# مقایسه میکرو ساختار و خواص مکانیکی پلیمر ABS در جوشکاری اصطکاک اغتشاشی و التراسونیک

**سید امیرعلی شریعت زاده**

**samiralishariat@gmail.com -۱**

**خلاصه**

این پژوهش به مقایسه تطبیقی روش‌های جوشکاری التراسونیک (USW) و جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (FSW) بر ریزساختار و خواص مکانیکی پلیمر آکریلونیتریل بوتادین استایرن (ABS) می‌پردازد. مطالعه مروری نظام‌مند انجام‌شده بر اساس تحلیل ۲۵ مقاله معتبر در بازه زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۵ نشان داد که مکانیزم تولید حرارت در USW (اصطکاک ویسکوالاستیک آنی) با FSW (اصطکاک مکانیکی تدریجی) متفاوت است. USW دارای HAZ محدود و دمای پیک بالا در زمان کوتاه بوده، در حالی که FSW با HAZ گسترده‌تر و دمای کنترل‌شده عمل می‌کند. نتایج نشان داد که USW موجب کاهش ۲۰ درصد استحکام کششی و ۳۰ درصد انرژی ضربه پلیمر ABS می‌شود، درحالی‌که FSW کاهش کمتری (۱۵ درصد استحکام کششی،۲۰ درصد انرژی ضربه) ایجاد می‌کند. FSW کنترل بهتری بر ریزساختار فازهای استایرن و بوتادین ارائه داده و برای ضخامت‌های بالاتر مناسب‌تر است، در حالی که USW برای اتصالات سریع و ضخامت‌های نازک کارآمدتر می‌باشد.

**کلمات کلیدی:** جوشکاری التراسونیک، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، آکریلونیتریل بوتادین استایرن، ریزساختار، خواص مکانیکی، ناحیه متأثر از حرارت، استحکام کششی، انرژی ضربه، مقایسه تطبیقی، پلیمرهای ترموپلاستیک

**مقدمه**

جوشکاری به عنوان یکی از پایه‌ای‌ترین و حیاتی‌ترین فرآیندها در حوزه ساخت و تولید محسوب می‌شود که هدف غایی آن ایجاد اتصالی دائمی و یکپارچه بین مواد همجنس و غیرهمجنس، اعم از فلزات، سرامیک‌ها، پلیمرها و کامپوزیت‌ها است. مکانیزم بنیادی شکل‌گیری این اتصال در بسیاری از روش‌های متداول، مبتنی بر اعمال انرژی حرارتی برای رساندن ماده به حالت ذوب یا خمیری و همجوشی سطوح درگیر، و به دنبال آن انجماد کنترل‌شده برای ایجاد ناحیه‌ای جامد و مستحکم، است[1].

فرآیندهای جوشکاری تنها به روش‌های ذوبی محدود نمی‌شوند؛ بلکه در کنار آن‌ها، دسته‌ای مهم و پیشرفته از این فرآیندها تحت عنوان جوشکاری حالت جامد قرار می‌گیرند. در این روش‌ها، اتصال از طریق اعمال فشار همزمان با گرم کردن ماده تا ناحیه‌ای زیر نقطه ذوب و رساندن آن به حالت خمیری حاصل می‌شود. نکته اصلی این روش‌ها، ذوب نشدن کامل ماده پایه است. این ویژگی منحصر به فرد منجر به مزایای عمده‌ای همچون کاهش تنش‌های پسماند حرارتی، به حداقل رسیدن اعوجاج، جلوگیری از ایجاد ریزساختارهای شکننده ناشی از انجماد، و حفظ خواص مکانیکی ماده پایه در منطقه اتصال می‌شود [2].

از میان مهم‌ترین و پرکاربردترین فرآیندهای جوشکاری حالت جامد می‌توان به جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (FSW) و جوشکاری اولتراسونیک (USW) اشاره نمود. این دو فناوری نسبتاً نوظهور، به دلیل مزایای منحصر به فرد خود در ایجاد اتصالات با کیفیت برتر، کاربرد گسترده‌ای در صنایعی نظیر هوافضا، خودروسازی و الکترونیک یافته‌اند[3].

از جمله مهم‌ترین کاربردهای مشترک جوشکاری اولتراسونیک (USW) و جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی(FSW) ، اتصال پلیمرها است. این دو فناوری امکان ایجاد اتصالات با استحکام بالا در اتصال پلیمر-پلیمر و همچنین اتصال پلیمر به آلیاژهای فلزی را فراهم می‌کنند. در صنعت خودروسازی، از این روش‌ها برای اتصال قطعات پلیمری داخلی و همچنین اتصال قطعات پلیمری به بدنه فلزی استفاده می‌شود. در صنایع الکترونیک نیز کاربرد گسترده‌ای در مونتاژ قطعات پلیمری محفظه دستگاه‌ها دارند[4].

در سال‌های اخیر، فناوری‌های جوشکاری پلیمرها شاهد پیشرفت‌های چشمگیری بوده‌اند. این رشد قابل توجه مرهون مزایای منحصر به فرد پلیمرها از جمله نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت شیمیایی و خوردگی عالی، خواص عایق‌کاری الکتریکی و قابلیت تولید انبوه اقتصادی است. امروزه پلیمرها به عنوان مواد کلیدی در صنایع پیشرفته‌ای همچون خودروسازی (تولید قطعات بدنه، اجزای داخلی و سیستم‌های تعلیق)، صنایع بسته‌بندی (ظروف چندلایه، بسته‌بندی‌های نانویی)، الکترونیک (عایق‌کاری، محفظه قطعات) و پزشکی (تجهیزات پزشکی، ایمپلنت‌ها) به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند. علاوه بر این، کاربردهای تخصصی پلیمرها در ساخت لوله‌های انتقال سیالات، عایق‌های الکتریکی پیشرفته و پوشش‌های محافظ در شرایط محیطی مختلف، گواهی بر اهمیت روزافزون این مواد در مهندسی نوین است [5].

