

The Effect of Pin Design on the Mechanical Behavior of Polypropylene-Polypropylene Joining through Friction Stir Welding

Amir Abbasi, Aliakbar Ghadi*, Hossein Ebrahimnezhad-Khaljiri*

Department of Material Science and Engineering, Faculty of Engineering, University of Zanjan,
Zanjan, Iran

Received: 16 December 2024, accepted: 3 June 2025

ABSTRACT

Hypothesis: Today, the friction stir welding (FSW) is known as a safe method for joining two parts especially thermoplastic polymers. One of the most effective parameters is designing the pin for creation of joint. In this research, the effect of pin shape was investigated on the FSW of polypropylene (PP)/polypropylene.

Methods: To do so, the pins were designed with different geometries: conical, threaded cylinder, and threaded. After welding the PP-PP plates by designed pins, the tensile, flexural, impact, and hardness tests were performed to investigate the mechanical behavior of the created joints. Also, scanning electron microscopy was used for microstructure study.

Findings: The tensile strength of the sample joined with the threaded cylindrical pin was 18.6 MPa, which had the highest tensile strength efficiency of weld (approximately 82%) as compared with other samples. Also, the weld fracture toughness of this sample under tensile test was 1862.6 mJ/mm³, which was an efficiency of approximately 51%. The values of flexural strength and fracture toughness in bending test of threaded sample were 75 and 60%, respectively. The welded sample with the threaded cylinder had the highest absorbed energy (533 kJ/m³), which was about 39% and 25% higher than values of the conical (383 kJ/m³) and threaded conical (425 kJ/m³) samples, respectively. The microstructure investigations of the created welds showed that in the sample welded with the conical pin, the polymeric fibers were created in the interface of PP-PP. However, the samples welded with threaded cylinder and threaded conical pins had dense structures. The results showed that the threaded cylinder pin is the most appropriate pin for creating joint between two PP plates with the FSW method.

Keywords:

polypropylene,
joining,
friction stir welding,
pin design,
mechanical properties

(*To whom correspondence should be addressed.

E-mail: ghadi@znu.ac.ir

ebrahimnezhad@znu.ac.ir

Please cite this article using:

Abbasi A., Ghadi A., Ebrahimnezhad-Khaljiri H., The Effect of Pin Design on the Mechanical Behavior of Polypropylene-Polypropylene Joining through Friction Stir Welding, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **37**, 513-524, 2025.

اثر طراحی پین بر رفتار مکانیکی اتصال پلی پروپیلن-پلی پروپیلن با روش جوشکاری اصطکاکی هم‌زدنی

امیر عباسی، علی اکبر قادی*، حسین ابراهیم‌نژاد خالجیری*

زنجان، دانشگاه زنجان، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی مواد، کد پستی ۳۸۷۹۱-۴۵۳۷۱

دریافت: ۱۴۰۳/۹/۲۶، پذیرش: ۱۴۰۴/۳/۱۳

چکیده

فرضیه: امروزه جوشکاری اصطکاکی هم‌زدنی روشی مطمئن برای اتصال بین دو قطعه به‌ویژه پلیمرهای گرمانرم شناخته می‌شود. یکی از مهم‌ترین پارامترهای اثرگذار، طراحی پین برای ایجاد اتصال است. در پژوهش حاضر، اثر شکل پین بر جوشکاری اصطکاکی هم‌زدنی پلی پروپیلن-پلی پروپیلن بررسی شد.

روش‌ها: بدین منظور پین با شکل‌های مخروطی، استوانه‌ای و مخروطی رزوه‌دار طراحی شدند. پس از جوشکاری صفحه‌های پلی پروپیلن-پلی پروپیلن با پین‌های طراحی شده، از آزمون‌های کشش، خمش، ضربه و سختی به‌منظور بررسی رفتار مکانیکی اتصال‌های ایجادشده، استفاده شد. همچنین از میکروسکوپی الکترونی پویشی برای مطالعه ریزساختاری استفاده شد.

یافته‌ها: استحکام کششی نمونه متصل‌شده با پین استوانه‌ای رزوه‌دار معادل $18/6 \text{ MPa}$ بود که با تقریباً ۸۲٪ بازده استحکام کششی جوش، بیشترین بازده را نسبت به سایر نمونه‌ها داشت. همچنین چقرمگی شکست جوش در این نمونه در آزمون کشش معادل $1862/6 \text{ mJ/mm}^3$ بود که بازدهی آن تقریباً ۵۱٪ بود. مقادیر بازدهی استحکام خمشی و چقرمگی شکست در آزمون خمش نمونه استوانه‌ای رزوه‌دار به ترتیب ۷۵٪ و ۶۰٪ بود. نمونه جوش‌خورده با پین استوانه‌ای رزوه‌دار با انرژی جذب‌شده 533 kJ/m^3 بیشترین مقدار انرژی جذب‌شده را داشت که این مقدار حدود ۳۹٪ نسبت به نمونه پین مخروطی (383 kJ/m^3) و ۲۵٪ نسبت به نمونه پین مخروطی رزوه‌دار (425 kJ/m^3) بیشتر بود. بررسی ریزساختاری جوش‌های ایجادشده نشان داد، در نمونه جوش‌خورده با پین مخروطی، رشته‌های پلیمری در فصل مشترک پلی پروپیلن-پلی پروپیلن ایجاد شده است، در حالی که نمونه‌های جوش‌خورده با پین‌های استوانه‌ای رزوه‌دار و مخروطی رزوه‌دار ساختار متراکمی داشتند. نتایج نشان داد، پین استوانه‌ای رزوه‌دار مناسب‌ترین پین برای ایجاد اتصال بین دو صفحه پلی پروپیلن با استفاده از جوشکاری اصطکاکی هم‌زدنی است.

واژه‌های کلیدی

پلی پروپیلن،
اتصال،
جوشکاری اصطکاکی هم‌زدنی،
طراحی پین،
خواص مکانیکی

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:

ghadi@znu.ac.ir

ebrahimnezhad@znu.ac.ir

مقدمه

امروزه استفاده از مواد سبک وزن برای کاهش وزن قطعات مهندسی حین کار، بسیار گسترده شده است. مواد گرمانرم به دلیل سبک وزنی، استحکام ویژه زیاد، هزینه های کم تولید، توجه های زیادی را از سوی تولیدکنندگان مختلف از جمله صنایع اتومبیل کسب کرده اند. در میان انواع مختلف مواد گرمانرم صنعتی، پلی پروپیلن یکی از گزینه های مناسب برای کاربردهای متنوع به دلیل داشتن وزن کم، قابلیت زیاد فرایندپذیری و آزادی در طراحی قطعه است [۱،۲]. اگرچه پلی پروپیلن به راحتی قابلیت تبدیل شدن به هر شکلی را دارد، اما اتصال آن برای تولید قطعات پیشرفته و بزرگ ضروری است که چالش های ویژه خود را دارد [۳،۴]. یکی از روش های اتصال قطعات پلیمری به ویژه پلی پروپیلنی، جوشکاری پلاستیک است که بر مبنای تشکیل پیوندهای مولکولی بین مواد پلیمری است. در این فرایند مواد بیشتر از دمای نرمی یا ذوب گرما داده می شوند، به طوری که امکان تحرک زنجیرهای پلیمری فراهم شود. سپس، با اعمال فشار خارجی پیوندهای مولکولی جدید ایجاد می شود. بیشتر فرایندهای جوشکاری انجام شده روی پلاستیک ها شامل گرمادادن سطح مشترک روی دمای نرمی-ذوب مواد و سپس فشاردادن اجزا به هم است. بنابراین، اجزا با سرعت سرد شدن مناسب به یکدیگر متصل می شوند [۵،۶]. یکی از روش های مناسب اتصال به روش جوشکاری، جوشکاری اصطکاکی هم زدنی (friction stir welding) است.

