

# بررسی پایداری استحکام تسلیم اتصال جوشی همزنی اصطکاکی پلاستیک گرمانرم آمورف مشابه با استفاده از عملگرهای میانگین وزنی مرتب شده

ناصر صادقیان\* (استادیار)

پردیس صنعتی شهدای هویزه، دانشگاه شهید چمران اهواز

علیرضا چاجی (استادیار)

دانشکده ی علوم پایه، دانشگاه بزرگمهر قائنات

مهندسی مکانیک شریف، (پاییز ۱۴۰۳)  
دوره ی ۴۰، شماره ی ۲، صص. ۶۴-۷۵، (پژوهشی)

در این تحقیق، بررسی استحکام تسلیم اتصال جوشی پلاستیک گرمانرم آکریلونیتریل بوتادین استایرن انجام شده است. جوشکاری ورق‌ها با استفاده از ابزارهای فولادی و دستگاه فرز صورت گرفته و پین ابزار دارای پروفیل‌های استوانه‌ای و مخروطی می‌باشد. به دلیل گرمای تولیدی از اصطکاک و تغییر شکل شدید ناشی از جوشکاری همزنی اصطکاکی، اتصال جوشی به حالت ذوبی تبدیل می‌شود. نتایج آزمون کشش استاندارد، به روش میانگین وزنی مرتب شده، مورد بررسی قرار گرفته به طوری که علاوه بر مطالعه بهبود اتصال جوشی و تعیین مقادیر بهینه پارامترهای ورودی می‌توان پایداری رفتار پاسخ را نیز به دست آورد. از روش ارزیابی ریسک مبتنی بر وزن دهی به مقادیر مرتب شده ورودی به ازای یک مقدار مشخص خوش‌بینی، استفاده شده و نتایج پایداری پاسخ استحکامی به صورت کمی و کیفی ارائه شده‌اند. این بررسی، اهمیت صنعتی‌سازی و تولیدی استحکام اتصال را نشان می‌دهد.

n.sadeghian@scu.ac.ir  
a.chaji@buqaen.ac.ir

واژگان کلیدی: رفتار مکانیکی، بررسی تجربی، ریسک‌پذیری، جوشکاری همزنی اصطکاکی، میانگین وزنی مرتب شده.

## ۱. مقدمه

ماهیتی پیچیده نیز می‌باشد. روش‌های گوناگون اتصال این گونه مواد شامل روش جوشکاری، چسباندن و اتصال با بست‌های مکانیکی می‌باشد. جوشکاری فقط برای پلاستیک‌های گرمانرم قابل اجراست و به دو دسته کلی جوشکاری با حرارت داخلی و خارجی تقسیم می‌شود. روش‌های جوشکاری با منبع حرارت خارجی عبارتند از: روش گاز داغ، روش ابزار داغ، روش اشعه لیزر، روش دی‌الکترونیک، روش مقاومتی، روش القایی. روش‌های جوشکاری با تولید حرارت داخلی مشتمل بر روش‌های مافوق صوت<sup>۱</sup>، جوشکاری اصطکاکی<sup>۲</sup> (با استفاده از ارتعاش یا چرخش) و جوشکاری همزنی اصطکاکی (FSW)<sup>۳</sup> می‌باشند. پارامترهای ورودی جوشکاری نقش بسزایی در تعیین کیفیت جوش اتصال دارند و کیفیت اتصال می‌تواند تابعی از ویژگی‌هایی نظیر هندسه جوش، خواص مکانیکی و اعوجاج باشد. در حالت کلی، هر نوع جوشکاری به منظور حصول یک هندسه جوش مطلوب، خواص مکانیکی عالی و کمترین اعوجاج انجام می‌شود.

مواد گرمانرم دسته‌ای از مواد پلیمری هستند که به کمک گرمادادن به آن‌ها، به دفعات قابلیت شکل‌دهی و استفاده مجدد دارند. این مواد به دو گروه عمده بی-شکل و نیمه‌بلورین طبقه‌بندی می‌شوند. دسته‌بندی براساس ریزساختار تشکیل‌دهنده پلاستیک‌ها می‌باشد؛ به این معنی که واحدهای تکراری سازنده ماده در هنگام فرایند تشکیل ماده گرمانرم، نوع آرایش هندسی و نظم ساختاری را به خود می‌گیرد.

تولید بیشتر، پیچیدگی و کارایی بالای قطعات پلاستیکی سبب افزایش نیاز به اتصال این مواد شده است. نیاز به روش‌های اتصال با تنوع زیاد، کارا و با کیفیت خوب، در مورد پلیمرها در حال افزایش است. برخلاف مواد دیگر، پلیمرها دارای ساختاری پیچیده و تنوع بسیار زیادی می‌باشند، بنابراین، اتصالات آن‌ها دارای

\*نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۱۶، تاریخ اصلاحیه: ۱۴۰۳/۰۶/۱۰، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۲۳.

استناد به این مقاله:

صادقیان، ناصر و چاجی، علیرضا، ۱۴۰۳. بررسی پایداری استحکام تسلیم اتصال جوشی همزنی اصطکاکی پلاستیک گرمانرم آمورف مشابه با استفاده از عملگرهای میانگین وزنی مرتب شده. مهندسی مکانیک شریف، ۴۰(۲)، صص. ۶۴-۷۵. DOI: 10.24200/J40.2024.64665.1709

<sup>۱</sup> Friction welding  
<sup>۲</sup> Friction stir welding

<sup>۱</sup> Thermoplastics  
<sup>۲</sup> Ultrasonic

جوشکاری موفقیت‌آمیز ورق‌های ABS با استفاده از روش طراحی آزمایش و تحلیل آماری (آنالیز واریانس) صورت گرفته است و مقادیر متغیر پارامترهای موثر فرایند برای نیل به حالت بهینه ارائه شده است.

در مقاله حاضر، استحکام تسلیم اتصال جوشی پلاستیک گرمانرم آمورف بررسی می‌شود که با تحلیل مشاهدات تجربی به روش وزن‌دهی به متغیر پاسخ، میزان ریسک پذیری برای دستیابی پایداری پاسخ ارائه شده است. از آنجا که بهبود عملکرد یک روش تولید، نیازمند درک عمیق از متغیرهای موثر در فرایند و رفتار مکانیکی ماده جوشکاری‌شونده می‌باشد و با توجه به خلأ موجود در مقالات پژوهشی پیشین، با این روش می‌توان رفتار استحکامی خط جوش را سنجید. با استفاده از یک مدل وزن‌دهی مبتنی بر اصل آنتروپی و مقدار مشخص خوش‌بینی، نتایج مورد تحلیل قرار گرفته است. مزیت این روش در سهیم کردن تمام مقادیر حاصل از سنجش‌های تجربی برای بررسی یک پاسخ مشخص در طول فرایند جوشکاری است و بسته به میزان شناخت از ماهیت و پیچیدگی فرایند می‌توان میزان ریسک‌پذیری متناظر را برای پیش‌بینی و تخمین مقادیر آزمایش نشده (جدید) به‌دست آورد. همچنین، بهینه کردن پاسخ فرایند با در نظر گرفتن عوامل متغیر موثر فرایند نیز به‌عنوان یکی از کرانه‌های بالا یا پایین میزان خوش‌بینی با توجه به هدف بهینه‌سازی به‌راحتی در دسترس قرار می‌گیرد.

در این مقاله، پایداری بزرگی استحکام تسلیم مدنظر بوده است به این معنی که از تمام مقادیر تجربی و آزمایشگاهی سه نمونه کششی در نواحی سه‌گانه (ابتدا، میانه و انتها) یک خط جوش موفق استفاده شده و حذف/برکناری هیچ یک از داده‌های عملی اتفاق نیفتاده است. بر اساس دانش ما در تحقیقات انجام شده تاکنون، کاری که در بررسی و گزارش بالاترین استحکام با ملاحظه میانگین آماری استحکام صورت گرفته است اما در پژوهش حاضر ریسک‌پذیری استحکام تسلیم خط جوش (فارغ از محل نمونه‌گیری) با اعمال ضرایب وزنی مرتب شده مورد مطالعه بوده و به‌عنوان هدف مقاله مطرح می‌باشد. با بررسی اثرات متغیرهای ورودی فرایند جوشکاری بر پاسخ رفتاری در صدد درک چرایی بهینه‌سازی و همچنین شناخت ملموس از ماهیت اثرات متغیرها بر خواص مکانیکی اتصال جوشی هستیم.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۱.۲. مواد و تجهیزات

در این پژوهش از یک ماده گرمانرم پر کاربرد با ساختار داخلی آمورف (بی‌شکل) استفاده شده که واحدهای ساختاری آن از سه نوع مختلف آکریلونیتریل، بوتادین و استایرن تشکیل یافته و بنام اختصاری ABS معروف است. این پلاستیک دارای خواص مکانیکی، فیزیکی، ساخت و بهره‌برداری قابل توجهی می‌باشد که خواص آن در جدول ۱ اشاره شده است. از کاربردهای این ماده می‌توان در تولید قطعات و لوازم خانگی مانند بدنه یخچال، تلویزیون، گوشی تلفن ثابت تا مصارف خودرویی (قطعات پلاستیکی داخل کابین، داشبورد، سینی جلو شیشه و ...)، ساخت کابینت بخصوص در مواردی که در معرض رطوبت و تماس با آب باشد و همچنین کاربردهای هواپیمایی و نظامی اشاره کرد. خواص ویژه این ماده، راحتی ساخت و شکل‌دهی با انرژی کم در قالب‌گیری، خواص ضربه‌پذیری مناسب، پایداری ابعادی و حفظ رنگ و نمای قابل

