

## ایجاد قابلیت جوشکاری در پلیمرهای گرماسخت تقویت شده به کمک آماده‌سازی سطحی با استفاده از پرتو لیزر

حامد تیربند، داود اکبری\*، محمد گلزار

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

(دریافت مقاله: 1400/05/19؛ پذیرش مقاله: 1400/06/17)

### چکیده

در این مقاله استحکام نمونه‌های پلیمری گرماسخت تقویت شده جوشکاری شده به روش فراصوتی که با روش آماده‌سازی سطحی به کمک پرتو لیزر آماده‌سازی شده‌اند، بررسی شده است. هدف اصلی بررسی مکانیزم‌های چسبندگی سطحی به‌ترتیب نسبت به سطح ساده و همچنین ایجاد رویکردهای عملی جهت افزایش قدرت چسبندگی اتصال قطعات گرماسخت و استفاده از این فرایند به عنوان تکنیک مقرون به صرفه است. بنابراین از دو ماده گرماترم پلی متیل متاکریلات و پلی پروپیلن به عنوان مواد واسطه برای ایجاد جوشکاری فراصوتی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهند که پارامتر نیرو و فشار در این اتصالات پارامترهای غیرتاثیرگذار بوده است و در جوش‌هایی با زمان بالاتر، رزین گرما سخت شروع به تخریب گرمایی کرده است. در تمامی قطعات در زمان جوشکاری، سه پارامتر اصلی فشار، زمان جوشکاری و زمان نگهداری به‌طور یکسان با مقدار 2 بار، 1/6 ثانیه و 3 ثانیه انتخاب شدند. نتایج نشان می‌دهد حداقل استحکام کششی در نمونه‌های مورد بررسی 1286 نیوتن است، که نسبت به حداکثر استحکام کششی نمونه‌های آماده‌سازی بدون سطح چندین برابر افزایش یافته است. نتایج این مقاله نشان می‌دهد که روش آماده‌سازی سطحی به کمک پرتو لیزر روش موثر در افزایش استحکام چسبندگی قطعات پلیمری گرما سخت می‌باشد.

کلمات کلیدی: جوشکاری فراصوتی، پلیمرهای گرما سخت، آماده‌سازی سطحی، استحکام کششی.

## Investigation of the ultrasonic welding strength in glass fiber reinforced thermoset polymers with surface preparation method using laser beam

H. Tirband, D. Akbari\*, M. Golzar

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

(Received 10 August 2021 ; Accepted 8 September 2021)

### Abstract

In this research, tensile strength of ultrasonic welded parts made of thermoset polymer-reinforced glass fiber with surface preparation has been investigated. In order to elevate the adhesion of two surfaces laser grooving method has been applied. Two type of thermoplastic materials including Polymethyl methacrylate (PMMA) and polypropylene (PP) have been used as interlayers. Influences of main welding parameters were investigated. The results show that the force and compression parameters in these joints have been ineffective parameters and in higher weld welds, the thermosetting resin has started thermal degradation. The pressure considered constant and set at 2 bar, welding time set at 1.6 seconds and holding time considered 3 seconds. The results showed that the minimum tensile strength of welded

\* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: [daakbari@modares.ac.ir](mailto:daakbari@modares.ac.ir)

samples with laser surface preparation method is 1286 N, which is much more than maximum tensile strength of welded samples without any surface preparation. This indicates that laser beam surface preparation is an effective method in improving of the adhesion strength of thermoset polymeric parts.

