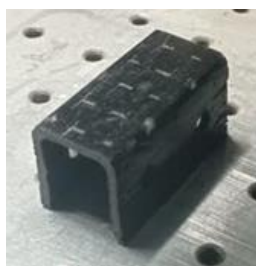
جدول ۱: خواص مکانیکی چسبنده‌ها [۱۱]

$\nu_{12} = \nu_{13} = \nu_{23}$	E_{33} (GPa)	E_{22} (GPa)	E_{11} (GPa)
0.29	7.43	7.43	94.5

بعد از تولید، چسبنده‌ها مطابق ابعاد نشان داده شده در شکل ۲ (الف) برشکاری و سوراخکاری شدند. شکل ۲ (ب) چسبنده نهایی ساخته شده را نشان می‌دهد.



(الف)



(ب)

شکل ۲: چسبنده‌های U شکل (الف) ابعاد چسبنده (ب) چسبنده U شکل

بعد از تولید چسبنده‌ها سطح آنها ابتدا با سنباده شماره ۱۰۰ زبر شدند. سپس از استون برای تمیز کردن سطح آنها استفاده شد. بعد از آماده‌سازی سطح اتصال از چسب اپوکسی دو جزئی R34 که بطور گسترده برای اتصال قطعات کامپوزیتی و فلزی در صنعت خودروسازی بکار می‌رود، برای ایجاد اتصال چسبی استفاده شد. مطابق شکل ۳ (الف) ضخامت چسب ۰/۳ میلی‌متری با استفاده از دو ورق مایلر هر کدام با ضخامت ۰/۱۵ میلی‌متر ایجاد شده است. همچنین ابعاد ناحیه اتصال ۱۷/۵×۲۵ میلی‌متر مربع است. بعد از ایجاد اتصال مطابق دستورالعمل شرکت سازنده چسب اپوکسی استفاده شده، ابتدا نمونه‌ها ۲۴ ساعت در دمای محیط سپس برای پخت نهایی ۳۰ دقیقه در دمای ۸۰ درجه سلسیوس داخل آون قرار داده شدند. خواص مکانیکی چسب اپوکسی براساس مستندات فنی شرکت سازنده مطابق جدول ۲ می‌باشد. شکل ۳ (ب) نمونه نهایی مونتاژ شده آزمون آرکان را نشان می‌دهد.

امکان تحلیل مستقل اتصال را فراهم کرده است. همچنین با بررسی سه زاویه بارگذاری (۰، ۴۵ و ۹۰ درجه) و تحلیل مکانیزم‌های شکست، تأثیر نوع بارگذاری بر استحکام اتصال به طور سیستماتیک مورد ارزیابی قرار گرفته است. در نهایت، تأثیر پارگی الیاف سطحی چسبنده‌ها به‌عنوان مکانیزم افزایش‌دهنده استحکام اتصال چسبی بررسی شده است.

۲- مواد و روش‌ها

در این بخش ابتدا مراحل آماده‌سازی نمونه‌های آزمون آرکان ارائه و سپس مراحل انجام آزمون آرکان در حالت‌های مختلف بارگذاری بیان خواهد شد.

