

## تاثیر پارامترهای فرآیند شکل دهی افزایشی بر نیرو و زمان در ورق سه لایه Al-Cu-Al

هدف از این تحقیق، بررسی تاثیر پارامترهای شکل دهی افزایشی بر نیرو و زمان شکل دهی ورق های فلزی چند لایه می باشد. به منظور دستیابی به این هدف، یک نمونه ورق فلزی متشکل از سه لایه آلومینیوم-مس-آلومینیوم به روش جوش انفجاری تولید شد. سپس با استفاده از روش آماري رویه پاسخ (RSM)، آزمایشات شکل دهی (ناشی از اثر متغیرهای تحقیق) انجام شد. با استفاده از ضرایب تخمینی مدل آماری، ارتباط میان متغیر پاسخ و هر یک از متغیرهای ورودی آزمایش بدست آمد. سرانجام این مدل با انتخاب مناسب فاکتورهای تحقیق، محدوده بهینه ای از عوامل تاثیرگذار را پیش بینی نمود.

محمد هنرپیشه<sup>۱</sup>

استادیار

علی عرشی<sup>۲</sup>

دانشجوی کارشناسی ارشد

احمد قیصریان<sup>۳</sup>

دانشجوی دکترا

واژه های راهنما: شکل دهی افزایشی، ورق جوش انفجاری شده آلومینیوم-مس-آلومینیوم، پارامترهای شکل-دهی، روش آماری رویه پاسخ

### ۱- مقدمه

شکل دهی افزایشی ورق های چندلایه، از فرآیندهای نوین شکل دهی محسوب می شود که به کمک یک ابزار ساده و ماشین کنترل عددی، ورق چندلایه شکل داده می شود. حسن فناوری های نوین شکل دهی، قابلیت تولید اشکال متقارن به هزینه اندک و بدون نیاز به قالب های گران قیمت می باشد [۱]. یکی از روش های اتصال مواد هم جنس و غیر هم جنس فرایند جوشکاری انفجاری می باشد [۲]. در این فرایند دو یا چند صفحه با فاصله توقف و زاویه استقرار مناسب نسبت به یکدیگر قرار گرفته و با سرعت بالایی که محصول انرژی آزاد شده یک ماده منفجره است، به یکدیگر برخورد می کنند و اتصال برقرار می شود. در این روش فلزات در ناحیه واسط بین خودشان با تشکیل یک موج و یا موج و گردابه، در هم فرو می روند. در حین اتصال تغییر شکل پلاستیک شدید و فشار زیاد باعث تشکیل جتی از بین صفحات به سمت بیرون می شود که با خود ناخالصی ها و اکسیدها را به سمت بیرون پرتاب می کند و یک فصل مشترک تمیز و اتصالی با کیفیت مناسب ایجاد می کند [۳].

<sup>۱</sup> نویسنده مسئول، استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان honarpishe@kashanu.ac.ir

<sup>۲</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد جاسب، جاسب al\_arshi58@yahoo.com

<sup>۳</sup> دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان ahmad.gheysarian@gmail.com

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۷/۲۶، تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۰/۰۷

پیرامون تاثیر پارامترهای شکل دهی در فرایند شکل دهی افزایشی ورق مطالعاتی انجام گرفته است. حاسین و همکارانش، به بررسی شکل پذیری ورق خالص تیتانیوم در فرآیند شکل دهی افزایشی پرداختند. در این مطالعه با تغییر در گام، پیشروی و قطر ابزار، میزان شکل پذیری و سایش ابزار مقایسه گردید.

نتایج نشان داد که شکل پذیری با افزایش گام به صورت خطی کاهش می یابد [۴].

