



## بررسی تجربی اتصال ورق آلومینیوم و کامپوزیت CFRP با استفاده از فرایند ساخت افزایشی اولتراسونیک

سعید کرباسفروش<sup>۱</sup>، علیرضا حاجی‌علی محمدی<sup>۲\*</sup>

۱- فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

\* ایمیل نویسنده مسئول: ahajiali@semnan.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

#### مقاله پژوهشی

دریافت: ۲۴ اردیبهشت ۱۴۰۳

پذیرش: ۲۵ شهریور ۱۴۰۳

#### کلیدواژگان:

جوشکاری اولتراسونیک

ساخت افزایشی

CFRP

استحکام جوش

به دلیل نسبت بالای استحکام به وزن دو ماده آلومینیوم و الیاف کربن، کاربرد این دو ماده و اتصال آن‌ها به یکدیگر در صنعت خودروسازی و هوافضا در حال گسترش است. هدف اصلی از انجام این پژوهش، تشکیل یک سازه سه بعدی متشکل از سه لایه ورق متصل شده به یکدیگر با استفاده از فرایند ساخت افزایشی اولتراسونیک می‌باشد. این سازه سه لایه‌ای به صورت دولایه آلومینیوم ۶۰۶۱ در دو طرف و یک لایه پلیمر بهبود یافته با الیاف کربن لایه چینی شده است. در نهایت با دستگاه آزمون کشش، استحکام کششی برشی سطح مقطع جوش تمامی ۱۵ نمونه آزمایشی، بر حسب مگاپاسکال اندازه‌گیری شد. طراحی آزمایش با روش پاسخ سطح، نوع باکس بنکن انجام شد. سه پارامتر توان، زمان و فشار و هر کدام در سه سطح به عنوان پارامترهای متغیر در نظر گرفته شده است. به منظور طراحی آزمایش و همچنین تحلیل و بررسی داده‌های آزمون، از نرم افزار دیزاین اکسپرت بهره گرفته شده است. نمودارهای تاثیر هر کدام از پارامترها استخراج شد و پارامترهای بهینه نیز بدست آمد. نتایج نشان داد که پارامتر توان اولتراسونیک بیشترین و پارامتر فشار کمترین تاثیرگذاری در استحکام کششی برشی جوش را دارند. بیشترین استحکام کششی برشی با پارامترهای توان ۱۴۰۰ وات، زمان ۰/۴ ثانیه و فشار ۷ بار برابر با حدود ۹۲ مگاپاسکال بدست آمد.

## Experimental study of the ultrasonic additive manufacturing using the aluminum and CFRP composite

Saeed Karbasforoosh<sup>1</sup>, Alireza Hajjalimohammadi<sup>2\*</sup>

1- MSc Graduate, Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

2- Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

\* Corresponding Author's Email: ahajiali@semnan.ac.ir

### Article Information

#### Original Research Paper

Received: 13 May 2024

Accepted: 15 September 2024

#### Keywords:

Ultrasonic Welding

Additive Manufacturing

CFRP

Weld Strength

### Abstract

Due to the high strength to weight ratio of aluminum and carbon fiber, The use of these two materials and their connection to each other is expanding in the automotive and aerospace industry. The main purpose of this research is to connect three layers of sheets to each other layer by layer, consisting of two layers of aluminum 6061 T6 on both sides with a thickness of 1 mm and a layer of CFRP with a thickness of 0.7 mm in the middle, which was done successfully. 15 pieces of aluminum and CFRP sheets were divided into 25 x 60 mm pieces connected to each other layer by layer using ultrasonic metal welding machine. Finally, with the tensile testing machine, the shear tensile strength of the weld cross-section of all 15 test samples was calculated and measured. The design of the experiment was done with the response surface method, the box behnken type, and three parameters of power, time, and pressure, each at three levels, are considered as variable parameters. In order to design the experiment as well as analyze and check the test data, Design Expert software has been used. In the following, the graphs of the influence of each of the parameters were extracted and the optimal parameters were also obtained. The highest shear tensile strength was obtained with power parameters of 1400 watt, time of 0.4 seconds and pressure of 7 bar equal to about 92 MPa.

### Please cite this article using:

Karbasforoosh S, Hajjalimohammadi A. Experimental study of the ultrasonic additive manufacturing using the aluminum and CFRP composite. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024 Aug 22;11(6):54-65. doi: 10.22034/IJME.2024.455673.1953 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

## ۱- مقدمه

با افزایش تقاضا برای بهبود عملکرد قطعات و با توجه به سفارشی‌سازی محصولات و توسعه مواد جدید، صنایع مختلف از جمله صنایع عمرانی، حمل و نقل، فضایی، بیوپزشکی به سمت استفاده از قطعات چند ماده‌ای سوق داده شده‌اند. کاهش وزن به همراه بهبود عملکرد کلی باعث افزایش کارایی محصولات از جمله کاهش تولید CO<sub>2</sub>، افزایش قابلیت ذخیره‌سازی انرژی (در صنعت حمل و نقل) و کاهش مصرف سوخت می‌شود. به عنوان مثال، برای تولید وسایل نقلیه برقی، با کاهش وزن در وسیله نقلیه (کاهش وزن در شاسی یا قطعات) می‌توان وزن باتری مورد استفاده در وسیله نقلیه را افزایش داد که این امر منجر به استقلال بیشتر از سوخت خواهد شد که همین دلیل همچنان یکی از دلایل اصلی محدودیت در گسترش این وسایل نقلیه است.

استفاده از مواد سبک و ترکیب مناسب از مواد مختلف، باعث کاهش کلی وزن محصولات و سازه‌ها می‌شود. استفاده از آلیاژهای سبک و پلیمرهای بهبودیافته از الیاف کربن<sup>۱</sup>، در صنعت خودروسازی بسیار گسترش یافته‌است. به منظور برقراری تماس مستقیم بین الیاف و فلز و همچنین ایجاد اتصال مکانیکی بین سطح فلز و الیاف، یک تغییر شکل پلاستیکی مورد نیاز است. انرژی مورد نیاز برای تغییر شکل، توسط ارتعاشات با فرکانس بالا از ابزار جوشکاری به قطعات اعمال می‌شود. قطعات روی سندان توسط یک نگه‌دارنده به هم بسته می‌شوند. شیپوره<sup>۲</sup> معمولاً امواج نوسانی را با دامنه نوسان بین ۵ تا ۵۰ میکرومتر و با سرعت لغزشی ۶ متر بر ثانیه در نوک شیپوره و فرکانس جوشکاری ۲۰ کیلوهرتز تولید می‌کند [۱]. بر اساس اصل تولید حرارت بر اساس اصطکاک (خصوصاً فلزات)، سطح اتصال مشترک می‌تواند به سرعت ذوب شود و پس از گذشت مدت زمانی از سرد شدن، یک اتصال مطمئن ایجاد شود. در این سیستم میزان ارتعاشات توسط بوستر و شیپوره یا هورن به سطح قطعه کار اعمال می‌شود. جوشکاری اولتراسونیک یک فرایند بر مبنای اصطکاک است که قادر به اتصال مواد غیر همجنس<sup>۳</sup> است. این تکنولوژی مناسب اتصال فلزات سبک به پلیمرهای بهبودیافته با الیاف کربن می‌باشد. برای مثال این فرایند برای اتصال آلیاژهای آلومینیوم و تیتانیوم به ترموپلاستیک‌های بهبود یافته با الیاف کربن یا شیشه به کار می‌رود [۲، ۳].