یکی از مهم‌ترین پلیمرهای ترموپلاستیک پرکاربرد در صنعت، آکریلونیتریل بوتادین استایرن (ABS) می‌باشد. این پلیمر ترموپلاستیک از کوپلیمریزاسیون سه مونومر آکریلونیتریل، بوتادین و استایرن سنتز می‌شود که هر یک نقش خاصی در خواص نهایی ایفا می‌کنند: آکریلونیتریل مقاومت شیمیایی و استحکام حرارتی، بوتادین چقرمگی و مقاومت ضربه‌ای، و استایرن صلبیت و قابلیت پرداخت سطحی را تأمین می‌نماید. ABS با ترکیب متعادلی از خواص مکانیکی شامل مقاومت به ضربه بالا، استحکام کششی مناسب، سختی مطلوب و قابلیت ماشینکاری عالی شناخته می‌شود. همچنین این پلیمر از پایداری ابعادی خوب، مقاومت در برابر حرارت و خزش نسبتاً پایین برخوردار است. به دلیل این ویژگی‌های برجسته، ABS کاربرد گسترده‌ای در تولید محفظه‌های الکترونیکی، قطعات خودرو (مانند داشبورد، پنل‌های داخلی)، اسباب‌بازی‌ها، لوازم خانگی و محصولات مصرفی دارد[6] .

این مقاله مروری به بررسی خواص مکانیکی و میکروساختاری پلیمر آکریلونیتریل بوتادین استایرن (ABS) می‌پردازد که به دلیل ترکیب منحصر به فرد خواص، جایگاه ویژه‌ای در کاربردهای صنعتی یافته است. تمرکز اصلی پژوهش بر تحلیل ریزساختار و خواص مکانیکی این ماده است.

**روش شناسی مرور**

این پژوهش به صورت یک مطالعه مروری نظام‌مند با هدف بررسی تأثیر فرآیندهای جوشکاری اولتراسونیک و اصطکاکی اغتشاشی بر ریزساختار و خواص مکانیکی پلیمر ABS انجام شد. رویکرد مورد استفاده در این مطالعه، مبتنی بر اصول استاندارد مرور نظام‌مند شامل شناسایی، غربالگری، ارزیابی و ترکیب یافته‌های پژوهشی موجود بوده است.

جستجوی مقالات در پایگاه‌های اطلاعاتی معتبر داخلی و خارجی شامل ScienceDirect ، Scopus، Web of Science، Google Scholar، SID با استفاده از کلیدواژه‌های کلیدی شامل "Ultrasonic Welding" ، "Friction Stir Welding"، "ABS Polymer"، "Microstructure" و "Mechanical Properties" انجام شد. معیارهای ورود مقالات به مطالعه شامل تمرکز بر موضوع پژوهش، انتشار در بازه زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۴، دسترسی به متن کامل و دارا بودن داده‌های تجربی مرتبط بود. در نهایت ۲۴ مقاله و یک کتاب معتبر (متالورژی جوشکاری جان وایلی) که واجد معیارهای فوق بودند، برای تحلیل نهایی انتخاب شدند.

فرآیند تحلیل داده‌ها به صورت کیفی و با استفاده از روش تحلیل محتوا انجام شد. داده‌های مربوط به پارامترهای فرآیندی، نتایج آزمون‌های مکانیکی و مشاهدات میکروساختاری استخراج شدند

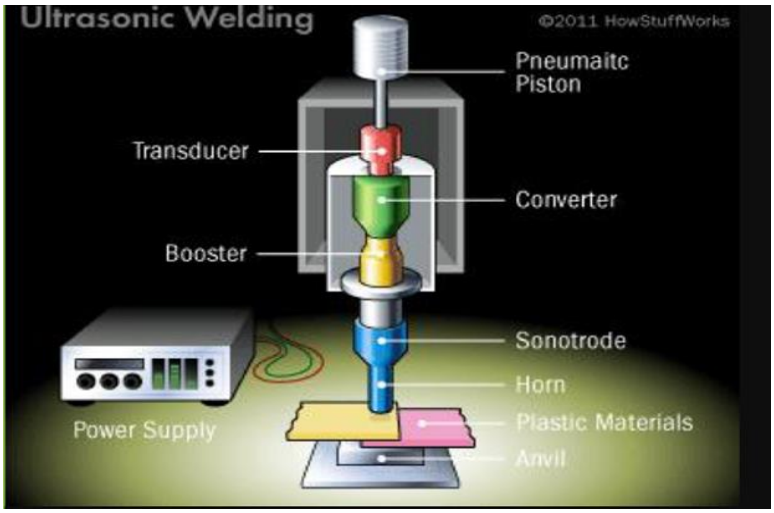
**بدنه اصلی و بحث**

جوشکاری اولتراسونیک (USW) به عنوان یکی از روش‌های پیشرفته جوشکاری حالت جامد شناخته می‌شود که در آن از ترکیب ارتعاشات با فرکانس بالا و نیروی فشاری محوری برای ایجاد اتصال استفاده می‌شود. این فرآیند به دلیل مزایای متعددی از جمله زمان جوشکاری کوتاه، انرژی مصرفی پایین، اعوجاج کم، آلودگی زیست‌محیطی کاهش‌یافته و قابلیت اتوماسیون بالا، جایگاه ویژه‌ای در میان روش‌های اتصال حالت جامد به خود اختصاص داده است.

از مهم‌ترین قابلیت‌های این فناوری، امکان اتصال قطعات نازک فلزی از جمله فویل‌ها، سیم‌ها و ورق‌های فلزی و همچنین مواد پلیمری است که آن را به گزینه‌ای ایده‌آل برای صنایع پیشرفته تبدیل کرده است.