نتایج میرنیا و ملائی در بررسی فرآیند شکل دهی افزایشی نشان داد که با افزایش گام عمودی و ضخامت ورق، نیروهای شکل دهی افزایش می یابند [۵]. لیو و همکارانش، به بهینه سازی فرآیند شکل دهی افزایشی جهت بهبود در زمان، با استفاده از روش تاگوچی پرداختند. نتایج آنها نشان داد که مهمترین پارامتر تاثیر گذار در زمان فرایند، گام عمودی می باشد که به دنبال نرخ تغذیه است و ضخامت ورق و قطر ابزار تاثیر کمی در زمان عملیات دارند [۶]. نتایج تحقیقات همیلتون و همکارانش در بررسی فرایند شکل دهی نمودی با سرعت های پیشروی بالا روی ورق A13003 مشخص نمود که پیشروی تاثیر چندانی بر توزیع ضخامت ورق ندارد [۷]. همچنین آزمایشات قاسمی و همکارانش، در مطالعه برخی پارامترهای موثر بر روی تغییر ضخامت قطعه شکل یافته و نیروها در فرآیند شکل دهی تدریجی نشان داد که با افزایش سرعت پیشروی، نیروی عمودی کاهش می یابد و بیان کردند که شکل پذیری وابسته به سرعت پیشروی ابزار می باشد [۸]. شانموگانان و همکارانش، به بهینه سازی این فرآیند با استفاده از روش پاسخ دهی سطح روی آلومینیوم ۱۲۰۰ پرداختند و نتیجه گرفتند که ضخامت متوسط جام استوانه ای شکل با کاهش قطر، افزایش می یابد و افزایش پیشروی و افزایش گام عمودی نیز همین اثر را دارند [۹]. هنرپیشه و همکارانش، به شکل دهی افزایشی گرم ورق تیتانیوم توسط تجهیزات الکتریکی پرداختند [۱۰]. در زمینه شکل دهی افزایشی ورقهای چندلایه، قیصریان و هنرپیشه [۱۲]، [۱۱] به بررسی پارامترهای شکل دهی افزایشی در ورقهای دو لایه جوش انفجاری شده مس/آلومینیوم پرداختند. انجام فرایندهای ثانویه بر روی ورقهای جوش انفجاری شده از جمله مواردی است که مورد توجه محققین مختلف قرار گرفته است. مطالعه اثرات نورد بر روی ورقهایی جوش انفجاری شده فولاد-آلومینیوم [۱۳] و آلومینیوم-مس [۱۴] از جمله اقداماتی است که در سالهای اخیر مورد توجه قرار گرفته است. البته شکل دهی ورق های دو جنسی در فرایندهای کشش عمیق سابقه کافی در تحقیقات داشته است لیکن به علت تاثیر غالب جنس ورق بر یکنواختی شکل حاصل از فرایند شکل دهی افزایشی، این فرایند بر روی ورق های دو جنسی چندان مورد آزمایش قرار نگرفته است.

در این تحقیق یک ورق سه لایه شامل صفحات آلومینیوم (Al1۰۵۰)، مس (Cu۱۴) و آلومینیوم (Al1۰۵۰) که به روش جوش انفجاری به یکدیگر متصل شده اند تهیه گردید و سپس به انجام تست های تجربی روی این ورق ها در فرآیند شکل دهی افزایشی پرداخته می شود و تاثیر پارامترهای قطر ابزار، گام عمودی، سرعت دورانی اسپیندل و سرعت پیشروی ماشین بر روی میزان نیرو و زمان شکل دهی مورد بررسی قرار می گیرد. نیرو و زمان عملیات شکل دهی افزایشی بر روی ورق های سه لایه به کمک دستگاه دینامومتر اندازه گیری شد. بدین منظور، با روش رویه پاسخ، طراحی آزمایشات ناشی از تاثیر متغیرهای قطر ابزار، گام عمودی، سرعت دورانی اسپیندل و سرعت پیشروی ماشین مورد مطالعه قرار گرفت.

## ۲- مواد و روش تحقیق

در این مطالعه از ورق‌های آلومینیوم (Al1۰۵۰) در لایه رویی و زیرین و ورق مس (Cu۱۴) در لایه میانی به ترتیب با ضخامت ۱ و ۰/۸ میلیمتر در اتصال به روش جوشکاری انفجاری و با چیدمان موازی استفاده شده است. جهت انجام جوشکاری، ابتدا صفحه آلومینیومی زیرین به عنوان صفحه ساکن بر روی بلوک بتنی گذاشته شده و سپس صفحه مسی به عنوان صفحه میانی و با فاصله توقف برابر با ضخامت لایه پرنده و توسط پایه‌های چوبی بر روی صفحه ساکن قرار داده شد. در آخر صفحه آلومینیومی رویی به عنوان صفحه پرنده و به صورت آرایش موازی بر روی صفحات دیگر قرار گرفت و مواد منفجره پس از آماده سازی و توزین، در داخل جعبه‌ای از جنس چوب کاملاً خشک ریخته شده و سپس روی صفحه پرنده قرار گرفته است.

