نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال پنجم، شماره 1، بهار و تابستان1398، صفحه 116-105

بررسی ویژگی های مکانیکی در مقیاس ماکروسکوپی فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی کامپوزیت پلی پروپیلن تقویت شده با 40 درصد الیاف شیشه

حامد انهاری[1] ، امیرحسین میثمی[1*] ، ایمان فخاری گلپایگانی[2]

۱- گروه مهندسی متالورژی و مواد، دانشکده فنی و مهندسی گلپایگان، گلپایگان، ایران.

۲- گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی گلپایگان، گلپایگان، ایران.

(دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۱/۱۹ ؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۷/۲۴)

چکیده

در این مقاله جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ورق های پلی پروپیلن۱ با ۴۰ درصد الیاف شیشه به روش تجربی، مورد مطالعه قرار گرفته است. همانند سایر روش های جوشکاری استحکام محل اتصال مهم ترین مشخصه در این فرآیند می باشد. پارامترهای زیادی از جمله هندسه ابزار، سرعت دورانی، سرعت خطی و زاویه کلگی به عنوان پارامترهای ورودی و با اهمیت در این نوع جوشکاری می باشد. بنابراین در تحقیق حاضر، تأثیر این پارامترها بر جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ورق های پلی پروپیلن بررسی و استخراج گردیده است. آزمایشات بر اساس روش تاگوچی و آرایه متعامد که برای طرح های سه سطحی مناسب می باشد، طراحی شده است. مدل سازی و تحلیل آماری با استفاده از آنالیز واریانس و نسبت سیگنال به نویز انجام پذیرفته است. بر اساس نتایج به دست آمده ابزار با پین استوانه ای – مخروطی پیچی کیفیت ظاهری بهتر و استحکام بالاتری را از خود نشان می دهد. از میان پارامترهای مورد بررسی، سرعت دورانی بیشترین و معنادارترین تاثیر را بر استحکام کششی – برشی و شکل ظاهری جوش دارا می باشد. پارامترهای بهینه جوشکاری شامل سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه، سرعت خطی ۲۰ میلیمتر بر دقیقه و زاویه کلگی ۱ درجه به دست آمد.

کلمات کلیدی: جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی، کامپوزیت پلی پروپیلن، الیاف شیشه، استحکام کششی-برشی.

Investigation of Mechanical Features at Macroscopic Scale for Friction Stir Welding of Polypropylene Strengthened with 40% Glass Fiber

H. Anhari[1], A. H. Meysami[*1], I. Fakhari Golpayegani[2]

1-Metallurgy and Materials Engineering Group, Golpayegan University of Engineering,Golpayegan, Iran
2-Mechanical Engineering Group, Golpayegan University of Engineering,Golpayegan, Iran

(Received 8 April 2018 ; Accepted 16 October 2018)

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: meysami@gut.ac.ir

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-10-30]

Abstract

In this paper experimentally, the friction-stir welding of the polypropylene sheets with 40% glass fiber has been investigated. Comparison to other welding methods, the strength of the joint is the most important feature in this process. Many parameters such as tool geometry, rotational speed, linear velocity, and tilt angle are very important as input parameters in this type of welding. Therefore, in the present study, the effect of these parameters on the friction-stir welding of the polypropylene composite sheets have been extracted. Experiments are based on the Taguchi method and the orthogonal L9 array that are suitable for three-level designs. Statistical analysis have been performed as variance (ANOVA) and signal-to-noise ratio. Based on the results, the tool with a screw cone-cylindrical pin has a better apparent quality and higher tensile-shear strength. Results analyze show the rotational speed has the most significant effect on the tensile-shear strength and appearance of the weld. The joint with maximum tensile strength is obtained at rotational speed of 1000 rev/min, welding speed of 20 mm/min and tilt angle of 1 degree.

Keywords: Friction-Stir Welding, Polypropylene Composite, Glass Fiber, Tensile-Shear Strength.

1- مقدمه

به دلیل بالا بودن نسبت استحکام به وزن بالا و فرم دهی نسبتاً ساده ی مواد مرکب پلیمری تقویت شده با الیاف، استفاده از آن ها در سازه های مهندسی در سال های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. این مواد در صنایع مختلف از جمله هوافضا، خودروسازی، دریایی و غیره مورد استفاده قرار می گیرند. در برخی تجهیزات پیچیده و بزرگ که از این مواد ساخته می‌شوند، ایجاد اتصال با روش هایی مانند جوشکاری بین آنها ناگزیر خواهد بود. استفاده از روش های معمول جوشکاری باعث ایجاد عیوب مختلف جوش، چون عدم ذوب، جدایش، سوختن و تبخیر است. بنابراین جوشکاری اصطکاکی- اغتشاشی به عنوان یکی از بهترین روش ها برای رفع مشکل جوشکاری پلیمرهای تقویت شده با الیاف مطرح می باشد. جوش ایجاد شده به این روش تنش پسماند کمتر، خواص مکانیکی بهتر و صافی سطح بالاتری خواهد داشت [۱و۲].

نخستین بار روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در موسسه جوشکاری بریتانیا ابداع و برای جوشکاری آلیاژهای آلومینیوم به کار گرفته شد [۳]. این فرآیند به دلیل عدم نیاز به ماده پرکننده، مصرف کم انرژی و سازگاری با محیط زیست استفاده فراوانی در صنعت پیدا کرده است. در این فرآیند ابزار مصرف نشدنی خاص با حرکت چرخشی و شرایط کنترل شده وارد منطقه جوش شده و با ایجاد فشار و اصطکاک بین ابزار و قطعه کار موجب بالا رفتن دما و نرم شدن محل تماس در لبه ها شده و قطعات به یکدیگر پیوند می خورند[۴]. از جمله پارامترهای مهم در جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی هندسه ابزار، سرعت دورانی و خطی ابزار، نیروی محوری و زاویه کلگی می باشد.