**Keywords:** Ultrasonic Welding - Hard Heat - Laser Surface - Tensile Strength.

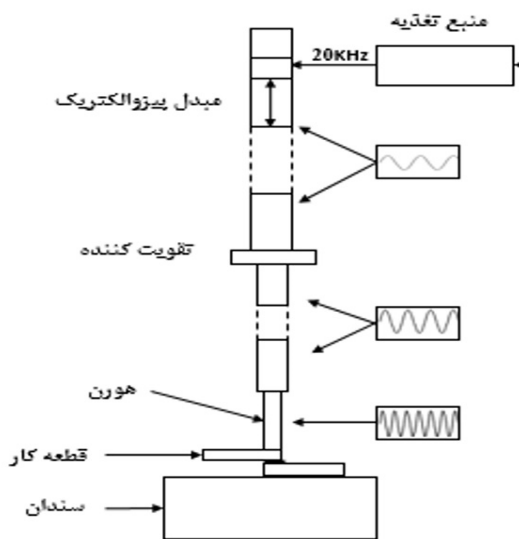
## 1- مقدمه

دستگاه جوشکاری فراصوتی شامل قسمت‌های مختلفی از جمله منبع تغذیه که تولید جریان با فرکانس مناسب را برعهده دارد، ترانسدیوسر، تقویت کننده و هورن و همچنین بدنه اصلی دستگاه می‌باشد. منبع تولید برق، جریان معمولی را تبدیل به جریانی با فرکانس 20 کیلوهرتز می‌کند. [4] این جریان با فرکانس مورد نظر به یک ترانسدیوسر فراصوتی که شامل پیرو الکتریک است اعمال می‌شود، که باعث ارتعاش شده و این ارتعاش از طریق بویستر به هورن که از قبل طراحی و مناسب اندازه سطح قطعه است انتقال پیدا می‌کند. اصطکاک ایجاد شده بین دو قطعه، باعث تولید گرما می‌شود که با بالا رفتن دمای دو قطعه، ذوب در آن منطقه اتفاق می‌افتد که باعث می‌شود دو قطعه اتصال، به داخل هم فرو روند و یکی شوند و اتصال نهایی برقرار شود [5]. در زمینه ایجاد قابلیت جوشکاری در پلیمرهای گرماسخت فعالیت‌های مختلفی انجام شده است. پتن و همکاران [6] با هم پخت کردن یک لایه نازک به اجزای اتصال اپوکسی، قابلیت جوشکاری داده‌اند. آن‌ها به این نتیجه رسیده‌اند که بین اپوکسی‌ها و گرمانرم‌ها شبکه‌های پلیمری تشکیل شده است. سپس با روش جوشکاری پرس‌ی آن‌ها را جوشکاری کرده‌اند و به استحکامی دست یافته‌اند که بالاتر از نمونه‌های چسبی است. شیلر و همکاران [7] بر روی اتصال نمونه‌های اپوکسی تقویت شده با الیاف کربن با روش جوشکاری القایی کار کرده‌اند. آن‌ها ابتدا اثر دما را بر روی خود نمونه اپوکسی تقویت شده بررسی کردند که نشان داده شد که نمونه‌های اپوکسی تا دمای 250 درجه سانتی‌گراد مشکلی به وجود نمی‌آید و جدایش از دمای 300 درجه سانتی‌گراد شروع می‌شود و در دمای 450 درجه سانتی‌گراد تمام اپوکسی تخریب خواهد شد. بعد از انجام تست‌ها آن‌ها متوجه شدند که بالاترین دمای تحمل گرما سخت، بالاترین استحکام

استفاده از قطعات پلیمری گرماسخت می‌تواند هزینه‌های مونتاژ را در سازه‌های فضایی حدود 50% نسبت به دیگر مواد پلیمری کاهش دهد [1]. معمولاً اتصال پلیمرهای گرما سخت با سه روش اتصال مکانیکی، چسبی و یا ترکیبی از این دو روش می‌باشد. جوشکاری این مواد بسیار محدود بوده و نیازمند توسعه روش‌های جدید است که در صورت توسعه تکنولوژی جوشکاری این مواد، باعث کاهش نسبی زمان و مقرون به صرفه‌تر و پوشاندن عیوب روش‌های دیگر اتصال خواهد شد [1]. در اتصالات مکانیکی بزرگترین نقطه ضعف اتصال، لزوم سوراخ کردن قطعه کار است که باعث ایجاد تمرکز تنش و نازک شدن قطعات می‌شود. برای رفع تمرکز تنش، تعداد لایه‌ها، ضخامت و وزن قطعه را بایستی افزایش داد که باعث از بین رفتن مزیت سبک بودن قطعات پلیمری می‌شود. علاوه بر آن، اتصال مکانیکی هزینه زیادی دارد. در اتصالات چسبی اگرچه نیاز به سوراخ کاری قطعات نیست، لذا دما، فشار، زمان و همچنین لزوم آماده‌سازی سطح برای اتصال باعث افزایش هزینه‌ها خواهد شد [2].

اتصال جوشی یک روش با کارایی بهتر برای انواع اتصالات است که با مدت زمان نسبی کمتر، اتصال قابل قبولی ایجاد می‌کند. از آنجا که پلیمرهای گرماسخت قابلیت جوشکاری ندارند، لذا از یک لایه واسط گرمانرم برای ایجاد قابلیت جوشکاری در میان قطعات گرما سخت استفاده می‌شود. اتصال جوشی بر اساس ذوب شدن و یا نرم شدن مواد واسط گرمانرم با افزایش دما انجام می‌گیرد. از این رو روش‌های زیادی برای اتصال جوشکاری قطعات پلیمری زمینه گرما نرم مانند روش فراصوتی، لیزر، القایی، اغتشاشی، گاز داغ و مقاومتی وجود دارند [3].

بدست آمد. کمترین مقدار استحکام کششی با انتخاب مناسب پارامترهای فرایند، 2341 نیوتن تخمین زده شد. در تمامی تحقیقات انجام شده، محدودیت بزرگ اتصال جوشکاری عدم نفوذ کامل لایه گرمانرم در بین الیاف قطعات تحت اتصال است که موجب کاهش استحکام می‌گردد. در بسیاری از تحقیقات هم یک لایه گرمانرم در زمان ساخت به لایه گرماسخت هم‌پخت شده است که موجب افزایش زمان و هزینه نهایی و از بین رفتن مزیت یک مرحله‌ای بودن عملیات جوشکاری می‌گردد.



شکل 1- شمای دستگاه جوشکاری فراصوتی.

در این مقاله برای حذف محدودیت‌های ذکر شده در ایجاد اتصال جوشکاری بین نمونه‌های پلیمری گرما سخت تقویت شده از روش آماده‌سازی سطحی با کمک پرتو لیزر استفاده شده است. برای اتصال و کیفیت بهتر از یک هورن مستطیل شکل در جوشکاری فراصوتی استفاده شده که تمام سطح را می‌پوشاند و عملیات جوش را در یک مرحله انجام می‌دهد. اهداف اصلی افزایش استحکام سطحی پلیمرهای گرماسخت و همچنین معرفی رویکردهای عملی مناسب نظیر استفاده از مواد واسطه مناسب جهت بالابردن استحکام قطعات و فرایندهای آماده‌سازی سطحی به عنوان تکنیک‌های ساخت مقرون به صرفه برای مونتاژ سریع ساختارهای پلیمر گرما سخت‌های تقویت شده

را نتیجه می‌دهد و نتیجه گرفتند که استفاده از ماده گرما سخت با تحمل حرارتی بیشتر است می‌تواند استحکام بالاتری را در جوشکاری القایی ایجاد کند. ویلگاس و همکاران [8] بر روی جوش نمونه‌های اپوکسی تقویت شده با الیاف کربن کار کردند. جوشکاری به صورت دو حالت تک لایه هادی انرژی و لایه هم پخت شده و دیگری فقط با وجود یک لایه هادی انجام شد. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که تخریب گرمایی اپوکسی بوده است.

