

# شبیه‌سازی و بررسی عددی اثر پارامترهای فرآیند جوشکاری فراصوتی ورق‌های پی‌وی‌سی

عباس پاک<sup>۱</sup> و \*، امیر شیخ‌الاسلامی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

<sup>۲</sup>کارشناسی مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

\*مسئول مکاتبات: a.pak@basu.ac.ir

## چکیده

## واژگان کلیدی

جوشکاری فراصوتی  
شبیه‌سازی عددی  
طراحی آزمایش  
روش سطح پاسخ  
پی‌وی‌سی

## تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۷/۰۳/۰۵  
تاریخ پذیرش ۱۳۹۸/۰۴/۰۵

جوشکاری فراصوتی یک روش نوین و اقتصادی برای اتصال قطعات هم جنس و غیرهم جنس بویژه قطعات از جنس مواد گرمانرم مانند پلاستیک و منسوجات در تولید انبوه و با کیفیت است. مهم‌ترین ویژگی‌های جوشکاری فراصوتی که آن را از روش‌های دیگر جوشکاری و اتصال مواد گرمانرم متمایز می‌کند حداقل تاثیر گذاری بر ساختار مواد، تمیزی و استحکام بالای اتصال به همراه سرعت زیاد انجام فرآیند است که در نتیجه در مقایسه با سایر فرآیندها بهره‌وری بالایی ایجاد می‌نماید. برای رسیدن به یک جوش باکیفیت مناسب و استحکام بالا در روش جوشکاری فراصوتی نیاز است که پارامترهای مؤثر فرآیند مشخص و تأثیر هر یک مورد مطالعه قرار گیرد.

در این مقاله مدل‌سازی فرآیند جوشکاری فراصوتی توسط نرم‌افزار اجزا محدود آباکوس برای ورق از جنس پی‌وی‌سی در دامنه‌های نوسان، فرکانس نوسان و فشار استاتیکی مختلف انجام و اثر آن‌ها بر روی مقدار تنش نرمال در سطح فصل مشترک قطعات جوش داده شده مورد بررسی قرار گرفته‌است. جهت بررسی اثر هر یک از پارامترها و اثر متقابل آن‌ها از روش طراحی آزمایش سطح پاسخ استفاده شده است. نتایج بدست آمده نشان داد که هر سه پارامتر دامنه، فرکانس و فشار بر تنش نرمال مؤثر بوده و دامنه نوسان بیشترین تأثیر و اثر فشار و فرکانس تقریباً یکسان است، به طوری که افزایش فشار باعث کاهش و افزایش فرکانس باعث افزایش تنش نرمال می‌گردد. مقدار و شرایط بهینه برای بیشترین تنش نرمال با دامنه نوسان ۶۰ میکرومتر، فرکانس ۲۰ کیلوهرتز و فشار ۳/۵ بار بدست آمده است.

## ۱ مقدمه

انرژی فراصوتی آزاد شده و در نتیجه مقدار تنش نرمال ایجاد شده در ناحیه جوش است و این انرژی تولید شده (تنش) در منطقه جوش با فرکانس، دامنه نوسانات، فشار در محل سطح تماس و سرعت تشکیل درز جوش متناسب است [۵-۹].

لذا برای انجام یک جوش باکیفیت مناسب و استحکام بالا بررسی پارامترهای مؤثر در فرآیند جوشکاری فراصوتی ضروری است. به همین منظور مطالعات متعددی در این زمینه صورت گرفته‌است. پارمار<sup>۱</sup> و همکارانش با استفاده از روش طراحی آزمایش<sup>۲</sup> سطح پاسخ<sup>۳</sup> تأثیر پارامترهای جوشکاری شامل فشار جوشکاری، زمان جوشکاری و دامنه نوسان را در جوشکاری فراصوتی موادی از جنس ABS<sup>۴</sup> بصورت عملی بررسی نموده‌اند نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که به ترتیب دامنه نوسان و فشار جوشکاری بیشترین تأثیر بر استحکام جوش را داشته‌اند [۱۰]. چینادورای<sup>۵</sup> و همکارانش به بررسی آزمایشگاهی تأثیر فشار، زمان و دامنه نوسان بر استحکام جوش در فرآیند جوشکاری فراصوتی پلیکربنات و ABS بر اساس روش طراحی آزمایش به روش سطح پاسخ پرداخته و نتایج بدست آمده نشان داد که اثر فشار و زمان جوشکاری بر روی استحکام جوش قابل توجه است [۱۱].