روش جوشکاری اصطکاکی- اغتشاشی برای اولین بار در سال ۱۹۹۷ برای جوشکاری پلاستیک ها استفاده گردید[۵]. در سال‌های اخیر نیز تحقیقات متعددی در زمینه جوشکاری اصطکاکی- اغتشاشی پلیمرها انجام شده است. پایگانه و همکاران [۶]، جوشکاری اصطکاکی- اغتشاشی پلی پروپیلن با الیاف شیشه را به روش تجربی بررسی و اثرات هندسه ابزار بر استحکام جوش را مطالعه نمودند. جایگانش و همکاران [۷]، بهینه سازی پارامترهای جوشکاری اصطکاکی- اغتشاشی در ورق های پلی پروپیلن با چگالی بالا به ضخامت ۵ میلی متر را انجام دادند. سرعت دورانی، سرعت خطی و نیروی محوری از جمله پارامترهای مورد بررسی در این تحقیق بود و استحکام جوش با تست کشش و ریزساختار مورد تحلیل قرار گرفت. در تحقیق پانرسلوام و همکاران [۸]، از روش جوشکاری اصطکاکی- اغتشاشی برای جوشکاری ورق های پرکاربرد نایلون ۶ با ضخامت ۱۰ میلیمتر استفاده گردید. ابزار مورد استفاده پین پیچی چپ گرد بوده و اثرات جهت چرخش ابزار در جهت ساعتگرد و پاد ساعتگرد را مطالعه نمودند. مطالعات آنها نشان داد که جوش با حرکت در خلاف جهت عقربه های ساعت موجب کاهش عیوب جوش و بهبود خواص آن خواهد

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-10-30]

شد. پیری زاد و همکاران [۹]، ابزاری جدید برای جوشکاری ورق های ABS را طراحی نمودند. این ابزار دارای دو پین که یکی با سطح بالای اتصال و دیگری با سطح پایین قطعه ها تماس دارد تشکیل شده است.

در آزمایشات اثر هندسه ابزار (استوانه ای یا مخروطی)، سرعت دورانی و خطی آن بر خواص مکانیکی جوش بررسی گردید. در میان پارامترهای مورد بررسی هندسه ابزار به عنوان موثرترین پارامتر بر استحکام کششی شناخته شد. سیموئز و رودریگز [۱۰]، جریان مواد و پدیده های ترمو مکانیکی ایجاد شده در جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی پلیمرها را مورد مطالعه قرار دادند.

تنش های پسماند ایجاد شده حین جوشکاری و رابطه آن با شرایط متفاوت جوشکاری استخراج گردید. حسین لقاب و همکاران [۱۱]، به بررسی اثرات پارامترهای اصلی جوشکاری اصطکاکی- اغتشاشی بر خزش ورق های پلی اتیلن متصل شده به یکدیگر پرداختند.

تست های متفاوت خزش، با بار یک گیلوگرم و در زمان های متفاوت از ۰/۵ الی ۲ ساعت روی این ورق ها انجام شده و نتایج حاکی از بهبود خواص خزشی ناحیه جوش نسبت به ماده پایه بوده است.

شاهمیری و همکاران [۱۲]، امکان اتصال ورق های پلی پروپیلن و آلیاژهای آلومینیوم را بررسی و اثرات دما بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال استخراج گردید. نتایج حاکی از این مسأله بود که، حداکثر استحکام کششی اتصال بالاتر از انجام جوش با روش های دیگر جوشکاری می باشد.

یان و همکاران [۱۳]، از یک ابزار دوپین برای اتصال لب به لب ورق های پلی پروپیلن با چگالی بالا استفاده گردید. آزمایشات تجربی بر اساس آرایه متعامد تاگوچی L9 انجام شده و نتایج آنها نشان داد که سرعت جوشکاری تأثیر بالایی بر استحکام اتصال دارد.

کوراب و همکاران [۱۴]، به منظور افزایش استحکام جوش قطعات PVC همزمان با انجام جوشکاری اصطکاکی نقطه ای، ذرات SiC را به ناحیه جوشکاری وارد کردند. از ورق با سوراخ راهنمای مختلف برای بررسی جوشکاری استفاده نمودند و به این نتیجه رسیدند که افزودن ماده کامپوزیتی موجب افزایش استحکام جوش می گردد.

از جمله مزیت های کامپوزیت پلی پروپیلن با چهل در صد الیاف نسبت به کامپوزیت های با درصد الیاف کمتر، بالاتر بودن سختی، مقاومت بیشتر نسبت به ضربه، کاهش درصد افزایش طول و کاهش قابل ملاحظه ضریب انبساط حرارتی آن می باشد. لذا از این نوع کامپوزیت در ساخت برخی از قطعات خودرو که در معرض ارتعاش و حرارت قرار داشته باشند، استفاده می شود. به دلیل بالاتر بودن درصد الیاف شیشه ایجاد اختلاط مواد در منطقه جوش با یکنواختی کمتری همراه است و انتخاب پروفیل مناسب ابزار این مشکل را بر طرف خواهد کرد.

بر اساس بررسی های صورت گرفته و مراجع موجود، جوشکاری اصطکاکی-اغتشاشی کامپوزیت پلی پروپیلن با چهل درصد الیاف شیشه به همراه استخراج و تحلیل نتایج بر اساس دو تحلیل آماری مختلف، تا کنون صورت نپذیرفته است. لذا هدف از انجام پژوهش حاضر، بررسی خواص مکانیکی جوشکاری اصطکاکی- اغتشاشی ورق های پلی‌پروپیلن تقویت شده با ۴۰ درصد الیاف شیشه می باشد.

ورق هایی به ابعاد ۲۰۰×۲۰۰ و ضخامت ۱۰ میلیمتر ساخته و به روش جوشکاری روی هم اتصال بین آنها برقرار شده است. آزمایشات با استفاده از آرایه متعامد L9 تاگوچی طراحی شده و اثر پارامترهای جوشکاری شامل سرعت چرخشی، سرعت خطی جوشکاری و زاویه کلگی بر روی استحکام کششی- برشی بررسی می شود.

از چهار نوع ابزار متفاوت برای جوشکاری ورق ها استفاده شده و بهینه ترین هندسه در میان این ابزارها برای جوشکاری معرفی گردیده است.

در نهایت به منظور تحلیل نتایج، شامل بررسی سهم تاثیر هر یک از پارامترها و معنا دار بودن آنها از آنالیز واریانس و تعیین مقادیر بهینه آن ها از روش سیگنال به نویز استفاده گردیده است.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-10-30]

2-مواد و روش ها

2-1-ماده زمینه

ماده زمینه کامپوزیت مورد استفاده در این پژوهش پلی پروپیلن می باشد. پلی پروپیلن با کمترین دانسیته بین ترموپلاست ها و با استحکام، صلبیت و مقاومت خوب در برابر پدیده خستگی یکی از پرمصرف ترین پلاستیک های مهندسی در صنایع به شمار می آید. از پلی پروپیلن شرکت پتروشیمی ایران با مشخصات جدول(۱) در ساخت ورق ها استفاده شده است. از ترکیب پلی-پروپیلن با الیاف های تقویت کننده مانند الیاف شیشه و الیاف کربن می توان به جهت دست یابی به خواص بهتراستفاده نمود. در این تحقیق از الیاف شیشه نوع E به عنوان تقویت کننده استفاده شده، و در شکل(۱) نمودار تنش- کرنش و در جدول(۲) نیروی گسیختگی، تنش حداکثر و کرنش کامپوزیت ساخته شده بیان گردیده است.