سیستم اولتراسونیک با تبدیل فرکانس برق شهری (۶۰-۵۰ هرتز) به فرکانس‌های بالا (معمولاً ۷۰-۲۰ کیلوهرتز) عمل می‌کند. انرژی الکتریکی در مبدل پیزوالکتریک به ارتعاشات مکانیکی با فرکانس بالا تبدیل شده و سپس از طریق بوستر و هورن به قطعه کار منتقل می‌شود. هورن علاوه بر انتقال ارتعاشات، مسئول اعمال فشار لازم بر روی قطعه کار نیز می‌باشد؛ در شکل شماره‌ی یک شمای کلی فرآیند جوش اولتراسونیک با اجزای آن نشان داده شده است.

مکانیزم تشکیل اتصال در این فرآیند مبتنی بر تبدیل انرژی ارتعاشی به انرژی حرارتی در سطح مشترک قطعات است. این تبدیل انرژی ناشی از اصطکک مولکولی در سطح تماس بوده که منجر به نرم‌شدن موضعی مواد، ایجاد پیوندهای بین اتمی و در نهایت تشکیل اتصال جامد می‌گردد [۷].




**شکل ۱؛ شمای کلی از فرآیند جوش اولتراسونیک (USW)**

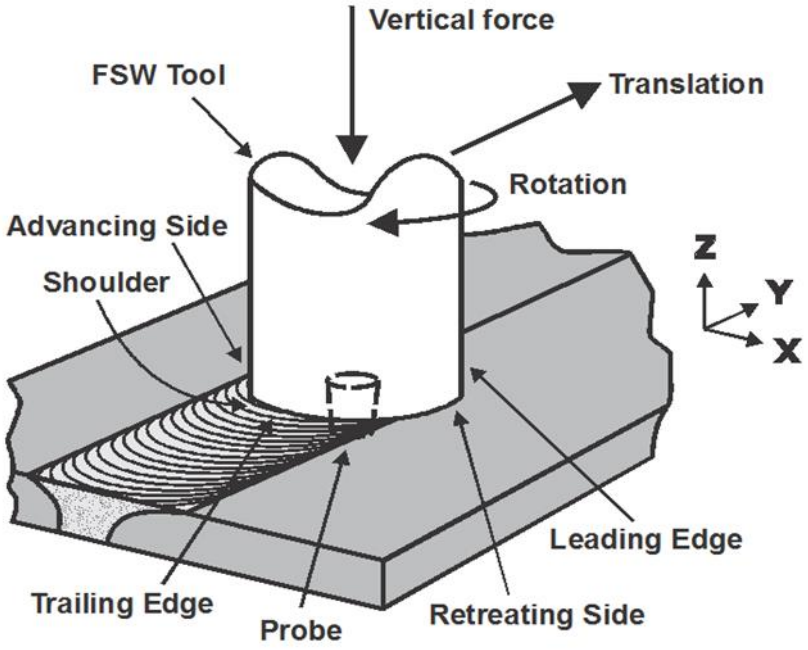
جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی برای اولین بار در سال ۱۹۹۱ توسط مؤسسه جوشکاری انگلستان (TWI) ابداع گردید و در ابتدا بر روی آلیاژهای آلومینیوم مورد آزمایش قرار گرفت[8].

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (FSW) یک فرآیند جوشکاری حالت جامد است که در آن اتصال بدون ذوب شدن ماده پایه صورت می‌گیرد. در این روش، یک ابزار دوار با پین مخصوص با سرعت بالا وارد سطح قطعه کار شده و با حرکت در امتداد خط اتصال، حرارت لازم را از طریق اصطکاک و تغییر شکل پلاستیک شدید مواد تولید می‌کند [۹]. این حرارت کنترل‌شده موجب نرم شدن مواد بدون رسیدن به نقطه ذوب می‌شود و در نتیجه، اتصالی با کیفیت بالا ایجاد می‌گردد.

از مهمترین مزایای این فرآیند می‌توان به کاهش قابل توجه تنش‌های پسماند، کاهش اعوجاج، ریزدانه‌بودن ریزساختار منطقه جوش، و بهبود خواص مکانیکی اشاره کرد [۱۰]. همچنین، این روش برای جوشکاری آلیاژهای غیرهمجنس و موادی که به روش‌های ذوبی معمول تمایل به ترک‌خوردگی دارند، بسیار مناسب است[9].

جوشکاری اصطکاک اغتشاشی به‌طور گسترده در صنایع هوافضا، خودروسازی، دریایی و ریلی برای اتصال صفحات آلومینیومی، منیزیمی و کامپوزیت‌ها و پلیمرها مورد استفاده قرار می‌گیرد. کنترل پارامترهای فرآیند از جمله سرعت چرخش و پیشروی ابزار نقش کلیدی در تعیین کیفیت نهایی جوش دارد [۹و۱۰].

شکل شماره‌ی ۲ شماتیک کلی ابزار جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (FSW) و نیروهای وارد بر آن را نشان می‌دهد. در این فرآیند، ابزار دوار متشکل از شانه (Shoulder) و پین (Probe) تحت اعمال نیروی عمودی به سطح قطعه کار نفوذ کرده و همزمان با حرکت انتقالی و چرخش، موجب اختلاط و اتصال مواد در سمت پیشرو و سمت پسرونده می‌شود.




**شکل شماره‌ی ۲ ؛ شماتیک فرآیند جوشکاری اصطکاک اغتشاشی**

با توجه به کاربرد قابل توجه فرآیندهای جوشکاری حالت جامد در صنایع گوناگون و نسبتاً جدید بودن آنها، تحقیقات گسترده‌ای در سال‌های اخیر در این زمینه انجام شده است. در ادامه مروری مختصر بر برخی از این مطالعات ارائه می‌شود.

در پژوهشی توسط Orłowska و همکاران، از فرآیند جوشکاری اصطکاکی برای اتصال نمونه‌های آلومینیوم فوق‌ریزدانه تولیدشده به روش تغییر شکل پلاستیکی شدید استفاده شد. نتایج نشان داد که اگرچه ریزساختار در ناحیه جوش به طور کامل حفظ نشد و رشد دانه تا ۶/۱ تا ۲ میکرومتر مشاهده شد، اما استحکام کششی اتصالات به‌دست‌آمده به ۸۳ تا ۹۰ درصد استحکام ماده پایه رسید. همچنین موقعیت صفحات برش ناشی از فرآیند اکستروژن در کانال زاویه‌دار تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر یکنواختی و کیفیت جوش داشت[11] .