چونگ و همکارانش [9] با استفاده از روش استحکام لب به لب بر روی نمونه‌های پلیمری پلی پروپیلن تقویت شده با الیاف شیشه کار کردند که آن‌ها این نمونه‌ها را در دو سطح  $(10-30)\%$  که به روش جوشکاری فراصوتی اتصال یافته بودند، به طور تجربی بررسی کردند. فاکتورهای موثر اصلی به ترتیب فشار جوشکاری، زمان جوشکاری، شکل هدایت کننده انرژی و دامنه ارتعاش می‌باشد. کم‌ترین استحکام در کامپوزیت با  $10\%$  شیشه بدست آمد، که به طور کلی پارامترهای بهینه عبارتند از: دامنه 40 میکرون، فشار جوشکاری 2 بار، زمان جوشکاری  $0/33$  و زمان نگهداری  $0/15$  ثانیه.

بیل و همکاران [10] بر روی اتصال پلیمرهای پلی آمید تقویت شده با الیاف کربن را به ورقه‌های آلومینیمی 2024 مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. در این مطالعه تجربی، میزان اثر واکنش رفتارهای متفاوت گرمایی بر روی خواص مکانیکی و میکروساختاری اتصال بررسی شد.

نیکوی و همکاران [11] با روش طراحی آزمایش، استحکام اتصال نمونه‌ها به صورت لب به لب روی هم نمونه‌های پلیمری پلی پروپیلن تقویت شده با الیاف شیشه را که به روش جوشکاری فراصوتی اتصال یافته بودند، به طور تجربی بررسی کردند. نتایج تحقیقات نشان داد که دامنه، مقدار الیاف شیشه، زمان جوشکاری و فشار جوشکاری به ترتیب بیشترین تاثیر را بر استحکام جوش این نوع پلیمر دارند. همچنین کمترین مقدار برای استحکام کششی، در دامنه ارتعاش  $31/66$  میکرون، زمان جوشکاری  $0/4$  ثانیه، فشار نگهداری  $1/5$  بار و مقدار الیاف شیشه

است.

## 2- روش تحقیق

پلیمرهای گرماسخت تقویت شده به طور معمول قابلیت جوشکاری ندارند. لکن با استفاده از مواد واسطه گرمانرم و جوشکاری فراصوتی این قابلیت را در این مواد می توان ایجاد نمود. مهمترین خاصیت جوشکاری فراصوتی سرعت بالای آن است و ویژگی دیگر آن هم تمرکز تولید گرما در فصل مشترک است که برای جوشکاری گرماسختها بسیار مطلوب خواهد بود. در شکل (1) شمایی از یک دستگاه جوشکاری فراصوتی قابل مشاهده است.

برای بهبود استحکام پلیمرهای گرماسخت تقویت شده از آماده سازی سطح با لیزر استفاده شده است. آماده سازی سطح با لیزر، ایجاد الگوهای مناسب بر سطح قطعه کار می باشند که مقدار نفوذ مواد واسطه در قطعات را افزایش داده و استحکام کششی را گسترش می دهد. لذا در این مقاله با طراحی و اجرای این الگوهای سطحی، استحکام اتصال بهبود یافته است.



شکل 2- ساخت نمونه های پلیمری گرماسخت تقویت شده با الیاف شیشه.

## 2-2- آماده سازی سطح

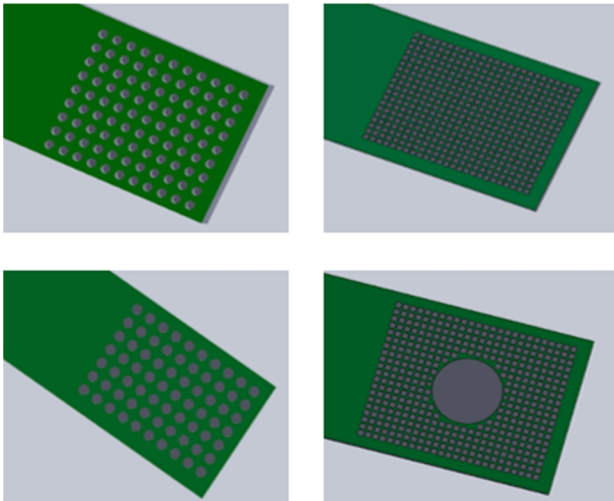
برای اتصال جوشکاری پلیمرهای گرماسخت تقویت شده می توان از دو روش هم پخت کردن و آماده سازی سطح استفاده کرد. در روش هم پخت کردن از انواع روش های حرارت دهی اصطکاکی، حرارت دهی الکترومغناطیسی، گرمادهی حجمی و تکنیک های دو مرحله ای استفاده نمود. در مقابل در روش آماده سازی سطح از فرسایش پرتو لیزر، پولیش دستی، سایش مکانیکی، حرکت ارتعاشی و اچ شیمیایی کردن روش هایی می باشد که قابل استفاده می باشد. هدف از آماده سازی سطح از بین بردن اپوکسی جهت نفوذ مواد واسطه در قطعه، و در نتیجه آن بالا بردن استحکام کششی و افزایش مقاومت قطعات می باشد.