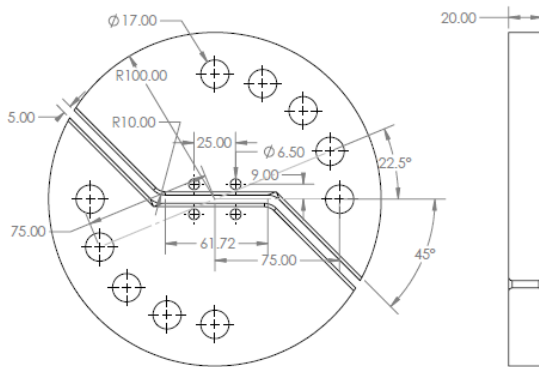
۲-۱- آماده‌سازی نمونه‌ها

برای بررسی رفتار اتصال چسبی در شرایط مختلف بارگذاری از نمونه آرکان U شکل استفاده شده است. برای تولید چسبنده‌ها از الیاف کربن تک جهت با وزن ۲۵۰ گرم در هر مترمربع به عنوان تقویت کننده و از رزین دوجزئی LR620 به عنوان زمینه استفاده شده است. خواص مکانیکی چسبنده‌ها مطابق جدول ۱ می‌باشد. چسبنده‌های U شکل با استفاده از قالب فولادی و با روش لایه‌گذاری دستی مطابق شکل ۱ تولید شدند. از ۱۲ لایه با جهت [۹۰/۰] برای تولید چسبنده‌ها استفاده شده است. ترتیب لایه‌چینی به شکلی است که لایه سطحی که در معرض اتصال قرار دارد با جهت صفر درجه باشد. مطابق دستورالعمل شرکت سازنده رزین، ابتدا نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط نگاه‌داشته شدند، سپس برای پخت نهایی به مدت ۴ ساعت داخل کوره با دمای ۸۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند.



شکل ۱: مراحل تولید چسبنده‌های U شکل

سوراخ‌ها با زاویه ۲۲/۵ درجه نسبت به یکدیگر ماشین‌کاری شده‌اند که امکان بارگذاری در شرایط مختلف را فراهم می‌کنند.



(الف)



(ب)

شکل ۴: فیکسچر آزمون آرکان الف) نقشه فیکسچر ب) فیکسچر نهایی ساخته شده

آزمون آرکان توسط دستگاه آزمون کشش زوئیک Z-250 با ظرفیت ۵ تن استفاده شده است. آزمون در دمای ۲۵ درجه سلسیوس و رطوبت ۴۵ درصد انجام شده است. شکل ۵ تجهیزات آزمون آرکان را نشان می‌دهد.



شکل ۵: تجهیزات آزمون آرکان

جدول ۲: خواص مکانیکی چسب اپوکسی

متوسط استحکام برشی تک لبه فلز-فلز ۱۲/۴۰	(مگاپاسکال)
متوسط استحکام برشی تک لبه کامپوزیت-کامپوزیت ۱۰	(مگاپاسکال)
استحکام خمشی ۴۰	(مگاپاسکال)



(الف)



(ب)

شکل ۳: نمونه‌های آرکان الف) مراحل چسباندن ب) نمونه نهایی

۲-۲- تجهیزات آزمون آرکان

برای انجام آزمون آرکان با استفاده از نمونه U شکل از فیکسچر نشان داده شده در شکل ۴ استفاده شده است. جنس فیکسچر آزمون آرکان از فولاد ST-37 می‌باشد. همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است، فیکسچر آرکان دارای دو قسمت فولادی نیم‌دایره‌ای شکل می‌باشد که قسمت بالایی به فک ثابت دستگاه آزمون و قسمت پایینی به فک متحرک دستگاه توسط یک پیچ متصل می‌شود. سوراخ‌های با قطر ۱۷ میلی‌متر محل اتصال فیکسچر به دستگاه آزمون می‌باشند، این

جدول ۳: نامگذاری نمونه‌های آرکان

شماره نمونه	نام گذاری نمونه	شرایط بارگذاری
S1		
S2	S	بارگذاری برشی
S3		
ST1		
ST2	ST	بارگذاری کششی-برشی
ST3		
T1		
T2	T	بارگذاری کششی
T3		

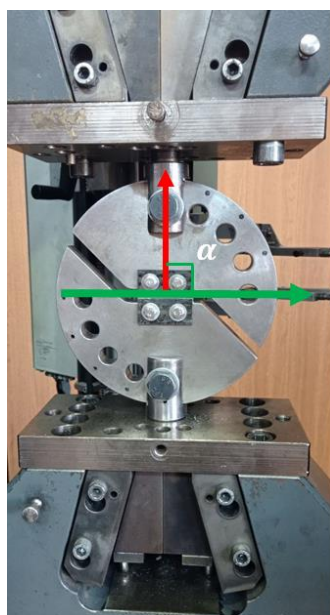
شکل ۶ شرایط بارگذاری نمونه‌ها را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است، آزمون آرکان در سه زاویه بارگذاری به شرح زیر انجام شده است:

• بارگذاری برشی خالص ($\alpha = 0^\circ$)

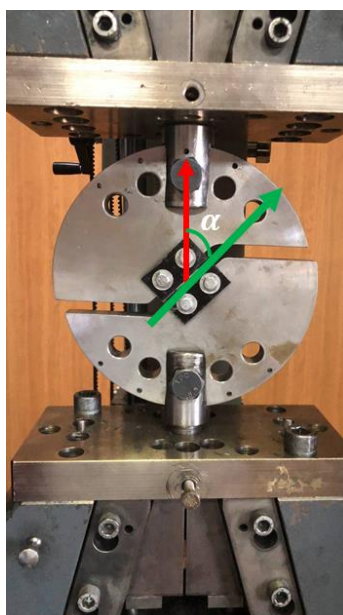
• بارگذاری کششی-برشی ($\alpha = 45^\circ$)

• بارگذاری کششی خالص ($\alpha = 90^\circ$)

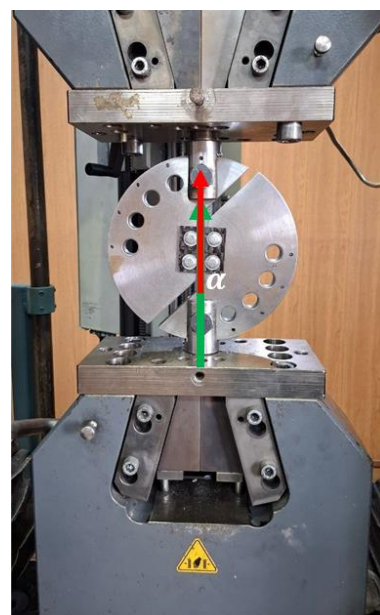
برای هر حالت تعداد سه نمونه مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. جدول ۳ نامگذاری نمونه‌ها را نشان می‌دهد. همچنین آزمون آرکان به صورت کنترل جابه‌جایی و با سرعت ۱ میلی‌متر بر دقیقه انجام شده است. در حین آزمون مقادیر نیرو و جابه‌جایی متناظر آن توسط دستگاه آزمون ثبت شده است.



(ج)



(ب)



(الف)

شکل ۶: پیکربندی آزمون آرکان. الف) بارگذاری برشی خالص ($\alpha=0^\circ$) ب) بارگذاری کششی-برشی ($\alpha=45^\circ$) ج) بارگذاری کششی خالص ($\alpha=90^\circ$)

۳- نتایج

در این بخش ابتدا نمودارهای نیرو-جابه‌جایی به دست آمده از آزمون آرکان بررسی و سپس مقادیر استحکام ارائه خواهد شد. در نهایت تأثیر شرایط بارگذاری بر سطح شکست نمونه‌ها بررسی خواهد شد.

شکل ۷ منحنی‌های نیرو-جابه‌جایی در شرایط مختلف بارگذاری را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده است با تغییر از حالت بارگذاری کششی به برشی بیشینه نیروی قابل تحمل اتصال و جابه‌جایی متناظر آن افزایش می‌یابد. با توجه به شکل ۷ (الف) بیشترین نیروی قابل تحمل اتصال مربوط به نمونه S2 در شرایط بارگذاری برشی خالص به مقدار ۳۹۱۳ نیوتن در جابه‌جایی متناظر