در مطالعه دیگری، صفدریان به بررسی اثر پارامترهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (FSW) شامل هندسه ابزار، سرعت دورانی و سرعت پیشروی بر قابلیت شکل‌دهی ورق‌های لایه‌گذاری شده از جنس آلیاژهای آلومینیوم پرداخت.

با بهره‌گیری از روش طراحی آزمایش تاگوچی و آزمون اریکسون، نتایج نشان داد که انتخاب ابزار مناسب و افزایش سرعت چرخش ابزار منجر به بهبود کیفیت جوش و افزایش قابلیت تغییر شکل ورق‌های جوش‌خورده می‌شود. این تحقیق بر اهمیت بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند جهت دستیابی به اتصالاتی با استحکام و شکل‌پذیری مطلوب تأکید دارد [12].

رضازاده و همکاران نیز در پژوهشی به بررسی اثر پارامترهای جوشکاری اولتراسونیک شامل دامنه ارتعاش، زمان و فشار جوشکاری و نیز درصد الیاف شیشه بر استحکام برشی-کششی و کیفیت ظاهری اتصالات کامپوزیت پلی‌پروپیلن/الیاف شیشه پرداختند. در این پژوهش، نشان داده شد که افزایش دامنه ارتعاش و زمان جوشکاری تا حد بهینه، موجب بهبود استحکام می‌شود، در حالی که افزایش فشار و درصد الیاف اثر معکوس دارد. شرایط بهینه برای دستیابی به بیشینه استحکام و حداقل عیوب، در دامنه ۳۳ میکرومتر، زمان ۴/۰ ثانیه، فشار ۵/۱ بار و درصد ۱۰٪ الیاف به‌دست آمد[13].

احمدی و همکاران قابلیت استفاده از روش جوشکاری التراسونیک برای اتصال ورق‌های آکریلونیتریل بوتادین استایرن (ABS)را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها تأثیر پارامترهای فرآیند شامل دامنه ارتعاش، فشار استاتیک، زمان جوشکاری و فرکانس اولتراسونیک بر کیفیت اتصال، استحکام مکانیکی و ریزساختار ناحیه جوش بررسی کردند. نتایج آزمایش‌های مکانیکی و تحلیل‌های حرارتی-مکانیکی نشان داد که این روش قادر به ایجاد اتصال سریع و مؤثر بین قطعات ABS است و با کنترل دقیق پارامترهای فرآیند می‌توان به اتصالات با کیفیت بالا دست یافت که برای تولید انبوه قطعات پلاستیکی مناسب باشد[14].

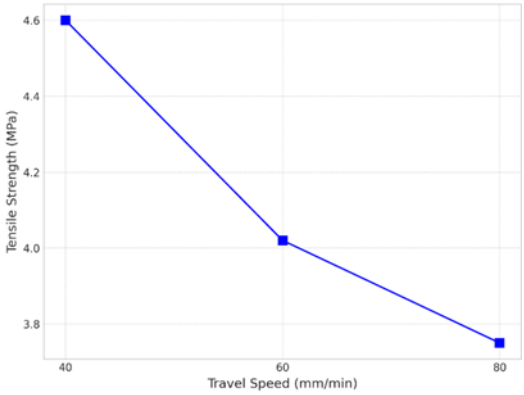
مرادی و همکاران امکان‌پذیری کاربرد روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی برای اتصال ورق‌های آکریلونیتریل بوتادین استایرن (ABS) را مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها تأثیر پارامترهای کلیدی فرآیند شامل سرعت دورانی ابزار، سرعت پیشروی خطی، نیروی عمودی اعمالی و هندسه پین بر کیفیت جوش، خواص مکانیکی و توزیع دمایی در ناحیه تحت تأثیر حرارت بررسی کردند. نتایج حاصل از آزمایش‌های کشش، برش و تحلیل‌های ترمومکانیکی نشان داد که این تکنیک قادر به ایجاد اتصالات پیوسته و با دوام بین قطعات ABS بوده و با بهینه‌سازی مناسب پارامترهای عملیاتی می‌توان به جوش‌هایی با استحکام قابل مقایسه با مواد پایه دست یافت که برای کاربردهای ساختاری و صنعتی مناسب است[15].

در ادامه به بررسی پارامترهای مهم و کلیدی در جوشکاری اصطکاک اغتشاشی و جوشکاری اولتراسونیک و مقایسه این دو پارامتر بر طبق مقالات و پژوهش‌های گذشته پراخته خواهد شد.

در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی(FSW) ، سرعت چرخشی و سرعت پیشروی ابزار به عنوان دو پارامتر فرآیندی کلیدی و مؤثرترین عوامل بر روی تولید حرارت، جریان ماده، و در نتیجه خواص نهایی اتصال شناخته می‌شوند. این دو پارامتر به طور مستقیم بر روی نسبت حرارت ورودی و زمان ماندگاری حرارت تأثیر گذاشته و میکروساختار و خواص مکانیکی منطقه جوش را کنترل می‌کنند. در رده بعدی، هندسه ابزار شامل شکل و ابعاد پین و شانه، جنس ابزار و قطر شانه قرار می‌گیرند که نقش حیاتی در توزیع حرارت، انتقال ماده و یکنواختی اتصال ایفا می‌کنند[16].