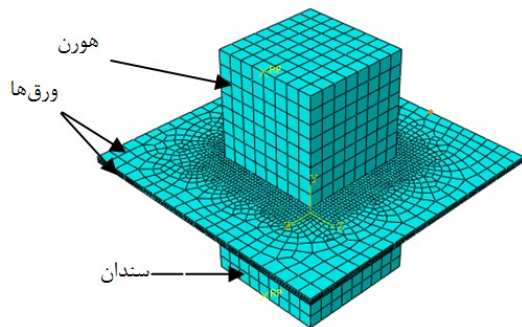
جوشکاری فراصوتی یک روش نوین و اقتصادی برای اتصال قطعات هم جنس و غیرهم جنس بویژه قطعات از جنس مواد گرمانرم مانند پلاستیک و منسوجات در تولید انبوه و با کیفیت است. مهم‌ترین ویژگی‌های جوشکاری فراصوتی که آن را از روش‌های دیگر جوشکاری و اتصال مواد گرمانرم متمایز می‌کند حداقل تاثیر گذاری بر ساختار مواد، تمیزی و استحکام بالای اتصال به همراه سرعت زیاد انجام فرآیند است که در نتیجه در مقایسه با سایر فرآیندها بهره‌وری بالایی ایجاد می‌نماید [۱-۴].

در جوشکاری فراصوتی مواد گرمانرم نوسانات عمود بر فصل مشترک اتصال اعمال می‌گردند، نوسانات اعمال شده سبب ایجاد تنش‌های متناوب در سطوح فصل مشترک قطعات جوش داده‌شده می‌شوند. این تنش‌ها به دلیل تمرکز تنش به محدوده تنش تغییر شکل پلاستیک می‌رسد. تغییر شکل مواد در اطراف نوک ناهمواری‌های ریز، جذب انرژی را افزایش داده سبب افزایش دما در فصل مشترک و به دنبال آن افزایش تحرک زنجیره‌های پلیمری شده که این امر سبب اختلاط زنجیره‌های پلیمری در فصل مشترک شده و منجر به ایجاد یک درز جوش می‌شود. در این فرآیند کیفیت درز جوش وابسته به مقدار

## ۳ شبیه‌سازی عددی فرآیند جوشکاری

شبیه‌سازی فرآیند جوشکاری فراصوتی توسط نرم‌افزار اجزا محدود و برای جوشکاری دو ورق از جنس PVC که بر روی یک سندان قرار گرفته و توسط یک هورن که امواج فراصوتی را به محل اتصال انتقال می‌دهد و همزمان فشار استاتیک را نیز اعمال می‌کند، انجام شده است. در محیط نرم‌افزار دو ورق از جنس PVC با طول، عرض و ضخامت به ترتیب ۲۰، ۲ و ۰/۲ میلی‌متر، سندان و هورن به صورت مکعب به ترتیب با اضلاع ۹ و ۸ میلی‌متر مدل شده‌اند.

قطعات بعد از مونتاژ کلی، شبکه‌بندی شده‌اند تا خطای ناشی از شکل‌گیری گره‌ها در محل‌های تماس بین سطوح قطعات کنترل شود. به دلیل اینکه اتصال در محل اعمال نوسانات صورت گرفته است از شبکه‌بندی کوچکتر در محل اتصال و از شبکه بندی بزرگتری در قسمت‌هایی که در تماس با ابزار نمی‌باشند استفاده شده تا زمان حل کاهش یابد. نوع شبکه استفاده شده المان از نوع C3D8RT است که از نظر شکل ظاهری شش‌وجهی<sup>۷</sup> با روش اجرای ساخت‌یافته<sup>۸</sup> می‌باشد. همچنین برای کاهش محاسبات از روش انتگرال‌گیری کاهیده<sup>۹</sup> استفاده شده است. شکل ۱ مدل شبکه‌بندی شده را بر اساس بررسی همگرایی مش با تعداد المان‌ها و گره‌هایی به ترتیب برابر ۱۲۹۸۹ و ۱۹۵۴۶ نشان داده شده است.



شکل ۱: مدل شبکه‌بندی شده توسط نرم‌افزار

مدلسازی فرآیند جوشکاری فراصوتی در دو مرحله شامل مرحله اول اعمال فشار عمودی به صورت خطی از صفر تا مقدار بیشینه در فصل مشترک ورق‌ها و مرحله دوم با حفظ فشار بیشینه  $(P(t))$ ، نوسانات به هورن وارد می‌شود که این نوسانات به صورت تابع سینوسی و عمود بر فصل مشترک طبق رابطه (۱) اعمال می‌شود.

$$U_1(t) = u \cdot \sin(2\pi f \cdot t) \quad (1)$$

$U$  مقدار دامنه نوسان و  $f$  مقدار فرکانس می‌باشد. مدت زمان حل مرحله اول و دوم به ترتیب ۲/۵ و ۲ میلی‌ثانیه و روش حل برای هر دو مرحله از نوع Dynamic و Temp-Disp, Explicit در نظر گرفته شده است [۹]. در مدل‌سازی هورن و سندان به صورت صلب و تماس آن‌ها با ورق‌ها به صورت یکپارچه و ضریب اصطکاک بین دو ورق PVC با توجه به مرجع [۹]، ۰/۴ و در نظر گرفته شده است. در شکل ۲ شرایط تماس بین اجزا نشان داده شده است. هورن و سندان از جنس فولاد در نظر گرفته شده است.