2-2- طراحی ابزار

یکی از عوامل اساسی که بیشترین تأثیر را در پروفیل اتصال و خواص جوش دارد، طراحی ابزار می باشد. طراحی ابزار در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، شامل دو بخش انتخاب جنس و طراحی هندسه است به نحوی که، جنس ابزار بر روی ضریب اصطکاک و در نتیجه حرارت تولیدی و هندسه آن بر پروفیل اتصال، جریان ماده و نیروی وارد به ابزار در حین جوشکاری تاثیر می گذارد. برای ساخت ابزار، از فولاد ابزاری (X100CrMoV51) به دلیل سختی نسبتاً بالا، مقاومت حرارتی خوب، قیمت مناسب و همچنین سرعت برشی نسبتاً بالا در هنگام کار استفاده می شود.

براساس تحقیقات گذشته [۶،۱۵ و۱۶] چهار نوع از مناسب‌ترین ابزارها به عنوان طرح پایه برای طراحی ابزارهای جدید در این تحقیق استفاده گردیده است. مشخصات و هندسه این چهار ابزار در جدول(۳) و شکل(۲) به ترتیب نشان داده شده است.

2-3-طراحی آزمایش ها

در ابتدا، برای تعیین بهینه ترین هندسه ابزار برای رسیدن به مناسب ترین شکل ظاهری و بالاترین استحکام و پس از انجام آزمایشات متعدد پارامترهای جوشکاری شامل سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه، سرعت خطی۱۶ میلی‌متر بر دقیقه و زاویه کلگی ۱ درجه و در جهت ساعتگرد انتخاب گردیده است. در نهایت با مشخص شدن مناسب ترین ابزار از نتایج آزمایش اولیه، اثر سایر پارامترها بر استحکام کششی-برشی استخراج می شوند. در این تحقیق برای طراحی آزمایش ها و رسیدن به حالت بهینه، روند طراحی آزمایش تاگوچی مورد استفاده قرار گرفته است. سه پارامتر فرآیند قابل کنترل شامل سرعت دورانی، سرعت خطی و زاویه کلگی در فرآیند شناسایی و هر کدام از پارامترها در سه سطح تعریف شده اند. به دلیل زیاد بودن تعداد آزمایش ها آرایه متعامد L9 به عنوان ماتریس طراحی برای کمینه کردن تعداد آزمایشات مربوطه انتخاب گردیده است. پارامترهای مورد بررسی در جدول(۴) ارائه شده‌اند. انتخاب پارامترها با توجه به میزان تاثیرگذاری آنها و محدوده ها بر اساس آزمایشات مختلف انجام شده و با استفاده از تحقیقات قبلی در این زمینه انتخاب گردیده اند[۶و ۱۳]. قابل ذکر است در ســـرعت های دورانی بالاتر از ۱۳۰۰ دور بر

جدول۱- مشخصات پلی پروپیلن استفاده شده [۱۹]

چگالی Gr/cm^3	ازدیاد طول %	سختی HRC	مقاومت به ضربه j/cm^2	مدول خمشی MPa	استحکام کششی MPa	شاخص مذاب gr/10min
۰/۹۱۴	۱۳	۷۱	۰/۴	۱۵۰۰	۳۴	۶

جدول۲- نیروی گسیختگی، تنش حداکثر و کرنش کامپوزیت مورد استفاده

نوع ماده	نیروی گسیختگی (N)	تنش حداکثر (MPa)	کرنش (%)
کامپوزیت پلی‌پروپیلن با ۴۰ درصد الیاف شیشه	۳۸۶۴	۱۶/۳	۰/۰۵

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-10-30]

جدول۳-مشخصات ابزارها

شماره ابزار	نام ابزار	مشخصات
۱	استوانه‌ای پیچی	قطر پین ۴ میلیمتر، طول پین ۷/۷ میلیمتر و قطر شولدر ۱۲ میلیمتر است. یک شیار هم در پیشانی ابزار با مقطع دایره ای ایجاد شده است و دندانه ی پیچها راست گرد و M6×0.8
۲	استوانه ای – مخروطی پیچی	قطر پین ۴ میلیمتر، طول پین ۷/۷ میلیمتر و قطر شولدر ۱۲ میلیمتر
۳	استوانه ای – مخروطی ساده	قطر پین ۴ میلیمتر، طول پین ۷/۷ میلیمتر و قطر شولدر ۱۲ میلیمتر
۴	پین مخروطی شیاردار	گام ۱.۵ میلیمتر و شولدر ارشمیدسی و جهت دوران ساعتگرد، طول پین ۷/۷ میلیمتر و قطر شولدر ۱۲ میلیمتر

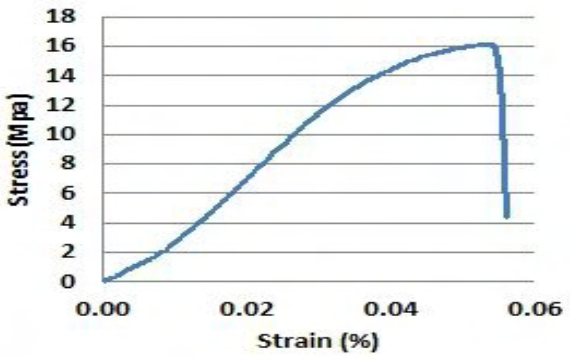
جدول۴- مقادیر مربوط به کدهای ماتریس طراحی

پارامترهای فرآیند	واحد	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
سرعت دورانی	rpm	۸۰۰	۱۰۰۰	۱۲۵۰
سرعت خطی	mm/min	۱۶	۲۰	۲۵
زاویه کلگی	degree	۰	۱	۲



ابزار شماره۱ ابزار شماره۲ ابزار شماره۳ ابزار شماره۴

شکل۲- هندسه ابزار ها



شکل۱-نمودار تنش – کرنش کامپوزیت

دقیقه به علت عدم توانایی دستگاه و ارتعاش زیاد کیفیت جوش کاهش یافته و در سرعت های دورانی پایینتر از ۷۵۰ دور بر دقیقه نیز به علت ایجاد اغتشاشات کم در خط اتصال، جوش انجام نمی شود.

در سرعت های خطی بالاتر از ۲۵ میلیمتر بر دقیقه ماده فرصت خمیری شدن و الیاف نیز فرصت جابه جایی و قرار گرفتن در مسیر خط اتصال را پیدا نخواهد کرد. همچنین در سرعتهای خطی پایین تر از ۱۶ میلیمتر بر دقیقه نیز به دلیل توقف بیش از حد در محل اتصال، جوش به صورت پودر در می آید. از زاویه کلگی، برای کمک به جریان بیشتر ماده، جلوگیری از بیرون ریختن مواد از حوضچه جوش و افزایش نیروی فورجینگ جهت استحکام بیشتر پیوند تشکیل شده استفاده می‌شود. در زاویه های بالاتر از ۲ درجه جوش خوبی بدست نیامده و به همین دلیل محدوده این پارامتر بین ۰ تا ۲ درجه در نظر گرفته شده است. درجدول(۵) شماره آزمایشات طراحی شده به روش تاگوچی مشاهده می شوند.