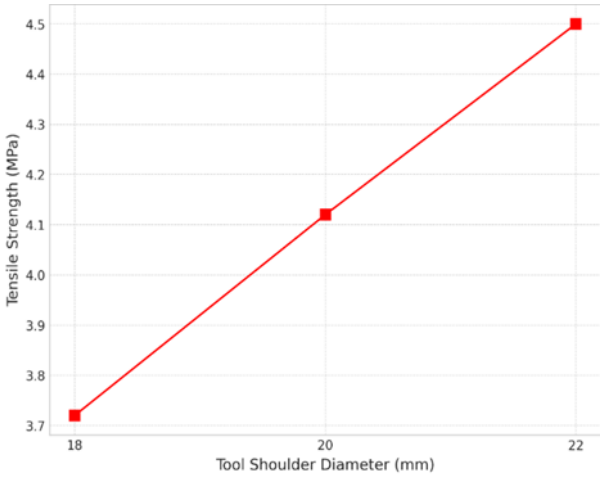
پارامترهای فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (FSW) تأثیر مستقیمی بر ورودی حرارت، جریان پلاستیک ماده و در نتیجه، خواص مکانیکی نهایی اتصال دارند. در این میان، سرعت پیشروی و ابعاد ابزار از جمله متغیرهای کلیدی و کنترل‌کننده فرآیند محسوب می‌شوند.

بررسی‌ها نشان می‌دهد که میان سرعت پیشروی ابزار و استحکام کششی نهایی جوش، یک رابطه معکوس برقرار است (نمودار ۱). هنگامی که سرعت پیشروی کاهش می‌یابد، زمان تماس و اصطکاک ابزار با قطعه کار در واحد طول جوش افزایش می‌یابد. این امر منجر به تولید حرارت بیشتر و افزایش دمای منطقه اغتشاش می‌شود. در دمای بالاتر، پلاستیسیته و سیالیت ماده بهبود یافته و جریان پلاستیک به شکل بهتری صورت می‌گیرد که نتیجه آن، ایجاد یک ساختار جوش متراکم، همگن و عاری از عیوب حجمی (مانند حفرات) است. برعکس، در سرعت‌های پیشروی بالا، ورودی حرارت ناکافی بوده و ماده فرصت کافی برای نرم شدن و جریان یافتن را پیدا نمی‌کند. این پدیده می‌تواند منجر به نازک شدن خط جوش یا ایجاد عیوب کشیدگی و در نهایت، کاهش استحکام مکانیکی اتصال گردد.




**نمودار ۱؛ بررسی اثر سرعت پیشروی بر استحکام کششی ماده**

از سوی دیگر، قطر شانه ابزار به عنوان منبع اصلی تولید حرارت، تأثیر قابل توجهی بر استحکام جوش دارد. همانطور که در نمودار ۲ مشاهده می‌شود، با افزایش قطر شانه از ۱۸ به ۲۲ میلی‌متر، استحکام کششی به طور محسوسی افزایش یافته است. شانه با قطر بزرگتر به دلیل سطح تماس بیشتر با قطعه کار، اصطکاک و در نتیجه حرارت بیشتری تولید می‌کند. این حرارت اضافی، حجم بیشتری از ماده را به حالت پلاستیک درآورده و یک منطقه اغتشاش کارآمدتر را شکل می‌دهد. در مقابل، قطر شانه کوچک (مانند ۱۸ میلی‌متر)، به دلیل تولید حرارت ناکافی و نسبت نامناسب قطر پین به شانه، نمی‌تواند جریان ماده مناسبی را ایجاد کند. این امر به شکل‌گیری عیوبی نظیر تخلخل و کاهش خواص مکانیکی می‌انجامد [۱۷].




**نمودار ۲؛ بررسی اثر قطر ابزار بر استحکام کششی ماده**

سرعت چرخش ابزار یکی از پارامترهای کلیدی در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (FSW) است که تأثیر مستقیمی بر کیفیت اتصال، ریزساختار و خواص مکانیکی ماده پایه دارد. افزایش سرعت چرخش ابزار معمولاً منجر به بهبود اختلاط مواد و نفوذ بهتر بین ناحیه پین و شانه می‌شود. این امر ناشی از افزایش تنش برشی و انتقال حرارت اصطکاکی است که شرایط بهینه برای جریان پلاستیک ماده فراهم می‌کند. از سوی دیگر، سرعت‌های چرخش پایین‌تر ممکن است با افزایش زمان تماس، موجب افزایش دمای موضعی و نرم‌شدگی بیشتر ماده شوند.

با این حال، انحراف از محدوده بهینه سرعت چرخشی چه به سمت مقادیر بسیار بالا و چه بسیار پایین می‌تواند اثرات نامطلوبی به همراه داشته باشد. سرعت‌های بسیار بالا ممکن است منجر به تولید گرمای بیش از حد، تخریب ترمومکانیکی و کاهش خواص مکانیکی شوند. در مقابل، سرعت‌های بسیار پایین نیز به دلیل تولید ناکافی گرما، ممکن است سبب نفوذ ناقص، تخلخل و ضعف در پیوند بین مواد گردند.

بر اساس تحلیل داده‌های آزمایشگاهی مربوط به جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (FSW) پلیمرABS ، بیشینه استحکام کششی برابر با حدود ۱۷/۷۷ مگاپاسکال در شرایط بهینه سرعت چرخشی ابزار ۱۱۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۶۰ میلی‌متر بر دقیقه حاصل شده است. این شرایط به دلیل ایجاد ورودی حرارتی متعادل، اختلاط مؤثر ماده و بهبود یکپارچگی میکروساختاری، موجب کاهش عیوبی همچون حفرات و نواحی همجوشی ناقص می‌گردد. در مقابل، کمینه استحکام کششی حدود ۷/۴مگاپاسکال در سرعت چرخشی ۴۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیشروی ۱۲۰ میلی‌متر بر دقیقه به‌دست آمده که به دلیل سرعت پیشروی بالا نسبت به نرخ چرخش ابزار، منجر به تولید ناکافی حرارت اصطکاکی، پلاستیسیته ضعیف، افزایش تخلخل و افت محسوس خواص مکانیکی در ناحیه جوش شده است [18].