در آزمایش جوش انفجاری انجام شده در این تحقیق از پودر آماتول با ترکیب شیمیایی ۹۲٪ درصد وزنی نیترات آمونیوم به همراه ۶٪ درصد وزنی گازوئیل و با چگالی ۰/۸۵ گرم بر سانتی متر مکعب و با سرعت انفجاری متوسط ۲۵۰۰ متر بر ثانیه استفاده شده است. همچنین جهت آغاز و اطمینان از عملیات انفجار، از چاشنی C۴ استفاده گردیده است. به منظور مطالعه تاثیر پارامترهای شکل‌دهی بر میزان نیرو و زمان عملیات شکل‌دهی افزایشی ورق‌های جوش انفجاری، نمونه‌ها با ابعاد ۱۷۰×۱۷۰ میلیمتر از ورق آلومینیوم/مس/آلومینیوم تهیه گردید و عملیات حرارتی نمونه‌ها داخل کوره با تیرانس دمایی  $\pm 5^{\circ}\text{C}$  به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۳۰۰ درجه سانتیگراد صورت گرفت.

جهت بررسی تاثیر پارامترهای قطر ابزار، گام عمودی، سرعت دورانی اسپیندل و سرعت پیشروی از یک دستگاه فرز CNC<sup>۱</sup> سه محوره با کنترلر زیمنس<sup>۲</sup> مدل 802C با یکسری تجهیزات اضافی شامل ورق گیر (فیکسچر) و ابزار شکل‌دهی استفاده گردید. بدین ترتیب که نمونه‌ها جهت قرار گرفتن در قالب شکل‌دهی افزایشی، ابتدا سوراخ کاری و سپس آماده قرار گرفتن در قالب می‌شوند. ابعاد دهانه فیکسچر ۱۶۰×۱۶۰ میلیمتر بودند. جهت انجام و القای حرکت به ابزار فرم‌دهی، در مسیر مشخص شده بر روی ورق سه لایه و نهایتاً شکل‌دهی آن حرکت مورد نظر توسط برنامه گرفته شده از نرم افزار پاورمیل<sup>۳</sup> ایجاد می‌گردد و توسط نرم افزار سیمکو به کنترلر دستگاه CNC منتقل می‌گردد.

شکل (۱) نمای کلی از نحوه حرکت میله ابزار ماشین فرز CNC بر روی ورق را نشان می‌دهد. استفاده از مایع روانکار به منظور بهبود صافی سطح، افزایش حد شکل‌پذیری و به طور خاص کاهش اصطکاک بین ورق و ابزار بسیار ضروری می‌باشد. با حرکت ابزار دستگاه فرز CNC بر روی قطعه ورق سه لایه، عملیات شکل‌دهی افزایشی با هندسه هرمی شکل انجام می‌شود که ابعاد دهانه ۷۲ در ۷۲ میلیمتر، عمق ۴۰ میلیمتر و زاویه دیواره ۶۰ درجه تعیین گردید.

<sup>1</sup> Computer numerical control

<sup>2</sup> Siemens

<sup>3</sup> Powermill



شکل ۱- نمایی از نحوه قرارگیری و حرکت ابزار در شکل دهی افزایشی



شکل ۲- فرم هندسی از شکل دهی افزایشی ورق سه لایه جوش انفجاری Al/Cu/Al

شکل (۲) آزمایش ایجاد هرم ناقص در شکل دهی افزایشی را نشان می دهد. همزمان نمودارهای اثر نیرو ناشی از ارتباط با دینامومتر، در هر سه راستای  $X$ ،  $Y$  و  $Z$  بدست می آیند. به دلیل اصطکاک بسیار زیادی که از تماس بین ورق و ابزار حین عملیات شکل دهی حاصل می شود، ابزار از فولاد MO40، به صورت سر کروی، با مقاومت سایشی بالا، با درجه صلبیت و قابلیت ماشین کاری خوب انتخاب شد که دارای سختی لازم برای انجام فرآیند بوده و عدم سایش ابزار و شکل دهی مناسب را تضمین می کند و همچنین مشخصات ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی آن در جداول (۱) و (۲) نشان داده شده است. همچنین برای جلوگیری از گرم شدن ورق در محل تماس با ابزار از روانکار روغن استفاده شده است.