این روش اتصال، کارآمد و سازگار با محیط زیست است و با توجه به این واقعیت که ذوب در طی جوشکاری رخ نمی دهد، به عنوان فرایند اتصال حالت جامد نیز طبقه بندی می شود که مزایای زیادی نسبت به روش های جوشکاری ذوبی مانند کاهش منافذ و ترک های انجمادی دارد [۷،۸].

اگرچه اتصال به روش جوشکاری اصطکاکی هم زدنی توسعه یافته است، اما تاکنون پژوهش های محدودی درباره اتصال صفحه های پلی پروپیلن به پلی پروپیلن انجام شده است. Derazkola و Kubit [۹] تجزیه گرمایی اثر گام های چرخش پین روی جوشکاری اصطکاکی هم زدنی صفحه های پلی پروپیلن را بررسی کردند. گام های چرخش پین به سرعت چرخش پین و سرعت پیشروی آن در محل اتصال وابسته است. این پژوهشگران بیان کردند، گام های چرخشی بیشتر به اختلاط پلی پروپیلن در جهت عمودی در محل اتصال منجر می شود. همچنین، گام های چرخشی کم باعث اختلاط در لایه افقی در محل اتصال دو صفحه پلی پروپیلن می شود. هرچقدر گام های چرخشی کمتر باشد، خطر اختلاط بیش از حد و حبس هوا در محل اتصال جوش بیشتر می شود. نتایج این پژوهش نشان داد، دمای اختلاط 175°C با گام

چرخشی 0.410 و دمای اختلاط 210°C با گام چرخشی 0.107 شرایط بهینه برای ایجاد اتصال مناسب در صفحه های پلی پروپیلن است. در پژوهش دیگری Stadler و همکاران [۱۰] اثر سرعت چرخش پین و سرعت پیشروی آن بر استحکام کششی اتصال ایجاد شده بین دو صفحه پلی پروپیلن را بررسی کردند. این پژوهشگران گزارش کردند، با افزایش سرعت چرخش، نیروی اعمالی پین در نقطه جوش کاهش می یابد. در حالی که این نیروی محوری با افزایش سرعت پیشروی، روندی افزایشی نشان داد. استحکام کششی اتصال ایجاد شده و نیز بازده پیوند با افزایش سرعت چرخش پین بهبود یافت. در حالی که با افزایش سرعت پیشروی عامل های بیان شده روند کاهش شدیدی نشان دادند. همچنین این پژوهشگران نسبت سرعت چرخش پین به سرعت پیشروی پین را بررسی کردند. با افزایش این نسبت، روندی کاهش در استحکام جوش و روند پیوند مشاهده شد. Panneerselvam و Lenin [۱۱] اثر عامل های مختلف بر جوشکاری اصطکاکی هم زدنی پلی پروپیلن را به منظور مشخصه یابی میکروساختاری و شناخت سازوکارهای اثرگذار بررسی کردند. در این پژوهش سرعت های چرخش پین 1500 ، 1750 ، 2000 و 2250 rpm انتخاب شدند. همچنین، سرعت های پیشروی به منظور ایجاد اتصال 30 ، 40 ، 50 و 60 mm/min تنظیم شدند. نتایج این پژوهش نشان داد، در سرعت های پیشروی 40 و 50 mm/min و سرعت های چرخش پین 1500 و 2250 rpm هیچ گونه نقصی در ساختار میکروسکوپی اتصال ایجاد شده مشاهده نشد. میرابزاده و همکاران [۱۲] با شبیه سازی و مقایسه آن با داده های تجربی، توزیع گرما در محل اتصال ورق های پلی پروپیلن را بررسی کردند. با توجه به نتایج گرمای ایجاد شده در نقطه اتصال صفحه های پلی پروپیلن تا بیش از 70% مرتبط با سرعت چرخش پین، 15% هندسه ابزار، 11% سرعت پیشروی و 4% زاویه تماس گزارش شد.

در پژوهش جالبی صمدی و همکاران [۱۳] از صفحه های پلی پروپیلن دارای نانوذرات تیتانیم اکسید برای انجام جوشکاری اصطکاکی هم زدنی استفاده کردند. صفحه های کامپوزیتی در این پژوهش با فناوری چاپ سه بعدی تهیه شد. نتایج نشان داد، برای دستیابی خواص بهینه در نمونه با سرعت چرخش پین 833 rpm سرعت پیشروی 20 mm/min و مقدار نانوذرات تیتانیم اکسید $3/5$ wt% به دست آمد. در پژوهش مشابهی افشاری و همکاران [۱۴] نانوصفحه های گرافن را به پلی پروپیلن افزودند و با چاپگر سه بعدی، صفحه های کامپوزیتی (به منظور بررسی رفتار اتصال به روش جوشکاری اصطکاکی هم زدنی) ساختند. نتایج این پژوهش نشان داد، نمونه با سرعت چرخش پین 667 rpm، سرعت پیشروی 16 mm/min و

جدول ۱- خواص کششی و خمشی صفحات پلی پروپیلن.

Table 1. The tensile and flexural properties of polypropylene plates.

Property	Amount
Tensile strength (MPa)	22.7 ± 0.1
Tensile failure strain (%)	19.6 ± 0.1
Tensile fracture toughness (mJ/mm^3)	3651.2 ± 0.1
Flexural strength (MPa)	24.3 ± 0.1
Flexural failure strain (%)	15.8 ± 0.1
Flexural fracture toughness (mJ/mm^3)	3442.7 ± 0.1

از سه پین مختلف از جنس فولاد ساده کربنی با شکل‌های مختلف مخروطی، استوانه‌ای رزوه‌دار و مخروطی رزوه‌دار استفاده شد. شکل ۱ نشان‌دهنده تصاویر ماکروسکوپی و طرح‌واره‌ی از ابزارهای استفاده‌شده در این پژوهش است. با توجه به پژوهش‌های انجام‌شده توسط دیگر پژوهشگران پین‌های بیان‌شده به‌صورت بهینه طراحی شده‌اند [۶، ۱۷].

جوشکاری اصطکاکی هم‌زدنی

ابتدا، فرایند جوشکاری با بستن و محکم‌کردن ابزار نگه‌دارنده روی میز دستگاه فرز عمودی (مدل FP4M ساخت ماشین‌سازی تبریز) و سپس بستن ورق‌های پلیمری مدنظر روی آن آغاز شد. سپس، پین ابزار در حال دوران در قطعه کار نفوذ می‌کند تا جایی که شانه ابزار

مقدار ۱/۵ wt٪ نانوصفحه‌های گرافن، خواص و اتصال بهینه را داشت. با توجه به بررسی‌های انجام‌شده کارهای پژوهشی محدودی درباره طراحی پین و اثر آن بر رفتار اتصال از نوع جوشکاری اصطکاکی هم‌زدنی پلی پروپیلن انجام شده است [۱۵، ۱۶]. بنابراین، نوآوری این پژوهش بررسی اثر طراحی پین به‌ویژه اثر رزوه بر رفتار مکانیکی اتصال ایجادشده بین صفحه‌های پلی پروپیلن است. پس از ایجاد اتصال، رفتار مکانیکی در شرایط کششی، خمشی و فشار بررسی شد. همچنین، رفتار سختی و میکروساختاری به‌منظور شناخت بهتر رفتار مکانیکی و شناسایی دقیق سازوکارهای مرتبط در فرایند جوشکاری مطالعه شد.