جوشکاری اولتراسونیک (USW) به دلیل توانایی منحصر به فرد در اتصال قطعات نازک، امتیاز ویژه‌ای در صنایع مختلف پیدا کرده است. این فناوری امکان ایجاد اتصال پایدار را برای طیف وسیعی از مواد شامل فویل‌ها، سیم‌ها، ورق‌های فلزی و همچنین مواد پلیمری فراهم می‌کند.

مهم‌ترین پارامترهای فرآیندی مؤثر بر کیفیت اتصال در این روش عبارتند از: توان اولتراسونیک، زمان جوشکاری و نیروی اعمالی. بهینه‌سازی این پارامترها برای دستیابی به حداکثر استحکام مکانیکی و یکنواختی در فصل مشترک اتصال امری ضروری است.

مطالعات نشان می‌دهد که با افزایش توان اولتراسونیک و زمان جوشکاری، استحکام اتصال به‌طور قابل توجهی بهبود می‌یابد. از نظر فیزیکی، افزایش توان به معنی افزایش دامنه ارتعاشات و در نتیجه انتقال انرژی بیشتر به ناحیه اتصال است. این امر منجر به افزایش دمای موضعی، نرم‌شدن مواد و فعال‌شدن مکانیزم‌های نفوذ در فصل مشترک می‌شود. در مقابل، مقادیر ناکافی توان و زمان جوشکاری، به دلیل تولید انرژی حرارتی ناکافی، منجر به جدایش آسان قطعات متصل‌شده می‌گردد که دلیل محکمی بر شکل‌گیری ناقص پیوندهای بین اتمی و عدم نفوذ کافی است[19].

بر پایه مطالعات تجربی، بیشترین استحکام کششی اتصالات جوشکاری اولتراسونیک پلیمر ABS در محدوده پارامترهای بهینه به دست می‌آید. این محدوده عموماً شامل دامنه ارتعاش بین ۳۰ تا ۵۰ میکرون، زمان جوشکاری بین ۰.۵ تا ۱.۵ ثانیه و فشار اعمالی در محدوده ۲ تا ۳ بار است. در این شرایط، انرژی حرارتی تولید شده در فصل مشترک به اندازه‌ای است که موجب نرم‌شدن و فعالیت مولکولی کافی بدون تخریب زنجیره‌های پلیمری می‌گردد. در نتیجه، پیوندهای بین مولکولی قوی در سطح مشترک تشکیل شده و استحکام اتصال می‌تواند به ۸۵ تا ۹۵ درصد استحکام ماده پایه برسد. میکروساختار تشکیل‌شده در این شرایط بهینه، عاری از حفره و ناپیوستگی بوده و از یکنواختی بالایی برخوردار است [20].

در مقابل، کمترین استحکام اتصال هنگامی رخ می‌دهد که پارامترهای فرآیند خارج از محدوده بهینه باشند. دامنه ارتعاش بسیار پایین (کمتر از ۲۰ میکرون) همراه با زمان جوشکاری کمتر از ۰.۳ ثانیه منجر به تولید انرژی حرارتی ناکافی می‌شود. در این شرایط، مواد در فصل مشترک به حالت خمیری کامل نرسیده و در نتیجه، پیوند بین مولکولی ضعیفی تشکیل می‌شود که به راحتی تحت بار شکسته می‌شود. میکروساختار ناحیه جوش در این شرایط، مملو از حفره‌ها و ترک‌های ریز است و فاز بوتادین به دلیل حرارت بیش از حد، تجمع یافته و خواص مکانیکی را به شدت تضعیف می‌کند. استحکام اتصال در این پارامترهای نامناسب می‌تواند به کمتر از ۳۰ درصد استحکام ماده پایه کاهش یابد[20].

در بررسی میکروساختار و تغییرات حرارتی ناشی از جوشکاری اولتراسونیک و اصطکاکی اغتشاشی بر روی پلیمر ABS، مشاهده می‌شود که هر دو روش منجر به تغییرات آمورف و کریستالی در ساختار می‌شوند، اما تفاوت‌های قابل توجهی در مقیاس و شدت این تغییرات وجود دارد. درUSW ، میکروساختار عمدتاً آمورف با حضور فازهای استایرن، بوتادین و اکریلونیتریل است که منجر به تشکیل لایه‌های جوشی با ضخامت کم و ناحیه تحت تأثیر حرارتی (HAZ)باریک می‌گردد، که این امر به دلیل ورودی حرارتی پایین در زمان کوتاه ۳ ثانیه و تمرکز انرژی ویبره‌ای است. در مقابل، FSW با ورودی حرارتی بالاتردر زمان طولانی‌تر ۶۰ ثانیه و اختلاط مکانیکی شدید، ساختار کریستالی غالب‌تری ایجاد می‌کند که شامل زنجیره‌های پلیمری مشابه اما با تغییرات بیشتر در ترکیب شیمیایی است، که این امر HAZ وسیع‌تری و عمق نفوذ بیشتر را به همراه دارد. این تفاوت‌ها نشان‌دهنده آن است که USW برای حفظ ساختار اولیه پلیمر مناسب‌تر است، در حالی که FSW تغییرات گسترده‌تری در میکروساختار ایجاد می‌کند که می‌تواند به بهبود همگنی جوش منجر شود، اما خطر تخریب حرارتی را افزایش می‌دهد[21].

از منظر خواص مکانیکی، مقایسه استحکام کششی نهایی، سختی و مقاومت به ضربه بین دو روش، برتری USW را در حفظ خواص سطحی برجسته می‌سازد. درUSW ، استحکام کشش نهایی حدود ۱۵ تا ۲۵ درصد کاهش می‌یابد

اما با تمرکز بر HAZ کمتر و سختی سطحی، که این امر به دلیل فرآیند سریع و بدون ذوب گسترده است، منجر به جوش‌هایی با استحکام کششی کاهشی اما پایدار می‌شود. همچنین، سختی حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد افزایش می‌یابد و مقاومت به ضربه ۳۰ درصد کاهش می یابد، که این تغییرات عمدتاً به دلیل تراکم مولکولی در ناحیه جوش است. برعکس، FSW با کاهش استحکام کششی نهایی در محدوده ۵ تا ۱۵ درصد خواص مکانیکی حجمی بهتری ارائه می‌دهد، اما مقاومت به ضربه آن حدود ۱۵ درصد کاهش می‌یابد و سختی کلی ۵ تا ۱۰ درصد کمتر است، که این امر ناشی از اختلاط مکانیکی و گرادیان حرارتی بالاتر است. این مقایسه نشان می‌دهد که USW برای کاربردهای نیازمند سختی سطحی بالا (مانند قطعات الکترونیکی) ایده‌آل است، در حالی که FSW برای ساختارهای حجمی مقاوم مانند قطعات خودرو مناسب‌تر می‌باشد[22,23].