کومار<sup>۱</sup> و همکارانش نیز با استفاده از روش فاکتوریل کامل به بررسی تأثیر پارامترهای جوشکاری شامل فشار نگهداری، زمان نوسان، دامنه نوسان و تأثیر متقابل آن‌ها بر استحکام جوش فلز مس پرداخته‌اند [۱۲]. ژاو<sup>۲</sup> و همکارانش به بررسی تأثیر پارامترهای و بدست آوردن شرایط بهینه با طراحی آزمایش به روش فاکتوریل کامل در فرآیند جوشکاری منیزیم و تیتانیوم پرداخته‌اند، همچنین از شبکه‌ی عصبی مصنوعی بر اساس الگوریتم ژنتیکی<sup>۳</sup> برای پیش‌بینی و تحلیل خواص مکانیکی جوش استفاده کرده‌اند. نتایج بدست آمده از این پژوهش نشان داده‌است که فشار نگهداری بیشترین تأثیر را بر استحکام جوش داشته‌است. همچنین استحکام با زمان بیشتر نوسان و دامنه نوسان بزرگتر کاهش یافته‌است [۱۳].

هدف از این مقاله مدل‌سازی عددی فرآیند جوشکاری فراصوتی توسط نرم‌افزار اجزا محدود<sup>۴</sup> آباکوس<sup>۵</sup> برای جوشکاری ورق PVC<sup>۶</sup> با ضخامت ۰/۲ میلی‌متر است و استفاده از روش سطح پاسخ برای بررسی اثر پارامترهای مؤثر این فرآیند شامل دامنه نوسان، فرکانس و فشار اعمالی بر روی تنش نرمال در حین فرآیند جوشکاری فراصوتی و تعیین شرایط بهینه جهت جوشکاری فراصوتی می‌باشد.

## ۲ طراحی آزمایش و شرایط انجام آن

جهت بررسی ارتباط بین متغیرهای ورودی و خروجی و شناخت اثرات ترکیبی آن‌ها از روش طراحی آزمایش سطح پاسخ با طرح باکس بنکن استفاده و طراحی آزمایش و تحلیل آماری توسط نرم‌افزار مینی‌تب صورت گرفته است. روش سطح پاسخ از جمله روش‌های طراحی آزمایش و بهینه‌سازی می‌باشد که با استفاده از مجموعه‌ای از روش‌های ریاضی و آمار، مسائل را مدل و از اجرای پرهزینه‌ی شبیه‌سازی و آزمون‌ها جلوگیری و امکان بررسی و تعیین شرایط بهینه فرآیند را که اغلب غیرخطی می‌باشد فراهم می‌نماید.

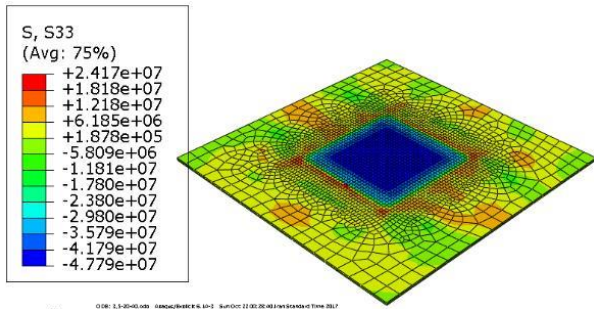
در این طراحی آزمایش سه متغیر اصلی فرآیند جوشکاری فراصوتی شامل فشار، فرکانس و دامنه نوسان به عنوان عوامل آزمایش یا ورودی در نظر گرفته و هر یک در سه سطح پایین (۱-)، میانه (۰) و بالا (۱+) کدگذاری و مورد بررسی قرار گرفته‌اند. محدوده مناسب برای انتخاب مقدار متغیرهای ورودی با استفاده از نتایج مطالعات و آزمایش‌های قبلی تعیین شده است [۱۴]. متغیر خروجی مقدار تنش نرمال ایجاد شده در ناحیه جوش است. مقادیر متغیرهای ورودی و محدوده انتخابی آن‌ها در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱: مقادیر متغیرها و محدوده انتخابی آن‌ها

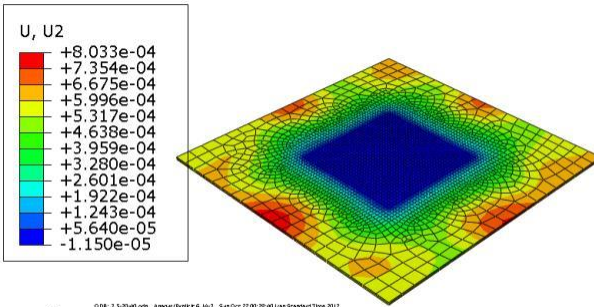
متغیر	نماد	واحد	محدوده
فشار	P	Bar	۱ ۰ ۴/۵
فرکانس	F	KHz	۲۰ ۳۰ ۴۰
دامنه نوسان	A	m/μ	۴۰ ۵۰ ۶۰

بر اساس روش طراحی آزمایش با توجه به متغیرهای مستقل شامل فشار، دامنه نوسان و فرکانس تعداد و شرایط هر شبیه‌سازی معلوم و نتایج خروجی هر شبیه‌سازی تعیین گردید.