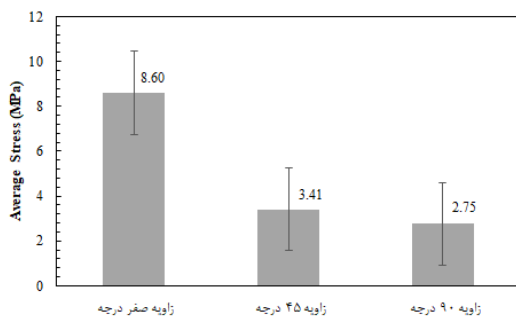
۳/۴۸ میلی‌متر می‌باشد. این در حالی است که با توجه به شکل ۷ (ج) کمترین نیروی قابل تحمل اتصال مربوط به نمونه T2 در شرایط بارگذاری کششی خالص به مقدار ۱۱۱۱ نیوتن در جابه‌جایی متناظر ۰/۴۸ میلی‌متر بوده است. بیشترین مقدار کاهش در نیروی قابل تحمل با تغییر شرایط بارگذاری از زاویه صفر درجه به زاویه ۴۵ درجه به مقدار ۶۱/۸۵ درصد می‌باشد، این در حالی است که تغییر زاویه بارگذاری از ۴۵ درجه به ۹۰ درجه باعث کاهش ۲۰ درصدی در بیشینه نیروی قابل تحمل اتصال شده است. با توجه به منحنی‌های نیرو-جابه‌جایی اتصالات چسبی در برابر بارگذاری برشی استحکام بیشتری از خود نشان می‌دهند، اما با تغییر حالت بارگذاری به کششی استحکام اتصال کاهش پیدا می‌کند. این کاهش استحکام بدلیل تغییر در مکانیزم

جدول ۴ مقادیر استحکام در شرایط مختلف بارگذاری را نشان می‌دهد. استحکام محاسبه شده در جدول ۴ حاصل تقسیم نیروی بیشینه به سطح مقطع اتصال می‌باشند.

جدول ۴: مقادیر تنش‌های بدست آمده از آزمون آرکان

مقدار متوسط تنش (MPa)	انحراف معیار (MPa)	مقدار تنش (MPa)	شماره نمونه	شرایط بارگذاری
۸/۶۰	۰/۲۹	۸/۳۸	S1	بارگذاری
		۸/۹۴	S2	برشی
		۸/۵۰	S3	بارگذاری
۳/۴۱	۰/۲۸	۳/۴۱	ST1	کششی-برشی
		۳/۱۶	ST2	کششی-برشی
		۲/۸۵	ST3	برشی
۲/۷۵	۰/۲۱	۲/۹۶	T1	بارگذاری
		۲/۵۴	T2	کششی
		۲/۷۶	T3	کششی

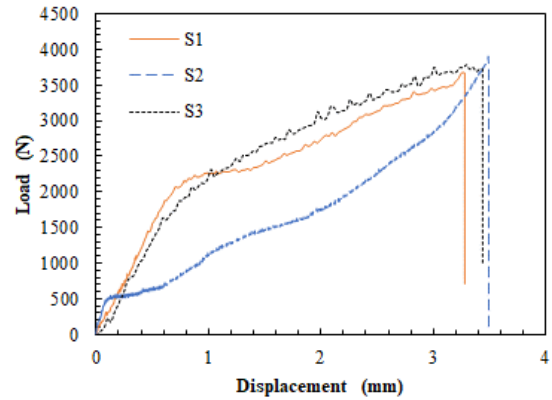
باتوجه به جدول ۳ استحکام متوسط در شرایط بارگذاری برشی (زاویه صفر درجه) ۸/۶۰ مگاپاسکال، در شرایط بارگذاری ترکیبی کششی - برشی (زاویه ۴۵ درجه) ۳/۴۱ مگاپاسکال و در شرایط بارگذاری کششی (زاویه ۹۰ درجه) ۲/۷۵ مگاپاسکال محاسبه شده است. از اطلاعات جدول ۱ می‌توان نتیجه گرفت تغییر زاویه بارگذاری از زاویه صفر درجه به ۴۵ درجه باعث کاهش ۶۰/۳۴ درصدی در استحکام اتصال شده است. این درحالی است که تغییر زاویه بارگذاری از ۴۵ درجه به ۹۰ درجه باعث کاهش ۱۹/۳۵ درصدی در استحکام اتصال شده است. شکل ۸ مقادیر استحکام اتصال چسبی در شرایط مختلف بارگذاری را نشان می‌دهد.