در نهایت، از دیدگاه مزایا و چالش‌ها، USW به عنوان یک روش سریع و کم‌مصرف انرژی، مزایای زیست‌محیطی و اقتصادی بیشتری ارائه می‌دهد، اما محدودیت‌هایی در عمق جوش و حساسیت به ناهمواری سطح دارد. FSW، با پیوندهای شیمیایی قوی‌تر و ساختار کریستالی پایدار، برای جوشکاری قطعات ضخیم‌تر کارآمدتر است، اما ورودی حرارتی بالا می‌تواند منجر به افزایش عیوب شود. مطالعات تجربی بر اساس داده‌های ارائه‌شده در جدول ۱، تأکید می‌کنند که انتخاب روش بر اساس نیازهای کاربردی ضروری است، و ترکیب این دو روش در فرآیندها می‌تواند راهکاری نوین برای دستیابی به خواص بهینه در پلیمرهای ترموپلاستیک مانند ABS باشد[۲۲,۲۳].

**جدول ۱؛ مقایسه کلی دو فرآیند جوشکاری**

| ویژگی | جوشکاری اولتراسونیک (USW) | جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (FSW) |
|---|---|---|
| دمای جوش | حدود ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد در مدت ۳ ثانیه | حدود ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد در مدت یک دقیقه |
| میکروساختار | آمورف | کریستالی |
| استحکام کشش نهایی | ۲۰ درصد کاهش | حدود ۱۵ درصد کاهش |
| سختی | ۱۰ تا ۱۵ درصد افزایش | ۵ تا ۱۰ درصد کاهش |
| مقاومت به ضربه | ۳۰ درصد کاهش | ۲۰ درصد کاهش |
| عمق جوش | ۱۰ تا ۵۰ میکرومتر | ۲۰۰ تا ۸۰۰ میکرومتر |
| ورودی حرارت | متوسط | بالا |
| HAZ | باریک؛ ۱ تا ۲ میلی‌متر | وسیع ۱۰ تا ۱۵ میلی‌متر |

## نتیجه‌گیری و پیشنهادات

بررسی ادبیات در حوزه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (FSW) نشان می‌دهد که این روش به طور مؤثر استحکام کششی و سختی را در مواد فلزی (مانند آلیاژهای آلومینیوم و فولاد) افزایش می‌دهد، اما اغلب با کاهش شکل‌پذیری و چقرمگی همراه است، که این امر بر لزوم کنترل دقیق پارامترهای فرآیند مانند سرعت چرخش، سرعت پیشروی و ورودی حرارتی تأکید دارد تا از تشکیل عیوب میکروساختاری جلوگیری شود. در پلیمرهای ترموپلاستیک مانند ABS، مقایسه FSW با جوشکاری اولتراسونیک (USW) حاکی از برتری USW در حفظ شکل‌پذیری و حداقل تغییرات حرارتی است، در حالی که FSW همگنی میکروساختاری و استحکام مکانیکی بالاتری ارائه می‌دهد، هرچند با ریسک بالاتر تخریب حرارتی و کاهش چقرمگی[24].

با این وجود، تحقیقات آتی باید بر بهینه‌سازی پارامترهای فرآیند تمرکز کند تا تغییرات ساختاری و حرارتی نامطلوب در پلیمرها کاهش یابد، و مطالعات تجربی بیشتری برای ارزیابی مقایسه‌ای میکروساختار ABS در این دو روش انجام گیرد. این یافته‌ها نه تنها اهمیت انتخاب روش جوشکاری بر اساس الزامات کاربردی را برجسته می‌سازند، بلکه زمینه‌ای برای توسعه فرآیندهای هیبریدی نوین، مانند ترکیب FSW وUSW ، در جوشکاری کامپوزیت‌های ترموپلاستیک فراهم می‌آورند تا تعادلی بهینه بین خواص مکانیکی و پایداری حرارتی حاصل شود.

جوشکاری اولتراسونیک (USW) پتانسیل بالایی برای کاربردهای صنعتی در اتصال کامپوزیت‌های ترموپلاستیک مانند ABS ارائه می‌دهد، زیرا فرآیند سریع و کم‌مصرف انرژی آن منجر به حداقل تغییرات حرارتی و حفظ خواص مکانیکی می‌شود؛ با این حال، نیاز به تحقیقات بیشتر در اتصال مواد مانند پلیمر به فلز و پلیمر به پلیمر می‌باشد، بهینه‌سازی پارامترها برای مواد پیشرفته و توسعه تجهیزات قدرتمندتر برای ضخامت‌های بیشتر ضروری است[25].

در مقابل، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (FSW) برای مواد حساس به حرارت مانند ABS چالش‌برانگیز است، زیرا ورودی حرارتی بالا می‌تواند تغییرات ساختاری (مانند افزایش کریستالینیتی یا تخریب مولکولی) ایجاد کند که منجر به افزایش استحکام اما کاهش شکل‌پذیری و چقرمگی می‌شود؛ بنابراین، کنترل دقیق پارامترها مانند سرعت چرخش و پیشروی برای جلوگیری از عیوب ضروری است. مقایسه این دو روش حاکی از برتری USW در حفظ شکل‌پذیری است، در حالی که FSW برای دستیابی به همگنی میکروساختاری بالاتر مناسب‌تر می‌باشد، و تحقیقات آتی باید بر بهینه‌سازی هیبریدی این فرآیندها برای کاربردهای پیشرفته تمرکز کند [25].