در این مقاله آماده سازی سطح قطعات با استفاده از روش فرسایش پرتو لیزر انجام شده است، این روش با استفاده از انرژی لیزر که در سطح قطعه کار متمرکز می شود بهره می برد. انرژی کاملاً متمرکز شده و با چگالی بالا، بخش هایی از قطعه

## 2-1- آماده سازی نمونه ها

برای ساخت نمونه ها از دو محلول مایع رزین اپوکسی و هاردنر 2021 که در دمای محیط مستحکم می شوند استفاده شده است. طبق پیشنهاد شرکت سازنده نسبت رزین به هاردنر 100 به 55 گرم می باشد. برای تهیه نمونه های کامپوزیتی از الیاف شیشه نوع E که به صورت پارچه ای و دارای بافت دو بعدی با خواص طولی و عرضی یکسان است، با چگالی سطحی  $200 \text{ g/m}^2$  استفاده شده است. در ابتدا نمونه ها با ضخامت  $1/5$  میلی متر با تعداد 8 لایه گذاری می شود و مقدار الیاف مورد نیاز بریده و با توجه به آن، مقدار رزین می شود. به منظور ایجاد ضخامت یکسان و خواص برابر، نمونه ها یکجا ساخته می شوند. برای این منظور از یک قالب فولادی به اندازه  $25 \times 30$  سانتی متر استفاده شده که جهت جلوگیری از چسبیدن رزین به قالب از یک ورق نازک تفلونی در زیر و روی کار استفاده می شود. سپس به وسیله لایه چینی دستی ساخت کامپوزیتها انجام

میلی متر طراحی شدند و تمامی عمق آن‌ها 1 میلی متر می‌باشد، که با توجه به میزان قدرت پرتو لیزر بتوان آن‌ها را ایجاد کرد.



شکل 4- سطح لیزر شده با الگوی دایره ای.

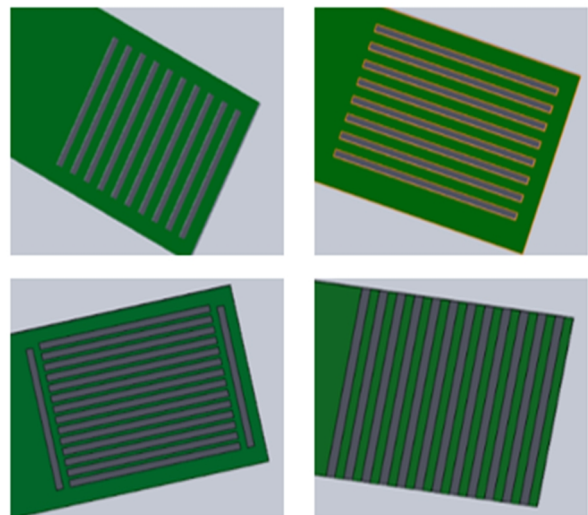
### 2-3- مواد واسطه

برای اتصال قطعات از مواد واسطه‌ای از جنس گرمانرم استفاده شده است. گرمانرم‌ها به خاطر ویژگی خاص که با افزایش دما بدون تغییر شیمیایی ذوب می‌شوند و این پلیمرها را می‌توان به دفعات ذوب و دوباره جامد نمود انتخاب شدند. گرمانرم‌ها در دمای بیش از دمای انتقال شیشه‌ای خود، منعطف هستند. اغلب گرمانرم‌ها در دمای کمتر از نقطه ذوب خود حاوی مناطق بلورینی هستند که بین نواحی آمورف قرار دارند. نواحی آمورف، ویژگی کشسانی و نواحی بلورین، استحکام و صلیبیت را به ماده می‌بخشند. از بین مواد گرمانرم از دو ماده پلی‌پروپیلن و پلی‌متیل متاکریلات انتخاب شدند.

پلی پروپیلن‌ها پلیمری با دانسیته تقریبی  $0/9$  گرم بر سانتی متر مکعب از پلیمریزه شدن منومر پروپیلن به دست می‌آید. این ماده در برابر رطوبت، روغن‌ها و حلال‌های معمولی مقاوم بوده و در دمای حدود  $170$  درجه سانتی‌گراد ذوب می‌گردد. این ماده غیرسمی و بی‌بو در هنگام سوختن همانند شمع به قطرات ذوب شده واکس مانند تبدیل شده و با شعله‌ای بدون دود و بویی کمی زننده می‌سوزد. مقاومت در برابر کشش، چگالی کم، بی‌رنگی، سختی، مقاومت در برابر اسید، باز و حلال‌ها و هزینه تولید کم از جمله ویژگی‌های پلی پروپیلن محسوب می‌شود.

را به شیوه‌ای کنترل شده ذوب و تبخیر می‌کند. این فرایند که نیازی به خلا ندارد برای ایجاد اشکال مختلف بر روی سطوح استفاده شده است.

تمامی قطعات بعد از ساخت در اندازه‌های استاندارد برش داده شد. سپس آماده سازی سطح بر روی آن‌ها انجام گرفت. برای طراحی الگوهای لیزر خطی از نرم‌افزار سالیدورک استفاده شد، قطعات به صورت‌های که در شکل‌های (3 و 4) قابل مشاهده است.

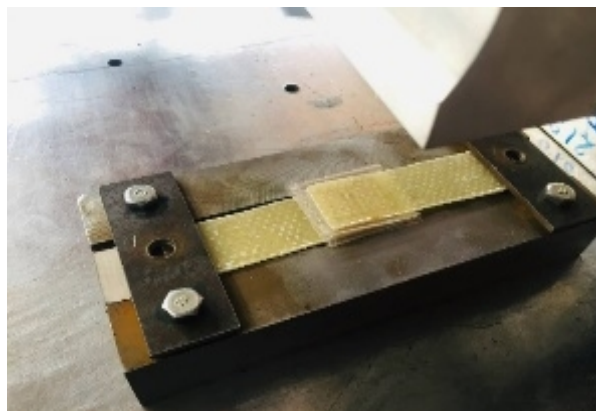


شکل 3- سطح لیزر شده با الگوی شیاردار.