پس از طراحی آزمایشات، جوشکاری بصورت روی هم بر قطعاتی که ابعاد آنها در اندازه های ۱۰×۵۰×۱۰۱ میلیمتر آماده شده بودند انجام و در نهایت مجموعه جوشکاری شده به ابعاد ۱۰×۵۰×۱۷۷ میلیمتر ایجاد گردید.

با توجه به نوع اتصال جوش که به صورت روی هم است و در حین وارد شدن ابزار به قطعه کار نیروی زیادی به آن وارد و

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-10-30]

جدول۵- آزمایشات طراحی شده به روش تاگوچی

شماره آزمایش	سرعت دورانی(rev/min)	سرعت خطی(mm/min)	زاویه کلگی(degree)
۱	۸۰۰	۱۶	۰
۲	۸۰۰	۲۰	۱
۳	۸۰۰	۲۵	۲
۴	۱۰۰۰	۱۶	۱
۵	۱۰۰۰	۲۰	۲
۶	۱۰۰۰	۲۵	۰
۷	۱۲۵۰	۱۶	۲
۸	۱۲۵۰	۲۰	۰
۹	۱۲۵۰	۲۵	۱

باعث جابجایی قطعه کار در حین فرآیند می شود، از زیرکاری های با جنس فولادی که نحوه قرار گیری آنها در شکل(۳) نشان داده شده است استفاده گردیده است.



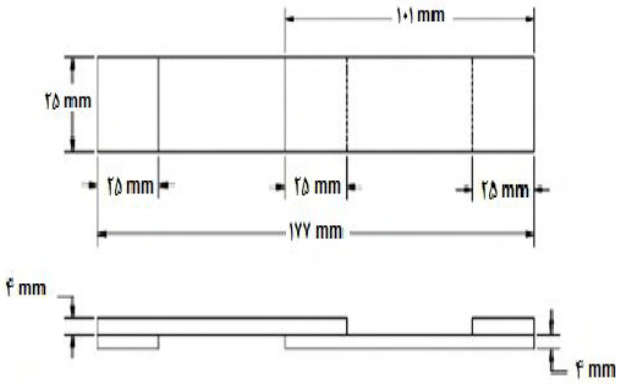
شکل۳- مجموعه دستگاه فرز و فیکسچر جوشکاری

2-4-نمونه های تست کشش

از آنجایی که فواصل ۱۰ میلیمتری از لبه های ابتدایی و انتهایی خط جوش به دلیل ناپایداری شرایط دمایی معمولاً خواص نامطلوبی از خود نشان می دهند، پس از انجام فرآیند جوشکاری از قطعه کار جدا و از باقیمانده قطعات برای تهیه نمونه ها استفاده شده است. نمونه هایی با ابعاد نشان داده شده در شکل(۴) و مطابق با استاندارد ASTM D5868 برای آزمایش ها آماده گردیده است .

2-5-دستگاه های استفاده شده در پژوهش

از دستگاه های اکسترودر با مارپیچ همسوگرد و پرس داغ شرکت کیمیا فروز و قالبی با ابعاد ۲۰×۲۰×۱ سانتی متر برای ساخت ورق ها و از دستگاه SANTUM مدل STM-۱۵۰ که پژوهشگاه بنیاد علوم کاربردی رازی موجود است برای آزمایش کششی - برشی استفاده گردید .



شکل۴-ابعاد و شکل هندسی نمونه آزمایش کششی - برشی

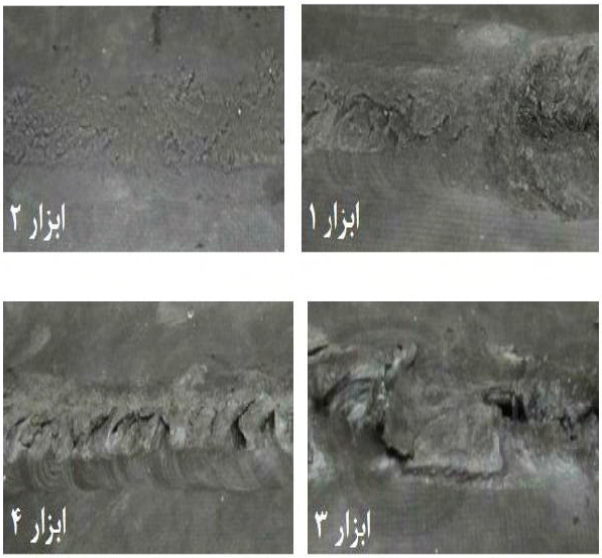
3-نتایج و بحث

3-1-تاثیر هندسه ابزار برشکل ظاهری جوش

برای درک بهتر تاثیر هندسه ابزار، تصاویر جوش های حاصل از چهار ابزار بر کامپوزیت پلی یروییلن با ۴۰٪ الیاف شیشه در شکل(۵) نشان داده شده اند. با توجه به جدول(۳) و شکل(۴) طول پین ابزار ها برابر ۷/۷ میلیمتر و ضخامت دو ورق ۸ میلیمتر بوده، لذا فرو رفتگی اولیه ابزار داخل ورق ها به میزان ۷/۵ میلیمتر در جوشکاری لحاظ شده است. بر اساس مشاهده تصاویر سطح جوشکاری، کیفیت ظاهری سطح جوش بدست آمده از ابزار شماره ۲ نسبت به کیفیت سطح جوش ابزارهای دیگر بهتر و جوشکاری انجام شده با این ابزار یکنواخت و با عرض ثابت می باشد. این مسئله به دلیل هندسه خاص این ابزار و بیشتر بودن سطح تماس آن با قطعه کار و ایجاد

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-10-30]

اصطکاک و حرارت بیشتر است. همچنین شیارهای موجود بر روی پین ابزار باعث ایجاد اغتشاش بهتر مواد خمیری در محل درز جوش می گردد. ابزار ۳ بدترین کیفیت سطح جوش را، به دلیل ساده بودن پین و عدم ایجاد اغتشاش کافی در مواد و همچنین کوچک بودن سطح تماس و کاهش اصطکاک و حرارت، ایجاد می نماید. ابزار شماره ۱ درمقایسه با ابزار شماره ۲ سطح تماس کمتری را با قطعه کار ایجاد می کند واین کاهش سطح تماس باعث کاهش اصطکاک و حرارت تولیدی و در نهایت این امر موجب کاهش کیفیت سطح جوش می شود. ابزار شماره ۴ نیز که پین آن مخروطی رزوه دار است درمقایسه با ابزار شماره ۱ سطح تماس کمتری را با قطعه کار ایجاد کرده و این امر موجب می شود تا کیفیت جوش ابزار شماره ۴ درمقایسه با ابزار شماره ۱ کاهش پیدا کند.