جوشکاری اولتراسونیک یک روش جوشکاری می‌باشد که ارتعاشات مکانیکی با فرکانس بالا (۷۰-۲۰ KHz) به سطح قطعه کار وارد می‌شود [۴]. روش اتصال مکانیکی به عنوان ساز و کار اصلی تشکیل اتصالات ترکیبی فلز/CFRP در جوشکاری اولتراسونیک می‌باشد. تعدادی از محققان [۵-۷] از این امواج جهت پلیسه‌گیری الکتروشیمیایی و پلیسه‌گیری فتر رینگ روغن موتور و همچنین سوراخکاری پلیمر بهبود یافته با الیاف کربن استفاده کرده‌اند. اتصال مکانیکی به دو روش قابل انجام است، اتصال ماکرو مکانیکی<sup>۴</sup> و اتصال میکرو مکانیکی<sup>۵</sup> [۸].

منظور از اتصال ماکرو مکانیکی، اتصال فلز و CFRP به وسیله ماشینکاری زائده‌هایی مانند پین و قلاب بر روی فلز و چفت شدن این زائده‌ها در قطعه مقابل می‌باشد. منظور از اتصال میکرو مکانیکی به اتصال تشکیل شده ناشی از حرارت پخت و گرم شدن FRTP<sup>۶</sup> و تداخل آن در سطح فلز تحت نیروی جوشکاری در مقیاس میکرو می‌باشد. ریزساختار سطح فلز عمدتاً شامل شیارهای میکروسکوپی و تخلخل‌هایی است که می‌توان توسط لیزر یا روش‌های الکترومکانیکی ایجاد کرد. اتصال میکرو مکانیکی عمدتاً به وسیله تداخل و قلاب شدن ریزساختار دو سطح FRTP و فلز ایجاد می‌شود [۹].

به صورت کلی، هر چه فرورفتگی‌ها و خلل و فرج سطح و ریزساختار بیشتر و پیچیده تر باشد، ناحیه تماس بین فلز و CFRP افزایش و در نتیجه خواص مکانیکی پس از فرایند جوشکاری بهبود می‌یابد.

این اتصالات همچنین در بخش عمرانی به شکل گسترده‌ای کاربرد دارند [۱۰]؛ برای مثال از قطعات الیاف کربن برای تقویت پل‌ها، به منظور افزایش سفتی خمشی تیرهای آلومینیومی [۱۱]، برای تعمیر و بهبود قطعات سازه‌ای [۱۲-۱۴] و همچنین به منظور محافظت از آتش و ایجاد عایق حرارتی برای سازه‌های سبک وزن استفاده می‌شود [۱۵]. در اکثر اوقات اتصال مواد غیر همجنس به دلیل تفاوت در ترکیب شیمیایی، خواص مکانیکی و خصوصیات فیزیکی اتفاق نمی‌افتد. سگانگ و همکارا [۱۶] به منظور افزایش عمر

1 Carbon Fiber Reinforcement Element

2 Sonotrode

3 Dissimilar Materials

4 Macro Mechanical Interlock

5 Micro Mechanical Interlock

6 Fiber Reinforced Thermoplastic

کاری شیپوره چرخشی مورد استفاده در جوشکاری اولتراسونیک پیوسته، با روش اجزا محدود و با در نظر گرفتن تمرکز تنش محیطی، شکست خستگی و سایش شیپوره یک هندسه و الگوی دندانه‌ای شکل بر روی شیپوره طراحی کردند. جیمز و دانگ [۱۷]، تاثیر پارامترهای بحرانی شامل توان اولتراسونیک و زبری سطح بر استحکام کششی برشی ورق تیتانیوم و CFRP که با فرایند ساخت افزایشی اولتراسونیک تولید شده را بررسی کردند. آن‌ها در این آزمایش، از ورق تیتانیوم با ضخامت ۱۰۰ میکرون و ورق کامپوزیت CFRP با ضخامت ۶۰۰ میکرون به منظور اتصال دولایه استفاده کردند.

آن‌ها همچنین تاثیر زبری سطح بر استحکام برشی اتصال تیتانیوم/پلیمر بهبود یافته با الیاف کربن را بررسی کردند. کونته و همکاران [۱۸]، تاثیر روش‌های مختلف عملیات سطحی، مانند سند بلاست<sup>۱</sup>، سنگ‌زنی<sup>۲</sup>، سمباده‌زنی<sup>۳</sup> افشانش گرمایی<sup>۴</sup> (پوشاندن سطح قطعات با ذرات فلزی یا نیمه فلزی مذاب یا نیمه مذاب) و استفاده از لیزر را بر روی استحکام اتصالات فلز/پلی‌آمید<sup>۶</sup> مقایسه کردند و پی بردند که استحکام برشی اتصالات با افزایش زبری سطح، افزایش می‌یابد. در تحقیقات گوناگون، تاثیر پارامترهای مختلف جوشکاری از جمله توان، فشار، زمان، زبری سطح، جنس، ضخامت ورق‌ها و نوع فرایند بر کیفیت استحکام اتصال بررسی شده‌است.