<sup>1</sup>Kumar <sup>2</sup>Zhao <sup>3</sup>Genetic Algorithm <sup>4</sup>Finite Element <sup>5</sup>ABAQUS <sup>6</sup>Polyvinyl Chloride <sup>7</sup>Hex <sup>8</sup>Structured <sup>9</sup>Reduced Integration



(الف)



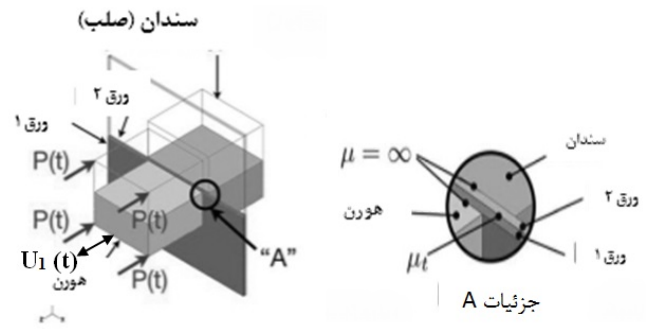
(ب)

**شکل ۳:** الف) توزیع تنش و ب) توزیع جابجایی حاصل از مدل‌سازی فرآیند در شرایط فشار ۳/۵ بار، فرکانس ۲۰ کیلوهرتز و دامنه ۴۰ میکرومتر

#### ۴ بررسی و تحلیل نتایج شبیه‌سازی

در شکل ۴ اثر پارامترهای فشار، فرکانس و دامنه نوسان بر روی تنش نرمال نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش دامنه نوسان تنش نرمال در ورق‌ها بدلیلی افزایش تغییر شکل ناشی از جابجایی بیشتر ابزار، افزایش یافته است. افزایش فرکانس نیز باعث افزایش تنش نرمال شده است چرا که تعداد نوسانات (ضربات) در واحد زمان افزایش یافته است. لیکن مشاهده می‌گردد اثر تغییرات دامنه نوسان بیشتر از اثر تغییرات فرکانس بر روی تنش نرمال بوده است. تنش نرمال با افزایش فشار اعمالی کاهش یافته است دلیل این تغییرات را می‌توان کاهش حرکت نسبی بین صفحات در فشارهای بالا و در نتیجه جلوگیری از نوسان (جابجایی) بیان نمود. در جوشکاری فراصوتی معمولاً فشار جوشکاری ثابت است اما با اعمال فشار مناسب در طول سیکل جوشکاری، می‌توان استحکام جوش را بالا برد و زمان سیکل جوشکاری را کاهش داد.

شکل‌های ۵ و ۶ اثر همزمان فشار و فرکانس بر تنش نرمال در دامنه نوسان ثابت را نشان می‌دهند. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش فرکانس در تمام فشارهای اعمالی تنش نرمال افزایش می‌یابد. به عبارتی در یک دامنه نوسان ثابت در فرکانس‌های بالاتر و فشار اعمالی پایین تر به تنش‌های بالاتر رسید. در شکل‌های ۷ و ۸ اثر همزمان فشار و دامنه نوسان بر تنش نرمال در فرکانس ثابت را نشان داده شده است. همانطور که نشان داده می‌شود با افزایش دامنه نوسان در تمام فرکانس‌ها تنش نرمال افزایش می‌یابد. اثر فشار در دامنه‌های نوسان پایین کمتر و با افزایش دامنه نوسان اثر فشار در کاهش تنش نرمال افزایش می‌یابد. دلیل این موضوع را می‌توان اثر فشار در جلوگیری



**شکل ۲:** شرایط مرزی و نوع بارگذاری

ورق‌ها از جنس مواد گرمانرم از نوع PVC انتخاب شده است. خواص PVC در جدول ۲ آورده شده است.

**جدول ۲:** خواص مکانیکی و حرارتی PVC [۱۰]

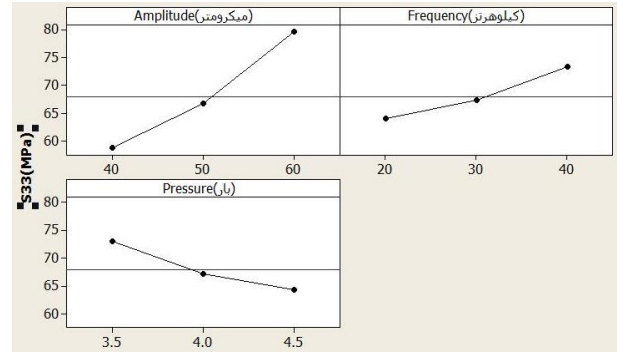
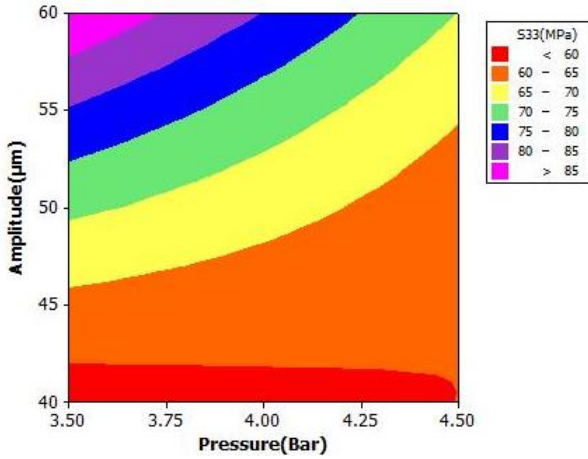
$۲/۴۱ \times ۱۰۹$	N/m <sup>2</sup>	مدول الاستیک
۰/۳۸۲۵	-	ضریب پواسون
۱۳۰۰	kg/m <sup>3</sup>	چگالی
$۴/۰۷ \times ۱۰۷$	N/m <sup>2</sup>	تنش نهایی
$۳/۸۶۱۱ \times ۱۰۷$	N/m <sup>2</sup>	تنش تسلیم
۰/۱۴۷	W/(m.K)	هدایت حرارتی
۱۳۵۵	J/(kg.K)	ظرفیت گرمایی ویژه