برای انتخاب نوع شکل‌های سطوح با توجه به طول و عرض قطعات سعی شد طراحی به گونه‌ای باشد که بیشتر فضای سطح را پوشش دهد. به همین خاطر یک سطح به صورت شیار دار در زوایای مختلف که در شکل (3) مشخص است استفاده شد. عمق تمامی شیارها 1 میلی متر می‌باشد. شیار دار بودن باعث می‌شود هنگام ذوب، مواد واسطه در زمان جوشکاری امکان قرارگرفتن بیشتر ماده را داشته باشد. انتخاب این نوع شکل‌ها برای شیار با توجه به میزان قدرت لیزر و نسوختن لبه‌های نمونه‌ها با کم‌ترین فاصله ممکن نسبت به هم طراحی شده‌اند.

سطح برخی نمونه‌ها که با الگوی دایره لیزر شده با توجه به امکان ایجاد سایزهای مختلف باعث ایجاد شکل‌های بیشتری وجود داشت. در همین راستا دایره‌ها با قطرهای  $1/5$ ،  $1/5$  و  $2$

می‌گیرد تا آماده جوشکاری شود. فیکسچر مورد استفاده در شکل (5) قابل مشاهده می‌باشد.



شکل 5- یک نمونه از قطعات درون فیکسچر.

#### 4- آزمون استحکام اتصالات

تمامی نمونه‌های جوشکاری شده بعد از آماده‌سازی سطح، تنظیم پارامترها و اتمام جوشکاری برای انجام تست استحکام کششی توسط دستگاه کشش با ظرفیت 2 تن مورد ارزیابی قرار گرفتند.

#### 4-1- طراحی آزمایش ونتایج حاصله

به طور کلی در طراحی آزمایش چهار فاز عملیاتی وجود دارد که شامل مراحل ساخت نمونه، آماده‌سازی سطح، جوشکاری و تست استحکام کششی است. در طراحی آزمایش در مرحله ساخت نمونه‌ها تمامی قطعات در اندازه 1/5 میلی‌متری ساخته و در اندازه‌های استاندارد برش داده شدند. در مرحله بعد از ساخت نمونه که آماده‌سازی سطحی قطعات ساخته شده بود، اشکال مورد نیاز بر روی قطعات با نرم‌افزار سالدورک طراحی گردیدند و سپس این اشکال که با دو صورت دایره ای و شیار دار طراحی شده بودند توسط پرتو لیزر آماده‌سازی سطحی شدند. در مرحله سوم انجام عملیات جوشکاری توسط دستگاه جوش فراصوتی انجام شد.

جوشکاری با وارد کردن سه فاکتور فشار، زمان جوشکاری و زمان نگهداری به همراه ابتدا و انتهای بازه تغییرات هر کدام، طراحی آزمایش انجام گرفت که به طور خلاصه می‌توان به اطلاعات جدول (1) اشاره کرد. فشار جوشکاری برحسب بار،

این ماده واسطه در زمان استفاده برای جوشکاری از 5 لایه بر روی هم که ضخامت 2 میلی‌متری به وجود آمده بود استفاده شده است.

پلی متیل متاکریلات دومین ماده واسطه مورد استفاده در این مقاله است. این گرمانرم خواص مقاوم در برابر آب و هوا، بسیار عالی را نشان می‌دهند یعنی وقتی در معرض تماس با شرایط جوی قرار می‌گیرند، مقاومت بالایی دارند و در برابر هوازادگی و شرایط محیطی (دما، فشار و رطوبت یا بخار آب) بسیار مقاوم می‌باشند. سختی سطح عالی، قابلیت تحمل عالی در برابر شرایط آب و هوایی گوناگون، مقاومت عالی در برابر هوازادگی و شرایط جوی، مقاومت بالا در برابر نور خورشید، صلب و انعطاف ناپذیر همراه با استحکام ضربه‌ای خوب، پایداری ابعادی عالی و کاهش حجم و انقباض درون قالبی پایین و شکل‌دهی گرمایی آن‌ها با چقرمگی دومحوری، یا دوبعدی، افزایش می‌یابد از دیگر مزایای این ماده است. جنس این ماده شفاف و سخت است از ضخامت 1 میلی‌متری دارا می‌باشد که با گذاشتن تنها یک لایه از آن جهت جوشکاری استفاده شده است.

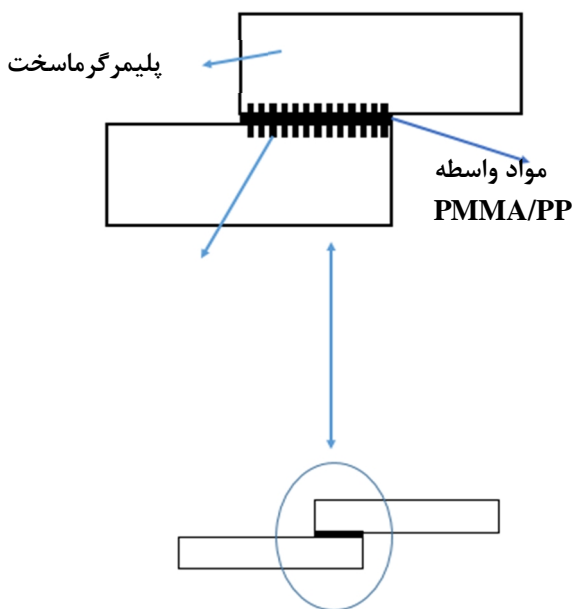
#### 3- فرایند جوشکاری

برای عملیات جوشکاری از یک دستگاه جوش فراصوتی با فرکانس 20 کیلوهرتز و قدرت 2600 وات استفاده شده است که از یک منبع تغذیه دیجیتالی که تمامی اطلاعات عملیات جوشکاری را برعهده داشت استفاده شده است. دامنه ارتعاش دستگاه جوشکاری فراصوتی استفاده شده حدود 25 میکرون است و در این آزمایش از هورن مستطیل شکل که سطح آن بدون آج بوده است استفاده شد که تمامی سطوح قطعه را می‌پوشاند.