تجربی

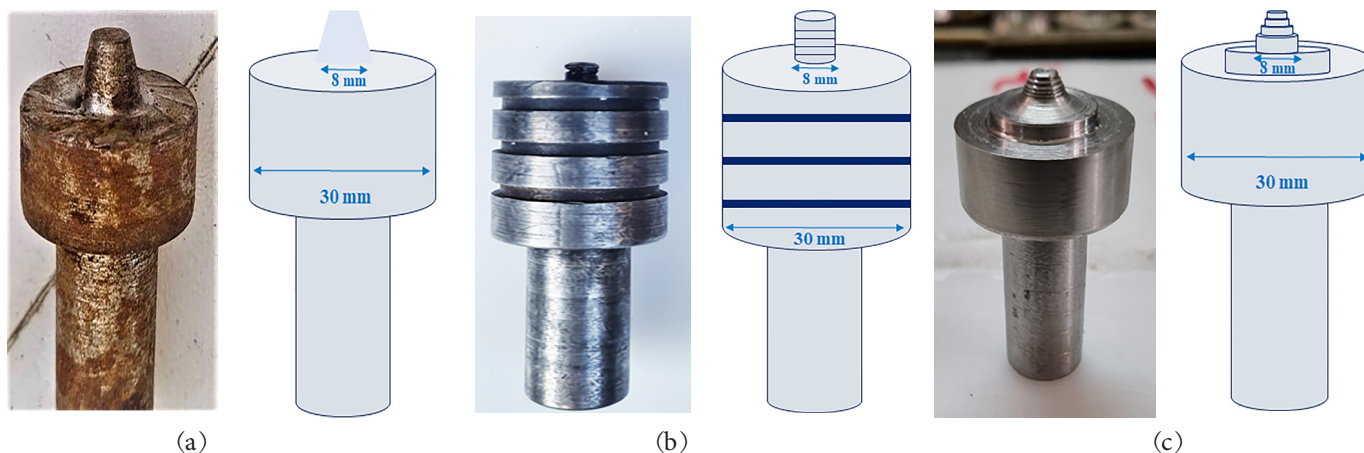
مواد

در این پژوهش برای انجام فرایند جوشکاری اصطکاکی هم‌زدنی، از صفحه‌های پلی پروپیلن با ضخامت ۶ mm از شرکت پارس پلیمر استفاده شد. پس از آماده‌سازی صفحه‌های پلیمری مشخصات مکانیکی آن‌ها مطابق استانداردهای بیان‌شده در بخش خواص مکانیکی اندازه‌گیری شد که در جدول ۱ آمده است.

دستگاه‌ها و روش‌ها

طراحی پین

در این پژوهش به‌منظور انجام فرایند جوشکاری اصطکاکی هم‌زدنی،



شکل ۱- طراحی انواع پین و طرح‌واره آن‌ها: (a) مخروطی، (b) استوانه‌ای رزوه‌دار و (c) مخروطی رزوه‌دار.

Fig. 1. Designing various pins and schematic of them: (a) conical, (b) threaded cylinder, and (c) threaded conical.

کشش با شکل دمبلی با ابعاد $80 \times 10 \times 6 \text{ mm}^3$ (طول، عرض و ضخامت) با استفاده از دستگاه مکانیکی سنتام مدل STM5 ساخت ایران تحت بارگذاری قرار گرفتند. به منظور بررسی خواص خمشی نمونه‌ها، آزمون خمشی سه نقطه‌ای مطابق با استاندارد ASTM D790 روی نمونه‌های پلیمری (شکل ۲) با ابعاد $80 \times 25 \times 6 \text{ mm}^3$ (طول، عرض و ضخامت) با استفاده از دستگاه مکانیکی سنتام (مدل STM5 به همراه نگه‌دارنده آزمون خمشی سه نقطه‌ای) انجام شد. به منظور بررسی رفتار ضربه نمونه‌ها، از آزمون چارپی مطابق با استاندارد ASTM D6110 استفاده شد. این آزمون با دستگاه آزمون ضربه سنتام مدل SIT-50B انجام شد. گفتنی است، ابعاد نمونه‌ها برای انجام آزمون ضربه $100 \times 20 \times 6 \text{ mm}^3$ (طول، عرض و ضخامت) بود. برای اندازه‌گیری میکروسختی، چهار نقطه انتخاب شد که نقاط ۱ و ۴ به صفحه‌های پلی پروپیلنی و نقاط ۲ و ۳ به نقاط جوش مربوط هستند. این آزمون با دستگاه سختی سنج Shore D مدل SHD ساخت شرکت سنتام انجام شد. به منظور افزایش دقت نتایج، هر آزمون برای هر نمونه حداقل سه مرتبه تکرار و میانگین نتایج گزارش شد.

بررسی میکروسکوپی

برای بررسی سطوح نمونه‌های جوشکاری شده و کیفیت آن‌ها، از میکروسکوپ الکترونی پویشی مدل QUANTA 200 ساخت شرکت

حدود 0.3 mm تا 0.4 mm در قطعه کار نفوذ کند. پس از حدود $10-15 \text{ s}$ توقف و حرکت در جای پین برای گرم کردن قطعه کار و نرم شدن مواد در اطراف پین، حرکت پیشروی شروع و ابزار در طول شیار حرکت می‌کند. شایان ذکر است، سرعت دورانی 950 rpm ، سرعت پیشروی 112 mm/min و زاویه انحراف 5° درجه به عنوان پارامترهای ثابت فرایند جوشکاری انتخاب شدند. شایان ذکر است، این عوامل اثرگذار پس از انجام چند مرتبه جوشکاری و نیز براساس کارهای مشابه انتخاب شدند [۵،۶]. پس از اتمام فرایند جوشکاری، تمام نمونه‌های آزمون‌های خواص مکانیکی با دستگاه برش لیزری روتک (ساخت ایران) مدل RT1390 بریده شدند. نحوه نام‌گذاری نمونه‌ها به صورت PP-PP-CON-T و PP-PP-CY-T، PP-PP-CON است که به ترتیب بیانگر اتصال پلی پروپیلن-پلی پروپیلن با پین مخروطی، پین استوانه‌ای رزوه‌دار و پین مخروطی رزوه‌دار هستند.

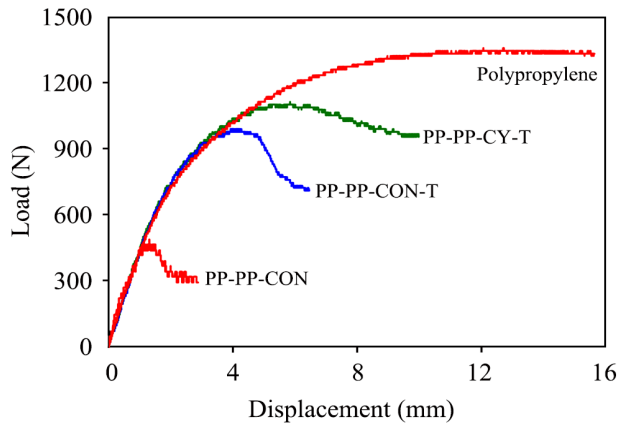
بررسی خواص مکانیکی

در این پژوهش، به منظور بررسی خواص مکانیکی نمونه‌ها آزمون‌های کشش، خمش، سختی و ضربه انجام شد. نمونه‌های آزمون کشش طبق استاندارد ASTM D638 نوع I آماده شدند که در شکل ۲ قابل مشاهده است. آزمون کشش با سرعت فک ثابت 1 mm/min در دمای محیط برای همه نمونه‌ها انجام شد. نمونه‌های آزمون



شکل ۲- نمونه‌های آزمون کشش و خمش در پلی پروپیلن‌های متصل شده با روش جوشکاری اصطکاکی هم‌زدنی با پین‌های مختلف: نمونه کشش متصل شده با پین (a) مخروطی، (b) استوانه‌ای رزوه‌دار و (c) مخروطی رزوه‌دار و نمونه خمش متصل شده با پین (d) مخروطی، (e) استوانه‌ای رزوه‌دار و (f) مخروطی رزوه‌دار.

Fig. 2. The samples of tensile and flexural tests in jointed polypropylene by friction stir welding with the different pins: welded tensile sample by (a) conical pin, (b) threaded cylinder pin, (c) threaded conical pin, (d) welded flexural sample by (e) conical pin, (f) threaded cylinder pin, and (f) threaded conical pin.