بعد از انجام شبیه‌سازی در شرایط مختلف مطابق با جدول ۳ مقدار توزیع تنش نرمال ایجاد شده در محل جوشکاری استخراج و سپس توسط نرم‌افزار مینی تب اثرات متغیرهای بررسی شده است. در شکل ۳ نحوه توزیع جابجایی و تنش نرمال برای یکی از حالت‌های مدل‌سازی نشان داده شده است.

**جدول ۳:** شرایط انجام شبیه‌سازی‌ها و نتایج حاصل

شماره آزمایش	فشار (Bar)	فرکانس (KHz)	دامنه نوسان ( $\mu\text{m}$ )	تنش نرمال (MPa)
۱	۳/۵	۲۰	۴۰	۴۷/۷۹
۲	۴/۵	۲۰	۴۰	۴۷/۷۱
۳	۳/۵	۴۰	۴۰	۶۹/۷۶
۴	۴/۵	۴۰	۴۰	۷۰/۱۰
۵	۳/۵	۲۰	۶۰	۹۸/۳۴
۶	۴/۵	۲۰	۶۰	۷۲/۰۷
۷	۳/۵	۴۰	۶۰	۸۲/۳۸
۸	۴/۵	۴۰	۶۰	۶۵/۲۳
۹	۳/۵	۳۰	۵۰	۶۶/۷۶
۱۰	۴/۵	۳۰	۵۰	۶۶/۶۵
۱۱	۴	۲۰	۵۰	۵۴/۵۱
۱۲	۴	۴۰	۵۰	۷۸/۸۳
۱۳	۴	۳۰	۴۰	۵۸/۷۰
۱۴	۴	۳۰	۶۰	۸۰/۰۳
۱۵	۴	۳۰	۶۰	۶۶/۷۳
۱۶	۴	۳۰	۵۰	*
۱۷	۴	۳۰	۵۰	*
۱۸	۴	۳۰	۵۰	*
۱۹	۴	۳۰	۵۰	*
۲۰	۴	۳۰	۵۰	*

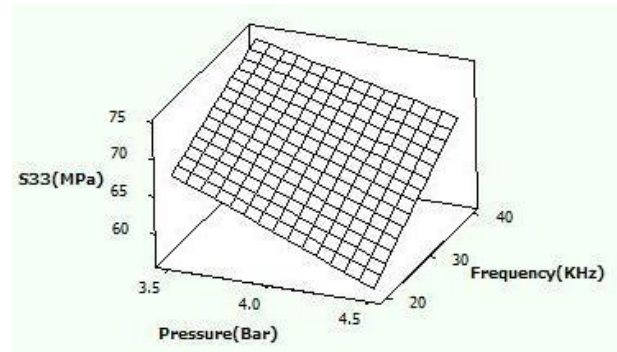
از نوسان در دامنه‌های بزرگتر بیان کرد.



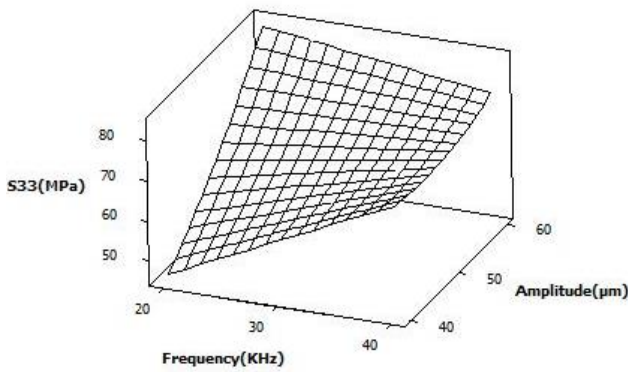
شکل ۴: نمودار مربوط به اثر هریک از پارامترهای فشار، فرکانس و دامنه نوسان بر مقدار تنش نرمال