مهمترین پارامتر خروجی در اتصال قطعات غیرهمجنس از جمله آلومینیوم و CFRP استحکام کششی برشی مقطع اتصال می‌باشد. پژوهش‌های مختلف، نتایج مختلفی را به همراه داشتند که علت این امر، تفاوت در نحوه انجام فرایند، استفاده از چسب‌های شیمیایی، انجام عملیات سطحی مختلف، استفاده از درجه‌های مختلف مواد، ضخامت و تعداد لایه‌گذاری‌های انجام شده می‌باشد. هونگچی و همکاران [۱۹]، با استفاده از چندین لایه آلومینیوم، چندین لایه CFRP و استفاده از چسب در فرایند به استحکام ۱۲۹/۵ مگاپاسکال رسیدند. دلیل بالا بودن استحکام کششی برشی مقطع اتصال در این پژوهش نسبت به پژوهش‌های دیگر، استفاده از تعداد لایه‌های بسیار بیشتر و همچنین استفاده از چسب مخصوص می‌باشد. آرناس و همکاران [۲۰]، مقادیرهای متفاوتی از استحکام کششی-برشی را به دلیل انجام عملیات سطحی مختلف بدست آوردند. ریبیرو و همکاران [۲۱]، با استفاده از نوعی چسب و همچنین پیچ معمولی به استحکام ۲۱ مگاپاسکال رسیدند. مارانانو و همکاران [۲۲] پی بردند که استفاده از پرچ‌های فولادی جهت اتصال دو ماده آلومینیوم و CFRP باعث افزایش استحکام کششی برشی مقطع اتصال می‌شود. فرانچسکا و همکاران [۲۳] در جهت تلاش برای اتصال آلومینیوم ۵۷۵۴ و پلی‌آمید<sup>۶</sup>، به استحکام ۳۴/۸ مگاپاسکال رسیدند.

در صنعت خودروسازی و هوافضا، ورق‌های آلومینیوم در بخش‌های مختلف محصولات به کار رفته است. در صورتی که بتوان در قسمت میانی این ورق‌های آلومینیومی یک کامپوزیت با استحکام بالاتر را به آلومینیوم متصل و از حجم آلومینیوم کم کرد، در نهایت همان خواص مکانیکی آلومینیوم (دو طرف آلومینیوم) اما با وزن بسیار پایین‌تر استحصال خواهد شد؛ اما نقطه ضعف این ایده، استحکام اتصال دو قطعه به یکدیگر می‌باشد، بنابراین در صورت رسیدن استحکام جوش اتصال بین دو نمونه به استحکام کششی آلومینیوم، می‌توان ادعا کرد سازه‌ای با استحکام کششی آلومینیوم اما با وزن کمتر تولید شده است. تفاوت بین جوش دولایه و سه لایه، در میزان مقاومت به ضربه و خوردگی و همچنین سفتی مورد نیاز در مرز سازه می‌باشد. در صورتی که در مرز سازه نیاز به تحمل ضربه و خوردگی باشد، می‌توان از آلومینیوم پوشش داده شده و سخت کاری شده در دو طرف استفاده کرد، این درحالی است که در صورت به کارگیری جوش دولایه، حتماً یک طرف سازه کامپوزیتی خواهد بود و ممکن است خواص مورد نیاز در مرز دیگر سازه ارضا نشود. در این پژوهش برای اولین بار دو ورق آلومینیوم و یک ورق پلی‌آمید<sup>۶</sup> تقویت شده با الیاف کربن با روش جوشکاری اولتراسونیک به یکدیگر متصل شدند و تشکیل یک سازه سه بعدی ترکیبی دادند. در ادامه، تاثیر سه پارامتر توان اولتراسونیک، زمان و فشار جوشکاری بر استحکام سه‌لایه آلومینیوم و پلیمر بهبودیافته با الیاف کربن مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

## ۲- مواد و روش‌ها

هدف از انجام این تحقیق، اتصال سه لایه متشکل از آلومینیوم و ورق کامپوزیت CFRP با زمینه ترموپلاستیکی پلی‌آمید<sup>۶</sup> بر روی یکدیگر (دو لایه آلومینیوم ۶۰۶۱ و یک لایه کامپوزیت CFRP) و بررسی پارامترهای اتصال به منظور دستیابی به بهترین ترکیب