در مقاله پریرا و همکاران<sup>[۱]</sup> جوشکاری گرمانرم‌ها با مصارف پزشکی و بهداشتی پلی‌آمیدی توسط روش لیزر مورد مطالعه و بررسی تجربی قرار گرفته است. در این کار تجربی، تأثیر نوع آماده‌سازی لبه ورق‌های اتصال جوشی مطالعه شده است. لبه‌های پخدار منجر به بهبود استحکام کششی اتصال شده است و در صورت عدم لبه‌سازی افزایش پاس جوشکاری نیز منجر به بهبود می‌شود. آنچه قابل توجه است اینکه، استحکام قسمت جوش‌شده در بهترین حالت تقریباً به نصف مقدار استحکام ماده پایه رسیده است. هوپمان و همکاران<sup>[۲]</sup> از یک مدل گرمایی بر مبنای تئوری حرکت و تنظیم مجدد ساختارهای پلیمرها و شبیه‌سازی عددی استفاده کرده‌اند تا کاهش عیوب و بهینه کردن خواص مکانیکی را به‌دست بیاورند. در مقاله باستوس و همکاران<sup>[۳]</sup> تغییرات استحکام مکانیکی متأثر از پارامترهای جوشکاری لیزری گرمانرم‌ها ارائه شده است. سرعت، دما و تعداد پاس جوش بر بهبود استحکام تأثیر قابل توجهی نشان داده است. اضافه کردن قطعات تقویتی مثلثی نیز دارای اثر مثبت در افزایش استحکام قلمداد شده است. در مقاله لیو و همکاران<sup>[۴]</sup> بهینه‌سازی استحکام اتصال جوشی گرمانرم‌ها با روش جوشکاری مافوق صوت ارائه شده است. با توجه به یافته‌های پژوهشی ایشان برای بهینه‌کردن اتصال جوشی گرمانرم آمورف نیاز به میزان کمتر انرژی جوشکاری، در مقایسه با گرمانرم نیمه‌بلورین، وجود دارد. دستورالعملی نیز برای جوشکاری گرمانرم‌ها به این روش جوشکاری داده شده است که برگرفته از نتایج بررسی آماری اجزای تجربی جوشکاری بوده است. در مقاله مندز و همکاران<sup>[۵]</sup> تأثیر پارامترهای اصلی جوشکاری همزنی اصطکاکی بر کیفیت جوش صفحات ABS<sup>۱</sup> بررسی و ارائه شده است. جوش در یک دستگاه اختصاصی با استفاده از ابزاری با شانه ثابت و بدون سیستم گرمایش خارجی انجام شده و پارامترهای مورد مطالعه سرعت چرخش و پیشروی همچنین نیروی محوری متغیر بوده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که جوش‌های تولید شده همیشه دارای استحکام کششی کمتر از ماده پایه هستند و به حداکثر راندمان بالای ۶۰ درصد می‌رسد. برای سرعت چرخش و نیروی محوری پایین، جوش‌ها دارای اختلاط ضعیف مواد در سمت پسرو و حفره‌های خالی هستند و به همین علت کرنش شکست صفحات جوشی در مقایسه با مواد پایه کمتر است. در پژوهشی دیگر از مندز و همکاران<sup>[۶]</sup> یک دستگاه رباتیک برای جوشکاری قطعات پلاستیکی گرمانرم ABS ارائه شده است که با کنترل دمای شانه ثابت ابزار (علاوه بر اثر اصطکاکی فرایندی) کار می‌کند. سایر پارامترهای موثر جوشکاری نیروی عمودی فشارنده، سرعت‌های دورانی و پیشروی ابزار معرفی شده است. اثر کیفی نیروی عمودی بر خواص ناحیه جوش مطالعه شده است. رفتار مکانیکی استحکام و کرنش منطقه اتصال در ارتباط مستقیم با مورفولوژی حوضچه جوشکاری قطعات بوده است. در مقاله رضا و همکاران<sup>[۷]</sup> بهینه‌سازی جوشکاری مافوق صوت پلاستیک‌های گرمانرم ارائه شده است. بهبود قابل توجهی در هر دو مورد گرمانرم ABS و PP<sup>۲</sup> در مقایسه با ماده پایه حاصل شده است که البته توضیح کاملی از سازوکار و دلایل فنی کار ارائه نشده است. همچنین، مقایسه براساس برش اتصال روی هم و مقایسه با استحکام برشی ماده پایه انجام شده است. شاخص انرژی در این کار تحقیقی ملاحظه شده است که ارزش پردازش بیشتر با درک مکانیزم فرایند ترمومکانیکی جوشکاری را مورد توجه می‌سازد. در مقاله پژوهشی صادقیان و بشارتی<sup>[۸]</sup> جوشکاری همزنی اصطکاکی بر روی نمونه‌های ورقی ترموپلاستیک، ABS و نیمه‌بلورین، پلی‌اتیلن، را با موفقیت انجام شده و

<sup>۲</sup> Polypropylene

<sup>۱</sup> Acrylonitrile Butadiene Styrene

دو نوع پروفیل موثر پین (استوانه‌ای و مخروطی) با استفاده از پیش‌آزمایش‌های جوشکاری اولیه انتخاب شده است.

## ۲.۲. روش انجام کار تجربی

پس از انجام ۳۰ اتصال جوشی (به ترتیب ۱۰ اتصال براساس جدول ۳ و ۲۰ اتصال مطابق با جدول ۴) مطابق با ایده طراحی آزمایش‌ها، از هر خط جوش موفق سه نمونه برای آزمون کشش استاندارد در جهت عرضی راستای جوشکاری از سه قسمت آغازین، میانه و پایانی خط جوش آماده‌سازی شده است.

آماده‌سازی بر مبنای استاندارد ASTM D ۶۳۸ و نمونه کششی نوع چهارم استاندارد گفته شده (مطابق با شکل ۲) صورت گرفته است. هدف از این آزمون شناسایی و تعیین رفتار مکانیکی ناحیه جوش همزنی اصطکاکی قطعات ABS می‌باشد. آزمون کشش استاندارد یک روش پذیرفته شده برای تعیین خواص مکانیکی و تعیین رفتار مکانیکی ماده است. این کد استاندارد مختص قطعات پلاستیکی بوده و نتایج آن به صورت مقادیر داده‌ای یا نموداری قابل ارائه است.

جدول ۲. عوامل موثر و سطوح آنها در جوشکاری همزنی اصطکاکی ABS پلاستیک گرمانرم.

سطوح			پارامتر
پایین	میانی	بالا	
۹۰۰	۱۴۰۰	۱۸۰۰	سرعت دورانی [دور در دقیقه]
۶	۱۶	۲۵	سرعت پیشروی [م.م. بر دقیقه]
۰	۱	۲	انحراف ابزار [درجه]
$\frac{20}{10} = 2$	$\frac{20}{5} = 4$	$\frac{20}{3} = 6.67$	ضریب منظر (قطر شانه به قطر پین)
استوانه	مخروط		پروفیل پین

جدول ۳. طرح مرکب مرکزی جوشکاری FSW ورق ABS با ابزار استوانه‌ای.

جوش	ضریب منظر	سرعت دورانی	سرعت پیشروی	انحراف ابزار
۱	۲	۱۴۰۰	۱۶	۱
۲	۳/۳	۱۴۰۰	۱۶	۱
۳	۲/۵	۱۸۰۰	۱۶	۱
۴	۲/۵	۱۴۰۰	۱۶	۲
۵	۲/۵	۱۴۰۰	۱۶	۱
۶	۲/۵	۱۴۰۰	۱۶	۱
۷	۲/۵	۱۴۰۰	۲۵	۱
۸	۲/۵	۹۰۰	۱۶	۱
۹	۲/۵	۱۴۰۰	۶	۱
۱۰	۲/۵	۱۴۰۰	۱۶	۰

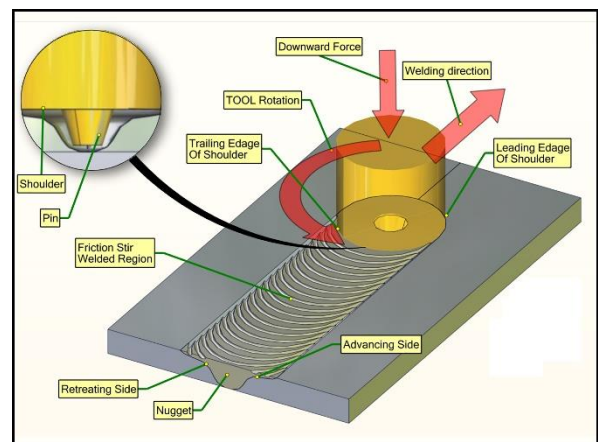
توجه و چشم‌نواز (بدون رنگ پریدگی) و همچنین خواص مکانیکی نسبتاً مناسب و قابل قبول (البته در مقایسه با سایر گرمانرم‌ها) می‌باشد. با توجه به امکان تولید مواد اولیه در ایران، قیمت خوب و قابلیت تولید پایدار نیز به مزیت‌های آن اضافه می‌شود. از ضعف‌های عمده ABS می‌توان به رفتار ترد و افت خواص مکانیکی در دماهای بالا جوشکاری، به‌ویژه در روش‌هایی که گرمای فرایند زیاد باشد، اشاره کرد.

جوشکاری همزنی اصطکاکی یک روش نوپا با انرژی ورودی کم و قابل کنترل است که برای اتصال ABS مناسب است. برای انجام این کار از ورق‌های تجاری با ضخامت ۸ میلی‌متر که به ابعاد ۱۵×۱۰ سانتی‌متر برش داده شده، استفاده می‌گردد. اتصال جوشکاری توسط یک ابزار فولادی بسته شده به یک ماشین فرزکاری همه‌کاره انجام می‌شود. قطعات ورقی در کنار یکدیگر توسط قیدهایی روی میز ماشین قرار می‌گیرند. ابزار جوشکاری متشکل از یک بدنه استوانه (شانه) و پین است که در درز بین دو ورق نفوذ داده می‌شود. نمایی از فرایند جوشکاری در شکل ۱ نشان داده شده است. علاوه بر سرعت‌های دورانی ابزار و خطی جوشکاری (سرعت میز ماشین)، نسبت قطر شانه به قطر پین، به‌عنوان متغیر فرایند مطرح می‌باشد. به‌منظور بهبود کیفیت جوشکاری از انحراف جزئی ابزار نسبت به راستای عمودی نیز به‌عنوان یک متغیر موثر بهره گرفته شده است.