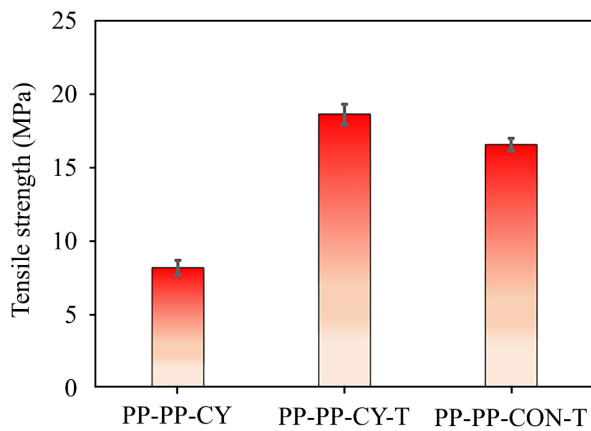
شکل ۳- منحنی نیرو-جابجایی پلی پروپیلن و پلی پروپیلن جوش خورده با انواع پین.

Fig. 3. Force-displacement curve of polypropylene and welded polypropylene with the different pins.

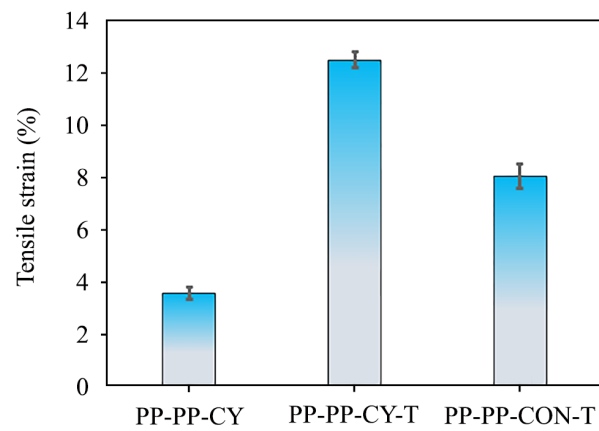
پرتو رایان رستاک استفاده شد. برای جلوگیری از تجمع بارهای الکترونی روی سطح نمونه طی تصویربرداری، پوشش طلا با استفاده از روش کندوپاش اعمال شد.

نتایج و بحث

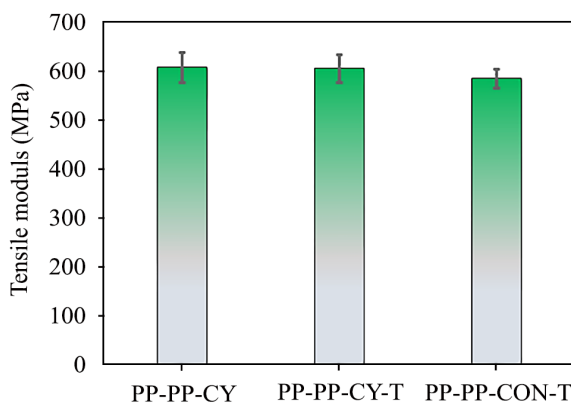
خواص کششی جوشکاری اصطکاکی همزدنی پلی پروپیلن-پلی پروپیلن
 شکل ۳ منحنی‌های نیرو-جابجایی نمونه پلی پروپیلن و پلی پروپیلن جوش خورده با پین‌های مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۳، داده‌های خواص کششی نمونه‌های پلی پروپیلن جوش خورده استخراج شد که در شکل ۴ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۴ (a)، در بین نمونه‌ها، نمونه PP-PP-CON کمترین استحکام کششی $8/2 \text{ MPa}$



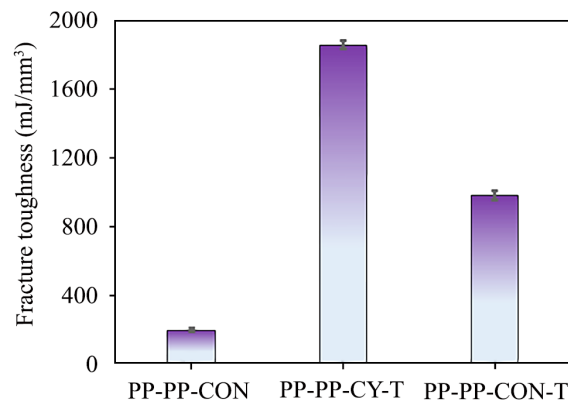
(a)



(b)



(c)



(d)

شکل ۴- خواص کششی اتصال پلی پروپیلن-پلی پروپیلن با پین‌ها به کمک جوشکاری اصطکاکی همزدنی: (a) استحکام کششی، (b) کرنش کششی، (c) مدول کشسانی و (d) چقرمگی شکست.

Fig. 4. The tensile properties of polypropylene-polypropylene joint with various pins through friction stir welding: (a) tensile strength, (b) tensile strain, (c) elastic modulus, and (d) fracture toughness.

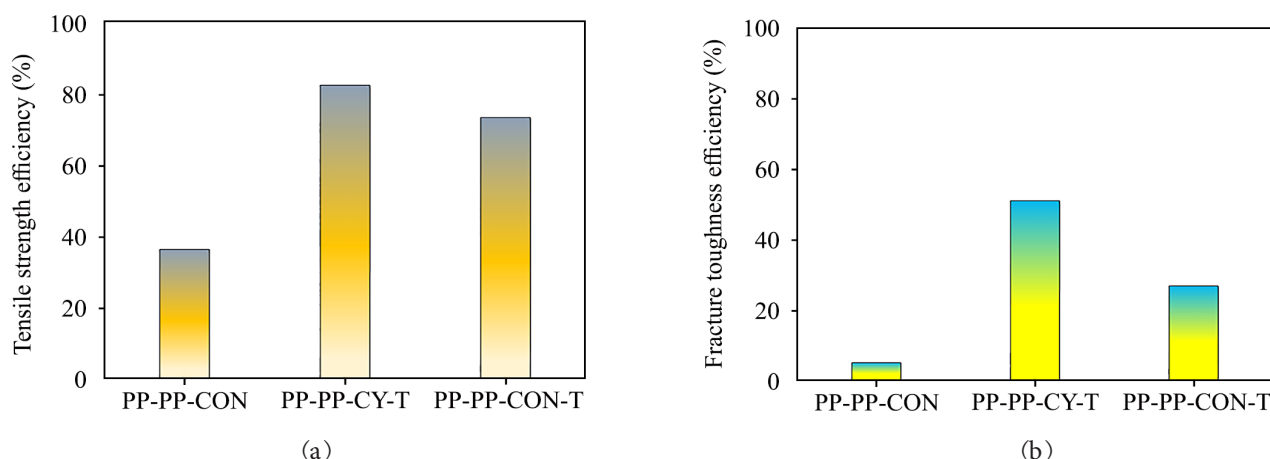
متصل شده به روش جوشکاری، به نمونه بدون جوش است. شکل ۵ نشان دهنده مقادیر بازدهی استحکام کششی و چقرمگی شکست نمونه‌های پلی پروپیلن است. با توجه به شکل ۵ می‌توان فهمید، نمونه متصل شده با بین استوانه‌ای رزوه‌دار با داشتن تقریباً ۸۲٪ بازده استحکام کششی جوش، بیشترین بازده را نسبت به سایر نمونه‌ها دارد. بررسی بازده چقرمگی شکست جوش در این نمونه نشان می‌دهد، مقدار آن تقریباً ۵۱٪ است. دلیل کاهش در چقرمگی شکست را می‌توان در کم‌تر بودن مقدار کرنش شکست نمونه جوش خورده نسبت به نمونه پلی پروپیلن بدون جوش داشت. این بدین معنی است که فرایند اتصال به روش جوشکاری باعث کاهش چقرمگی شکست و افزایش تردی در پلی پروپیلن شده است. بررسی سایر کارهای پژوهشی چنین رفتاری را تأیید می‌کند [۲۰]. Sahu و همکاران [۲۱] اثر پارامترهای جوشکاری مانند سرعت دورانی و سرعت پیشروی بر اتصال صفحه‌های پلی پروپیلن را بررسی کردند. نتایج نشان داد، پی از اتصال رفتار شکست نمونه‌ها رفتاری ترد بوده است.