شکل ۸: توزیع اثر همزمان فشار و دامنه نوسان بر تنش نرمال در فرکانس ۳۰ کیلو هرتز

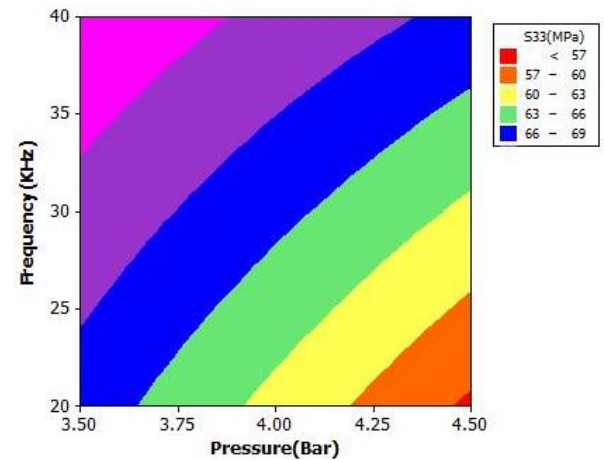
در شکل‌های ۹ و ۱۰ اثر همزمان فرکانس و دامنه نوسان را بر تنش نرمال در فشار ثابت نشان داده شده است. با افزایش دامنه نوسان و فرکانس تنش افزایش یافته است.



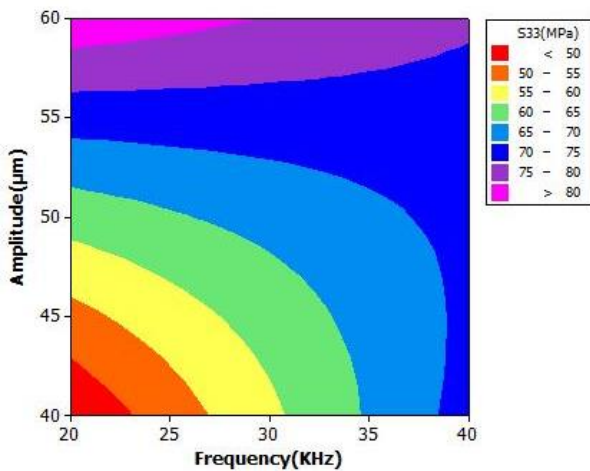
شکل ۵: اثر همزمان فرکانس و فشار بر تنش نرمال در دامنه نوسان ۵۰ میکرومتر



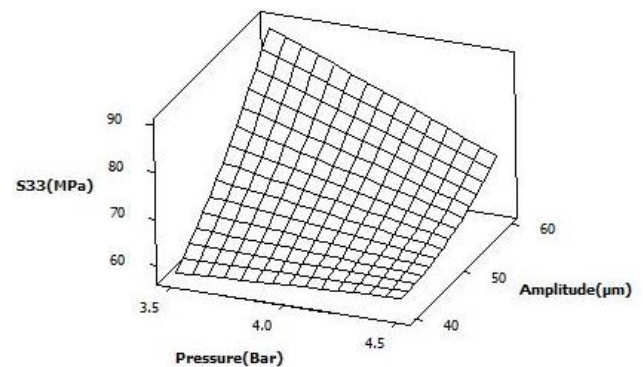
شکل ۹: نمودار صفحه‌ای اثر همزمان دامنه نوسان و فرکانس بر تنش نرمال در فشار ۴ بار



شکل ۶: توزیع اثر همزمان فشار و فرکانس بر تنش نرمال در دامنه نوسان ۵۰ میکرومتر



شکل ۱۰: نمودار صفحه‌ای اثر همزمان دامنه نوسان و فرکانس بر تنش نرمال در فشار ۴ بار



شکل ۷: نمودار صفحه‌ای اثر همزمان دامنه نوسان و فشار بر تنش نرمال در فرکانس ۳۰ کیلوهرتز

همانطور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود اثر همزمان دامنه نوسان و فرکانس دارای بصورت معکوس می‌باشند به طوری که با افزایش دامنه نوسان



در رابطه (۲)، فشار  $P$  (بار)، فرکانس (هرتز) و  $A$  دامنه نوسان (میکرون) می‌باشند.

## ۶ بهینه‌سازی فرآیند

علاوه بر نتایج بدست آمده از تحلیل نمودارها، بهینه‌سازی فرآیند جوشکاری فراصوتی با استفاده از نتایج بدست آمده بر اساس طراحی آزمایش به روش پاسخ سطح توسط نرم افزار مینی‌تب برای بیشترین تنش نرمال صورت گرفته است.

در این روش در ابتدا، پاسخ خروجی  $y_i$  به مطلوبیت بدون بعد  $d_i$  تبدیل می‌شود ( $0 < d < 1$ )، به طوری که مقدار بالاتر  $d_i$  دلالت بر مطلوبیت بیشتر پاسخ  $y_i$  دارد و اگر پاسخ خارج از محدوده‌ی قابل قبول باشد  $d_i = 0$  خواهد شد.

بدین ترتیب برای پاسخ خروجی، یک تابع مطلوبیت مجزا با بردی از ۰ تا ۱ بدست می‌آید. در این آزمایش، هدف تابع مطلوبیت، بیشینه‌سازی متغیر پاسخ یعنی تنش نرمال می‌باشد. بر این اساس نمودارهای برشی (شکل ۱۱) مربوط به آن و مقادیر بهینه هر یک از متغیرها مشخص شده است. مقدار و شرایط بهینه برای بیشترین تنش نرمال با دامنه نوسان ۶۰ میکرومتر، فرکانس ۲۰ کیلوهرتز و فشار ۳/۵ بار بدست آمده است که مقدار آن برابر با ۹۸/۳۴ مگاپاسکال است.