برای انجام جوشکاری فراصوتی قطعات که طبق استاندارد ای اس تی ام دی 5868 به ابعاد 25 در 100 میلی‌متر و با ضخامت 1/5 میلی‌متر بریده شده اند، از یک فیکسچر به شکل زیر که از قبل طراحی و ساخته شده است استفاده شده است. فیکسچر به منظور نگهداری قطعه کار در موقعیت مشخص استفاده می‌گردد. به عبارتی وسیله‌ای است که قطعه کار در آن قرار

پارامترهای در نظر گرفته شده و سطوح تغییرات آن‌ها در روش مورد استفاده در این مقاله تعداد 10 آزمایش در مرحله طراحی آزمایش لحاظ شد و جوشکاری بر روی آن‌ها انجام و آزمون استحکام کششی بر روی آن‌ها صورت گرفت.

بررسی نوع شکست در این اتصالات دو نکته مهم را بیان می‌کند. اول اینکه شکست در تمامی نمونه‌های جوشکاری شده از محل اتصال ماده واسطه با قطعات بوده است که نشان از ساخت مناسب قطعات و در هم پیچیدگی درست الیاف با رزین می‌باشد و دوم اینکه در قطعات لیزر شده، برخلاف قطعات ساده، ماده گرما نرم مذاب حین جوشکاری هیچ‌گونه بیرون راندگی ندارد و کامل در قطعات فرو می‌رود اما سطح ساده بدلیل نداشتن فضای خالی بعد از جوش ماده واسطه از بغل به بیرون راه پیدا می‌کند. در شکل (9) شماتیک پلیمرهای گرماسخت تقویت شده با الیاف شیشه با مواد واسطه گرمانرم قابل مشاهده است.



شکل 6- نحوه اتصال قطعات.

در شکل (7) نمودار استحکام کششی قطعات با ماده واسطه پلی‌پروپیلین مشاهده می‌شود و در شکل (8) نمودار استحکام کششی قطعات با ماده واسطه پلی متیل متاکریلات مشاهده می‌شود. نمودار شکل (7) کاملاً بیانگر این است که چسبندگی قطعه ساده نسبت به قطعه آماده‌سازی سطحی از استحکام

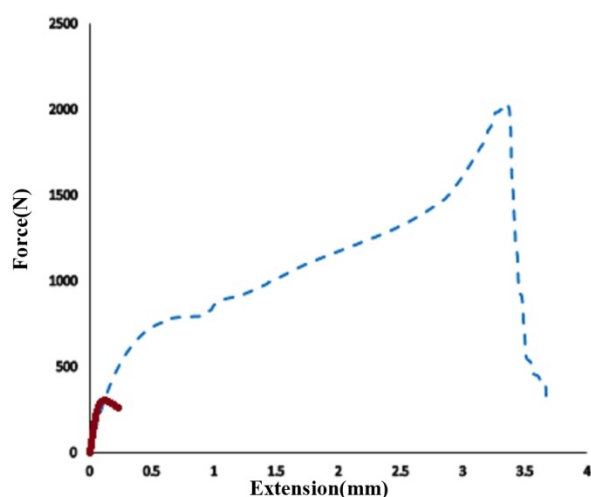
زمان جوشکاری بر حسب ثانیه و زمان نگهداری نیز بر حسب ثانیه می‌باشد. انجام جوشکاری با طراحی آزمایش بر روی قطعاتی که ابعاد آن‌ها، اندازه‌های استاندارد آماده شده بودند، مطابق با جدول و به‌طور مرتب انجام شدند تا از بروز خطای سیستمی جلوگیری شود. برای بدست آوردن نتایج علمی از تاثیر پارامترها بر جوش به شکل ظاهری نمونه‌ها اکتفا نکرده و نمونه‌ها برای بررسی خواص مکانیکی مورد تست قرار گرفتند. بدین منظور برای همه نمونه‌هایی که با هر دو ماده واسطه جوش داده شدند، آزمایش استحکام کشش انجام گرفت. در انتخاب پارامترهای مورد استفاده در جدول، در ابتدا آزمایش‌های نمونه‌ای روی قطعات متعددی انجام شد تا حدود پارامترها برای جوش پذیر بودن قطعات استخراج گردد. در این راستا و براساس تجربه ایجاد شده و همچنین قابلیت‌های دستگاه جوش آلتراسونیک مورد استفاده در این مقاله، زمان نگهداری، زمان جوش و فشار دستگاه انتخاب و در جدول اعمال شد. گام آخر آزمایش تست کشش نمونه‌های جوشکاری شده است، آزمایش‌های درم‌ای اتاق و با سرعت کشش 2 میلی‌متر توسط دستگاه تست کشش تک محوره صورت گرفت.

جدول طراحی براساس مقایسه استحکام کششی قطعات دارای سطح ساده با نمونه‌های آماده سازی سطح با لیزر طراحی شده است. هدف از طراحی جدول، بدست آوردن و نتیجه‌گیری مناسب و مقایسه نمونه‌ها در سطح ساده و سطح لیزر شده با توجه به استفاده از دو نمونه مواد واسطه در تمامی قطعات و انتخاب یکسان تمامی پارامترهای جوشکاری می‌باشد تا مقاومت و قدرت چسبندگی نمونه‌ها به صورت برابر بررسی گردد. هدف از انتخاب اشکال دایره و شیار کم کردن فضای خالی بین طرح‌ها که مواد واسطه نفوذ بیشتری در قطعه داشته باشند.