خواص خمشی جوشکاری اصطکاکی هم‌زدنی پلی پروپیلن- پلی پروپیلن

خواص خمشی نمونه‌های جوشکاری شده پلی پروپیلن با بین‌های مختلف در شکل ۶ نشان داده شده است. این تصاویر نیز به خوبی بیانگر مؤثر بودن بین‌های استوانه‌ای رزوه‌دار و مخروطی رزوه‌دار نسبت به بین مخروطی در اتصال نمونه‌های پلی پروپیلن است. استحکام خمشی نمونه PP-PP-CY-T برابر ۱۸/۳ MPa است که این مقدار نسبت به نمونه‌های PP-PP-CON-T و PPP-PP-CON به ترتیب حدود ۷ برابر و ۳۲٪ بیشتر است. همچنین، در این نمونه‌ها

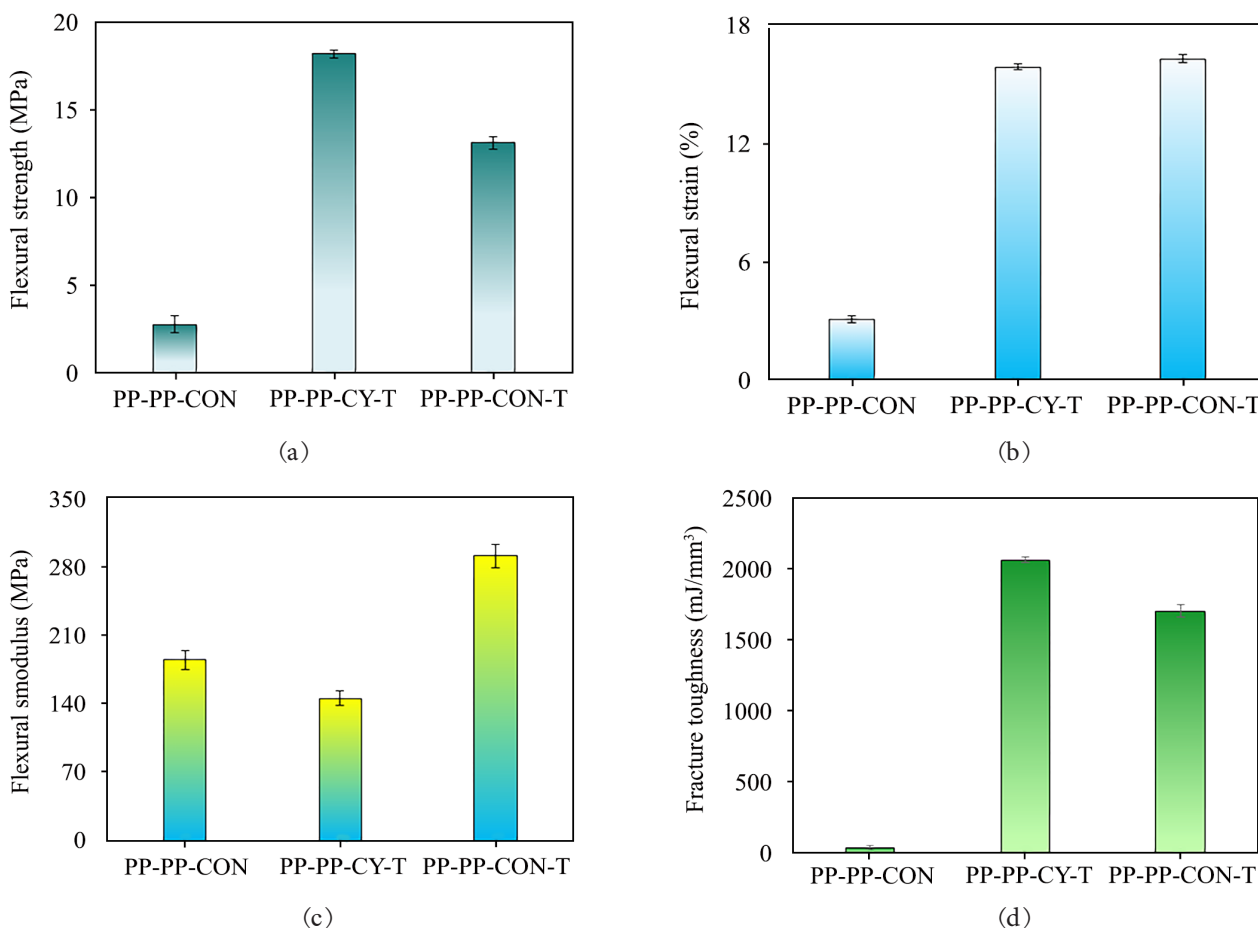
را داشت، در حالی که نمونه‌های PP-PP-CY-T و PP-PP-CON-T به ترتیب دارای استحکام کششی ۱۸/۶ و ۱۶/۶ MPa هستند. این بدان معنی است که استحکام‌های کششی به دست آمده با بین‌های استوانه‌ای رزوه‌دار و مخروطی رزوه‌دار به ترتیب ۱۲۷ و ۱۰۲٪ بهتر از استحکام جوش به دست آمده از بین مخروطی بدون رزوه هستند. دلیل این بهبود را می‌توان ناشی از ایجاد رزوه در بین‌ها دانست. زیرا ایجاد رزوه باعث می‌شود، اختلاط پلیمر در ناحیه جوش بیشتر شود که امکان دستیابی به جوش مناسب و یکنواخت را فراهم می‌سازد [۱۸]. با توجه به شکل ۴ (b) می‌توان فهمید، کرنش شکست نمونه‌های PP-PP-CON، PP-PP-CY-T و PP-PP-CON-T به ترتیب ۳/۶، ۱۲/۵ و ۸/۱٪ است. همانند استحکام کششی، نمونه متصل شده با بین استوانه‌ای رزوه‌دار دارای بیشترین کرنش شکست بود.

هم زمانی استحکام کششی زیاد و کرنش شکست مناسب یکی از ویژگی‌هایی است که می‌تواند خواص ماده را بسیار مطلوب کند. چقرمگی شکست یکی دیگر از معیارهای مناسب برای بررسی رفتار مکانیکی و دستیابی به کیفیت جوش مناسب است. نمونه‌های PP-PP-CON، PP-PP-CY-T و PP-PP-CON-T به ترتیب دارای چقرمگی شکست $۹۸۳/۲$ و $۱۸۶۲/۶$ ، $۱۹۵/۴$ mJ/mm^3 هستند. به عبارت دیگر می‌توان بیان کرد، چقرمگی شکست نمونه PP-PP-CY-T نسبت به نمونه‌های PP-PP-CON-T و PP-CON-PP به ترتیب حدود ۹/۵ و ۱/۹ برابر بیشتر است. این نتایج به مؤثر بودن بین استوانه‌ای رزوه‌دار اشاره می‌کند. زیرا بیشتر بودن چقرمگی شکست بدین معناست که اتصال ایجاد شده ترد نیست و کیفیت جوش مناسبی دارد [۱۹]. یکی از پارامترهای بررسی شده برای اطمینان از اتصال به روش جوشکاری، بازده جوشکاری است که از نسبت پارامترهای مکانیکی نمونه



شکل ۵- بازده اتصال‌های در جوش پلی پروپیلن-پلی پروپیلن: (a) بازده استحکام کششی و (b) بازده چقرمگی شکست.

Fig. 5. The joint efficiency in polypropylene-polypropylene weld: (a) tensile strength efficiency and (b) fracture toughness efficiency.



شکل ۶- خواص خمشی اتصال پلی پروپیلن-پلی پروپیلن با پین‌های مختلف به کمک جوشکاری اصطکاکی هم‌زدنی: (a) استحکام خمشی، (b) کرنش خمشی، (c) مدول خمشی و (d) چقرمگی شکست.