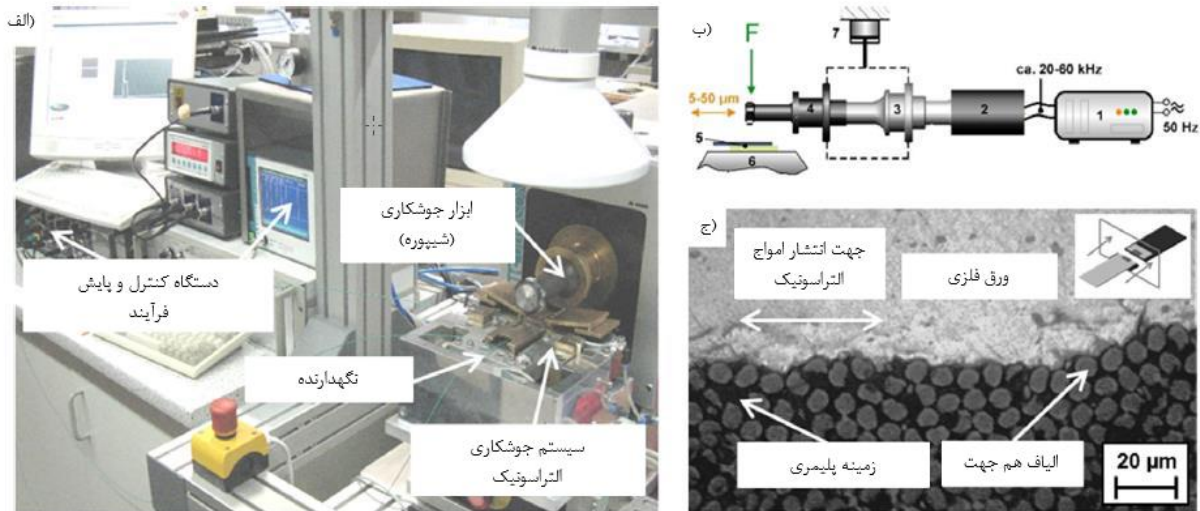
<sup>1</sup> Sandblasting

<sup>2</sup> Grinding

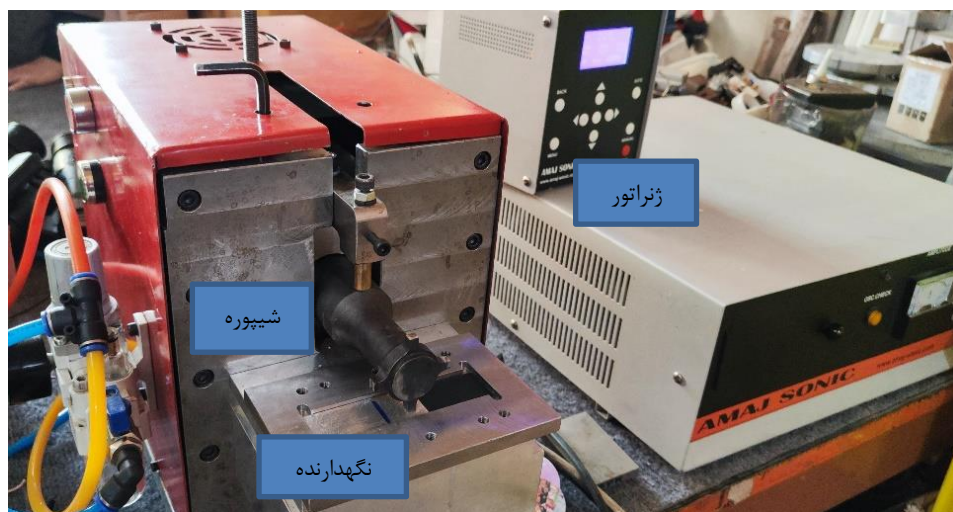
<sup>3</sup> Sandpaper

<sup>4</sup> Thermal Spraying

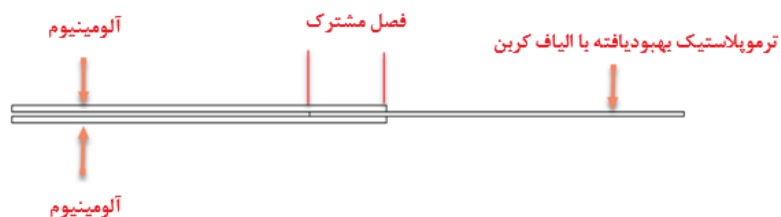
پارامترها و متعاقبا دستیابی به بالاترین استحکام و کیفیت اتصال می‌باشد. شکل ۱ شماتیک کلی از دستگاه و شکل ۲ دستگاه استفاده شده در آزمون و اجزا آن را نمایش می‌دهد. اتصال نهایی مورد نظر در شکل ۳ و ۴ نشان داده شده است. فضای بین ورق آلومینیوم‌ها خالی مانده است (طبق استاندارد [۲۴] ASTM D3528-96).



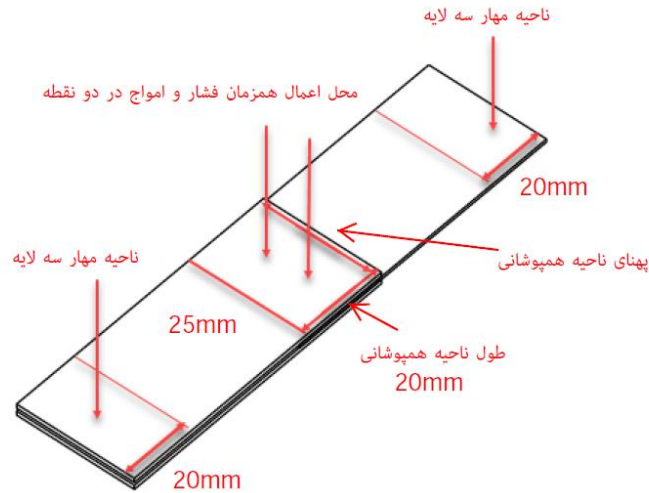
شکل ۱ الف) تجهیزات تجربی برای جوشکاری اولتراسونیک فلز/CFRP ب) اجزای اصلی سیستم جوشکاری (۱) ژنراتور اولتراسونیک (۲) مبدل پیزوالکتریک (۳) تقویت کننده (۴) شیپوره (۵) نگهدارنده (۶) انتقال بار ج) تصویر ناحیه مشترک اتصال فلز/FRP [۱]



شکل ۲ دستگاه جوش فلز اولتراسونیک و اجزا آن

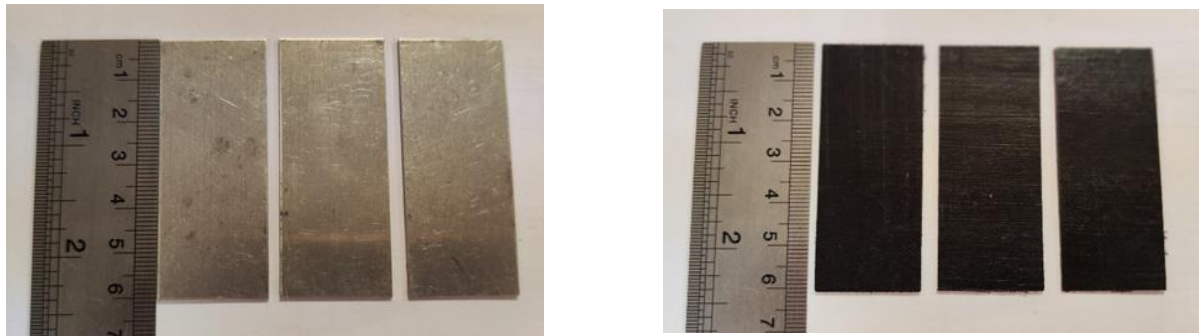


شکل ۳ نحوه لایه گذاری سه قطعه روی یکدیگر از نمای بغل



شکل ۴ نحوه لایه‌گذاری سه قطعه روی یکدیگر از نمای ایزومتریک

ورق‌های آلومینیوم و کامپوزیت CFRP به قطعات استاندارد  $1 \times 25 \times 60$  میلی‌متر جهت انجام آزمون استحکام برشی بریده شده‌اند.



شکل ۵ ورق‌های بریده شده آلومینیوم و کامپوزیت CFRP (سمت راست آلومینیوم و سمت چپ کامپوزیت)

در این آزمون از بین تمامی پارامترهای قابل تغییر در فرایند اتصال اولتراسونیک (توان اولتراسونیک، فشار جک، زمان، زبری سطح، ضخامت و نوع مواد) سه پارامتر توان جوشکاری اولتراسونیک، زمان جوشکاری و فشار جوشکاری که در بیشتر پژوهش‌ها به عنوان متغیر در نظر گرفته شده‌اند و تاثیر گذاری بیشتری در استحکام جوش دارند، به عنوان متغیر در نظر گرفته شده‌اند. سه پارامتر دیگر یعنی زبری سطح، ضخامت و نوع مواد به دلیل جلوگیری از ایجاد پیچیدگی در آزمون و احتمال ایجاد خطا در پاسخ‌ها ثابت گرفته شده‌اند. پارامتر زبری سطح  $Ra=1/2$  اندازه‌گیری شد (با استفاده از دستگاه زبری سنج). به دلیل هزینه بالای انجام عملیات سطحی، از انجام این عملیات در این پژوهش صرف‌نظر شد، از این‌رو در پژوهش جداگانه‌ای می‌توان اثر عملیات سطح و زبری سطح را با جزئیات بالا بررسی کرد. در جدول ۱ پارامترها و سطوح در نظر گرفته شده برای این پارامترها نشان داده شده است. منظور از فشار، فشار جک است که توسط شیپوره به صورت عمودی بر قطعات وارد می‌شود و با شیر تنظیم فشار روی دستگاه قابل تنظیم است. نحوه تعیین محدوده پارامترها نیز کاملاً به صورت تجربی تعیین شده است.