این متغیرها همراه با ۱ سطوح و مقادیر عددی هر یک از آنها، در جدول ۲ ارائه شده‌اند. اجراهای جوشکاری براساس یک طرح مرکب مرکزی<sup>۱</sup> با چهار متغیر ورودی و یک متغیر بلوکی دو سطحی صورت می‌گیرد. سطوح تغییرات متناسب با مقادیر موجود بر روی ماشین فرزکاری، امکان‌پذیری جوشکاری و

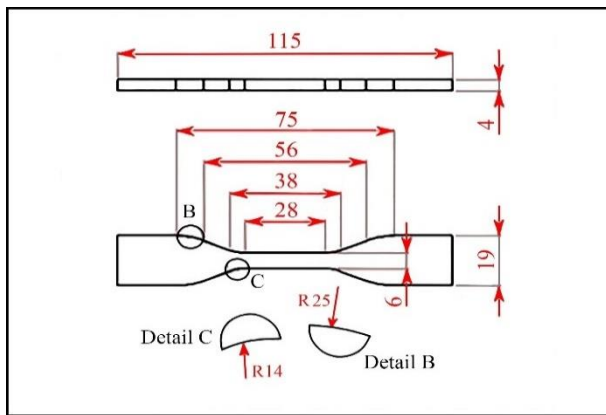
جدول ۱. خواص مهندسی پلاستیک گرمانرم ABS استفاده شده.

نمونه	کرنش تسلیم	تنش تسلیم [مگاپاسکال]	مدول کشسانی [مگاپاسکال]	افزایش طول [درصد]
ABS-۱	۰/۰۳۰۲	۴۲/۳۶	۱۱۹۵	۳/۰۷
ABS-۲	۰/۰۲۸۸	۴۲/۸۷	۱۳۱۴	۲/۹۲
ABS-۳	۰/۰۳۰۹	۳۹/۳۵	۱۳۳۹	۳/۱۴
ABS-۴	۰/۰۳۰۲	۴۲/۶۲	۱۱۰۸	۳/۰۶



شکل ۱. نمایش نمادین جوشکاری همزنی اصطکاکی.

<sup>۱</sup> Central composite design



شکل ۲. نمونه سازی قطعات آزمون کشش استاندارد براساس ASTM D ۶۳۸.

تصمیم‌گیرنده برای تعیین اهمیت هر ورودی بر اساس موقعیت آن در دنباله مرتب شده، این محدودیت را برطرف می‌کند که منجر به یک نتیجه ادغام دقیق‌تر و خاص‌تر می‌شود و به یک چارچوب نظری غنی برای درک رفتار و ویژگی‌ها منتهی می‌گردد. به‌عنوان مثال، عملگرهای OWA مجموعه‌ای از بدیهیات را برآورده می‌کنند که ویژگی‌های مطلوبی مانند یکنواختی، ناتوانی و بی‌طرفی را دربر می‌گیرد. این ویژگی‌ها پایه محکمی برای کاربرد عملی برای عملگرهای OWA در تصمیم‌گیری و ترکیب داده‌ها فراهم می‌سازند.

### ۲.۳. تحلیل رفتار مکانیکی ناحیه اتصال

در مقاله حاضر، از دیدگاه ریاضی در ریسک‌پذیری پدیده‌های تجربی بهره گرفته شده است تا اثرات عوامل موثر در پاسخ مدنظر رفتار مکانیکی تجزیه و تحلیل شود و برون‌داد این دیدگاه پایداری پاسخ می‌باشد به این مفهوم که مقدار عددی پاسخ با توجه به تغییرات عامل ورودی بررسی می‌شود. این پایداری با عنوان آنالیز حساسیت در مهندسی مطرح بوده که می‌تواند برای پیش‌بینی حوزه تغییرات قابل قبول در متغیرهای ورودی فرایند استفاده شود. همچنین، نظر به اینکه از تمام اطلاعات داده‌ای در مطالعه رفتار استفاده می‌شود، لذا لازم است تا داده‌های عملی به نحو موثری در تحلیل پاسخ سهیم شوند. این رویکرد در پژوهش‌های انتشار یافته قبلی در زمینه بهینه‌سازی خواص مکانیکی اتصال جوشی تاکنون مورد توجه نبوده است. از طرف دیگر، هر پاسخ منفرد دارای نتیجه متفاوت است و از برهم‌گذاری این پاسخ‌ها می‌توان حوزه تغییرات پارامتری را برای به‌دست آوردن بازه متناسب خاصیت مطلوب را طرح‌ریزی کرد. با این افاق دید، مقاله و کار پژوهشی حاضر سعی در ارائه روشی ساختارمند دارد که در مقالات گذشته مشاهده نشده است.

### ۳.۳. عملگرهای وزنی مرتب شده (OWA)

این عملگرها کاربردهای فراوان در زمینه‌های مختلف علوم از جمله: روش‌های رگرسیون، تصمیم‌گیری چندمعیاره، شبکه‌های عصبی، سیستم‌های فازی، و سیستم‌های هوشمند دارند [۱۱-۱۸] که به‌صورت زیر بیان می‌گردند:

**تعریف ۱.** عملگر  $n$  بعدی OWA در حقیقت یک نگاشت از فضای  $R^n$  به فضای  $R$  است و دارای یک بردار وزن صعودی یا نزولی به‌صورت  $W = [w_1, \dots, w_n]$  بوده، به‌طوری که هر عضو این بردار  $w_i \in [0, 1]$  و  $\sum_{i=1}^n w_i = 1$  است، همچنین:

### جدول ۴. طرح مرکب مرکزی جوشکاری FSW ورق ABS

ورق با ابزار مخروطی.

جوش	ضریب منظر	سرعت دورانی	سرعت پیشروی	انحراف ابزار
۱۱	۳/۳	۹۰۰	۲۵	۰
۱۲	۲/۵	۱۴۰۰	۱۶	۱
۱۴	۳/۳	۱۸۰۰	۲۵	۰
۱۵	۲/۵	۱۴۰۰	۱۶	۱
۱۶	۲	۱۸۰۰	۲۵	۲
۱۷	۳/۳	۹۰۰	۶	۰
۱۸	۲	۹۰۰	۶	۰
۱۹	۳/۳	۹۰۰	۶	۲
۲۰	۳/۳	۱۸۰۰	۲۵	۰
۲۲	۲	۱۸۰۰	۶	۰
۲۳	۲	۱۸۰۰	۶	۲
۲۴	۲	۹۰۰	۲۵	۰
۲۵	۲/۵	۱۴۰۰	۱۶	۱
۲۶	۳/۳	۱۸۰۰	۶	۰
۲۷	۲/۵	۱۴۰۰	۱۶	۱
۲۸	۲	۹۰۰	۶	۲
۲۹	۳/۳	۱۸۰۰	۶	۲
۳۰	۳/۳	۹۰۰	۲۵	۲

### ۳. تحلیل اتصال جوشی

#### ۱.۳. تحلیل مبتنی بر میزان خوش‌بینی

برای سنجش پایداری استحکام تسلیم اتصال جوشی مدنظر این پژوهش، از بررسی ریسک‌پذیری مبتنی بر داده‌های عملی تجربی استفاده شده است. هر پارامتر رفتاری (یک پاسخ گفته شده) برآیندی از تمام داده‌های حاصل در شرایط مختلف فرایندی، ابزاری و ماشین است که اثر خود را در پاسخ دارد. عملگرهای میانگین وزنی مرتب شده<sup>۱</sup> (OWA) خانواده‌ای از عملگرهای تجمیع هستند که روشی انعطاف‌پذیر برای ترکیب چند ورودی در یک خروجی ارائه می‌کنند. عملگرهای OWA توسط یاگر در دهه ۱۹۸۰ معرفی شدند [۹-۱۰].

این عملگرها به‌نوعی تعمیم میانگین وزنی است و امکان ادغام ترجیحات تصمیم‌گیرنده را فراهم کرده و می‌توانند داده‌های واضح و نامطمئن را مدیریت کنند. در یک میانگین وزنی سنتی، وزن‌های اختصاص داده شده به هر ورودی ثابت است و براساس مقادیر ورودی تغییر نمی‌کند. با این وجود، در روش OWA، وزن‌ها بر اساس یک مقدار مشخص از خوش‌بینی تعیین می‌شوند و امکان یک فرآیند تجمع انعطاف‌پذیرتر و پویاتر را فراهم می‌کنند. یکی دیگر از جنبه‌های مهم عملگرهای OWA توانایی آن‌ها در مدیریت داده‌های ورودی مرتب شده است. در بسیاری از مسایل واقعی، داده‌های ورودی ممکن است دارای ترتیب یا رتبه‌بندی طبیعی باشند و روش‌های تجمیع سنتی ممکن است این ساختار را به‌طور کامل نشان ندهند. عملگر OWA با اجازه دادن به

<sup>۱</sup> Ordered weighted averaging

(جدول های ۵، ۶ و ۷) مورد بررسی قرار گرفته است تا درک درستی از مشاهدات تجربی به دست آید.

در جدول استحکام تسلیم ماده پایه ABS ارائه شده است. مقادیر این جدول و جدول های ۶ و ۷ با استفاده از خوش بینی (روابط ۱ تا ۳) در روش OWA محاسبه و حاصل شده است.

در جدول ۶ مقادیر حاصل از استحکام تسلیم اتصال جوشی بر حسب متغیرهای فرایند جوشکاری با ابزار استوانه ای ارائه شده است. نتایج خلاصه شده حاصل از داده های آزمایش کشش استاندارد با تعریف معیار خوش بینی (از کمترین مقدار تا حالت بیشینه آن) در جدول ۶ به عنوان تغییرات پاسخ استحکامی معرفی شده است. تنش تسلیم به عنوان خروجی (یا پاسخ رفتار مکانیکی) در بررسی پایداری سیستم طراحی این مقاله مورد توجه قرار گرفته است.