شکل۵-جوش های به دست آمده با استفاده از چهار ابزار

3-2-تاثیر هندسه ابزار بر استحکام کششی و برشی جوش

تاثیر هندسه ابزار بر استحکام کششی - برشی جوش در شکل(۶) مشاهده می شوند. همچنین جدول(۶) نیروی گسیختگی، تنش حداکثر و کرنش نمونه های جوشکاری شده را نشان می دهند. همانطور که مشخص است، استحکام کششی- برشی وشکل پذیری مربوط به قطعه جوشکاری شده توسط ابزار ۲ از سایر نمونه ها بیشتر است. مقدار استحکام کششی - برشی توسط ابزار ۲ در نمونه کامپوزیت پلی پروپیلن با ۴۰٪ الیاف شیشه به MPa ۴/۵ میرسد. دلایلی که برای بهتر بودن شکل ظاهری قطعه جوشکاری شده توسط ابزار ۲ ارائه شد می تواند در مورد استحکام کششی - برشی آنها نیز صدق کند. پس از ابزار شماره ۲ بالاترین استحکام مربوط به ابزارهای شماره ۱، ۴ و ۳ می باشد. در مورد سایر نمونه ها نیز همین دلایل صادق است، به طوری که هر چه نمونه جوشکاری شده دارای عیوب کمتری باشد استحکام آن نیز به مراتب بالاتر خواهد بود. درصد استحکام جوش نسبت به استحکام ماده اولیه در این تحقیق بالاتر از این نسبت در منابع قبل [۶] بوده است که حکایت از کیفیت و طراحی مناسب روش اشاره شده در این مقاله دارد.

3-3-تأثیر پارمترهای فرآیندی بر استحکام جوشکاری

از نتایج تاثیر هندسه ابزار بر استحکام و شکل ظاهری جوش مشخص است که ابزار شماره ۲ مناسب ترین ابزار برای جوشکاری می باشد. بر این اساس آزمایش های طراحی شده به روش تاگوچی با ابزار شماره ۲ انجام گردیده و نتایج آن در جدول(۷) بیان شده است. برای اطمینان یافتن از نتایج به دست آمده در آزمون کشش از هر جوش سه نمونه تست کشش تهیه گردیده و میانگین این سه آزمایش به عنوان جواب نهایی درنظرگرفته شده اند. شکل ظاهری جوش های به دست آمده از این نه اتصال در شکل(۷) نمایش داده شده است.

3-4-تحلیل نسبت سیگنال به نویز

جهت بهینه سازی پارمترهای جوشکاری روش سیگنال به نویز (S/N) به کار گرفته شده است [۱۷]. درجدول(۷) برای بدست آوردن نسبت S/N ازرابطه ۱ استفاده می شود:

$$\frac{S}{N} = -10Log\left(\frac{1}{r}\sum_{i=1}^{r}\frac{1}{Y_i^2}\right) \qquad (۱)$$

در این رابطه r تعداد تکرار هرآزمایش و Y_i مقدار iامین خروجی اندازه گیری شده (استحکام کششی- برشی) می‌باشند. تاثیر پارامترهای فرآیند برمیانگین و نسبت S/N در جدول(۸) و شکل(۸) نشان داده شده است.

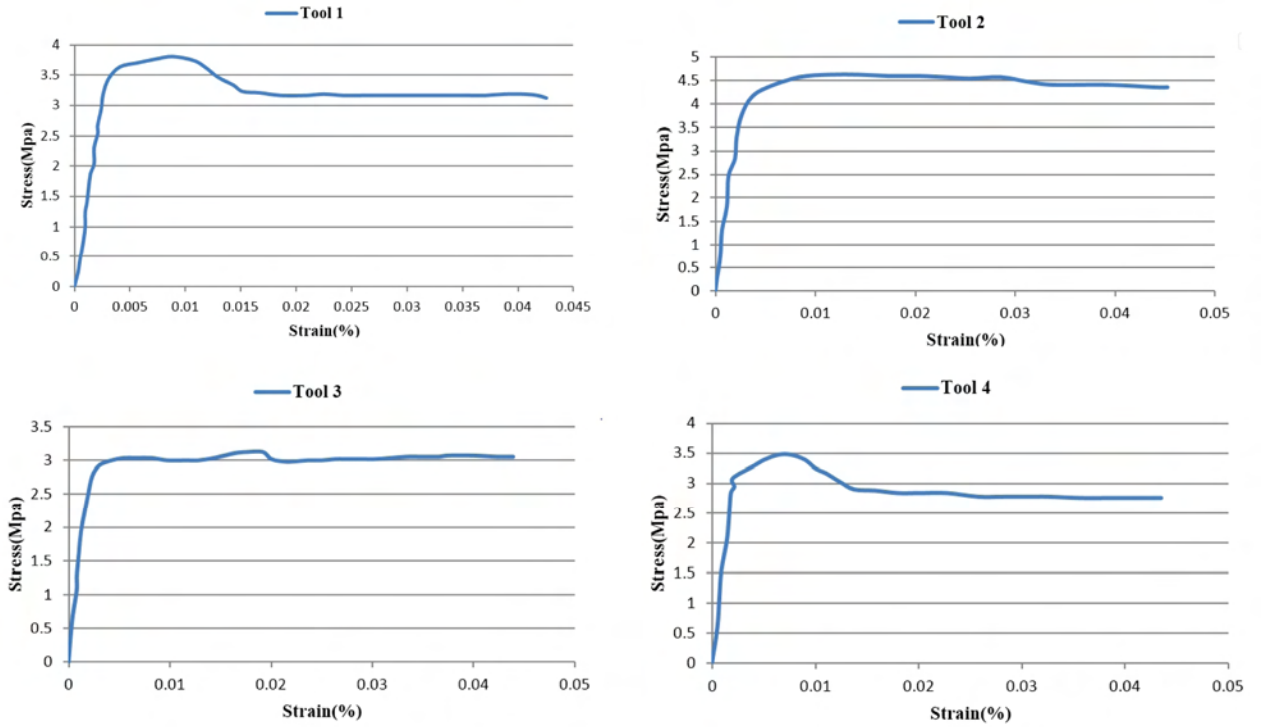
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-10-30]

جدول ۶-نیروی گسیختگی ،تنش حداکثر وکرنش در نمونه های جوشکاری شده

شماره ابزار	نیروی گسیختگی(N)	استحکام نهایی(MPa)	کرنش(%)	درصد استحکام نسبت به ماده اولیه
۱	۹۰۸	۳/۷	۰/۰۰۶۴	۲۲/۷
۲	۱۱۰۴	۴/۵	۰/۰۰۸	۲۷/۶
۳	۷۵۲	۳/۱	۰/۰۱۵۲	۱۹/۰
۴	۷۴۲	۳/۵	۰/۰۰۴۸	۲۱/۴