## ۳- نتایج و بحث

با انجام عملیات شکل دهی افزایشی، تاثیر متغیرهای شکل‌دهی روی مقادیر نیرو و زمان شکل پذیری ورق های سه لایه آلومینیم-مس- آلومینیم مورد مطالعه قرار می گیرد. مشخصات این فاکتورها به ترتیب ذیل می باشد:

الف) متغیر قطر ابزار (A)، در بازه ۲۰-۱۶ mm .

ب) متغیر گام عمودی (B)، در بازه ۱-۰/۲۵ mm .

ج) متغیر دور اسپیندل (C)، در Rate/min ۲۰۰۰-۸۰۰ .

د) متغیر سرعت پیشروی (D)، در mm /min ۱۵۰۰-۵۰۰ .

با فرض انتخاب ۵ قطر، ۴ گام عمودی، ۱۳ سرعت دورانی و ۱۱ سرعت پیشروی ملاحظه شد تعداد حالات انجام آزمایشات بسیار زیاد و مستلزم مدت زمان زیادی می باشد. در این گونه موارد روش‌های رویه پاسخ<sup>۱</sup> جایگزین‌های مناسبی به شمار می روند. روش‌های رویه پاسخ به وسیله توابع تخمینی، تقریبی از فضای طرح مبتنی بر نمونه‌های طرح‌ریزی شده و حاصل از طراحی آزمایش<sup>۲</sup> را تعیین می نمایند. روش آماری رویه پاسخ با طراحی آزمایشات و انتخاب حالات بهینه می تواند سبب کاهش تعداد آزمایشات شود. بطور کلی می توان روش رویه پاسخ را به سه مرحله اساسی طراحی آزمایش<sup>۳</sup>، اجرای آزمون‌های آزمایش<sup>۴</sup> و تحلیل داده های آزمایش<sup>۵</sup> تقسیم بندی نمود [۱۵]. با استفاده از طرح‌های مرکب مرکزی<sup>۶</sup>، تعداد آزمایشات طرح ریزی شده به ۱۲ مورد آزمایش تقلیل یافت. بنابراین آزمایش شکل‌دهی افزایشی ورق سه لایه بر طبق طراحی متغیرهای ورودی آزمایش انجام شدند و پاسخ های این آزمایش شامل دو خروجی نیروی<sup>۷</sup> شکل دهی و زمان شکل دهی با استفاده از تحلیل ترسیمی، مطابق با روش اندازه گیری محققین قبلی اندازه گیری و محاسبه شدند [۱۶].

جدول ۱- مشخصات ترکیب شیمیایی ابزار فولاد mo40

	C	i	Mn	P	s	cr	mo	Ni
Min	۰/۳۸	۰/۱۵	۰/۷۵	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۸	۰/۱۵	۰/۲۵
max	۰/۴۳	۰/۳۵	۱	-	-	۱/۱	۰/۲۵	-

جدول ۲- مشخصات خواص مکانیکی ابزار فولاد mo40

Yield strength	Tensile strength	Elongation %	Hardness
۷۰۰	۹۲۰	۱۵	۲۷۰

<sup>1</sup> Response surface methodology

<sup>2</sup> Design of experiment

<sup>3</sup> Planning experiment

<sup>4</sup> Implementations of experiment

<sup>5</sup> Analyzing of experiment

<sup>6</sup> Central Composite Designs

<sup>7</sup> Force

به منظور تعیین نیرو و زمان حاصل از شکل دهی افزایشی ورق، از دستگاه دینامومتر<sup>۱</sup> مدل 9257B کیستلر<sup>۲</sup> قابل اتصال به ماشین CNC استفاده می شود. نتایج این اندازه گیری در جدول (۳) نتایج ارائه شده است. این دستگاه (دینامومتر) دارای یک تقویت کننده و یک دریافت کننده اطلاعات می باشد که این دو توسط یک کابل RS232 به یکدیگر متصل شده اند. همچنین نرم افزار داینواور<sup>۳</sup> جهت کنترل دستگاه و آنالیز داده ها مورد استفاده قرار می گیرد. سنسور دینامومتر بر روی میز CNC و زیر قالب فرایند نصب و تعبیه می گردد. محور Z در راستای ابزار و X و Y در راستای محورهای میز دستگاه CNC می باشند. با توجه به بررسی و تاثیر متغیرهایی همچون دور بر دقیقه اسپیندل، گام عمودی، سرعت پیشروی و قطر ابزار بر فرایند شکل دهی افزایشی ورق های سه لایه آلومینیوم-مس-آلومینیوم جوش انفجاری، نمودارهای نیرو-زمان متنوعی بدست آمد. در جدول (۳) نتایج این اندازه گیری و ماتریس طراحی آزمایشات همراه با پاسخ های بدست آمده از آنها نشان داده شده است. همان گونه که بیان شد مقادیر پاسخ ها شامل نیرو ( $R_1$ ) و زمان ( $R_2$ ) از روی نمودارهای دستگاه دینامومتر استخراج شدند. این پارامترهای خروجی می توانند خواص شکل پذیری ورق سه لایه را توصیف نمایند [۱۶]. هرچه مقادیر  $R_1, R_2$  کمتر باشند عملیات شکل دهی ورق آلومینیوم-مس-آلومینیوم مطلوبتر خواهد بود.