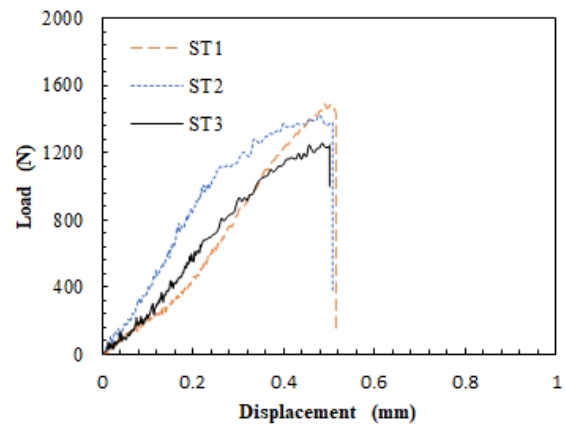
شکل ۸: مقادیر استحکام در شرایط مختلف بارگذاری

شکل ۹ سطح شکست نمونه‌های آرکان با شرایط مختلف بارگذاری را نشان می‌دهد.

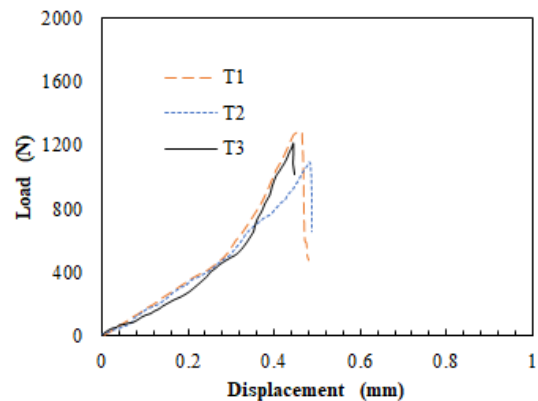
شکست می‌باشد، بصورتی که در اتصال چسبی تحت بارگذاری کششی شکست از لبه‌های اتصال U شکل آغاز می‌شود، اما در بارگذاری برشی شکست از مرکز اتصال آغاز می‌شود [۹].



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۷: منحنی‌های نیرو-جاب‌جایی با شرایط مختلف بارگذاری. الف) بارگذاری برشی خالص ($\alpha=0^\circ$) ب) بارگذاری کششی-برشی ($\alpha=45^\circ$) ج) بارگذاری کششی خالص ($\alpha=90^\circ$)

به شکل ۹ (ب) در شرایط بارگذاری با زاویه ۴۵ درجه تنها دو حالت خرابی اتصال و خرابی چسب قابل مشاهده است. این در حالی است که در بارگذاری با زاویه ۹۰ درجه تنها خرابی اتصال ایجاد شده است. در اتصال چسبی با چسبنده‌های پلیمری تقویت شده با الیاف کربن ایجاد حالت خرابی پارگی الیاف باعث افزایش استحکام اتصال می‌شود [۱۳]. با توجه به مکانیزم شکست ایجاد شده در زاویه بارگذاری صفر درجه خرابی پارگی الیاف باعث افزایش قابل توجه استحکام اتصال شده است. همچنین با مقایسه شکل ۹ (ب) و (ج) ایجاد حالت خرابی چسب در زاویه بارگذاری ۴۵ درجه باعث افزایش ۱۹/۳۵ درصدی در استحکام اتصال شده است.

باتوجه به چیدمان صفر و ۹۰ درجه الیاف کربن هنگام تولید نمونه‌های U شکل آرکان و با افزایش ضخامت نمونه در هیچ‌کدام از شرایط بارگذاری خرابی چسبنده‌ها^۴ مشاهده نشد. این موضوع به این دلیل اهمیت دارد که می‌توان با استفاده از نمونه آرکان اصلاح شده به طور دقیق رفتار اتصال چسبی را بررسی نمود.