**مراجع**

[۱] Kou, S. (2003). *Welding Metallurgy*. John Wiley & Sons.
[۲] Mishra, R. S., & Ma, Z. Y. (2005). Friction stir welding and processing. Materials Science and Engineering: R: Reports, *50*(1-2), 1-78.
[۳] Mendes, N., Neto, P., Loureiro, A., & Moreira, A. P. (2014). A review on friction stir welding of thermoplastic polymers. Materials & Design, *64*, 574-582.
[۴] Squeo, E. A., & Bruno, G. (2020). Polymer joining techniques: A review. *Journal of Manufacturing Processes*, 56, 1355-1366.

[۵] Yousefi, A., & Ahmadi, M. (2021). Recent advances in polymer welding technologies: A comprehensive review. *Journal of Manufacturing Processes*, 68, 1528-1546.

[۶] Aumnate, C., Pongwisuthiruchte, A., Pattananuwat, P., & Potiyaraj, P. (2018). Fabrication of ABS composites: A review. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 31(5), 689-704.

[۷] Masoumi, H. R., Razavi, H., Meysami, A. H., & Khodaei, M. (2021). Experimental Investigation of Ultrasonic Spot Welding on Dissimilar AA1050 and AA3105 Alloys Joining. *Journal of Science and Technology of Welding and Joining*, 7(1), 61-70.

[۸] M. Elyasi, H. Aghajani Derazkola & M. Hosseinzadeh, “Investigations of tool tilt angle on properties friction stir welding of A441 AISI to AA1100 aluminium”, *Proc IMechE Part B: J Engineering Manufacture*, Vol. 230, No. 7, pp. 1234–1241, 2016.
[۹] A. Parvaresh, H. Sabet, M. Roohnia, "Measuring of Residual Stress in TIG Welding of the AISI 304 Stainless Steel by Ultrasonic Method", *نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران*, Vol. 3, No. 2, pp. 20-32, 2017.
[۱۰] R. Nandan, T. DebRoy, H.K.D.H. Bhadeshia, "Recent advances in friction-stir welding – Process, weldment structure and properties", *Progress in Materials Science*, Vol. 53, Issue 6, 2008, pp. 980-1023.
[۱۱] M. Orłowska et al., "Application of linear friction welding for joining ultrafine grained aluminium," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 56, pp. 540–549, 2020.
[۱۲] R. Safdarian, "The effect of friction stir welding parameters on the formability of AA5182/AA6061 laminated sheets," *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, vol. 48, no. 2, pp. 205–212, 2023. (In Persian)
[۱۳] R. Nikoi, N. Bani Mostafa Arab, and A. A. Ghaderi, "Investigation of mechanical and weld appearance properties of polymer based composites in ultrasonic welding process," *Journal of Modern Processes in Manufacturing and Production*, vol. 12, no. 3, pp. 223–239, 2023. (In Persian)
[۱۴] Ahmadi, S.M., Rezaei, M., Hosseinzadeh, A., "Investigation of ultrasonic welding parameters on joint quality and mechanical properties of ABS thermoplastic sheets", Journal of Manufacturing Processes, Vol. 45, pp. 224-235, 2019.
[15] Moradi, H., Hosseini, S.A., Ghorbani, M., "Friction stir welding of acrylonitrile butadiene styrene (ABS): Process optimization and mechanical characterization", Journal of Manufacturing Processes, Vol. 58, pp. 242-255, 2020.
[16] M. R. Ojnordy, F. Kolahan, "Numerical analysis and experimental study on friction stir welding (Case studies on aluminum alloy 6061 and steel alloy 1018)," *Majlis-i Muhandisī-I Makanīk-i Madāris*, vol. 18, no. 2, pp. 252–263, 2017.
[۱۷] M. Nadernejad Moziraji, M. Elyasi, M. Hosseinzadeh, "Experimental study on effects of ultrasonic vibration on tensile strength and hardness of friction stir welded ABS sheets," Modares Mechanical Engineering, vol. 16, no. 1, pp. 237–247, 2016.
[۱۸] Khan, S. A., & Sohail, M. (2025). Characteristics of friction stir welding of 3 mm thick ABS and PC thermoplastic polymers: An experimental approach. PLOS One, 20(5), e0322456.
[۱۹] Zhao, D., Wang, Y., Sheng, S., & Lin, Z. (2021). Parameter optimization and interfacial characterization of ultrasonic welding of multi-material systems. Journal of Manufacturing Processes, *64*, 1513-1525.
[۲۰] Staic, D., et al. (2022). Optimization of ultrasonic welding parameters for ABS polymer: Mechanical performance and microstructural analysis. Journal of Materials Processing Technology, *309*, 117372.
[21] Frederick, H., Li, W., & Palardy, G. (2021). Disassembly study of ultrasonically welded thermoplastic composite joints via resistance heating. Materials, 14(10), 2521.
[22] Qiu, J., Zhang, G., Sakai, E., Liu, W., & Zang, L. (2020). Thermal welding by the third phase between polymers: A review for ultrasonic weld technology developments. Polymers, 12(4), 759.

[23] Guevara-Sotelo, N. S., & Fernandez Villegas, I. (2023). Effect of adherend thickness on near-field ultrasonic welding of single-lap CF/LMPAEK thermoplastic composite joints. Materials, 16(21), 6968.
[۲۴] Bhudolia, S. K., Gohel, G., Leong, K. F., & Islam, A. (2020). Advances in ultrasonic welding of thermoplastic composites: A review. Materials, 13(6), 1284.
[25] Tehrani-Moghadam, H.G., Jafarian, H.R., Aghazadeh Ghomi, M., Heidarzadeh, A. (2025). Effect of friction stir welding on microstructure, phase transformations, and mechanical properties of austenitic Fe-24Ni-4Cr steel. Journal of Welding Science and Technology of Iran, 11(1).