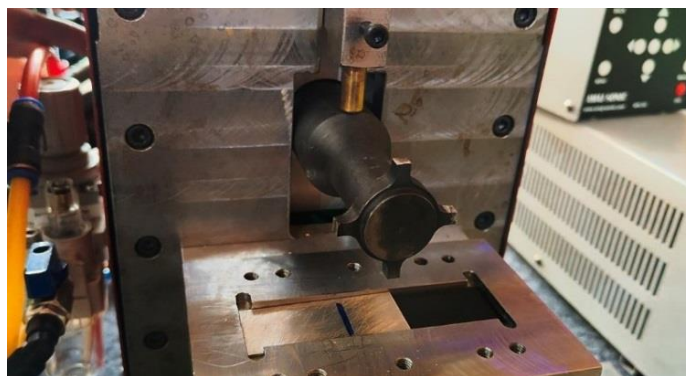
جدول ۱ پارامترها و سطوح در نظر گرفته شده برای آن‌ها

شماره آزمایش	پارامتر	اختصار	واحد	سطح
۱	توان اولتراسونیک	W	w	۱-، ۰، ۱+
۲	زمان	t	s	۰/۳، ۰/۳۵، ۰/۴
۳	فشار	p	bar	۵، ۶، ۷

برای طراحی آزمایش از نرم‌افزار دیزاین اکسپرت<sup>۱</sup> و روش سطح پاسخ<sup>۲</sup> با نوع طراحی باکس بنکن<sup>۳</sup> بهره گرفته شده است. برای به دست آوردن محدوده مناسب پارامترها، حدود ۵۰ مرحله آزمایش انجام شد. محدوده مناسب پارامترها کاملاً به صورت تجربی تعیین شده است. افزایش هریک از پارامترها به بیش از حد بالای مشخص شده در آزمون، (توان ۱۴۰۰ وات، فشار ۷ بار، زمان ۰/۴ ثانیه) باعث نفوذ عمیق شیپوره و پارگی ناحیه جوش می‌شد. برای مثال با ثابت نگه داشتن پارامتر فشار در ۷ بار و زمان در ۰/۴ ثانیه و افزایش توان به حدود ۱۸۰۰ وات (افزایش توان دستگاه به صورت پیوسته نبود) پارگی ناحیه جوش حاصل شد. این اتفاق به صورت متناظر، برای دو پارامتر دیگر در فشار ۸ بار و زمان ۰/۵ ثانیه اتفاق افتاد. از طرفی با کاهش هریک از پارامترها به کمتر از حد پایین موجود در آزمون، باعث عدم شکل‌گیری مناسب جوش شد. برای مثال با ثابت نگه داشتن پارامتر فشار در ۷ بار و زمان در ۰/۴ ثانیه و کاهش توان به حدود ۶۰۰ وات، عدم اتصال ناحیه جوش یا اتصال بسیار ضعیف حاصل شد. این اتفاق به صورت متناظر، برای دو پارامتر دیگر در فشار ۴ بار و زمان ۰/۲۵ ثانیه اتفاق افتاد. برای انجام آزمون‌های جوش از دستگاه جوش فلز اولتراسونیک با فرکانس تشدید ۲۰ کیلوهرتز استفاده شده است. از آنجایی که پارامتر دامنه ارتعاش، وابسته به توان تنظیم شده بر روی دستگاه است، دستگاه قابلیت نمایش دامنه ارتعاش را نداشت و اطلاعاتی در مورد این پارامتر موجود نیست. در شکل ۷ نحوه قرارگیری نگهدارنده و شیپوره افقی نسبت به هم نمایش داده شده است. نحوه کار بدین صورت است که سه لایه با حدود ۲۰ میلی‌متر همپوشانی روی یکدیگر قرار می‌گیرند و دو نقطه اتصال به صورت دستی روی قطعات ایجاد می‌شود (محل ایجاد نقاط اتصال به صورت دستی علامت‌گذاری شده است). لازم به ذکر است که در طراحی نگهدارنده از دو طرف حدود ۲۰ میلی‌متر فاصله طولی جهت گیرش با پیچ و لقمه جهت جلوگیری از لغزش مجموعه در نظر گرفته شده بود اما در عمل نیازی به بستن پیچ و لقمه نشد. مجموعه نگهدارنده طراحی شده در شکل ۶ آورده شده است. در شکل ۸ و ۹ قطعات متصل شده از نمای بالا و نمای جانبی نمایش داده شده است.



شکل ۶ نگهدارنده طراحی شده شامل پایه، لقمه و پیچ



شکل ۷ نحوه قرارگیری مجموعه ورق‌ها و نگهدارنده نسبت به دستگاه

<sup>1</sup> Design Expert

<sup>2</sup> Response Surface

<sup>3</sup> Box-behnken



شکل ۸ سه لایه متصل شده به یکدیگر (دو لایه آلومینیوم و یک لایه کامپوزیت) مطابق استاندارد (ASTM D3528-96 (DOUBLE LAP SHEAR TEST) [۲۱] جهت انجام آزمون کشش