جدول ۷ مقادیر به دست آمده برای تغییرات استحکام تسلیم اتصالات جوشی انجام شده با استفاده از ابزار مخروطی را لیست کرده است. اجرای جوشکاری مطابق جدول آزمایش طراحی شده برای ابزار مخروطی در نظر گرفته شده است. اما با توجه به اینکه دو مورد (جوش های شماره ۱۳ و ۲۱) از این اجراهای جوشکاری منجر به اتصال جوشی مناسب نشدند. در هر پارامتر تحت بررسی،

جدول ۵. تغییرات استحکام تسلیم ماده پایه ABS.

خوش بینی	۰/۱	۰/۳	۰/۵	۰/۷	۰/۹
استحکام تسلیم	۴۰/۰۳	۴۰/۹۸	۴۱/۸۰	۴۲/۲۹	۴۲/۷۲

جدول ۶. تغییرات استحکام تسلیم اتصال جوشی قطعات ABS با ابزار استوانه ای.

جوش	میزان خوش بینی				
	۰/۱	۰/۳	۰/۵	۰/۷	۰/۹
۱	۱۰/۸۹	۱۶/۲	۲۰/۳۵	۲۳/۷۱	۲۶/۱۷
۲	۵/۷۸	۱۶/۱۵	۲۴/۹۸	۳۲/۷۲	۳۹/۱۵
۳	۳۲/۸۱	۳۳/۴۹	۳۳/۷۹	۳۴/۰۱	۳۴/۳۳
۴	۳/۷۵	۱۱/۱۹	۱۸/۱۸	۲۴/۸۵	۳۱/۲
۵	۲۵/۷۳	۲۶/۳۱	۲۶/۵۹	۲۶/۸	۲۷/۰۸
۶	۳/۵۷	۹/۹۲	۱۵/۲۹	۱۹/۹۶	۲۳/۷۹
۷	۲۷/۴۵	۲۹/۰۹	۳۰/۹۱	۳۳/۰۳	۳۵/۷۱
۸	۳/۶۵	۹/۹۷	۱۵/۱۶	۱۹/۵۴	۲۲/۹۴
۹	۲۳/۱۸	۲۴/۱۵	۲۴/۹۱	۲۵/۶۴	۲۶/۴۸
۱۰	۲۳/۲۴	۲۴/۶۶	۲۵/۶۹	۲۶/۵۸	۲۷/۴۴

$$F(x_1, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n w_i y_i \quad (1)$$

که  $y_i$  در رابطه فوق  $i$  امین، بزرگترین عضو بردار ورودی به صورت  $X = [x_1, \dots, x_n]$  است. یاگر  $[1]$  اندازه خوش بینی<sup>۱</sup> را که بیانگر اعمال نظر تصمیم گیرنده سیستم در تعیین وزن ها است، به صورت زیر تعریف نمود.

تعریف ۲. اندازه خوش بینی برای یک بردار وزن OWA، به صورت  $W = [w_1, \dots, w_n]$  از طریق رابطه زیر تعریف می شود:

$$\text{Orness}(W) = \alpha = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (n-i) w_i, \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (2)$$

به عنوان مثال، عملگرهای ماکزیمم، مینیمم و میانگین متناظر به صورت  $W_A^*$  و  $W_*$  طبق روابط (۱) و (۲) به شکل زیر هستند:

۱- اگر بردار وزن  $W^* = [1, 0, \dots, 0]$  باشد، داریم

$$\text{Orness}(W^*) = 1 \quad \text{بنابراین} \quad F_{W^*}(X) = \max_{1 \leq i \leq n} \{x_i\}$$

۲- اگر  $W_* = [0, \dots, 0, 1]$  آنگاه خواهیم داشت

$$\text{Orness}(W_*) = 0 \quad \text{لذا} \quad F_{W_*}(X) = \min_{1 \leq i \leq n} \{x_i\}$$

۳- اگر  $W_A = \left[ \frac{1}{n}, \dots, \frac{1}{n} \right]$  آنگاه  $F_{W_A}(X) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$

بنابراین  $\text{Orness}(W_A) = \frac{1}{n}$  که میانگین ورودی هاست.

اوهاگان<sup>[۱۹]</sup> در سال ۱۹۸۸ با کمک اندازه آنتروپی شانون و براساس اصل ماکزیمم آنتروپی، مدل زیر را برای تولید این وزن ها ارائه داد:

$$\text{Max disp}(W) = - \sum_{i=1}^n w_i \ln w_i$$

$$\text{subject to: } \alpha = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (n-i) w_i, \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1, \quad w_i \in [0, 1], \quad i = 1, 2, \dots, n$$

#### ۴. نتایج و بحث

در این مطالعه، اثر پارامترهای مختلف فرایند جوشکاری همزنی اصطکاکی بر روی استحکام تسلیم اتصال جوشی بررسی می شود. از دو ورق همسان پلاستیک گرم نرم ABS برای جوشکاری با ابزار فولادی استفاده شده است. ابزار دارای شانه با سطح زیرین مقعر برای تمرکز مواد مذاب و دو نوع بین استوانه ای و مخروطی است. پارامترهای فرآیند مشتمل بر ضریب منظر ابزار، سرعت دورانی و زاویه انحراف ابزار همچنین سرعت پیشروی جوشکاری می باشد. هر یک از این عوامل در سه سطح در نظر گرفته شده است در (جدول ۲) از یک دستگاه فرزکاری اونیورسال برای جوش قطعات استفاده شده است. بررسی تحلیلی با ثابت گرفتن یکی از عوامل ورودی جدول طراحی آزمایش (جدول های ۳ و ۴) و بررسی پاسخ مکانیکی (استحکام اتصال جوشی) مطابق با

<sup>۱</sup> Orness

بالاترین مقدار به‌منزله رسیدن به بیشترین مقدار پاسخ مطلوب است. لازم به‌ذکر است که  $\alpha = 0$  در هیچ یک از شکل‌ها ارائه نشده به‌عنوان بیشترین بدبینی (کمترین خوش‌بینی) و کمینه شدن پاسخ در اثر تغییرات عوامل متغیر ورودی فرایند تعبیر می‌شود. در بررسی این مقاله برای پوشش دادن احتمالات خطاهای اجرایی و تحلیل عدم قطعیت داده‌های تجربی تغییرات خوش‌بینی نیز به‌عنوان یک پارامتر موثر لحاظ شده است، در این مورد خاص می‌توان روند تغییرات پاسخ را به‌عنوان پایداری استحکام تسلیم جوش مورد توجه قرار داد.

#### ۱.۴ تغییرات استحکام تسلیم اتصال در ضریب منظر ثابت

$$1.1.4. \text{ سطح پایین ضریب منظر } \left( \frac{D}{d} = \frac{20}{10} = 2 \right)$$

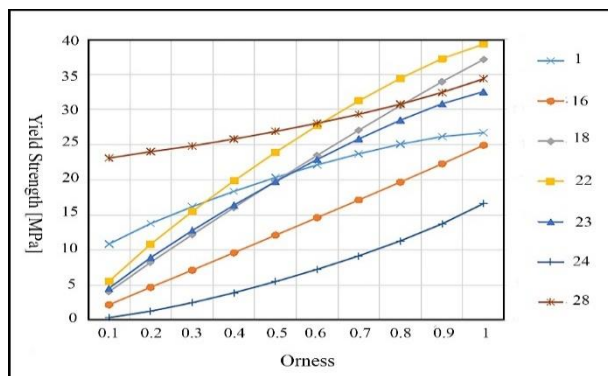
در این حالت، با توجه به کاهش سطوح تماس ابزار با سطوح دیواره‌های قطعات نمودار (الف) شکل ۳ مقادیر پاسخ متناظر با ابزار مخروطی (شماره‌های ۱۱ به

اثر نوع ابزار با توجه به میزان خوش‌بینی به‌دقت مورد مطالعه قرار گرفته است که در این مقاله به صورت نوآوری بررسی مشاهدات تجربی دارای اهمیت است. وزن‌ها به‌ازای اندازه‌های خوش‌بینی  $\alpha = 0.1$  تا  $\alpha = 1$  از طریق مدل ماکزیمم آنتروپی (۳) برای تمام اجزای جوشکاری به‌دست آمده و نتایج تجمیع به صورت گرافیکی در نمودارها (شکل‌های ۳ تا ۶) نشان داده شده‌اند. امکان مقایسه مقادیر استحکام تسلیم اتصالات جوشی با استحکام تسلیم ورق پایه (بدون جوش) با همان معیار خوش‌بینی مدنظر در هر خط جوش وجود دارد. جدول ۵ استحکام تسلیم ماده پایه (قبل از جوش) ABS را با توجه به معیار خوش‌بینی نشان می‌دهد. از بررسی موردی و مقایسه هر اتصال جوشی معین با ماده پایه، میزان تغییر استحکام اتصال جوشی در جدول‌های ۶ و ۷ به‌دست می‌آید.