جدول۷-نتایج بدست آمده از آزمایش نمونه ها

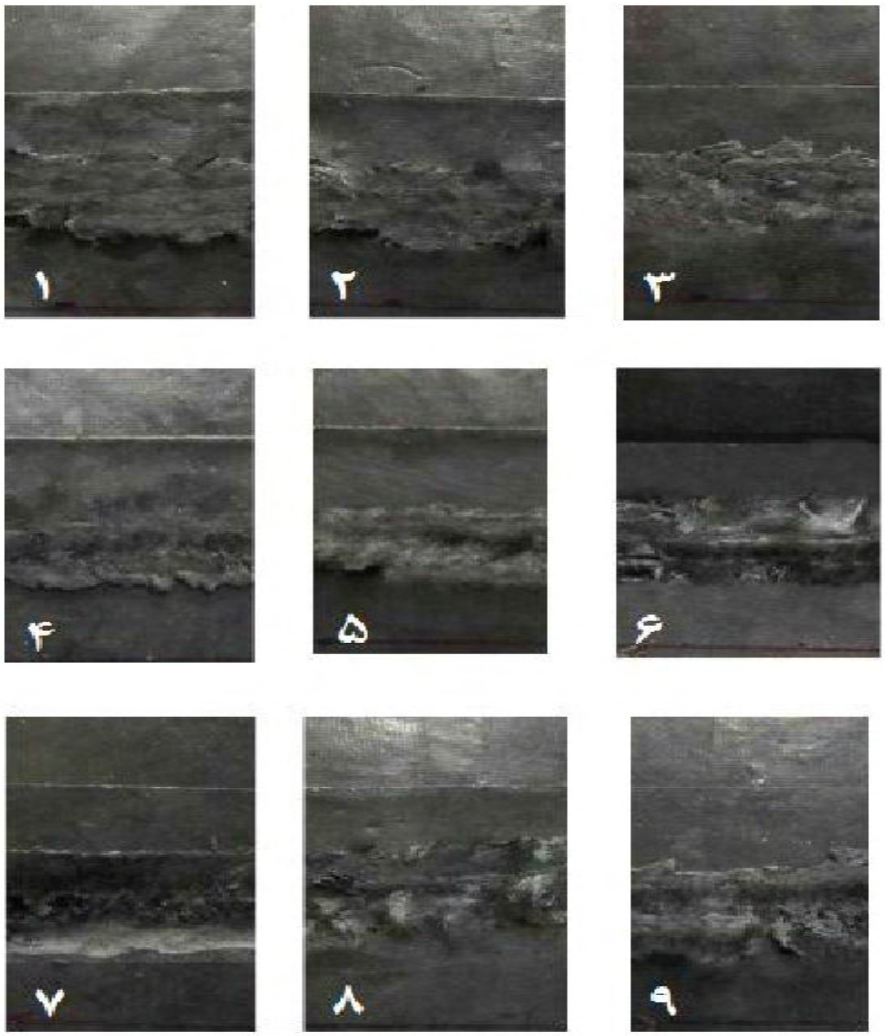
شماره آزمایش	پاسخ			مقدار میانگین (MPa)	نسبت (S/N)
	آزمایش ۱	آزمایش ۲	آزمایش ۳		
۱	۳/۷	۳/۸۴	۳/۷۸	۳/۷۷	۱۱/۵۳
۲	۵	۴/۹۸	۴/۷۴	۴/۹۱	۱۳/۸۱
۳	۴/۲	۴/۱	۳/۶	۳/۹۷	۱۱/۹۱
۴	۵/۴	۵/۱	۵/۲۹	۵/۲۶	۱۴/۴۲
۵	۴/۹۸	۵/۱	۶/۱۳	۵/۴۰	۱۴/۵۴
۶	۴/۱	۵/۱۶	۵/۴۸	۴/۹۱	۱۳/۶۲
۷	۴/۵	۴/۱۴	۴/۴۸	۴/۳۷	۱۲/۷۹
۸	۵/۶	۵/۲۸	۵/۶۵	۵/۵۱	۱۴/۸۱
۹	۵/۱	۵/۶۵	۶/۱۹	۵/۶۵	۱۴/۹۵



شکل۶- نمودارهای تنش-کرنش کامپوزیت جوشکاری شده با چهار ابزار مختلف

با توجه به نمودار و جدول بالا می توان ترکیب پارامتری برای حصول خروجی بیشینه (استحکام کششی-برشی جوش) را مشخص نمود. همان گونه که مشخص است، سرعت دورانی در سطح دوم خود یعنی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه، سرعت خطی در سطح دوم۲۰میلیمتربردقیقه وزاویه‌کلگی نیز درسطح دوم یعنی۱ درجه، بهینه ترین حالت برای انجام جوشکاری می باشند. باتوجه به اعدادی که برای Delta و Rank در جدول(۸) ارائه شده‌است می توان نتیجه گرفت که پارامتر سرعت دورانی مهم ترین پارامتر و پارامتر زاویه‌کلگی کم اثرترین پارامتری است‌که استحکام کششی- برشی جوش‌را تحت‌تاثیر قرار می‌دهد.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-10-30]



شکل۷- شکل ظاهری جوش های کامپوزیت پلی پروپیلن با ۴۰٪ الیاف شیشه حاصل از نه اتصال توسط جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

برای توجیه فیزیکی نتایج به دست آمده می توان گفت که، در سرعتهای دورانی پایین به علت ایجاد اغتشاشات کم در خط اتصال جوش انجام نشده و در سرعت های دورانی بالا نیز به علت عدم توانایی دستگاه و لرزش و ارتعاش زیاد کیفیت جوش کاهش می یابد. از طرف دیگر در سرعت های خطی بالا ماده فرصت خمیری شدن و الیاف فرصت جابه جایی و قرار گرفتن در مسیر خط اتصال را پیدا نکرده و همچنین در سرعت های خطی پایین نیز به دلیل توقف بیش از حد در محل اتصال، جوش بصورت پودر در می آید. به ازای زاویه کلگی بالای ۱ درجه در اطراف شولدر پلیسه های بیشتری مشاهده و در نتیجه ناحیه جوش کوچکتر می شود. در زوایای کمتر از آن نیز در سطح مقطع جوش و در قسمت عقب نشینی، عیب تونل و در بعضی موارد ترک ایجاد شده که می تواند به دلیل ناکافی بودن جریان مواد در جهت عمودی باشد. شکل(۹) پلیسه های ایجاد شده در حین فرآیند را با زاویه کلگی ۲ درجه نشان می دهد.