شکل ۹ سه لایه متصل شده به هم از نمای جانبی

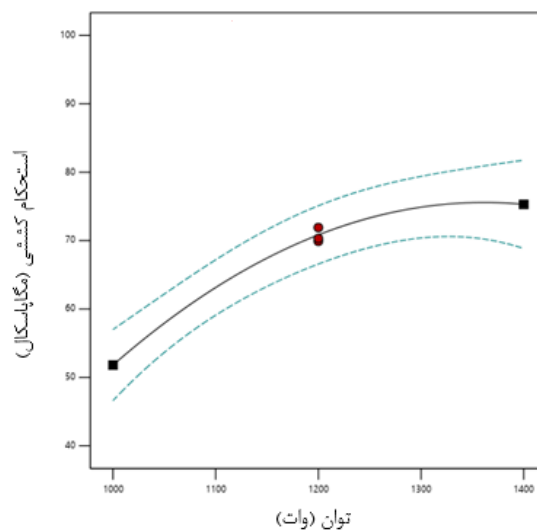
### ۳- نتایج و بحث

قطعات به صورت لایه به لایه و با دستگاه جوش التراسونیک فلز و با گیرش از طریق نگه‌دارنده مخصوص طراحی و ساخته شده به یکدیگر متصل شدند. قطعات متصل شده به هم در شکل ۵ نمایش داده شده است. طبق جدول طراحی آزمایش (جدول ۲)، ۱۵ نمونه آزمایشی (هر نمونه متشکل از دو لایه آلومینیوم و یک لایه کامپوزیت CFRP) به یکدیگر متصل شدند. به منظور دستیابی به بهینه‌ترین حالت پارامترها به صورت جداگانه و همچنین رفتار ترکیبی پارامترها، نمودارهای آثار پارامتر بر استحکام جوش و رویه‌های سه بعدی پاسخ سطح و تحلیل آن‌ها ارائه شده است. شکل‌های ۱۰ تا ۱۵ سطح پاسخ سه بعدی آزمایش را برای پارامترها به صورت دو به دو نمایش می‌دهد. با افزایش توان تا حد مشخصی، درجه حرارت در مقطع جوش افزایش می‌یابد و متعاقباً میزان نرم شدگی فلز آلومینیوم و کامپوزیت CFRP و در نهایت میزان نفوذ دو ماده در یکدیگر و تشکیل اتصال مکانیکی و شیمیایی قوی‌تر خواهد بود؛ اما با افزایش توان بیش از اندازه و متعاقباً افزایش دما در ناحیه اتصال، به دلیل انبساط موضعی بیشتر ناحیه اتصال در دمای بالاتر که موجب دیرتر خنک شدن و انقباض کندتر ناحیه اتصال نسبت به بقیه نواحی می‌شود، میزان تنش پسماند در ناحیه اتصال افزایش می‌یابد که این اتفاق در نهایت به کاهش رشد استحکام کششی برشی می‌انجامد.

با افزایش توان از ۱۰۰۰ به ۱۲۰۰ وات، شیب نمودار در شکل ۱۰ بیشتر است و استحکام کششی برشی به طرز ملموسی افزایش پیدا می‌کند اما با افزایش توان از ۱۲۰۰ به ۱۴۰۰ وات، شیب نمودار کاهش و تاثیر پارامتر توان بر استحکام کششی برشی کاهش پیدا می‌کند. در شکل ۱۱ با افزایش زمان و ادامه‌دار شدن اعمال امواج اولتراسونیک به مقطع جوش، میزان نرم‌شدگی و اختلاط دو ماده در یکدیگر افزایش پیدا خواهد کرد اما به دلیل کوچک بودن دامنه زمان، این افزایش از ۰/۳۵ تا ۰/۴ بیشتر نمود دارد. با افزایش زمان از ۰/۳ به ۰/۳۵ ثانیه شیب نمودار بسیار کند افزایش پیدا می‌کند، اما با افزایش از ۰/۳۵ تا ۰/۴ ثانیه شیب نمودار بیشتر و تاثیر این پارامتر بر استحکام کششی برشی بیشتر می‌شود. در شکل ۱۲ با افزایش فشار از ۵ به ۶ بار، تقریباً تغییری در نتایج استحکام کششی-برشی حاصل نمی‌شود و نتیجه ثابت می‌ماند اما با افزایش از ۶ به ۷ بار، کمی استحکام افزایش پیدا می‌کند. نمودارهای موجود در شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ میزان رشد استحکام کششی برشی را در هر پارامتر به صورت جداگانه با در نظر گرفتن دو پارامتر دیگر در حد وسط بازه نمایش می‌دهد. با توجه به شیب نمودار در شکل ۱۰ تاثیرگذاری بیشتر این پارامتر نسبت به دو پارامتر دیگر کاملاً مشهود است. در نهایت پارامترهای بهینه (بیشترین استحکام کششی-برشی) و همین‌طور کمترین استحکام کششی-برشی آزمون در جدول ۳ آورده شده است.

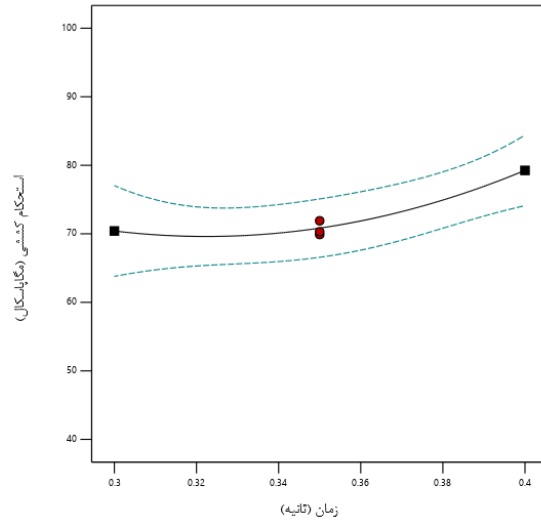
جدول ۲ جدول طراحی آزمایش به همراه نتایج حاصل شده

ردیف	W	P	t	استحکام کششی برشی
	w	bar	s	MPa
۱	۱۰۰۰	۶	۰/۳	۵۲/۱
۲	۱۴۰۰	۶	۰/۳	۷۶/۵
۳	۱۰۰۰	۶	۰/۴	۵۸/۵
۴	۱۴۰۰	۶	۰/۴	۸۳/۵
۵	۱۰۰۰	۵	۰/۳۵	۴۷/۶
۶	۱۴۰۰	۵	۰/۳۵	۷۷/۱
۷	۱۰۰۰	۷	۰/۳۵	۶۴/۶
۸	۱۴۰۰	۷	۰/۴	۹۲/۶
۹	۱۲۰۰	۵	۰/۳۵	۷۳/۹
۱۰	۱۲۰۰	۵	۰/۴	۷۸/۳
۱۱	۱۲۰۰	۷	۰/۳۵	۷۰/۷
۱۲	۱۲۰۰	۷	۰/۴	۸۸/۴
۱۳	۱۲۰۰	۶	۰/۳۵	۷۰/۳
۱۴	۱۲۰۰	۶	۰/۳۵	۷۱/۹
۱۵	۱۲۰۰	۶	۰/۳۵	۶۹/۹