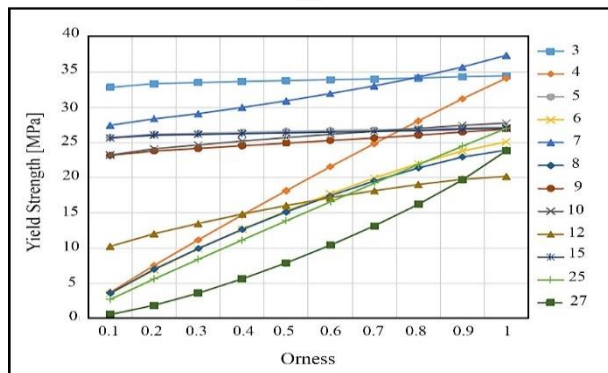
#### جدول ۷. استحکام تسلیم کششی اتصال جوشی قطعات

##### ABS با ابزار مخروطی.

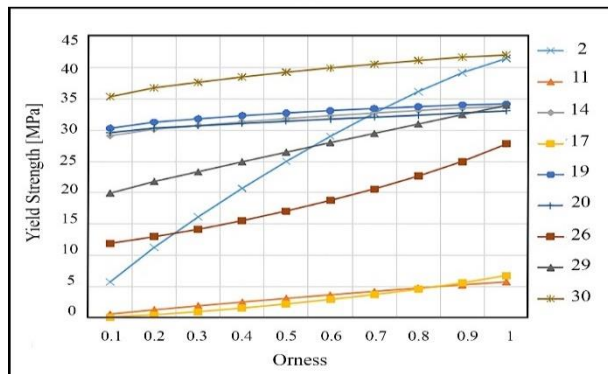
جوش	میزان خوش‌بینی				
	۰/۹	۰/۷	۰/۵	۰/۳	۰/۱
۱۱	۵/۳۳	۴/۲۸	۳/۱۶	۱/۹۷	۰/۶۷
۱۲	۱۹/۷۸	۱۸/۱۷	۱۶/۰۷	۱۳/۵۲	۱۰/۲۸
۱۴	۳۳/۵۱	۳۲/۷۲	۳۱/۸۲	۳۰/۷۲	۲۹/۱
۱۵	۲۶/۸۸	۲۶/۵۷	۲۶/۳۷	۲۶/۱۴	۲۵/۶۴
۱۶	۲۲/۲۹	۱۷/۱۵	۱۲/۱۴	۷/۱۸	۲/۲۶
۱۷	۵/۶۳	۳/۷۷	۲/۲۷	۱/۰۴	۰/۱۸
۱۸	۳۳/۹۶	۲۷/۰۷	۱۹/۸۱	۱۲/۲۱	۴/۱
۱۹	۳۴/۰۲	۳۳/۴۳	۳۲/۷۲	۳۱/۷۹	۳۰/۲۹
۲۰	۳۲/۷۴	۳۲/۰۵	۳۱/۴۱	۳۰/۶۷	۲۹/۵۷
۲۲	۳۷/۲۵	۳۱/۲۳	۲۳/۹۲	۱۵/۵۱	۵/۵۸
۲۳	۳۰/۸۳	۲۵/۸۳	۱۹/۷۷	۱۲/۸۱	۴/۶
۲۴	۱۳/۷۵	۹/۲۱	۵/۵۴	۲/۵۵	۰/۴۳
۲۵	۲۴/۴۷	۱۹/۲۳	۱۳/۹	۸/۴۳	۲/۷۶
۲۶	۲۵	۲۰/۶۲	۱۷/۰۹	۱۴/۱۷	۱۱/۹۴
۲۷	۱۹/۶۹	۱۳/۱۸	۷/۹۴	۳/۶۵	۰/۶۲
۲۸	۳۲/۴۴	۲۹/۳۳	۲۶/۸۸	۲۴/۸۳	۲۳/۱۱
۲۹	۳۲/۴۷	۲۹/۴۷	۲۶/۴۷	۲۳/۳۶	۱۹/۹۴
۳۰	۴۱/۶۳	۴۰/۵۱	۳۹/۲۲	۳۷/۶۲	۳۵/۳۲



(a)

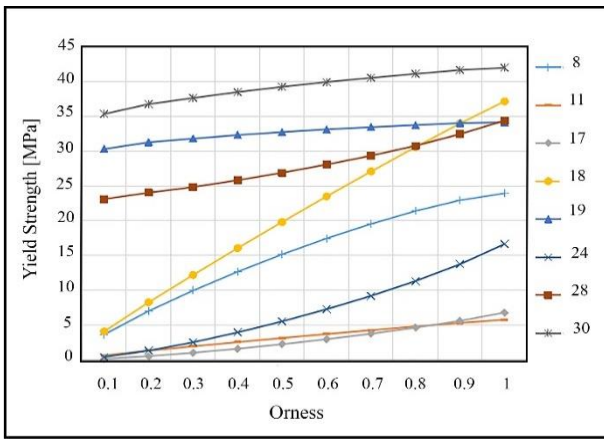


(b)

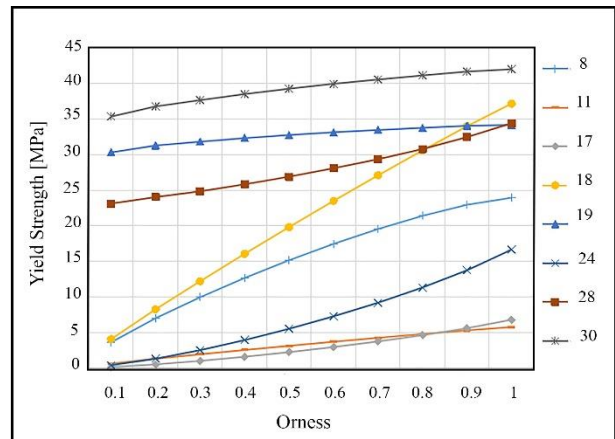


(c)

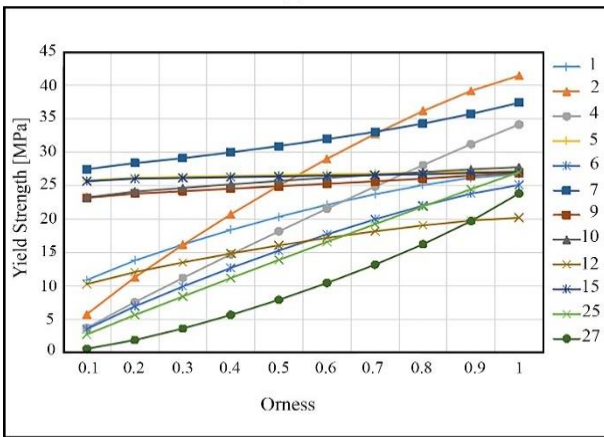
شکل ۳. تغییرات استحکام تسلیم اتصال با ضریب منظر ابزار: (الف) سطح پایین، (ب) سطح میانه و (ج) سطح بالا



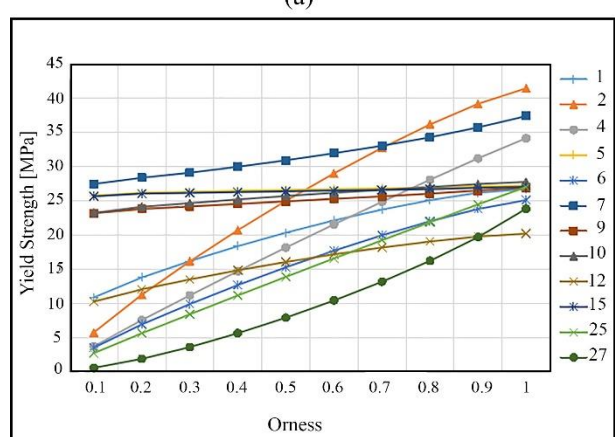
(a)



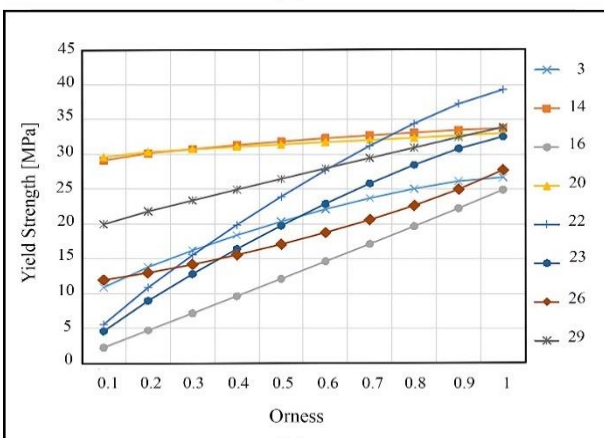
(a)



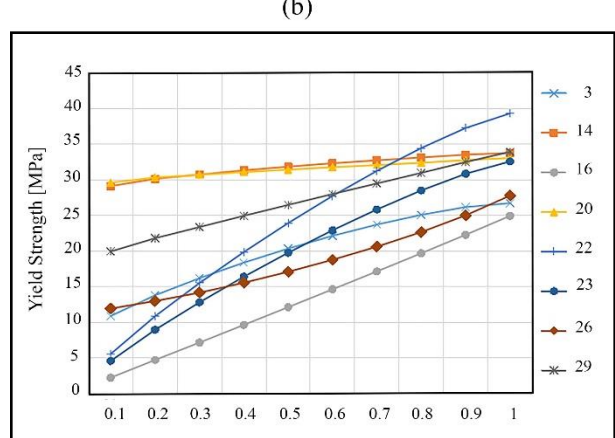
(b)



(b)



(c)



(c)

شکل ۵. تغییرات استحکام تسلیم اتصال با سرعت پیشروی سطح

(الف) پایین، (ب) میانی و (ج) بالا.

با هدف افزایش استحکام تسلیم اتصال، استفاده از ابزار مخروطی در این حالت مناسب‌تر است. در جوشکاری شماره ۲۸، با تغییرات امیدواری، از بدبینی نسبی  $\alpha = 0.1$  تا خوش‌بینی مطلق  $\alpha = 1$  استحکام تسلیم به اندازه ۴۰ درصد (از ۲۳/۴ مگاپاسکال تا ۳۴/۲ مگاپاسکال) نوسان داشته است که در مقابل تغییرات استحکام تسلیم جوشکاری شماره ۱ با ابزار استوانه‌ای به میزان ۱۴۰ درصد (از ۱۰/۹ مگاپاسکال تا ۲۶/۲ مگاپاسکال) می‌باشد و پایداری آن کاملاً آشکار می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش میزان خوش‌بینی مقادیر استحکام نیز افزایش نشان می‌دهند زیرا ترتیب مقادیر با هدف بیشینه-سازي پاسخ مدنظر بوده است.

شکل ۴. تغییرات استحکام تسلیم اتصال با سرعت دورانی ابزار در سطوح

(الف) پایین، (ب) میانی و (ج) بالا.