۴- تحلیل نتایج

نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهند که استحکام اتصال چسبی وابستگی شدیدی به زاویه بارگذاری دارد و با تغییر حالت بارگذاری از برشی خالص به کششی خالص، روندی نزولی مشاهده می‌شود. برای تبیین این رفتار می‌توان توزیع تنش و مکانیزم‌های شکست فعال شده در هر حالت را مورد بررسی قرار داد.

نتایج به‌دست‌آمده در این تحقیق را می‌توان با مطالعه سیردیلو و همکاران [۱۱] مقایسه نمود. آن‌ها با استفاده از نمونه‌ی U شکل آرکان و چسبنده‌های آلومینیومی نشان دادند که بیشترین استحکام اتصال در شرایط بارگذاری برشی و کمترین در بارگذاری کششی حاصل می‌شود. روند مشاهده‌شده در تحقیق حاضر نیز مشابه است؛ به‌طوری‌که استحکام اتصال در حالت برشی به‌طور میانگین ۸/۶۰ مگاپاسکال و در حالت کششی ۲/۷۵ مگاپاسکال به‌دست آمد. این هم‌خوانی رفتاری با نتایج مرجع [۱۱] نشان می‌دهد که طراحی نمونه‌ی اصلاح‌شده‌ی U شکل قابلیت اطمینان بالایی در ارزیابی عملکرد اتصالات چسبی دارد، حتی با وجود تفاوت در جنس چسبنده‌ها (CFRP در این پژوهش در مقابل آلومینیوم در مرجع [۱۱]). بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که تغییر جنس چسبنده بر روند کلی تغییرات



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۹: سطح شکست نمونه‌های آرکان با شرایط مختلف بارگذاری.
الف) بارگذاری برشی خالص ($\alpha=0^\circ$) ب) بارگذاری کششی - برشی ($\alpha=45^\circ$)
ج) بارگذاری کششی خالص ($\alpha=90^\circ$)

شکل ۹ (الف) نشان دهنده سه حالت خرابی پارگی الیاف^۱، خرابی اتصال^۲ و خرابی چسب^۳ در شرایط بارگذاری صفر درجه است. باتوجه

³ Cohesive Failure

⁴ Adherent Failure

¹ Fiber Tearing

² Adhesive Failure

همچنین باید توجه داشت که به دلیل ناهمسان‌گردی مکانیکی CFRP و لایه‌چینی [۹۰/۱۰]، در بارگذاری برشی بخشی از بار توسط الیاف منتقل می‌شود، اما در بارگذاری کششی خالص کل بار به چسب تحمیل می‌گردد. این تفاوت در نقش باربری چسبیده‌ها نیز عامل مؤثری در کاهش استحکام اتصال با افزایش زاویه بارگذاری است.

۵- جمع‌بندی

در این مطالعه رفتار اتصال چسبی کامپوزیت-کامپوزیت در شرایط مختلف بارگذاری کششی، ترکیب کششی-برشی و برشی خالص با استفاده از نمونه آرکان U شکل اصلاح شده بررسی شده است. منحنی‌های نیرو-جاب‌جایی، مقادیر استحکام و سطح شکست نمونه‌ها در شرایط مختلف بارگذاری بررسی شدند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که:

- رفتار اتصال چسبی وابسته به شرایط بارگذاری است و در حالت بارگذاری برشی اتصال چسبی بیشترین مقدار استحکام را از خود نشان می‌دهد.
- در مود بارگذاری برشی ($\alpha=0^\circ$) فعال شدن دو مکانیزم شکست ترکیبی پارگی الیاف و خرابی اتصال باعث افزایش تا $60/34$ درصد در استحکام اتصال چسبی می‌شود.
- در حالت بارگذاری 45° درجه نسبت به 90° درجه خرابی چسب می‌تواند تا $19/35$ درصد استحکام را افزایش دهد.
- نتایج تجربی نشان می‌دهند که در هیچ‌یک از شرایط بارگذاری، خرابی در چسبیده‌های کامپوزیتی مشاهده نشده است. این موضوع کارایی و دقت طراحی نمونه‌های آرکان اصلاح‌شده را در ارزیابی مستقل رفتار چسب تأیید می‌کند.