##### 5- بررسی نتایج و بحث

نمونه‌ها با استفاده از پارامترهای عنوان شده یکسان در بخش طراحی آزمایش جوشکاری و سپس براساس ابعاد هندسی استاندارد بریده و تحت آزمون قرار گرفت. براساس تعداد

گرماسخت تقویت شده الیاف شیشه خواهند داشت. در این نمودار تحمل استحکام کششی قطعه ساده 346 نیوتن می‌باشد در حالی که قطعه آماده سازی شده سطح با لیزر 2021 نیوتن تحمل بار کششی از خود نشان داده است. همانگونه که در بخش طراحی آزمایش بیان شد، 10 آزمایش در طراحی آزمایش لحاظ شد که تعدادی از آن‌ها با سطح ساده و بقیه آماده‌سازی سطح شده‌اند. جوشکاری بر روی تمامی قطعات انجام و آزمون استحکام کششی بر روی آن‌ها انجام گرفت که نتیجه این فعالیت‌ها در جدول شماره (1) نشان داده شده است.

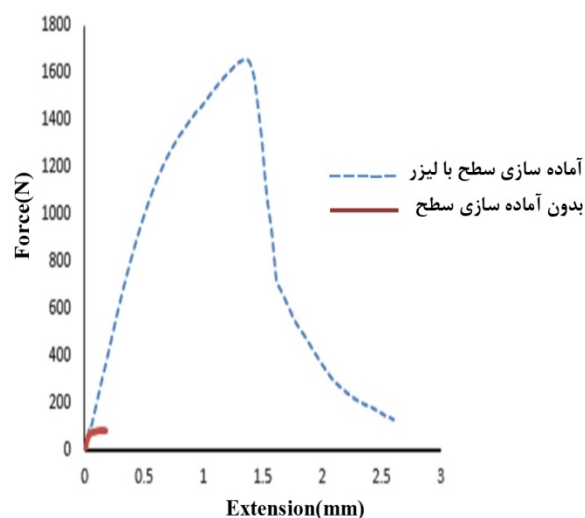


شکل 8- نمودار استحکام کششی قطعات باماده واسطه پلی متیل متاکریلات

نتیجه‌ها نشان از آن است که آماده سازی سطح و استفاده از ماده واسطه مناسب تاثیر بسزایی در استحکام کششی قطعات دارد. در این تحقیق به خوبی نشان داده شده است که قطعات ساده در مقابل قطعات آماده سازی سطح که با پرتو لیزر می‌باشد از استحکام و قدرت کششی کمتری برخوردار می‌باشند.

حداقل استحکام قطعات آماده‌سازی سطحی در مقایسه با حداکثر استحکام قطعات ساده از مقاومت بیشتری برخوردارند. در آماده‌سازی سطح از دو نوع شکل استفاده شده است، که اشکال دایره‌ای نسبت به شیار دار با توجه به پوشش بیشتر سطح قطعات از قدرت چسبندگی بیشتری برخوردار بودند، که این خود نشان از اهمیت بالای آماده سازی سطح می‌باشد که باعث افزایش و مقاومت قطعات گردیدند. ایجاد اشکال شیاردار در مقایسه با سطح ساده نیز از قدرت چسبندگی بیشتری برخوردار

بسیار کم‌تری برخوردار است. استحکام کششی قطعه ساده 81 نیوتن می‌باشد در حالی که قطعه آماده سازی شده سطح با لیزر 1655 نیوتن تحمل بار کششی از خود نشان داده است. این نمودار به خوبی نشان می‌دهد که قطعه‌ای با ایجاد اشکال بر روی سطح آن در مقایسه با قطعه ساده باعث نفوذ پذیری بیشتر ماده واسطه در خود شده و همین امر باعث مقاومت بیشتر قطعه نسبت به قطعات ساده می‌باشد. قطعات ساده به دلیل سطح یکنواخت، در هنگام جوشکاری ماده واسطه بعد از ذوب شدن به کناره‌های قطعات انتقال پیدا می‌کند و میزان کمی بین دو قطعه بر روی سطح نفوذ پیدا می‌کند که باعث چسبندگی کمتر قطعات می‌شود. با آماده سازی سطح بر روی قطعه می‌توان باعث مقاومت و قدرت چسبندگی بیشتر پلیمرهای گرما سخت تقویت شده الیاف شیشه شد.



شکل 7- نمودار استحکام کششی قطعات با ماده واسطه پلی پروپیلن.

در دیگر نمودار که در شکل شماره (8) قابل مشاهده است، قطعه کارهای بدون آماده سازی سطح و قطعه کار آماده سازی سطح شده توسط پرتو لیزر را نشان می‌دهد که با ماده واسطه پلی متیل متاکریلات به همدیگر جوش خورده‌اند. در این نمودار برتری قدرت استحکام کششی نمونه لیزر شده نسبت به ساده به وضوح قابل مشاهده است و در مقایسه با دیگر ماده واسطه هم از میزان تحمل کشش بالاتری برخوردار است. که این خود بیانگر این است علاوه بر آماده‌سازی سطح ماده واسطه چه میزان تاثیر فراوانی در استحکام نمونه‌های پلیمری



جدول 1- طراحی آزمایش جوشکاری فراصوتی پلیمرهای تقویت شده با الیاف شیشه.

آزمایش	آماده سازی سطح	فشار (BAR)	زمان جوشکاری (S)	زمان نگهداری (S)	استحکام برشی سطح (N)	استحکام برشی سطح (MPA)
1	ساده	2	1/6	3	67	2/62
2	ساده	2	1/6	3	81	3/16
3	ساده	2	1/6	3	49	1/91
4	ساده	2	1/6	3	133	5/20
5	ساده	2	1/6	3	346	13/54
6	شیار	2	1/6	3	1529	58/34
7	شیار	2	1/6	3	1286	50/17
8	دایره	2	1/6	3	1655	62/91
9	دایره	2	1/6	3	2021	78/80
10	دایره	2	1/6	3	1628	61/83

- آماده سازی سطحی با پرتو لیزر زیری سطح را به نوعی افزایش می دهد و باعث افزایش قابل ملاحظه ای تحمل استحکام کشش اتصال نسبت به سطح ساده شده است.