بعد در مقایسه با ابزار استوانه‌ای نتایج بهتری به دست داده است. ب بررسی روند تغییرات مقادیر استحکام تسلیم بر اثر تغییرات میزان خوش‌بینی، پایداری جواب‌ها نیز در ابزار مخروطی بیشتر است و نوسان کمتری دارد. در صورتی که براساس معیار خوش‌بینی، مقادیر تغییرات بزرگ داشته باشند به‌منزله آن است که پایداری پاسخ (استحکام تسلیم) ضعیف‌تر بوده و برعکس اگر تغییرات عددی استحکام تسلیم در محدوده تغییرات خوش‌بینی (از کم تا زیاد) کمتر باشد نشانگر پایداری پاسخ می‌باشد. به بیان دیگر شیب کم نمودارها نشانگر پایداری نسبی بهتر پاسخ (استحکام تسلیم اتصال جوش) خواهد بود. بنابراین،

استحکام تسلیم برای جوش شماره ۷ به دست آمده، لیکن نوسان پاسخ استحکامی بسیار بیشتر (۳۰ درصد) است.

$$3.1.4. \text{ سطح بالای ضریب منظر } \left(\frac{D}{d} = \frac{20}{6} = 3/33\right)$$

در این حالت و با توجه به روند گفته شده بالا، پایداری استحکام تسلیم اتصال جوشی در ابزارهای مخروطی به مراتب از مقادیر متناظر ابزار استوانه‌ای بهتر حاصل شده است (شکل ۳ ج)، اگرچه در این بررسی، تنها یک مورد جوشکاری با ابزار استوانه‌ای انجام شده است. این مساله در مورد جوشکاری با ابزارهای دارای ضریب منظر پایین نیز ملاحظه می‌شود که به دلیل طراحی اجراهای جوشکاری برای تحلیل آماری مشاهدات تجربی بوده است. بنابراین با استفاده از ابزار مخروطی با ضریب منظر بالا، انتظار بر این است که اتصال‌های جوشی با استحکام تسلیم پایدار و بیشینه حاصل شود. در مشاهدات تجربی این مقاله، جوشکاری شماره ۳۰ با نوسان تغییرات افزایشی ۱۸ درصد از ۳۵/۳ تا ۴۱/۶ مگاپاسکال به دست آمده است.

لازم به ذکر است که در حالت اخیر به دلیل افزایش سطوح تماس و در نتیجه افزایش گرمای اصطکاکی در طول فرایند جوشکاری، میزان حرارت تولیدی بهبود داشته و اثر آن بر روی استحکام اتصال مشاهده شده است. از طرف دیگر این بهبود گرمای تولیدی از ابتدای خط جوش تا پایان آن نیز در مشاهدات تجربی دیده شد.

#### ۲.۴ تغییرات استحکام تسلیم اتصال با سرعت دورانی ثابت

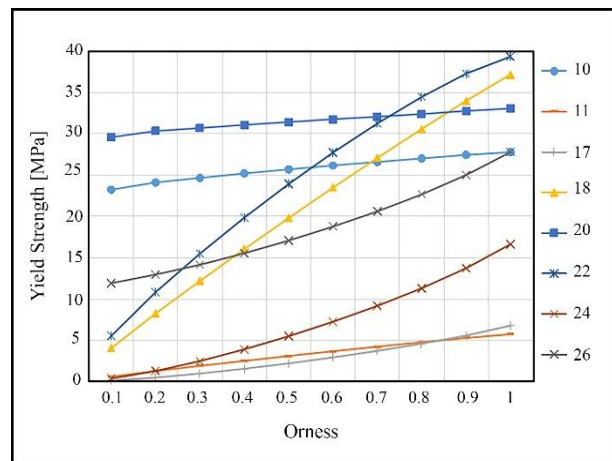
##### ۱.۲.۴ سطح پایین سرعت دورانی ( $n = 90 \cdot \text{rpm}$ )

با بررسی نمودار به دست آمده از مقادیر تجربی اجرا و آزمایش کشش استاندارد، مطابق شکل ۴ (الف)، مشاهده می‌شود که اتصال‌های جوشی با ابزار مخروطی هم از نظر مقدار بیشینه و هم از دیدگاه پایداری مقادیر پاسخ استحکام تسلیم وضعیت بهتری نسبت به ابزار استوانه‌ای دارند. مطلوب‌ترین نتیجه از جوشکاری شماره ۳۰ به دست آمده است. اگر چه پایداری پاسخ در جوشکاری ۱۹ (با مقدار نوسان ۱۴ درصد) اندکی بهتر از جوشکاری ۳۰ (با تغییرات مقدار استحکام تسلیم به مقدار ۱۷ درصد) است.

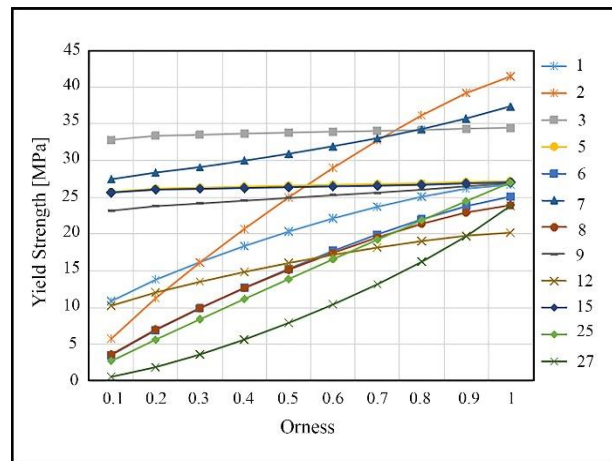
بررسی سایر اتصالات جوشی این حالت، بیانگر آن است که اتصالات بسیار ضعیفی نیز در این وضعیت وجود دارند. سرعت دورانی ابزار، پارامتر موثری در بهبود استحکام تسلیم پلاستیک‌های گرمانرم است [۸] به این معنی که با افزایش مقدار آن می‌توان انتظار داشت که بهبود نسبی در افزایش استحکام به وجود آید، البته به دلیل ماهیت پیچیده سایر متغیرهای موثر در پاسخ استحکامی اتصال، نباید تغییرات سایر عوامل را از نظر دور داشت. همچنین، مقدار سرعت دورانی و تولید انرژی مورد نیاز جوشکاری نیز عامل قابل توجهی است. سرعت دورانی علاوه بر اثر مستقیم در تولید گرمای اصطکاکی از دیدگاه دیگری نیز باید مورد توجه مضاعف قرار بگیرد. با تغییرات مقدار عددی سرعت دورانی همزنی مواد مذاب در هنگام انجام جوشکاری، میزان تغییر شکل پلاستیکی و تولید حرارت ثانویه ناشی از آن نیز وجود دارد که در ادامه بررسی-ها به آن اشاره می‌شود.

##### ۲.۲.۴ سطح میانی سرعت دورانی ( $n = 140 \cdot \text{rpm}$ )

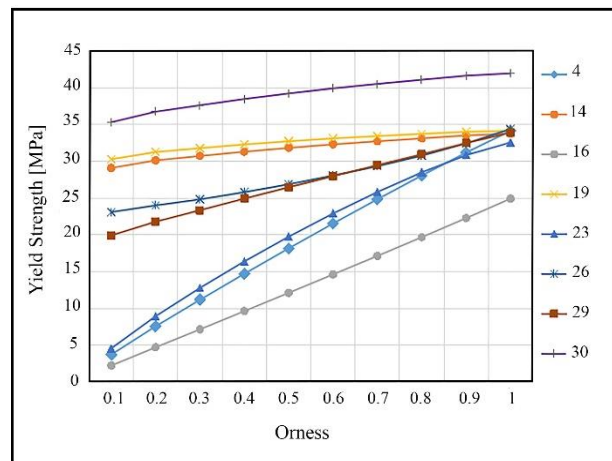
با ملاحظه نمودار شکل ۴ (ب) و در نظر گرفتن اثرات پیش گفته در مورد افزایش سرعت دورانی، مشاهده می‌شود که افزایش استحکام تسلیم اتصال در ابزارهای استوانه‌ای قابل توجه است. بالاترین و بهترین استحکام تسلیم در جوشکاری شماره (۷) ایجاد شده است که با تغییرات ۳۰ درصد به بیشترین



(a)



(b)



(c)

شکل ۶. تغییرات استحکام تسلیم اتصال با انحراف ابزار در سطح (الف) پایین، (ب) میانی و (ج) بالا.

$$2.1.4. \text{ سطح میانی ضریب منظر } \left(\frac{D}{d} = \frac{20}{8} = 2/5\right)$$

در این حالت از مشاهدات تجربی مطابق با شکل ۳ (ب)، نوسان مقادیر پاسخ استحکام اتصال در ابزار استوانه‌ای (جوشکاری شماره‌های زیر ۱۱) به مراتب بهتر از ابزار مخروطی به دست آمده است، البته در دو مورد استثناء وجود دارد. همچنین، بیشترین مقدار استحکام نیز در جوشکاری شماره ۳ اتفاق افتاده است که با تغییرات خوش‌بینی تنها ۴/۵ درصد افزایش استحکام تسلیم (از ۳۲/۸ مگاپاسکال تا ۳۴/۳ مگاپاسکال) حاصل شده است. البته بیشترین مقدار



### ۳.۳.۴. سطح بالای سرعت پیشروی ( $v = 25 \text{ mm/min}$ )

اتصالات جوشی در این سطح سرعت، در شکل ۵ (ج) نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود بالاترین استحکام و پایدارترین مقادیر استحکام تسلیم با ابزارهای مخروطی به دست آمده است. اتصال شماره (۳۰) که بهترین نمونه جوش داده شده در پژوهش‌های مقاله نیز قلمداد می‌شود، با  $41/63$  مگاپاسکال در طول خط جوش تنها نزدیک به ۱۸ درصد نوسان استحکام را تجربه کرده است، در شرایطی که برای جوش شماره (۷) با  $37/4$  درصد تغییرات استحکام تسلیم  $37/71$  مگاپاسکال به دست آمده است. با اینکه پیش‌بینی بر این است که با افزایش سرعت پیشروی جوشکاری امکان تولید گرما کمتر شود اما ترکیب سایر عوامل متغیر موثر در استحکام تسلیم نیز حائز اهمیت است.