روش رویه پاسخ منجر به حصول یک مدل تجربی  $Y = f(x_1, \dots, x_k)$  می شود و بنابراین اثر متغیرهای قطر ابزار ( $X_1$ )، گام عمودی ( $X_2$ )، دور اسپیندل ( $X_3$ ) و سرعت پیشروی ( $X_4$ ) به عنوان فاکتورهای مستقل روی پارامترهای خروجی به عنوان متغیر پاسخ ( $Y$ )، با استفاده از یک معادله چندجمله ای مرتبه دوم بصورت ذیل مرتب می شود:

$$Y = b_0 + \sum b_i x_i + \sum \sum b_{ij} x_i x_j \quad i \geq j \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (1)$$

در این معادله،  $b_0$  یک جمله مستقل مطابق با میانگین مقدار طرح ریزی آزمایش،  $b_i$  ضرایب رگرسیون است که اثرات متغیرها را در خطوط آنها (طولشان) توصیف می کند، و  $b_{ij}$  ضرایب رگرسیون ناشی از برهم کنش جمله ها میان متغیرها می باشد [۱۵].

### ۳-۱- بررسی آزمون نرمال روی پارامترهای اصطکاکی

به منظور اطمینان از روند خطی مناسب داده های خروجی، از تست نرمال استفاده گردید، در این آزمون نرم افزار داده های ورودی را بررسی کرده و نتایج بدست آمده را مورد آنالیز قرار می دهد و خطی بودن و نرمال بودن داده ها و پاسخ های بدست آمده را نمایش می دهد و در صورتی که داده ای غیر منطقی باشد در نمودار نمایان می کند. نتایج آزمون نرمال بر نیرو و زمان شکل دهی در شکل (۳-الف و ب)، نشان داده شده که حاکی از حسن جوابهای تحقیق و داشتن روند خطی مناسب پاسخ ها است.