Fig. 6. The flexural properties of polypropylene-polypropylene joint with various pins through friction stir welding: (a) flexural strength, (b) flexural strain, (c) flexural modulus, and (d) fracture toughness.

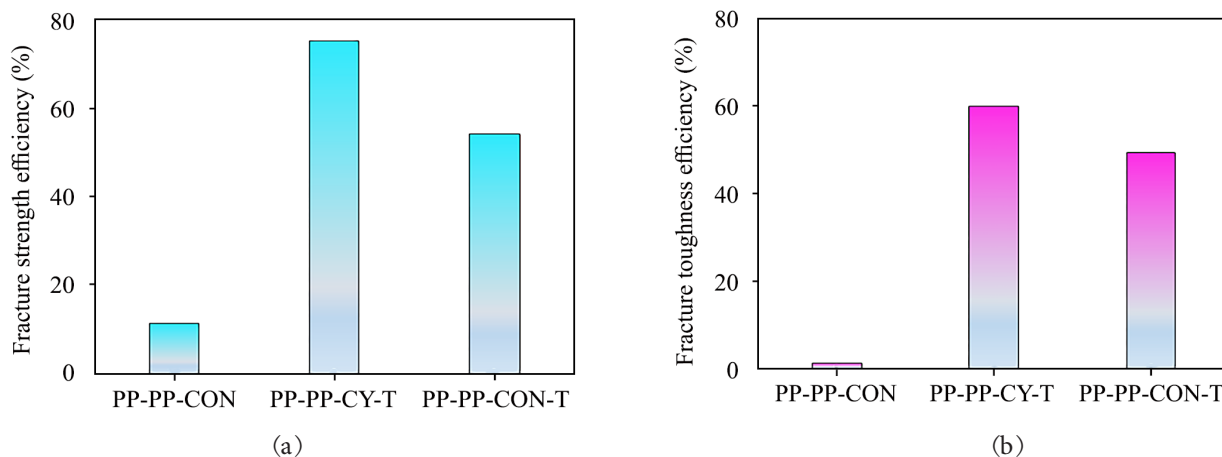
خمش نمونه‌های پلی پروپیلنی بسیار زیاد است که نشان‌دهنده جوش‌پذیری بیشتر پلی پروپیلن است. به نظر می‌رسد، خواص نظیر گرانروی و دمای ذوب عوامل اثرگذار بر این نتایج باشند [۲۲].

خواص ضربه جوشکاری اصطکاکی هم‌زدنی پلی پروپیلن-پلی پروپیلن

مقادیر انرژی جذب‌شده نمونه‌های پلی پروپیلنی پس از آزمون ضربه در شکل ۸ نشان داده شده است. مشخص است، نمونه PP-PP-CY-T دارای بیشترین مقدار انرژی جذب‌شده 533 kJ/m^3 است که این مقدار حدود ۳۹٪ نسبت به نمونه PP-PP-CON (383 kJ/m^3) و ۲۵٪ نسبت به نمونه PP-PP-CON-T (425 kJ/m^3) بیشتر است. بررسی‌ها نشان می‌دهد، در ناحیه جوش، قابلیت تغییر شکل پلاستیک و ایجاد سیلان مناسب در ناحیه جوش می‌تواند بر رفتار اختلاط و ریزساختار ناحیه جوش اثر بگذارد. می‌توان بیان کرد، در بین استوانه‌ای رزوه‌دار،

مقادیر کرنش شکست بیشتری نسبت به آزمون کشش مشاهده می‌شود. به عبارت دیگر، کرنش شکست نمونه‌های PP-PP-CON، PP-PP-CY-T و PP-PP-CON-T به ترتیب ۳/۱، ۱۵/۸، ۱۶/۲٪ است. به غیر از نمونه PP-PP-CON، مقادیر چقرمگی شکست این نمونه‌ها بسیار بیشتر از حالت‌های پیشین در آزمون کشش است. مقادیر چقرمگی شکست نمونه‌های PP-PP-CY-T و PP-PP-CON-T برابر $2063/5$ و $1703/9$ mJ/mm^3 است.

شکل ۷ نیز مقادیر بازدهی استحکام خمشی و چقرمگی شکست نمونه‌ها را نشان می‌دهد. این نتایج نیز نشان‌دهنده دستیابی به ترکیبی از مقادیر بازدهی بسیار زیاد استحکام خمشی و چقرمگی شکست است. مقادیر بازدهی استحکام خمشی و چقرمگی شکست نمونه PP-PP-CY-T به ترتیب ۷۵٪ و ۶۰٪ است. به طور کلی مشاهده می‌شود، مقادیر بازدهی استحکام و چقرمگی شکست در هر دو آزمون کشش و



شکل ۷- بازده اتصالات در جوش پلی پروپیلن-پلی پروپیلن: (a) بازده استحکام خمشی و (b) بازده چقرمگی شکست.

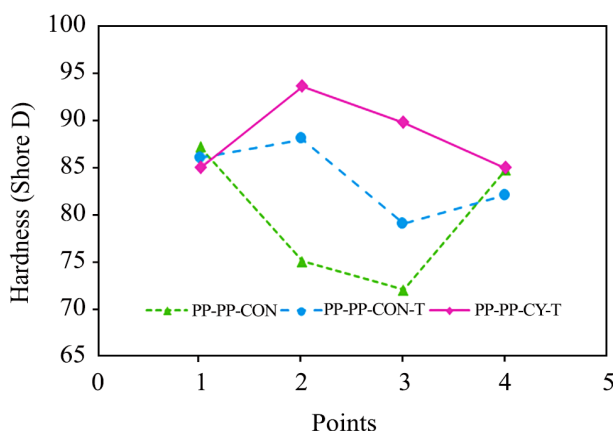
Fig. 7. The joint efficiency in polypropylene-polypropylene weld: (a) flexural strength efficiency and (b) fracture toughness efficiency.

بیشتر از مناطق ۱ و ۴ است که بیانگر اتصال مناسب این نمونه است. به عبارت دیگر، مقدار سختی در نقاط ۳ و ۲ در نمونه PP-PP-CY-T، ۸۹/۸ و ۹۳/۶ Shore D است، که این مقادیر حدود ۶٪ و ۱۰٪ بیشتر از مقادیر سختی نقاط ۱ و ۴ هستند. با وجود این، مقادیر سختی نقاط ۳ و ۲ در نمونه PP-PP-CON، ۷۲ و ۷۵ Shore D است، که این مقادیر حدود ۱۸٪ و ۱۴٪ کمتر از مقادیر سختی نقاط ۱ و ۴ هستند. این روند در تطابق با مقادیر استحکام کششی و خمشی نمونه‌ها و نیز بازده جوش به دست آمده از آزمون‌های کشش و خمش است. روند مشابهی در مطالعه Hajideh و همکاران [۲۴] گزارش شده است که در این کار پژوهشی اثر شکل‌های مختلف پین (مربعی، استوانه‌ای رزوه‌دار،

وجود رزوه مقدار اختلاط پلیمر را افزایش داده است، به گونه‌ای که مقدار عیب‌هایی مانند حفره، ریزترک را در ناحیه جوش بسیار کاهش داده است. به همین دلیل خواص مکانیکی بیشتر در پلی پروپیلن‌های جوش خورده با پین استوانه‌ای رزوه‌دار مشاهده شد [۲۳].