### ۴.۴. تغییرات استحکام تسلیم اتصال در انحراف ابزار ثابت

#### ۱.۴.۴. سطح پایین انحراف ابزار ( $\gamma = 0^\circ$ )

بررسی اتصالات در این وضعیت با توجه به شکل ۶ (الف) مقداری پیچیده و دشوار است. اما براساس روند پیش گفته، ابزارهای مخروطی با وجود نتایج ضعیف موجود در نمودار (الف) شکل ۶ بالاترین استحکام تسلیم و پایدارترین مقدار عددی استحکام را در طول خط جوش، نشان داده‌اند. اتصال شماره (۲۰) با استفاده از ابزار مخروطی، با ۱۰ درصد نوسان تغییرات استحکام تسلیم به مقدار بیشینه  $32/7$  مگاپاسکال رسیده است که از اتصال شماره (۱۰) با تغییرات ۱۸ درصدی و بیشینه  $27/44$  مگاپاسکال استحکام تسلیم بهبود بیشتری را داشته است. انحراف ابزار در جوشکاری همزنی اصطکاکی به‌عنوان یک شاخص هندسی مبین فشار اعمالی بر سطوح ورق‌های جوش‌شونده و عامل اثر اکستروژنی (در راستای ضخامت ورق) است، بنابراین، با تغییر در ریزساختار ماده پلاستیکی گرمانرم، جوشکاری همزنی اصطکاکی نوعی فرایند اکستروژن پلاستیکی است. این نتیجه‌گیری مشاهده شده، از رفتار نوعی یک پلاستیک گرمانرم است و یکی دیگر از تفاوت‌های عمده جوشکاری همزنی اصطکاکی این دسته از مواد با روش متناظر در فلزات است که با فرض آهنگری برای جوشکاری همزنی اصطکاکی آلیاژهای فلزی همراه شده است [۱۵].

#### ۲.۴.۴. سطح میانی انحراف ابزار ( $\gamma = 1^\circ$ )

در این حالت که نتایج آن در شکل ۶ (ب) نشان داده شده است، ملاحظه می‌شود اتصالات جوشی با استفاده از ابزار استوانه‌ای رفتار بهبودیافته‌تری در مقایسه با ابزار مخروطی حاصل کرده است. اتصال شماره (۳) با نوسان  $4/6$  درصد با استحکام تسلیم  $34/33$  مگاپاسکال رسیده است، این اتصال با یک ابزار استوانه‌ای تولید شده است. در حالی که بهترین اتصال با ابزار مخروطی در این حالت، اتصال شماره (۱۵) است که بالاترین استحکام تسلیم  $26/88$  مگاپاسکال را با تقریباً همان تغییرات  $32/7$  درصد در طول خط جوش حاصل کرده است. این نتیجه‌گیری مشابه حالت‌های پیشین به دست آمده است.

#### ۳.۴.۴. سطح بالای انحراف ابزار ( $\gamma = 2^\circ$ )

در این حالت به‌غیر از یک مورد استثنائی اتصال شماره (۱۶) در شکل ۶ (ج)، بالاترین میزان استحکام تسلیم و پایداری پاسخ به دست آمده است که مشابه حالات پیش گفته شده، در سایر متغیرهای فرایند جوشکاری می‌باشد.

همچنین، بهترین اتصال جوشی نیز با شماره (۳۰) در این حالت ایجاد شده است. همان‌طور که در شکل ۵ (ج) نیز پیشتر اشاره شده، اتصال جوشی با  $41/36$  مگاپاسکال استحکام تسلیم تنها نزدیک به ۱۸ درصد نوسان در طول

مقدار  $35/7$  مگاپاسکال رسیده است؛ اگرچه در جوش شماره (۲) استحکام بالاتری نیز به دست آمده است اما بنا به ماهیت مشاهدات تجربی و وجود خطاهای اجرایی و سنجش نمی‌توان آن را بدون ملاحظه پایداری پاسخ در نظر گرفت. در مورد ابزارهای مخروطی، ممکن است مشابه حالت میانی ضریب منظر ابزار (شکل ۳ (ب)) بیش‌گرمایی ناشی از سرعت دورانی مانع از شکل-گیری اتصال جوشی مناسب اتفاق افتاده باشد.

از نقطه نظر میزان خوش‌بینی، با توجه به شکل ۴ (ب)، معلوم می‌شود که در پیش‌بینی امیدوارانه (خوش‌بینی بالاتر از  $0/6$ ) قابلیت دسترسی به اتصالات جوشی مستحکم وجود دارد.

### ۳.۲.۴. سطح بالای سرعت دورانی ( $n = 180 \cdot \text{rpm}$ )

در این حالت (شکل ۴ (ج))، ابزار مخروطی پاسخ‌های کمی و کیفی بهتری در مقایسه با ابزار استوانه‌ای به دست آورده است. اتصالات جوشی شماره (۲۰) و (۱۴) به ترتیب با نوسان ۱۰ درصد و ۱۵ درصدی به مقادیر استحکامی  $32/7$  مگاپاسکال و  $33/5$  مگاپاسکال رسیده‌اند. از آنجا که افزایش تولید گرما در این حالت بیشترین میزان اثرگذاری را دارد، لذا، سایر عوامل موثر در فرایند جوشکاری نیز نیازمند مطالعه و بررسی عمیق‌تر می‌باشند که در ادامه آورده شده است.

### ۳.۴. تغییرات استحکام تسلیم اتصال در سرعت پیشروی ثابت

#### ۱.۳.۴. سطح پایین سرعت پیشروی ( $v = 6 \text{ mm/min}$ )

با مطالعه مشاهدات تجربی جوشکاری، با توجه به شکل ۵ (الف) ملاحظه می‌شود در این شرایط، ابزار مخروطی منجر به تولید اتصالات جوشکاری با استحکام تسلیم بالاتر نسبت به ابزار اتصالات جوشی با ابزار استوانه‌ای شده است. همچنین، پایداری استحکام تسلیم نیز کم‌نوسان‌تر از حالت متناظر در ابزار استوانه‌ای است. اتصال شماره (۱۹) با بیشینه استحکام تسلیم  $34/02$  مگاپاسکال در طول خط جوش خود حدود  $12/4$  درصد نوسان دارد در شرایطی که اتصال شماره (۹) با استفاده از ابزار استوانه‌ای حاصل شده و با بیشترین عدد استحکام تسلیم  $26/48$  مگاپاسکال دارای نوسانی بیش از  $14$  درصد به دست آمده است. این امر به دلیل سرعت پایین انتقال نقطه داغ (ابزار اصطکاکی در حال دوران) است که باعث تولید انرژی ورودی جوشکاری بیشتری به توده جرمی ماده در حال جوش می‌شود. همچنین، سرعت انتقال گرما از نقطه داغ نیز کمتر برآورد می‌گردد.

#### ۲.۳.۴. سطح میانی سرعت پیشروی ( $v = 16 \text{ mm/min}$ )

در بررسی اتصالات جوشی این حالت (شکل ۵ (ب))، مشاهده می‌شود ابزارهای استوانه‌ای در مقایسه با ابزار مخروطی عملکرد مناسب‌تری نشان داده است. در اتصال شماره (۳) بالاترین استحکام تسلیم اتصال با مقدار  $34/33$  مگاپاسکال به دست آمده که کمترین تغییرات عددی (حدود  $4/6$  درصد) را در طول خط جوشکاری داشته است در شرایطی که در ابزار مخروطی، برای اتصال جوشی، اجرا شماره (۱۵) بهترین استحکام تسلیم معادل  $26/88$  مگاپاسکال حاصل شده است، اگرچه تغییرات مقداری در این اتصال نیز معادل  $4/8$  درصد بوده است. بنابراین، با افزایش سرعت پیشروی جوشکاری چنین به نظر می‌رسد، گرمای تولیدی و گرمای انتقال یافته از نقطه داغ جوشکاری و حوضچه جوش در ابزارهای استوانه‌ای متعادل‌تر از ابزارهای مخروطی بوده است. این نتیجه به آن معنی است که بیش‌گرمایش تولیدی در مقایسه با انتقال حرارت کمتر بوده است و انرژی مورد نیاز جوشکاری با مقادیر متناسبی حاصل شده است.

( $n = 1400 \text{ rpm}$ ) سرعت پیشروی ابزار جوشکاری در بالاترین مقدار ( $v = 25 \text{ mm/min}$ ) و انحراف ابزار در پایین-ترین سطح مدنظر (بدون انحراف) تنظیم شوند.

۷. با توجه به مشاهدات تجربی این پژوهش، ابزار با پین مخروطی در شرایط نزدیکترین اجرای تجربی، جوشکاری (۲۰) با نوسان حدود ۱۰ درصدی به مقدار استحکام  $32/74$  مگاپاسکال رسیده است. اگرچه سرعت دورانی این ردیف جوشکاری ( $n = 1800 \text{ rpm}$ ) متفاوت از مقدار پیش‌بینی شده می‌باشد. به عبارت دیگر افزایش سرعت دورانی منجر به افت مقدار پاسخ شده است. در جوش شماره (۳۰) با استحکام تسلیم  $41/63$  مگاپاسکال حاصل شده است که دارای ۹۷ درصد استحکام تسلیم ورق پایه ABS می‌باشد، این اتصال با شرایط فرایندی نزدیک به ایده‌آل (بیشترین ضریب منظر، پیشروی، انحراف ابزار و کمترین سرعت دورانی) انجام شده و نوسان ۱۸ درصدی پاسخ استحکامی دارد.

۸. از بررسی مشاهدات تجربی با معیار خوش‌بینی، در مورد اتصال جوشی با ابزار استوانه‌ای چنین به دست می‌آید که جوش شماره (۳) با هدف بیشینه استحکام تسلیم  $34/45$  مگاپاسکال با تنظیم

مقادیر ضریب منظر ( $\frac{D}{d} = \frac{20}{8} = 2/5$ ) سرعت پیشروی

( $v = 16 \text{ mm/min}$ ) و انحراف ابزار ( $\gamma = 1^0$ ) حاصل شده است که همگی در سطح میانی می‌باشند؛ سرعت دورانی اما در بالاترین سطح ( $n = 1800 \text{ rpm}$ ) قرار داشته است. بازه استحکام این اتصال ۸۰ درصد استحکام متناظر ورق پایه ABS حاصل شده است. نوسان بزرگی استحکام در طول خط جوش حدود ۵ درصد به دست آمده است.