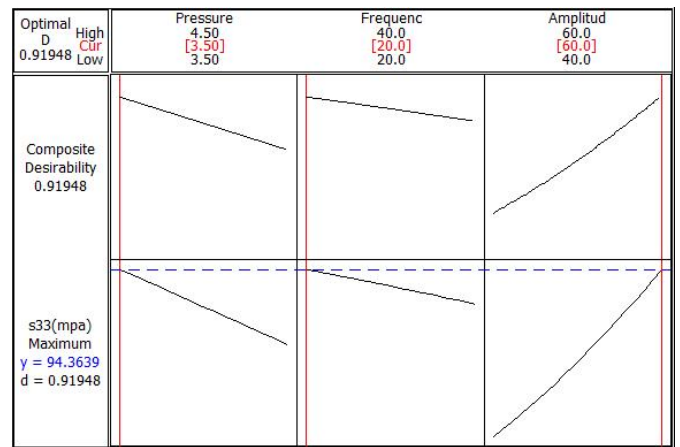
## ۷ نتیجه‌گیری

در این مقاله مدل‌سازی عددی فرآیند جوشکاری فراصوتی توسط نرم‌افزار اجزا محدود آباکوس برای جوشکاری ورق PVC انجام و با استفاده از روش سطح پاسخ اثر پارامترهای مؤثر این فرآیند شامل دامنه نوسان، فرکانس و فشار اعمالی بر روی تنش نرمال در حین فرآیند جوشکاری فراصوتی بررسی شده است. نتایج بدست آمده از این پژوهش را می‌توان به صورت خلاصه به شرح ذیل بیان نمود:

۱. هر سه پارامتر فشار، فرکانس و دامنه نوسان بر روی مقدار تنش نرمال مؤثر هستند.
۲. در مقایسه سه پارامتر دامنه نوسان، فشار و فرکانس، دامنه نوسان تأثیر بیشتری بر مقدار تنش نرمال داشته است.
۳. تأثیر فشار و فرکانس تقریباً به یک اندازه می‌باشد اما افزایش فشار باعث کاهش و افزایش فرکانس باعث افزایش مقدار تنش نرمال می‌شود.
۴. اثر تعاملی بین دامنه نوسان و فرکانس بیشتر از اثر تعاملی دامنه نوسان با فشار است.
۵. با افزایش دامنه نوسان جهت افزایش تنش نرمال باید فرکانس کاهش یابد و بالعکس.
۶. مقدار و شرایط بهینه برای بیشترین تنش نرمال با دامنه نوسان ۶۰ میکرومتر، فرکانس ۲۰ کیلوهرتز و فشار ۳/۵ بار بدست آمده است که مقدار آن برابر با ۹۸/۳۴ مگاپاسکال است.

در فرکانس پایین تنش نرمال افزایش یافته و برعکس با کاهش دامنه نوسان در فرکانس‌های بالاتر تنش نرمال افزایش می‌یابد.

این در حالی است که با افزایش فرکانس و دامنه نوسان به صورت مجزا، تنش نرمال افزایش می‌یابد. دلیل این موضوع مقدار انرژی انتقالی به محل جوش است که با افزایش همزمان دامنه نوسان و فرکانس مقدار و زمان انتقال انرژی کاهش می‌یابد. به همین دلیل می‌توان نتیجه گرفت که در موارد جوشکاری فراصوتی که نمی‌توان دامنه نوسان بالاتر اعمال نمود از فرکانس بالاتر استفاده نمود و بالعکس. به همین دلیل در جوشکاری فراصوتی مواد گرمانرمی (مواد بی‌شکل یا نیمه بلورین) که امواج را به خوبی مواد سخت‌تر منتقل نمی‌کنند از دامنه نوسان بالاتری هستند، همچنین مواد با نقطه ذوب بالاتر نیز دامنه‌های بالاتری احتیاج دارند.



شکل ۱۱: نمودارهای برشی مربوط به بهینه‌سازی فرآیند جوشکاری فراصوتی

## ۵ معادله رگرسیون

جدول آنالیز واریانس و ضرایب معادله رگرسیون حاکم برمسأله به صورت کد شده برای مقدار تنش نرمال به صورت زیر در جدول ۴ آمده است.

در بررسی طراحی آزمایش یکی از مواردی که دقت مدل حاکم بر آزمایش را تعیین می‌کند مقدار  $Rsq$  مدل می‌باشد. هرچه مقدار این مولفه به عدد ۱ و یا ۱۰۰ درصد نزدیک باشد، دقت انطباق مدل بالاتر و پیش بینی مدل آماری رگرسیون منطبق شده بر داده‌ها دقیقتر خواهد بود که با توجه به مقادیر بدست آمده، مقدار  $Rsq$  برابر با ۰/۹۲۰۷٪ که بیان کننده دقت انطباق مناسب مدل می‌باشد. همچنین با توجه به داده‌ها هر سه پارامتر دامنه نوسان، فرکانس و فشار پارامترهای مؤثر هستند.