۶- مراجع

- [1] A. Kariman Mghaddam and S. Rahnema, "Experimental Investigation of the Effect of the Functional Pattern of Laser Surface Treatment on the Strength of Aluminum / Composite Adhesive Bonded Joint in the Mode I Fracture," *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 23, No. 8, pp. 485-495, 2023, doi: [10.22068/jstc.2023.1990008.1828](https://doi.org/10.22068/jstc.2023.1990008.1828). (in Persian)
- [2] Y. H. Kim, S. Kumar, K. M. Lee, S. Y. Kim, S. W. Yoon, S. Y. Bae, and D. H. Shin, "Advancing carbon fiber and its composites technology: Korea's

استحکام تحت زوایای مختلف بارگذاری تأثیری نداشته و این امر بر اعتبار نتایج تحقیق حاضر می‌افزاید.

در شرایط برشی خالص (0°)، تنش‌ها به طور نسبتاً یکنواخت در سطح چسب توزیع می‌شوند [۸]. در این حالت، استحکام اتصال چسبی به دلیل فعال شدن دو مکانیزم شکست ترکیبی افزایش می‌یابد. علاوه بر جدایش چسب از سطح اتصال، بخشی از بار توسط لایه‌های سطحی الیاف CFRP منتقل شده و در نقاطی، تنش موجب پارگی الیاف می‌شود. این پارگی الیاف به‌عنوان یک مکانیزم تقویت‌کننده عمل کرده و انرژی شکست کل اتصال را افزایش می‌دهد. به‌عبارت‌دیگر، برای گسترش ترک در اتصال، علاوه بر غلبه بر چسبندگی چسب، باید مقاومت مکانیکی الیاف نیز شکسته شود؛ بنابراین بار موردنیاز برای شکست افزایش‌یافته و استحکام اتصال بالاتر می‌رود. این ترکیب انرژی شکست ناشی از جدایش چسب و پارگی الیاف سبب می‌شود که اتصال چسبی در حالت برشی بیشترین مقاومت خود را نشان دهد (میانگین $8/60$ مگاپاسکال). در مقابل، در حالت کششی خالص که شکست محدود به ناحیه چسب است و الیاف نقشی در فرایند شکست ندارند، استحکام اتصال به کمترین مقدار خود ($2/75$ مگاپاسکال) کاهش می‌یابد.

در شرایط ترکیبی کششی-برشی (45°)، ترکیب دو مؤلفه برش و کشش باعث ایجاد تمرکز تنش در لبه‌های اتصال می‌شود. این تمرکز تنش سبب می‌شود که شکست عمدتاً به‌صورت جدایش چسب از چسبیده اتفاق بیفتد [۷]. از آنجایی که این مکانیزم انرژی شکست کمتری نسبت به پارگی الیاف دارد، کاهش قابل‌توجهی در مقاومت اتصال نسبت به حالت برشی خالص رخ می‌دهد.

در شرایط کشش خالص (90°)، تنش‌های عمود بر سطح اتصال به بیشینه مقدار خود می‌رسند و تقریباً تمام بار به چسب منتقل می‌شود [۱۱]. در این حالت هیچ مکانیزم جذب انرژی ثانویه (مانند پارگی الیاف یا خرابی چسب) فعال نمی‌شود و شکست تنها به‌صورت جدایش یک‌سطحی رخ می‌دهد. به همین دلیل، استحکام اتصال در این شرایط حداقل مقدار خود را دارد.

از دیدگاه انرژی شکست می‌توان بیان کرد که در بارگذاری برشی خالص، مجموع انرژی شکست شامل سهم چسب و سهم پارگی الیاف است که منجر به بالاترین مقدار مقاومت می‌شود [۱۳]. در مقابل، در بارگذاری کششی خالص، انرژی شکست صرفاً محدود به گسیختگی چسب بوده و به همین دلیل کمترین استحکام حاصل می‌شود.