۹. با مرور مشاهدات تجربی این پژوهش معلوم می‌شود که جوشکاری همزنی اصطکاکی در یک پلاستیک گرمانرم تفاوت‌هایی با مواد فلزی دارد، به طوری که این فرایند در رده‌بندی روش‌های ذوبی جوشکاری قابل طبقه‌بندی است و گرمای تولیدی منجر به بازآرایی ریزساختار در حوضچه جوشکاری می‌شود. از طرف دیگر با در نظر گرفتن انحراف ابزار به عنوان شاخصی از فشار عمودی ابزار بر سطح قطعات جوشکاری شونده و مذاب حاصل، فرایندی مشابه اکستروژن پلیمری در مقیاس کوچک در این ناحیه اتفاق می‌افتد. برهم‌کنش تولید گرما و اکستروژن می‌تواند کلیدی برای توضیح کیفیت اتصال جوشی از گستره پاشش مواد مذاب تا بهبود یافته‌ترین اتصال جوشی باشد.

## تقدیر و تشکر

نویسندگان از زحمات سرکار خانم زرین مقانی اصل در ویرایش تصاویر برای مناسب‌سازی الگوی مدنظر این مقاله تشکر به عمل می‌آورند.

خط جوش داشته است. این اتصال به مراتب از اتصال شماره (۴) با ابزار استوانه‌ای و بالاترین استحکام  $34/13$  مگاپاسکال بهبود یافته‌تر است، علاوه بر اینکه در طول خط جوش خود بیش از ۷۳۰ درصد نوسان داشته است.

## ۵. نتیجه‌گیری

۱. برای اتصالات جوشی تولیدشده با ابزار دارای مقادیر عددی ضریب منظر پایین و بالا، استفاده از ابزار مخروطی منجر به عملکرد بیشینه پایداری استحکام تسلیم اتصال می‌گردد. در بررسی استحکام تسلیم اتصال، مقدار انرژی ورودی جوشکاری اثر مستقیم دارد، بنابراین، بالاترین پاسخ‌های استحکامی در ابزارهای با ضریب منظر بالا به دلیل افزایش سطوح اصطکاکی و تولید بخشی از گرمای مدنظر به دست می‌آید.

۲. در سرعت‌های دورانی پایین و بالا، با استفاده از ابزار مخروطی کمیت و کیفیت استحکام تسلیم اتصال بهتر از اتصال جوشی با ابزار استوانه‌ای به دست آمده است. میزان سرعت دورانی، ارتباط مستقیمی با مقدار گرمای اصطکاکی و انرژی حاصل از همزنی مواد مذاب دارد که با عنوان انرژی افزوده تغییر شکل پلاستیکی شناخته می‌شود.

۳. در اتصالات جوشی با پارامترهای ضریب منظر، سرعت دورانی، پیشروی و همچنین، انحراف ابزار همگی در سطوح میانی، استفاده از ابزار استوانه‌ای بیشترین مقادیر پایداری استحکام تسلیم اتصال را به دست می‌دهد.

۴. اتصال جوشی در مقادیر سرعت پیشروی جوشکاری پایین با استفاده از ابزار مخروطی منجر به جواب‌های بیشینه پایداری استحکام تسلیم اتصال در مقایسه با ابزار استوانه‌ای می‌گردد. این امر به دلیل سرعت پایین انتقال نقطه داغ (ابزار اصطکاکی در حال دوران) است که باعث تولید انرژی ورودی جوشکاری بیشتری به توده جرمی ماده در حال جوش می‌شود. همچنین، سرعت انتقال گرما از نقطه داغ نیز کمتر برآورد می‌گردد.

۵. اتصالات جوشی با استفاده از ابزارهای مخروطی در سرعت‌های پیشروی و انحراف ابزار بالا، پاسخ استحکام تسلیم و پایداری به مراتب بهتری نسبت به ابزار استوانه‌ای ایجاد کرده است. در این مورد باید به ترکیب سایر عوامل متغیر فرایندی و هندسی نیز توجه ویژه داشت.

۶. با ملاحظه کلی مقادیر و نمودارهای حاصل از تمام جوشکاری‌ها و بررسی تحلیلی نتایج حاصل از آزمایش‌ها با استفاده از روش میانگین وزنی مرتب شده، می‌توان تغییرات پاسخ را در مقابل تغییرات پارامترهای متغیر ورودی جوشکاری به دست آورد (آنالیز حساسیت پاسخ). در پژوهش حاضر، با توجه به پایداری استحکام تسلیم اتصال جوش برحسب پارامترهای ضریب منظر، سرعت دورانی ابزار، سرعت پیشروی جوشکاری و میزان انحراف ابزار چنین نتیجه‌گیری می‌شود: با هدف خوش‌بینی پاسخ (بیشینه کردن استحکام تسلیم اتصال) ضریب منظر بایستی در بالاترین مقدار

( $\frac{D}{d} = \frac{20}{6} = 3/3$ ) سرعت دورانی ابزار در سطح میانه

## References - منابع

- Pereira, A., Fernandes, F., de Morais, A. and Quintão, J., 2019. Mechanical strength of thermoplastic polyamide welded by nd:yag laser. *Polymers*, 11 (9). <https://doi.org/10.3390/polym11091381>.
- Hopmann, C., Bölle, S. and Reithmayr, L., 2020. Prediction of the bond strength of thermoplastics welded by laser transmission welding. *Advances in Polymer Processing*, pp. 247-257. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-60809-8\\_20](https://doi.org/10.1007/978-3-662-60809-8_20).
- Bastos, L., Alves, M., Sousa, B., Vilela, A., Rietter, L., Duarte, F., Carneiro, F. and Żmijewska-Rocha, F., 2023. Transmission laser welding of thermoplastics: influence of welding parameters and rib dimensions on the strength of welded joints. *Journal of Advanced Joining Processes*, 8 (100173). <https://doi.org/10.1016/j.jajp.2023.100173>.
- Liu, S. L., Lin, W. F., Chang, B. C., Wu, G. M. and Hung, S. W., 1999. Optimizing the joint strength of ultrasonically welded thermoplastics. *Advances in Polymer Technology*, 18 (2), pp. 125-135. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1098-2329\(199922\)18:2<125::AID-ADV3>3.0.CO;2-A](https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-2329(199922)18:2<125::AID-ADV3>3.0.CO;2-A).
- Mendes, N., Loureiro, A., Martins, C., Neto, P. and Pires, J. N., 2014. Effect of friction stir welding parameters on morphology and strength of acrylonitrile butadiene styrene plate welds. *Materials and Design*, 58, pp. 457-464. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.02.036>.
- Mendes, N., Loureiro, A., Martins, C., Neto, P. and Pires, J. N., 2014. Morphology and strength of acrylonitrile butadiene styrene welds performed by robotic friction stir welding. *Materials and Design*, 64, pp. 81-90. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.07.047>.
- Raza, S. F., Khan, S. A. and Mughal, M. P., 2019. Optimizing the weld factors affecting ultrasonic welding of thermoplastics. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 103, pp. 2053-2076. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03681-7>.
- Sadeghian, N. and Givi, M. K. B., 2015. Experimental optimization of the mechanical properties of friction stir welded acrylonitrile butadiene styrene sheets. *Materials and Design*, 67, pp. 145-153. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.11.03>.
- Yager, R. R., 1988. On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decisionmaking. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 18 (1), pp. 183-190. [10.1109/21.87068](https://doi.org/10.1109/21.87068).
- Yager, R. R., 2009. Weighted Maximum Entropy owa aggregation with applications to decision making under risk. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, 39 (3), pp. 555-564. [10.1109/TSMCA.2009.2014535](https://doi.org/10.1109/TSMCA.2009.2014535).
- Hussain, W., Raza, M. R., Jan, M. A., Merigó, J. M. and Gao, H., 2022. Cloud risk management with owa-lstm and fuzzy linguistic decision making. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 30(11), pp. 4657 – 4666. <https://doi.org/10.1109/TFUZZ.2022.3157951>.
- Flores-Sosa, M., Avilés-Ochoa, E., Merigó, J. M. and Kacprz, J., 2022. The owa operator in multiple linear regression. *Applied Soft Computing*, 124, p. 108985. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2022.108985>.
- D'Urso, P., Chachi, J., Kazemifard, A. and Giovanni, L. D., 2024. Owa-based multi-criteria decision making based on fuzzy methods. *Annals of Operations Research*. <https://doi.org/10.1007/s10479-024-05926-5>.
- Alcantud, J. C. R., Santos-García, G. and Akram, M., 2022. Owa aggregation operators and multi-agent decisions with n-soft sets. *Expert Systems With Applications*, 203, p. 117430. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.117430>.
- Mishra, R. S., De, P. S. and Kumar, N., 2014. Friction stir processing. In: *Friction Stir Welding and Processing*. Switzerland: Springer Cham, p. 259–296. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-07043-8\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-319-07043-8_9).
- D'Urso, P. and Leski, J. M., 2023. Owa-based robust fuzzy clustering of time series with typicality degrees. *Information Sciences*, 651. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2023.119706>.
- Chachi, J. and Chaji, A., 2021. Employing weighted operators in ordered least deviations regression model. *Journal of Statistical Sciences*, 15(1), pp. 39-60. <http://dx.doi.org/10.52547/jss.15.1.3>. [In Persian].
- Chachi, J. and Chaji, A., 2021. An owa-based approach to quantile fuzzy regression. *Computers and Industrial Engineering*, 159. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107498>.

19. O'Hagan, M., 1988. Aggregating template or rule antecedents in real-time expert systems with fuzzy set logic. *Twenty-Second Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, 2, pp. 681-689. <https://doi.org/10.1109/ACSSC.1988.754637>.