3-5- کاربرد تحلیل واریانس در بررسی تاثیر سه پارامتر فرآیند جوشکاری

بعد از اتمام مراحل روش تاگوچی، آنالیز واریانس برای تجزیه و تحلیل بیشتر نتایج انجام شده است. تحلیل واریانس یک روش آماری استاندارد است که در محاسبه درجه اطمینان و تعیین درصد مشارکت هر یک از متغییرهای ورودی (سرعت دورانی، سرعت خطی و زاویه کلگی) بر متغیر خروجی

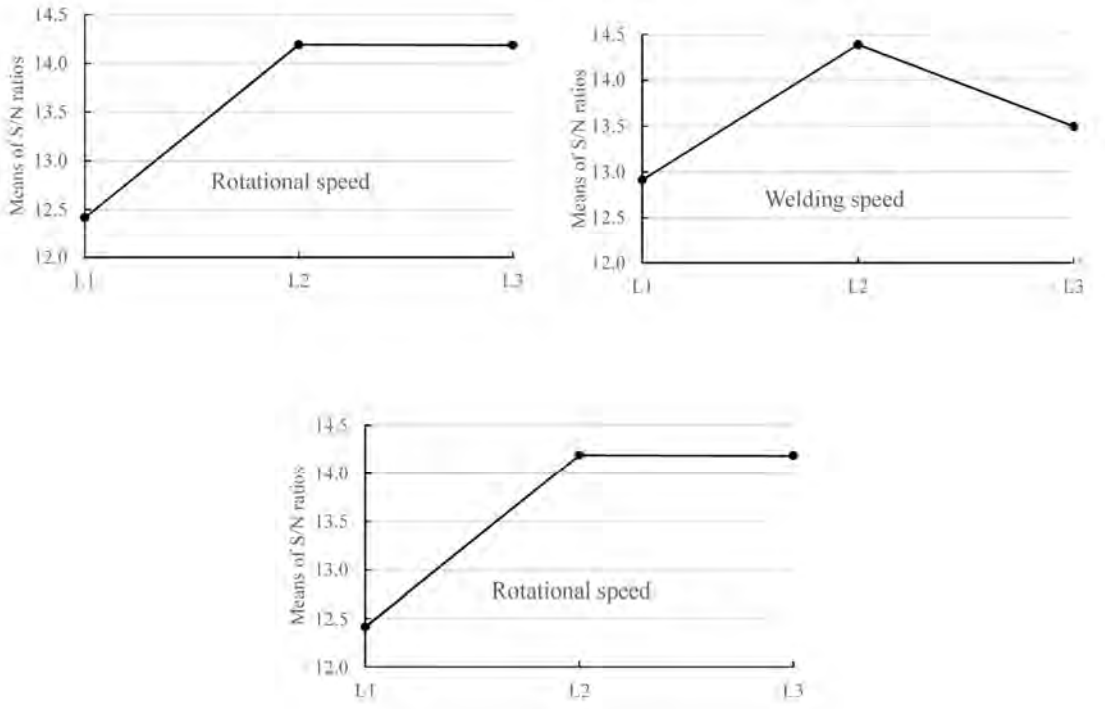
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-10-30]

جدول۸- پاسخ های نسبت S/N برای استحکام کششی-برشی

	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳	Delta	Rank
سرعت دورانی	12.416	14.193	14.187	1.777	1
سرعت خطی	12.915	14.388	13.494	1.473	2
زاویه کلگی	13.321	14.393	13.083	1.310	3

جدول۹- آنالیز واریانس پارامترها در استحکام کششی-برشی

منابع	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F	$F_{(DOF,2,0.05)}$	%p
سرعت دورانی	۲	۱/۸۸۰۱	۰/۹۴۰۰	۲۴/۰۸۰	۱۹/۰۰	۵۰/۵۴
سرعت خطی	۲	۰/۹۶۹۸	۰/۴۸۴۹	۱۲/۴۲۱	۱۹/۰۰	۲۶/۰۷
زاویه کلگی	۲	۰/۷۹۲۱	۰/۳۹۶۰	۱۰/۱۴۵	۱۹/۰۰	۲۱/۲۹
خطا	۲	۰/۰۷۸۱	۰/۰۳۹۰	–	–	۲/۱۰
مجموع	۸	۳/۷۱۹۹	–	–	–	۱۰۰



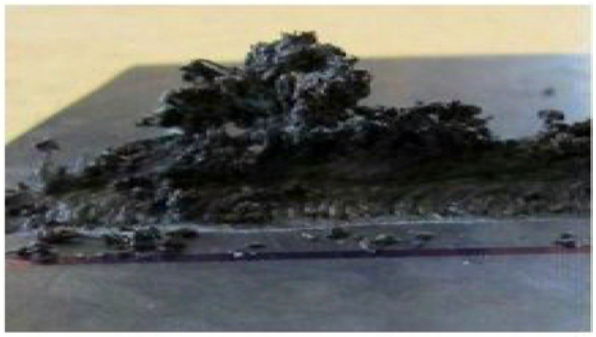
شکل۸- نمودارهای نسبت S/N برای پارامترهای فرآیند دراستحکام کششی-برشی

(استحکام کششی-برشی) فرآیند کاربرد دارد [۱۸]. این تحلیل بر اساس سطح اطمینان ۹۵ درصد (عدم قطعیت ۵ درصد) انجام شده است.

جدول(۹) نتایج تحلیل واریانس را برای استحکام کششی برشی نشان می دهد. نسبت فیشر (F) پارامتری است که میزان اهمیت هر یک از پارامترها را در جوشکاری بیان می نماید. همانطور که مشخص است، مقدار F برای سرعت دورانی، بالاتر از نسبت بحرانی فیشر در سطح اطمینان ۹۵ درصد F(DOF,2,0.05) می باشد. و این مسئله به این معنی است که تغییرات اندک سرعت دورانی اثر بالایی بر استحکام اتصال دارد. به دلیل پایین تر بودن نسبت فیشر از مقدار بحرانی یعنی عدد ۱۹، سرعت خطی جوشکاری و زاویه کلگی اثر معنادار کمتری نسبت به سرعت دورانی بر استحکام دارند. همچنین در این جدول سهم هر یک از پارامترها بر استحکام جوش تعیین شده است. واضح

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-10-30]

است که سرعت دورانی با سهم ۵۰/۵۴ درصدی بالاترین سهم و پس از آن سرعت خطی با ۲۶/۰۷ درصد و زاویه کلگی با ۲۱/۲۹ درصد در مراتب بعدی قرار دارند. خطای ۲/۱ درصدی نشان دهنده طراحی دقیق و موفق آزمایش ها می باشد.