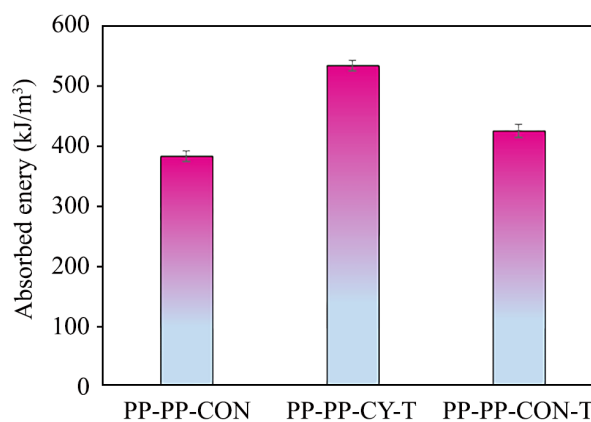
خواص سختی جوشکاری اصطکاکی هم‌زدنی پلی پروپیلن-پلی پروپیلن

شکل ۹ نشان‌دهنده تغییرات روند سختی نمونه‌ها در نقاط مختلف است. همان‌طور که دیده می‌شود، بیشترین مقادیر سختی در نقاط ۲ و ۳ به نمونه PP-PP-CY-T مربوط است. همچنین مشخص است، برخلاف سایر نمونه‌ها، سختی نقاط ۲ و ۳ در نمونه PP-PP-CY-T



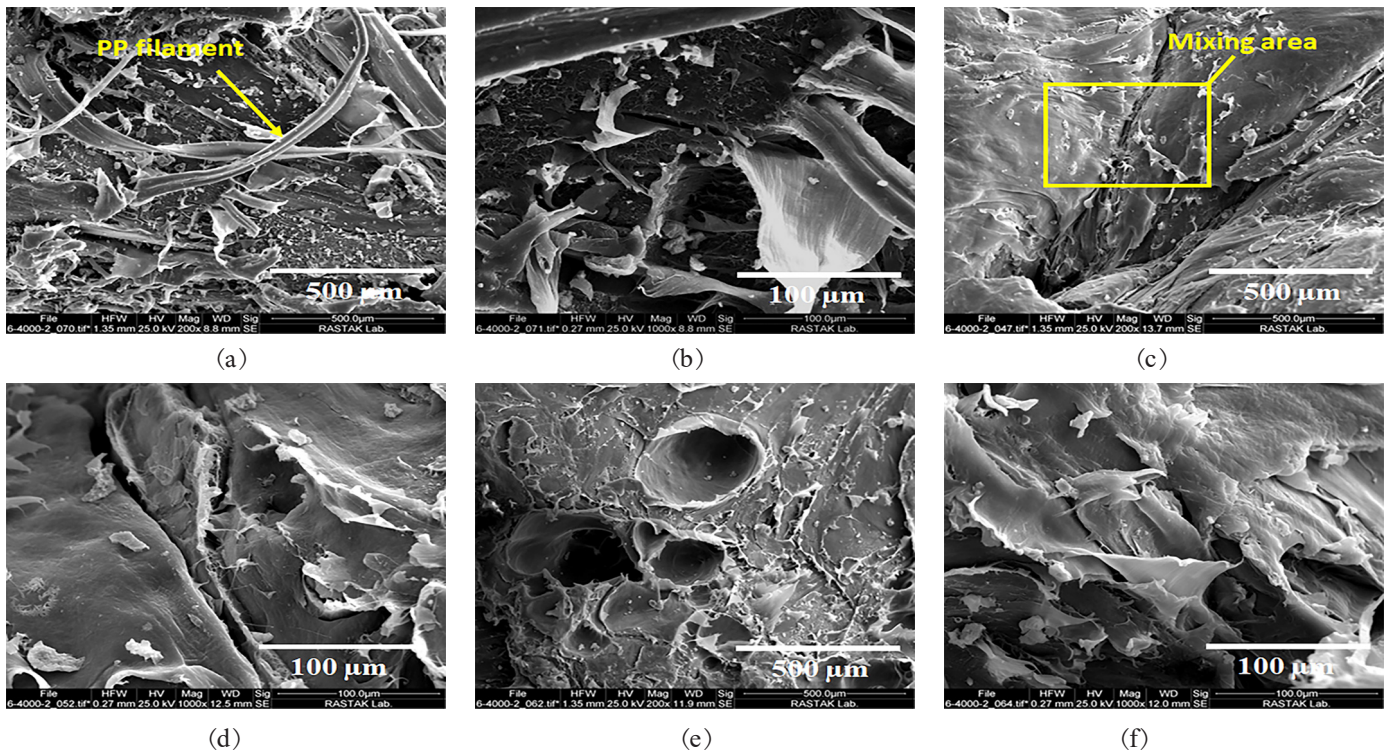
شکل ۹- تغییرات سختی اتصال پلی پروپیلن-پلی پروپیلن با پین‌های مختلف به کمک جوشکاری اصطکاکی هم‌زدنی.

Fig. 9. The hardness variations of polypropylene-polypropylene joint with various pins through friction stir welding.



شکل ۸- انرژی جذب شده اتصال پلی پروپیلن-پلی پروپیلن با پین‌های مختلف به کمک جوشکاری اصطکاکی هم‌زدنی.

Fig. 8. The absorbed energy of polypropylene-polypropylene joint with various pins through friction stir welding.



شکل ۱۰- تصاویر میکروسکوپ الکترونی پوششی با بزرگ‌نمایی‌های مختلف از سطح اتصالات پلی‌پروپیلن-پلی‌پروپیلن با پین‌های مختلف: (a)، (b) PP-PP-CON، (c)، (d) PP-PP-CY-T و (e)، (f) PP-PP-CON-T.

Fig. 10. The SEM images with various magnifications from the surface of polypropylene-polypropylene joint with the different pins: (a), (b) PP-PP-CON, (c), (d) PP-PP-CY-T and (e), (f) PP-PP-CON-T.

منجر می‌شود. رزوه‌ها همچنین با تولید گرما و فشار در فصل مشترک ورق‌های پلیمری باعث افزایش عمق نفوذ پین شده که در نتیجه پلیمرهای ذوب‌شده در فضاهای خالی میکروسکوپی ورق‌های پلیمری نفوذ کرده است و باعث ایجاد قفل‌های مکانیکی و در نتیجه بهبود خواص مکانیکی می‌شود [۲۵].

نتیجه‌گیری

در این کار پژوهشی اثر طراحی پین بر رفتار مکانیکی صفحه‌های پلی‌پروپیلن متصل شده به روش جوشکاری اصطکاکی هم‌زدنی بررسی شد. بدین منظور سه نوع پین مخروطی، استوانه‌ای رزوه‌دار و مخروطی رزوه‌دار طراحی شد. پس از اتصال صفحه‌های پلی‌پروپیلن، آزمون‌های کشش، خمش، ضربه و سختی به‌منظور مشخصه‌یابی خواص مکانیکی اتصالات ایجاد شده انجام شد. همچنین از آزمون میکروسکوپی به‌منظور شناسایی رفتار جوش استفاده شد. بررسی‌ها نشان داد، نمونه جوش خورده با پین مخروطی با $8/2$ MPa استحکام

مثلی و استوانه‌ای بدون رزوه) بر فرایند جوشکاری اصطکاکی هم‌زدنی ورق‌های ناهم‌جنس بررسی شد.

ارزیابی میکروسکوپی جوشکاری اصطکاکی هم‌زدنی پلی‌پروپیلن-پلی‌پروپیلن

شکل ۱۰ تصاویر میکروسکوپ الکترونی پوششی نمونه‌های جوشکاری شده پلی‌پروپیلن را نشان می‌دهد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی پوششی مرکز جوش نمونه‌ها تفاوت‌های شایان توجهی را در شکل‌شناسی نشان می‌دهد. نمونه PP-PP-CON رشته‌های پلیمری را نشان می‌دهد، در حالی که نمونه‌های PP-PP-CON-T و PP-PP-CY-T ساختار متراکمی دارند. استفاده از پین مخروطی به هم‌جوشی در نمونه PE-PE-CON-T منجر نشده است، اما وجود رزوه روی پین، ساختار متراکم‌تری را بدون حالت رشته‌ای ایجاد کرده است. رزوه‌های روی پین نقش مهمی در اختلاط و توزیع مواد پلیمری حین جوشکاری اصطکاکی هم‌زدنی ایفا می‌کنند که در نتیجه اتصال قوی‌تر و بهتری ایجاد می‌شود. نیروی برشی رزوه‌ها به ذوب و همگنی مواد پلیمری کمک می‌کند و به پیوند یکنواخت‌تر با کاهش احتمال نقص

شکست و استحکام خمشی نمونه استوانه‌ای رزوه‌دار به ترتیب ۶۰ و ۷۵٪ است. نمونه جوش خورده با پین استوانه‌ای رزوه‌دار دارای بیشترین مقدار انرژی جذب شده 533 kJ/m^3 بود که این مقدار حدود ۳۹٪ نسبت به نمونه پین مخروطی (383 kJ/m^3) و ۲۵٪ نسبت به نمونه پین مخروطی رزوه‌دار (425 kJ/m^3) بیشتر بود. براساس آزمون میکروسکوپی در نمونه مخروطی رشته‌های پلیمری در فصل مشترک پلی پروپیلن-پلی پروپیلن ایجاد شد، در حالی که در نمونه‌های استوانه‌ای رزوه‌دار و مخروطی رزوه‌دار ساختار متراکم تشکیل شدند.