- پارامترهای زمان و دما در استحکام نهایی اتصال تاثیرگذار است. پارامترهای نیرو و فشار در این نمونه های انجام شده در این مقاله غیرتاثیرگذار است.

- براساس نتایج الگوی سطح حکاکی شده به دلیل ایجاد عمق بر روی سطح بر استحکام اتصال تاثیر می گذارد به طوری که در قطعات آماده سازی سطح کمترین استحکام مربوط به سطح شیاردار برابر 1286 نیوتن است. در حالی که بیشترین استحکام سطح ساده 346 نیوتن است.

- ضخامت قطعه کامپوزیتی تاثیر مهمی در استحکام اتصال جوشکاری فراصوتی دارد.

- آماده سازی سطح بر روی قطعه، باعث مقاومت بیشتر قطعه در مقابل بار کششی و قدرت چسبندگی بیشتر پلیمرهای گرما سخت تقویت شده الیاف شیشه باشد.

#### منابع

1- Amend, P., T. Frick, and M. Schmidt. "Experimental studies on laser-based hot-melt bonding of thermosetting

می باشند. استفاده از آماده سازی سطح در نمونه خود باعث مقاومت بیشتر قطعات در مقابل استحکام کششی شده است. لذا می توان با روش پیشنهادی در الگوهای جدید و تغییر در مواد واسطه اتصال مناسبی را پیشنهاد نمود.

به دلیل نفوذ لایه نازک گرمانرمها در عمق ایجاد شده بر روی سطح و فضاهای خالی بین الگوها اتصال قوی تری را ایجاد کردند.

#### 6- نتیجه گیری

در این مقاله تاثیر پارامترهای نمونه های با سطح ساده و سطح آماده سازی شده توسط لیزر در استحکام اتصال جوشکاری فراصوتی در کامپوزیت های گرماسخت تقویت شده با الیاف شیشه بررسی شد. در این پژوهش کامپوزیت ها از اپوکسی / شیشه ساخته و توسط دو ماده گرما نرم به عنوان مواد واسطه به هم متصل شدند و با آزمایش استحکام برشی تحت کشش قرار داده شدند. نتایج حاصل نشان می دهد که:

- در نمونه های جوشکاری فراصوتی مورد توجه در این مقاله، زمان 1/6 بیشتر موجب تخریب گرمایی زمینه اپوکسی می شود.

ICCM, 2015.

9- Liu, Shih Jung, I Ta Chang, and Shiu Wan Hung. "Factors affecting the joint strength of ultrasonically welded polypropylene composites." *Polymer Composites* 22.1 (2001): 132-141.

10- Löbel, Thomas, et al. "A hybrid bondline concept for bonded composite joints." *International Journal of Adhesion and Adhesives* 68 (2016): 229-238.

11- Nikoyi.Reza, et al. "Experimental analysis of effects of ultrasonic welding on weld strength of polypropylene composite samples." *International Journal of Engineering* 28.3 (2015): 447-453.

12- Villegas, Irene Fernandez, and Pablo Vizcaino Rubio. "On avoiding thermal degradation during welding of high-performance thermoplastic composites to thermoset composites." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 77 (2015): 172-180.

13- Amend, P., T. Frick, and M. Schmidt. "Experimental studies on laser-based hot-melt bonding of thermosetting composites and thermoplastics", *Physics procedia* 12 (2011): 166-173.

14- Hou, Meng, Andrew Beehag, and Qiang Yuan. "Welding techniques for polymer or polymer composite components." U.S. Patent No. 8,790,486. 29 Jul. 2014.

15- Dehaghani, R. Chitsaz, M. M. Shokrieh, and F. Taheri-Behrooz. "An investigation on effects of acid etching duration on adhesive bonding of polyethylene to E-glass/epoxy composites." *International Journal of Adhesion and Adhesives* 85 (2018): 177-183.

composites and thermoplastics." *Physics procedia* 12 (2011): 166-173.

2- Hou, Meng. "Thermoplastic adhesive for thermosetting composites." *Materials Science Forum*. Vol. 706. Trans Tech Publications Ltd, 2012.

3- C. Ageorges, L. Ye, M. Hou, *Advances in fusionbonding techniques for joining thermoplastic matrix composites: a review*, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 32, No. 6, pp. 839-857, 2001/06/01/, 2001.

4- Charlson, Paul M., Clarence R. Schwieters, and Jun H. Souk. "Laser joining of thermoplastic and thermosetting materials." U.S. Patent No. 4,414,166. 8 Nov. 1983.

5- Parmar, Umang, and D. H. Pandya. "Experimental investigation of ultrasonic welding on non-metallic material." *Procedia Technology* 23 (2016): 551-557.

6- Deng, Shiqiang, et al. "Thermoplastic-epoxy interactions and their potential applications in joining composite structures-A review." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 68 (2015): 121-132.

7- Schieler, Oliver, and Uwe Beier. "Induction welding of hybrid thermoplastic-thermoset composite parts." *Applied Science and Engineering Progress* 9.1 (2016): 27-36.

8- Fernandez Villegas, I., and P. Vizcaino Rubio. "High-temperature hybrid welding of thermoplastic (CF/Peek) to thermoset (CF/Epoxy) composites." ICCM 20: 20th International Conference on Composite Materials, Copenhagen, Denmark, 19-24 July 2015.