همچنین معادله رگرسیون منطبق شده با مدل به صورت غیر کد شده برای تنش نرمال در رابطه (۲) آورده شده است.

$$\begin{aligned}
 S_{33} = & 66/7405 - 4/3130 \cdot P + 4/5740 \cdot F & (2) \\
 & + 10/3710 \cdot A - 0/0514P \times P \\
 & - 0/0864F \times F + 2/6086A \times A \\
 & + 1/1575P \times F - 5/4775P \times A \\
 & - 8/3775F \times A
 \end{aligned}$$

جدول ۴: آنالیز واریانس برای تنش نرمال

مقدار $P$	مقدار $T$	ضریب رگرسیون	عبارت
۰/۰۰۰	۴۳/۴۶۶	۶۶/۷۴۰۵	ثابت
۰/۰۱۲	-۳/۰۵۴	-۴/۳۱۳۰	$P$
۰/۰۰۹	۳/۲۳۸	۴/۵۷۴۰	$F$
۰/۰۰۰	۷/۳۴۳	۱۰/۳۷۱۰	$A$
۰/۹۸۵	-۰/۰۱۹	-۰/۰۵۱۴	$P.P$
۰/۹۷۵	-۰/۰۳۲	-۰/۰۸۶۴	$F.F$
۰/۳۵۶	۰/۹۶۹	۲/۶۰۸۶	$A.A$
۰/۴۸۰	۰/۷۳۳	۱/۱۵۷۵	$P.F$
۰/۰۰۰۶	-۳/۴۶۹	-۵/۴۷۷۵	$P.A$
۰/۰۰۰	-۵/۳۰۵	-۸/۳۷۷۵	$F.A$
$R - sq (pred) = ٪۳۲/۱۵, R - sq (adj) = ٪۸۴/۹۳, R - sq = ٪۹۲/۰۷$			

مراجع

- [11] Chinnadurai, T, Vendan, Arungalai, Mohan Raj, N, and Prakash, N. Studies on ultrasonic welding of polycarbonate and acrylonitrile butadiene styrene blends. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 52(1):41-51, 2017.
- [12] Kumar, J Pradeep and Prakasan, K. Experimental studies on joining copper wire-copper sheet using ultrasonic metal welding. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD) ISSN*, pp. 2249-6890.
- [13] Zhao, Dewang, Zhao, Kunmin, Ren, Daxin, and Guo, Xinglin. Ultrasonic welding of magnesium-titanium dissimilar metals: A study on influences of welding parameters on mechanical property by experimentation and artificial neural network. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 139(3):031019, 2017.
- [14] Lee, Dongkyun, Kannatey-Asibu, Elijah, and Cai, Wayne. Ultrasonic welding simulations for multiple layers of lithium-ion battery tabs. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 135(6):061011, 2013.
- [1] Flood, G. Ultrasonic bonding of nonwovens. *Tappi journal*, 72(5):165-170, 1989.
- [2] Al-Budairi, Hassan Dakhil. *Design and analysis of ultrasonic horns operating in longitudinal and torsional vibration*. Ph.D. thesis, University of Glasgow, 2012.
- [3] Khmelev, Vladimir N, Slivin, Aleksey N, Lehr, Andrey V, and Abramov, Aleksey D. Theoretical investigations of continuous ultrasonic seam welding of thermoplastic polymers and fabrics. in *2010 11th International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices*, pp. 341-344. IEEE, 2010.
- [4] Shi, Hui, Wang, Jianping, Chen, Xiaona, Luo, Shunhua, and Zhang, Lingxi. Research on the seam performance of waterproof clothing based on continuous ultrasonic welding technology. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 28(2):171-190, 2016.
- [5] Troughton, Michael J. *Handbook of plastics joining: a practical guide*. William Andrew, 2009.
- [6] Shi, Weihua and Little, Trevor. Mechanisms of ultrasonic joining of textile materials. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 12(5):331-350, 2000.
- [7] Nesterov, Viktor A, Khmelev, Vladimir N, Slivin, Aleksey N, and Lehr, Andrew V. Research of transformation of longitudinal ultrasonic vibrations into radial ones. in *2011 International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices Proceedings*, pp. 288-291. IEEE, 2011.
- [8] Khmelev, Vladimir N, Nesterov, Viktor A, Slivin, Aleksey N, Khmelev, Sergey S, and Abramov, Alexey D. The development of ultrasonic vibrating system for continuous seam welding. in *International Conference and Seminar of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices*, pp. 157-161. IEEE, 2012.
- [9] Kei-Lin, KUO. Ultrasonic vibrating system design and tool analysis. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 19:s225-s231, 2009.
- [10] Parmar, Umang and Pandya, DH. Experimental investigation of ultrasonic welding on non-metallic material. *Procedia Technology*, 23:551-557, 2016.