کششی، کمترین استحکام کششی را داشت، در حالی که نمونه‌های جوش خورده با پین‌های مخروطی رزوه‌دار و استوانه‌ای رزوه‌دار و به ترتیب دارای استحکام کششی ۱۶/۶ و ۱۸/۶ MPa بودند. طبق نتایج نمونه متصل شده با پین استوانه‌ای رزوه‌دار با داشتن تقریباً ۸۲٪ بازده استحکام کششی جوش، بیشترین بازده را نسبت به سایر نمونه‌ها دارد. همچنین بررسی بازده چقرمگی شکست جوش در این نمونه نشان می‌دهد، مقدار آن تقریباً ۵۱٪ است. استحکام خمشی نمونه متصل شده با پین استوانه‌ای رزوه‌دار ۱۸/۳ MPa بود که این مقدار نسبت به نمونه‌های جوش خورده با پین مخروطی و مخروطی رزوه‌دار به ترتیب حدود ۷ برابر و ۳۲٪ بیشتر است. مقادیر بازدهی چقرمگی

مراجع

- Chavooshi A., Madhoushi M., Mootab Saei A., Shakeri A., Effect of Nanoclay and Microwave Thermal Treatment on Mechanical Properties of MDF Dust-PP Nanocomposite, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **25**, 323-331, 2012.
- Albooyeh A. and Fereidoon A., Effect of Mesoporous Silica and Hydroxyapatite Nanoparticles on the Tensile and Dynamic-Mechanical Thermal Properties of Polypropylene and Polypropylene Foam, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **27**, 423-439, 2015.
- Lambiase F., Derazkola H.A., Simchi A., Friction Stir Welding and Friction Spot Stir Welding Processes of Polymers-State of the Art, *Materials*, **13**, 2291, 2020.
- Rudrapati R., Effects of Welding Process Conditions on Friction Stir Welding of Polymer Composites: A Review, *Compos., Part C-Open, C*, **8**, 100269, 2022.
- Eslami S., Tavares P.J., Moreira P.M.G.P., Friction Stir Welding Tooling for Polymers: Review and Prospects. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **89**, 1677-1690, 2017.
- Pereira M.A.R., Amaro A.M., Reis P.N.B., Loureiro A., Effect of Friction Stir Welding Techniques and Parameters on Polymers Joint Efficiency-A Critical Review, *Polymers*, **13**, 2056, 2021.
- Desai D., Shah P., Badheka V., Micro Friction Stir Welding Tools: A Comprehensive Review with Recent Developments in the Field, *J. Mater. Eng. Perform.*, 2025. DOI: 10.1007/s11665-025-10668-x
- Pereira M.A.R., Galvão I., Costa J.D.M., Amaro A.M., Leal R.M., Metal-Polymer Friction Stir Spot Welding Enhanced by Meso-mechanical Interlocking, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **136**, 4581-4593, 2025.
- Derazkola H.A. and Kubit A., Thermal Analysis of Revolution Pitch Effects on Friction Stir Welding of Polypropylene, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **130**, 1421-1437, 2024.
- Stadler G.R. Szebényi G., Horváth R., Investigation of Weld Forces and Strength of Friction Stir Welded Polypropylene, *Period. Polytech. Mech. Eng.*, **67**, 183-189, 2023.
- Panneerselvam K. and Lenin P., Effects and Defects of the Polypropylene Plate for Different Parameters in Friction Stir Welding Process, *Int. J. Res. Eng. Technol.*, **02**, 143-152, 2013.
- Mirabzadeh R., Parvaneh V., Ehsani A., Experimental and Numerical Investigation of the Generated Heat in Polypropylene Sheet Joints Using Friction Stir Welding (FSW), *Int. J. Mater. Form.*, **14**, 1067-1083, 2021.
- Samadi M.R., Ayaz M., Afshari M., Afkar A., An Investigation on the Friction Stir Welding of PP/TiO₂ Nanocomposites for Improving the Tensile Strength and Hardness of the Weld Joint, *Colloid. Polym. Sci.*, **301**, 465-480, 2023.
- Afshari M., Hardani H., Hamounpeyma M., and Samadi M.R., Friction Stir Welding of Polypropylene Based Graphene Nanocomposites Fabricated With 3-D Printing: An Investigation on the Microstructure and Mechanical Properties, *J. Compos. Mater.*, **57**, 1523-1538, 2023.
- Eslami S., de Figueiredo M.A.V., Tavares P.J., Moreira P.M.G.P., Parameter Optimisation of Friction Stir Welded Dissimilar Polymers Joints, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **94**, 1759-1770, 2018.
- Iftikhar S.H., Mourad A.H.I., Sheikh-Ahmad J., Almaskari F., Vincent S., A Comprehensive Review on Optimal Welding Conditions for Friction Stir Welding of Thermoplastic Poly-

- mers and Their Composites, *Polymers*, **13**, 1208, 2021.
17. Akbari M., DebRoy T., Asadi P., and Sadowski T., Recent Advances in Friction Stir Welding/Processing Tools, *J. Manuf. Process.*, **142**, 99–156, 2025.
 18. Wilkins L.T. and Strauss A.M., Influence of Tool Thread Pitch during Friction Stir Welding of High-Density Polyethylene Plate, *J. Manuf. Sci.*, **144**, 121010, 2022.
 19. Gao F., Guo Y., Qiu S., Yu Y., Yu W., Fracture Toughness of Friction Stir Welded TA5 Titanium Alloy Joint, *Mater. Sci. Eng. A.*, **776**, 138962, 2020.
 20. Debondue E., Fournier J.E., Lacrampe M.F., Krawczak P., Weld-Line Sensitivity of Injected Amorphous Polymers, *J. Appl. Polym. Sci.*, **93**, 644-650, 2004.
 21. Sahu S.K., Mishra D., Mahto R.P., Sharma V.M., Pal S.K., Pal K., Banerjee S., Dash P., Friction Stir Welding of Polypropylene Sheet, *Eng. Sci. Technol. Int. J.*, **21**, 245-254, 2018.
 22. Diani J., Liu Y., Gall K., Finite Strain 3D Thermoviscoelastic Constitutive Model, *Polym. Eng. Sci.*, **46**, 486-492, 2006.
 23. Aghajani Derazkola H. and Simchi A., Experimental and Thermomechanical Analysis of the Effect of Tool Pin Profile on the Friction Stir Welding of Poly(methyl methacrylate) Sheets, *J. Manuf. Process.*, **34**, 412-423, 2018.
 24. Hajideh M.R., Farahani M., Alavi S.A.D., Ramezani N.M., Investigation on the Effects of Tool Geometry on the Microstructure and the Mechanical Properties of Dissimilar Friction Stir Welded Polyethylene and Polypropylene Sheets, *J. Manuf. Process.*, **26**, 269-279, 2017.
 25. Kumar S. and Roy B.S., Effect of Different Tool Pin Geometries on Force, Torque, Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welded Acrylonitrile Butadiene Styrene and Polycarbonate Joints, *Int. J. Interact. Des. Manuf.*, **18**, 6897-6908, 2024.