- [8] L. F. M. Da Silva, D. A. Dillard, B. Blackman, and R. D. Adams, Eds., *Testing Adhesive Joints: Best Practices*. John Wiley & Sons, 2012, pp. 50-82.
- [9] R. Créac'Hcadeç, L. Sohier, and C. Cellard, "A stress concentration-free bonded Arcan tensile compression shear test specimen for the evaluation of adhesive mechanical response," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 61, pp. 81-92, 2015, doi: [10.1016/j.ijadhadh.2015.05.003](https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2015.05.003).
- [10] L. Alfonso, C. Badulescu, and N. Carrère, "Use of the modified Arcan fixture to study the strength of bonded assemblies for automotive applications," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 80, pp. 104-114, 2018, doi: [10.1016/j.ijadhadh.2017.09.014](https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2017.09.014).
- [11] R. Ciardiello, L. Greco, M. Miranda, F. Di Sciullo, and L. Goglio, "Experimental investigation on adhesively bonded U-shaped metallic joints using the Arcan test," *Journal of Advanced Joining Processes*, Vol. 1, p. 100010, 2020, doi: [10.1016/j.jajp.2020.100010](https://doi.org/10.1016/j.jajp.2020.100010).
- [12] A. Benelli, R. Ciardiello, C. B. Niutta, and L. Goglio, "Experimental and numerical characterization of adhesive joints with composite substrates by means of the Arcan test," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 122, p. 103321, 2023, doi: [10.1016/j.ijadhadh.2022.103321](https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2022.103321).
- [13] A. Kariman Moghadam and S. Rahnama, "Experimental investigation of the effect of different surface treatment on mode I fracture behavior of composite/aluminum adhesive joint," *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 9, No. 4, pp. 2116-2127, 2023, doi: [10.22068/jstc.2023.1990008.1828](https://doi.org/10.22068/jstc.2023.1990008.1828). (in Persian)
- strategic growth and innovation," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 256, p. 112266, 2025, doi: [10.1016/j.compositesb.2025.112266](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2025.112266).
- [3] X. Jiang, M. H. Kolstein, and F. S. K. Bijlaard, "Experimental and numerical study on mechanical behavior of an adhesively-bonded joint of FRP-steel composite bridge under shear loading," *Composite Structures*, Vol. 108, pp. 387-399, 2014, doi: [10.1016/j.compstruct.2013.09.045](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.09.045).
- [4] R. D. F. Moreira, V. Oliveira, F. G. A. Silva, R. Vilar, and M. F. S. F. De Moura, "Mode II fracture toughness of carbon-epoxy bonded joints with femtosecond laser treated surfaces," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 148, pp. 707-713, 2018, doi: [10.1016/j.ijmecsci.2018.09.029](https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.09.029).
- [5] C. Badulescu, C. Germain, J. Y. Cognard, and N. Carrere, "Characterization and modelling of the viscous behaviour of adhesives using the modified Arcan device," *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol. 29, No. 5, pp. 443-461, 2015, doi: [10.1080/01694243.2014.991483](https://doi.org/10.1080/01694243.2014.991483).
- [6] A. Fereidoon, N. Kordani, Y. Rostamiyan, D. D. Ganji, and M. G. Ahangari, "Effect of carbon nanotubes on adhesion strength of e-glass/epoxy composites and alloy aluminium surface," *World Applied Sciences Journal*, Vol. 9, No. 2, pp. 204-210, 2010. (in Persian)
- [7] G. Stamoulis, N. Carrère, J. Y. Cognard, P. Davies, and C. Badulescu, "Investigating the fracture behavior of adhesively bonded metallic joints using the Arcan fixture," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 66, pp. 147-159, 2016, doi: [10.1016/j.ijadhadh.2016.01.001](https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2016.01.001).