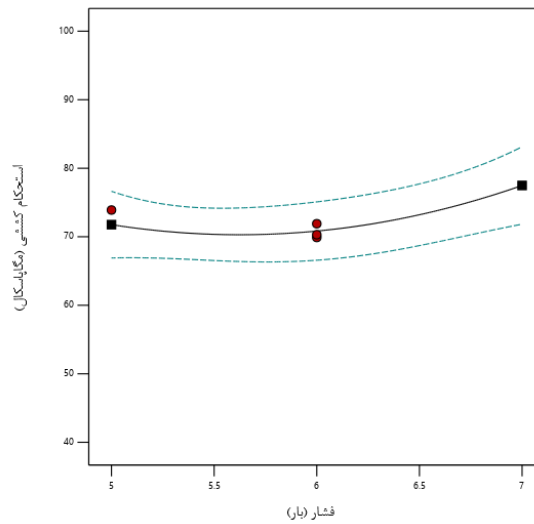


شکل ۱۰ نمودار استحکام کششی بر حسب توان با در نظر گرفتن دو پارامتر دیگر در حد وسط

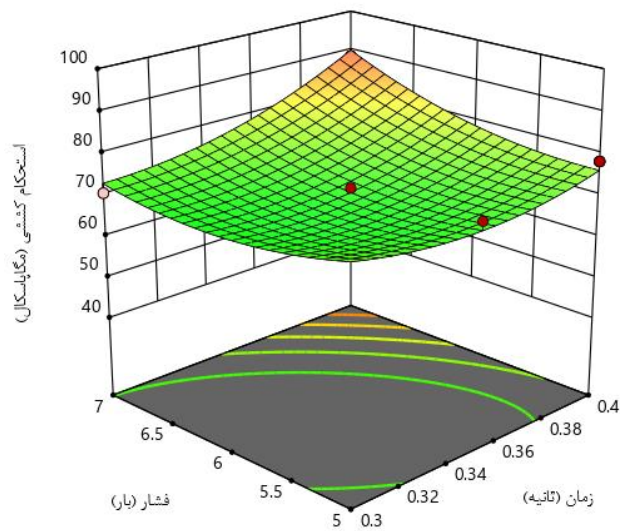
به منظور دستیابی به بهینه‌ترین حالت پارامترها به صورت جداگانه و همین‌طور رفتار ترکیبی پارامترها، رویه‌های سه بعدی پاسخ سطح و تحلیل آن‌ها ارائه شده است. شکل‌های ۱۳ تا ۱۵ سطح پاسخ سه بعدی آزمایش را برای پارامترها به صورت دو به دو نمایش می‌دهد. در شکل ۱۳ نقطه بهینه به طور همزمان برای هر دو پارامتر در زمان ۰/۴ ثانیه و فشار ۷ بار اتفاق می‌افتد. در شکل ۱۴ نقطه بهینه به صورت همزمان در فشار ۷ بار و توان ۱۴۰۰ وات اتفاق می‌افتد. در شکل ۱۵ نیز نقطه بهینه تقریباً در توان ۱۴۰۰ وات و زمان ۰/۴ ثانیه رخ می‌دهد.



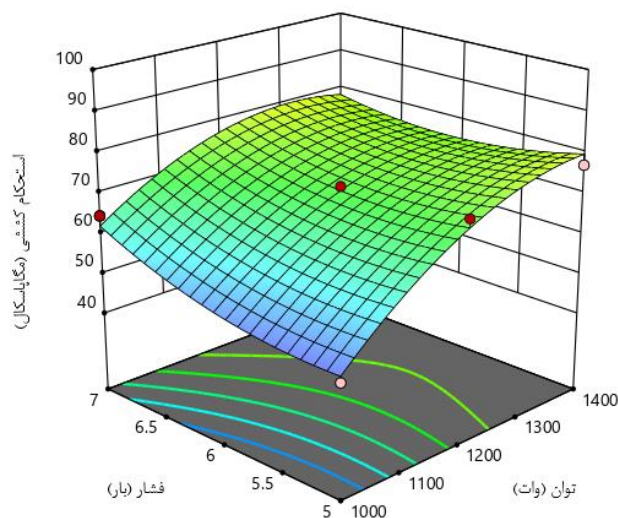
شکل ۱۱ نمودار استحکام کششی بر حسب زمان با در نظر گرفتن دو پارامتر دیگر در حد وسط



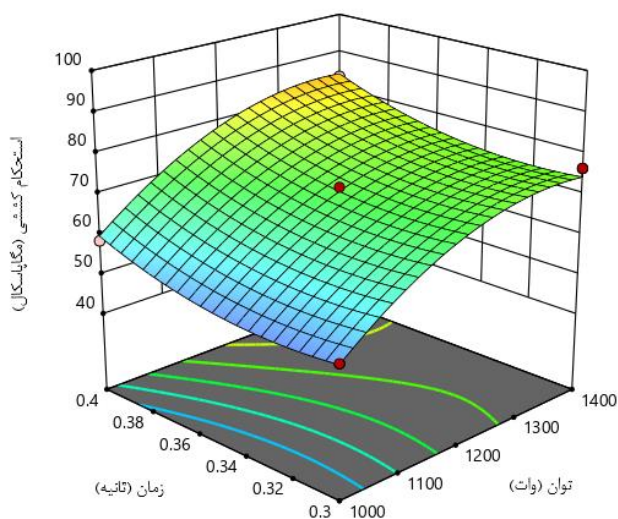
شکل ۱۲ نمودار استحکام کششی بر حسب فشار با در نظر گرفتن دو پارامتر دیگر در حد وسط



شکل ۱۳ رویه سطح پاسخ سه بعدی برای دو پارامتر زمان و فشار



شکل ۱۴ رویه سطح پاسخ سه بعدی برای دو پارامتر توان و فشار



شکل ۱۵ رویه سطح پاسخ سه بعدی برای دو پارامتر توان و زمان

جدول ۳ شرایط بهینه پارامترها

پارامتر	بیشترین استحکام کششی - برشی	کمترین استحکام کششی - برشی
توان (وات)	۱۴۰۰	۱۰۰۰
زمان (ثانیه)	۰/۴	۰/۳۵
فشار (بار)	۷	۵
استحکام کششی برشی (MPa)	۹۲/۶	۴۷/۶

#### ۴- نتیجه‌گیری

با توجه به کاربرد جوشکاری اولتراسونیک در اتصال مواد غیرهمجنس در این مقاله بررسی امکان پذیری اتصال ورق کامپوزیت و آلومینیوم با روش چاپ سه بعدی اولتراسونیک مورد مطالعه قرار گرفت. جهت بررسی این موضوع، سه ورق متشکل از دو ورق آلومینیوم به ضخامت ۱ میلی‌متر و یک ورق کامپوزیت به ضخامت ۰/۷ میلی‌متر (هر طرف دو نقطه اتصال) با استفاده از نگاه‌دارنده به یکدیگر متصل شدند. ابتدا ورق‌های آلومینیومی توسط لیزر و ورق‌های کامپوزیتی توسط واترجت به ابعاد مساوی بریده شدند. پس از

انجام چندین مرحله آزمون تجربی و استخراج حدود دامنه پارامترها، طراحی آزمایش با روش سطح پاسخ (باکس بنکن) انجام شد، همچنین به منظور بررسی و تحلیل داده‌ها، سه پارامتر توان، زمان و فشار جوشکاری هرکدام در سه سطح به کار گرفته شد. نتایج نشان داد بیشترین استحکام کششی-برشی (حدود ۹۲ مگاپاسکال) با پارامترهای فشار ۱۴۰۰ وات، زمان ۰/۴ ثانیه و فشار ۷ بار به دست می‌آید. همچنین مشخص شد که پارامتر توان، بیشترین تاثیر و پارامتر فشار کمترین تاثیر را در نتایج استحکام جوش دارد.