شکل۹-پلیسه های ایجاد شده در اثر زاویه کلگی ۲ درجه

4- نتیجه گیری

در این پژوهش جوشکاری اصطکاکی - اغتشاشی کامپوزیت پلی پروپیلن با ۴۰ درصد الیاف شیشه به صورت تجربی و با موفقیت انجام گرفته است. از روش طراحی آزمایشات تاگوچی استفاده شده و اثر پارامترهای جوشکاری شامل هندسه ابزار، سرعت چرخشی، سرعت خطی جوشکاری و زاویه کلگی بر روی استحکام کششی- برشی استخراج گردیده است. به منظور تحلیل نتایج، شامل بررسی سهم تاثیر هر یک از پارامترها، معنا دار بودن و مقادیر بهینه آن ها از دو روش آنالیز واریانس و سیگنال به نویز استفاده گردیده و نتایج زیر حاصل گردیده اند:

۱- هندسه ی ابزار تاثیر زیادی بر شکل ظاهری و استحکام کششی - برشی جوش ها داشته و در میان ابزارها، ابزار استوانه ای-مخروطی پیچی کیفیت ظاهری سطح و یکنواختی بهتر و استحکام بالاتری را از خود نشان داده است. استفاده از این ابزار موجب افزایش درصد استحکام نسبت به استحکام ماده خام نسبت به تحقیقات قبلی گردیده است.

۲- ابزارهایی که پین آنها رزوه دار و شیاردار است برای ایجاد اتصال و جریان بهتر مواد و تلاطم و اغتشاش بیشتر در محل اتصال مناسب تر می باشند .

۳- پارامترهای بهینه شامل سرعت دورانی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه، سرعت خطی ۲۰ میلی متر بر دقیقه و زاویه کلگی ۱ درجه به- دست آمد.

۴- در بین پارامترهای فرآیند FSW ، سرعت دورانی بیشترین و معنادارترین تاثیر را بر استحکام کششی - برشی و شکل ظاهری جوش داشته و درصد تاثیر سهمی این پارامتر برای کامپوزیت پلی پروپیلن با ۴۰ ٪ الیاف شیشه ۵۰/۵۴٪ می باشد. بعد از سرعت دورانی، سرعت خطی به میزان ۲۶/۰۷٪ و زاویه کلگی با مقدار ۲۱/۲۹٪ بر استحکام جوش تاثیر دارند.

۵- خطای ۲/۱ درصدی در آنالیز واریانس، نشان دهنده طراحی دقیق و موفق آزمایش ها می باشد.

منابع

1- Dickerson, T. L., Przydatek, J., "Fatigue of friction stir welds in aluminium alloys that contain root flaws", International Journal of Fatigue, Vol. 25, No. 12, pp. 1399-1409, 2003.

2- Barcellona, A., Buffa, G., Fratini, L., Palmeri, D., "On microstructural phenomena occurring in friction stir welding of aluminium alloys", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 177, No. 1, pp. 340-343, 2006.

3-Mishra, R. S., Mahoney, M. W., "Friction Stir Welding and Processing", 1 ed., Materials Park, Ohio 44073-0002: ASM International, 2007.

4-Besharati-Givi, M.-K., Asadi, P., "dvances in Friction-Stir Welding and Processing", 1 ed., pp. 796: Woodhead Publishing, 2014.

5- Strand, S., "Joining plastics - Can friction stir welding compete", IEEE, 0-941783-23. , 2003.

6-G. H. Payganeh, Arab, N. B. M., Y. Dadgar Asl, Ghasemi, F. A., Boroujeni, M. S., "Effects of friction stir welding process parameters on appearance and strength of polypropylene composite welds", International Journal of the Physical Sciences, Vol. 6, No. 19, pp. 4595-4601, 2011.

7-Jaiganesh, V., Maruthu, B., Gopinath, E., "Optimization of Process Parameters on Friction Stir Welding of High Density Polypropylene Plate", Procedia Engineering, Vol. 97, No. Supplement C, pp. 1957-1965, 2014.

8-Panneerselvam, K., Lenin, K., "Joining of Nylon 6 plate by friction stir welding process using threaded pin profile", Materials & Design, Vol. 53, No. Supplement C, pp. 302-307, 2014.

9-Pirizadeh, M., Azdast, T., Rash Ahmadi, S., Mamaghani Shishavan, S., Bagheri, A., "Friction stir welding of thermoplastics using a newly designed tool",

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-10-30]

14- Kurabe, Y., Miyashita, Y., Hori, H., "Joining process and strength in PVC friction stir spot welding with fabricating composite material at welding area", Welding International, Vol. 31, No. 5, pp. 354-362, 2017.
15-Buffa, G., Campanile, G., Fratini, L., Prisco, A., "Friction stir welding of lap joints: Influence of process parameters on the metallurgical and mechanical properties", Materials Science and Engineering: A, Vol. 519, No. 1, pp. 19-26, 2009.
16- Liu, G., Murr, L. E., Niou, C. S., McClure, J. C., Vega, F. R., "Microstructural aspects of the friction-stir welding of 6061-T6 aluminum", Scripta Materialia, Vol. 37, No. 3, pp. 355-361, 1997.
17-Roy, R., K, "A primer on the Taguchi method", 1990.
18-Mohamed-Ali Rezgui, M. A., Abel Cherouat, Kamel Hamrouni, Ali Zghal, Samir Bejaoui, "Application of Taguchi approach to optimize friction stir welding parameters of polyethylene", EPJ Web of Conferences, Vol. 6, pp. 1-8, 2010.
19- Forooz, K., "40% glass fiber copolymer based black color polypropylene", data sheet, K. F. Inc., ed., 2016.
Materials & Design (1980-2015), Vol. 54, No. Supplement C, pp. 342-347, 2014.
10- Simões, F., Rodrigues, D. M., "Material flow and thermo-mechanical conditions during Friction Stir Welding of polymers: Literature review, experimental results and empirical analysis", Materials & Design, Vol. 59, No. Supplement C, pp. 344-351, 2014.
11-Hoseinlaghab, S., Mirjavadi, S. S., Sadeghian, N., Jalili, I., Azarbarmas, M., Besharati Givi, M. K., "Influences of welding parameters on the quality and creep properties of friction stir welded polyethylene plates", Materials & Design, Vol. 67, No. Supplement C, pp. 369-378, 2015.
12-Shahmiri, H., Movahedi, M., Kokabi, A. H., "Friction stir lap joining of aluminium alloy to polypropylene sheets", Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 22, No. 2, pp. 120-126, 2017.
13- Yan, Y., Shen, Y., Lan, B., Gao, J., "Influences of friction stir welding parameters on morphology and tensile strength of high density polyethylene lap joints produced by double-pin tool", Journal of Manufacturing Processes, Vol. 28, No. Part 1, pp. 33-40, 2017.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2026-10-30]