## References

- [1] Lambiasi F, Balle F, Blaga LA, Liu F, Amancio-Filho ST. Friction-based processes for hybrid multi-material joining. *Composite Structures*. 2021 Jun 15;266:113828. doi: 10.1016/j.compstruct.2021.113828
- [2] Lionetto F, Balle F, Maffezzoli A. Hybrid ultrasonic spot welding of aluminum to carbon fiber reinforced epoxy composites. *Journal of Materials Processing Technology*. 2017 Sep 1;247:289-95. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2017.05.002
- [3] Krüger S, Wagner G, Eifler D. Ultrasonic welding of metal/composite joints. *Advanced engineering materials*. 2004 Mar;6(3):157-9. doi: 10.1002/adem.200300539
- [4] Yang Y, Li Y, Li YA, Wang B, Ao S, Zhen Luo. Advances in ultrasonic welding of carbon fiber reinforced thermoplastic composites. *Journal of Mechanical Engineering*. 2021;57:130-56. doi: 10.3390/ma13061284 [In Chinese]
- [5] KianiMajd M, Hajjalimohammadi A, Raiat Roknabadi A, Golbaz S. Experimental study of the effect of ultrasonic waves on the parameters of the electrochemical deburring process. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2023 Apr 21;10(2):1-6. doi: 10.22034/IJME.2023.417555.1836 [In Persian]
- [6] KianiMajd M, Hajjalimohammadi A. Development of an electrochemical deburring process using ultrasonic waves for combustion engine oil spring ring. *The Journal of Engine Research*. 2024 Jun 21;71(2):55-68. doi: 10.22034/ER.2024.2025121.1040 [In Persian]
- [7] Jadidi T, Hajjalimohammadi A, Azadi M. Ultrasonic Assisted Drilling of Carbon Fiber Reinforced Plastic Composites with Non-Rotating Vibratory Tool. *Mechanics of Advanced Composite Structures*. 2022 Apr 1;9(1):147-54. doi: 10.22075/MACS.2022.24286.1356
- [8] Liu Y, Zhao H, Zhou B, Zhou L, Wang P, Yang H, Song X. A review on friction-based metal/polymer joining technology. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*. 2021;42. doi: 10.7527/S1000-6893.2021.25016 [In Chinese]
- [9] Liu Z, Li Y, Liu Z, Yang Y, Li Y, Luo Z. Ultrasonic welding of metal to fiber-reinforced thermoplastic composites: A review. *Journal of Manufacturing Processes*. 2023 Jan 6;85:702-12. doi: 10.1016/j.jmapro.2022.12.001
- [10] Zhou Y, Fan H, Jiang K, Gou M, Li N, Zhu P, Tu Y. Experimental flexural behaviors of CFRP strengthened aluminum beams. *Composite Structures*. 2014 Sep 1;116:761-71. doi: 10.1016/j.compstruct.2014.06.012
- [11] Meng F, Li W, Fan H, Zhou Y. A nonlinear theory for CFRP strengthened aluminum beam. *Composite Structures*. 2015 Nov 1;131:574-7. doi: 10.1016/j.compstruct.2015.06.022
- [12] Zhao XL, Zhang L. State-of-the-art review on FRP strengthened steel structures. *Engineering structures*. 2007 Aug 1;29(8):1808-23. doi: 10.1016/j.engstruct.2006.10.006
- [13] Teng JG, Yu T, Fernando D. Strengthening of steel structures with fiber-reinforced polymer composites. *Journal of constructional steel research*. 2012 Nov 1;78:131-43. doi: 10.1016/j.jcsr.2012.06.011
- [14] Harries KA, Peck AJ, Abraham EJ. Enhancing stability of structural steel sections using FRP. *Thin-walled structures*. 2009 Oct 1;47(10):1092-101. doi: 10.1016/j.tws.2008.10.007
- [15] Christke S, Gibson AG, Grigoriou K, Mouritz AP. Multi-layer polymer metal laminates for the fire protection of lightweight structures. *Materials & Design*. 2016 May 5;97:349-56. doi: 10.1016/j.matdes.2016.02105
- [16] Staab F, Liesegang M, Balle F. Local shear strength distribution of ultrasonically welded hybrid Aluminium to CFRP joints. *Composite Structures*. 2020 Sep 15;248:112481. doi: 10.1016/j.compstruct.2020.112481
- [17] James S, Dang C. Investigation of shear failure load in ultrasonic additive manufacturing of 3D CFRP/Ti structures. *Journal of Manufacturing Processes*. 2020 Aug 1;56:1317-21. doi: 10.1016/j.jmapro.2020.04.026
- [18] Dal Conte UF, F Villegas I, Tachon J. Ultrasonic plastic welding of CF/PA6 composites to aluminium: process and mechanical performance of welded joints. *Journal of Composite Materials*. 2019 Aug;53(18):2607-21. doi: 10.1177/0021998319836022
- [19] Guo H, Gingerich MB, Headings LM, Hahnlen R, Dapino MJ. Joining of carbon fiber and aluminum using ultrasonic additive manufacturing (UAM). *Composite Structures*. 2019 Jan 15;208:180-8. doi: 10.1016/j.compstruct.2018.10.004
- [20] Arenas JM, Narbón JJ, Alfá C. Optimum adhesive thickness in structural adhesives joints using statistical techniques based on Weibull distribution. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2010 Apr 1;30(3):160-5. doi: 10.1016/j.ijadhadh.2009.12.003

- [21] Ribeiro TE, Campilho RD, da Silva LF, Goglio L. Damage analysis of composite-aluminium adhesively-bonded single-lap joints. *Composite Structures*. 2016 Feb 1;136:25-33. doi: [10.1016/j.compstruct.2015.09.054](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.09.054)
- [22] Marannano GV, Zuccarello B. Numerical experimental analysis of hybrid double lap aluminum-CFRP joints. *Composites Part B: Engineering*. 2015 Mar 15;71:28-39. doi: [10.1016/j.compositesb.2014.11.025](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.11.025)
- [23] Lionetto F, Balle F, Maffezzoli A. Hybrid ultrasonic spot welding of aluminum to carbon fiber reinforced epoxy composites. *Journal of Materials Processing Technology*. 2017 Sep 1;247:289-95. doi: [10.1016/j.jmatprotec.2017.05.002](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.05.002)
- [24] ASTM D3528-96 (DOUBLE LAP SHEAR TEST)