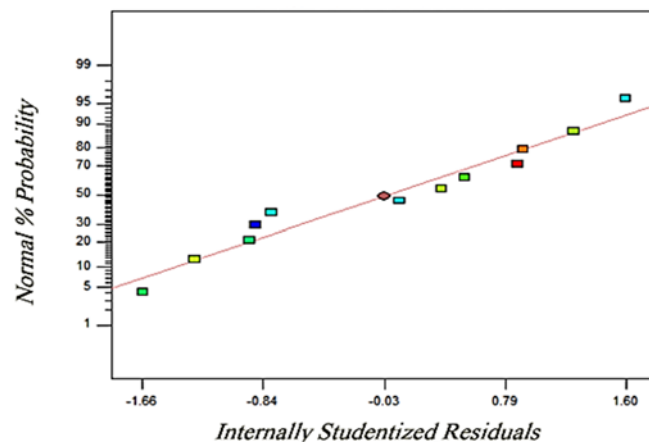
<sup>1</sup> Dynamometer

<sup>2</sup> Kistler

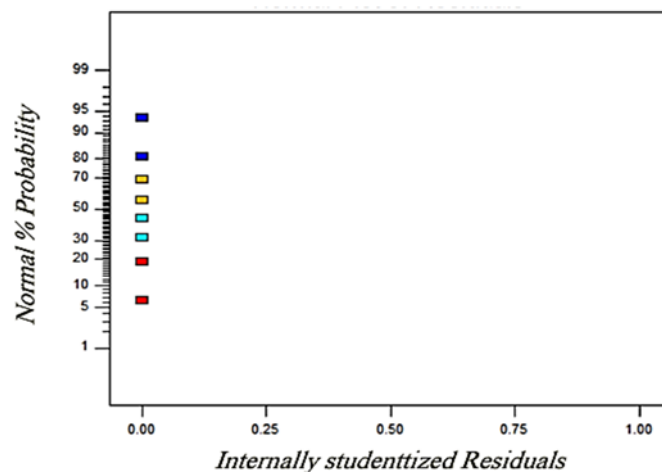
<sup>3</sup> Dynoware

جدول ۳- ماتریس طراحی از ترتیب آزمایشات و پاسخ‌های آنها

کد	قطرایزار (mm)	گام عمودی (mm)	سرعت دورانی (rpm)	پیشروی (mm/min)	نیرو (N)	زمان (Sec)
۱	۲۰	۰/۲۵	۲۰۰۰	۱۵۰۰	۱۹۷۹	۸۵۰
۲	۱۶	۱	۲۰۰۰	۱۵۰۰	۲۰۰۹	۲۲۰
۳	۲۰	۰/۲۵	۲۰۰۰	۵۰۰	۱۵۹۱	۹۹۰
۴	۱۶	۱	۸۰۰	۱۵۰۰	۲۱۹۳	۲۲۰
۵	۲۰	۱	۸۰۰	۵۰۰	۱۷۷۸	۴۰۰
۶	۱۶	۰/۲۵	۸۰۰	۱۵۰۰	۱۶۵۲	۸۵۰
۷	۱۶	۰/۲۵	۲۰۰۰	۵۰۰	۱۳۸۴	۹۹۰
۸	۱۶	۱	۲۰۰۰	۵۰۰	۱۸۹۶	۴۰۰
۹	۲۰	۱	۸۰۰	۱۵۰۰	۲۲۹۸	۲۲۰
۱۰	۲۰	۱	۲۰۰۰	۵۰۰	۱۹۸۹	۴۰۰
۱۱	۱۶	۰/۲۵	۸۰۰	۵۰۰	۱۵۹۳	۹۹۰
۱۲	۲۰	۰/۲۵	۸۰۰	۱۵۰۰	۱۷۴۶	۸۵۰



(الف) نیروی شکل‌دهی

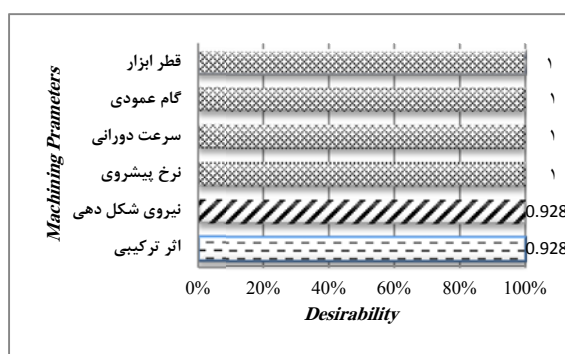


(ب) زمان شکل‌دهی

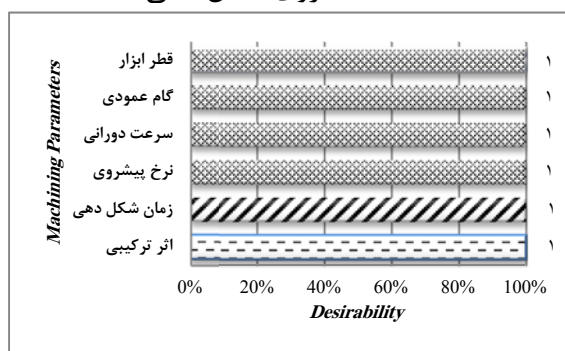
شکل ۳- نمودار تست نرمال مقادیر خروجی (الف) نیرو، (ب) زمان در فرآیند شکل‌دهی

## ۳-۲- بررسی توابع مطلوبیت

میزان مطلوبیت متغیرهای مذکور تعیین می‌کند که بهینه‌سازی به چه میزان نسبت به سطح مطلوب (۱/۰۰۰) صورت گرفته است. همچنین بیانگر آن است که با وجود اعمال محدودیت‌های تحقیق، متغیرهای مذکور تا چه میزان می‌توانند بر روی نرخ مطلوبیت اثرگذار باشند. در شکل (۴- الف و ب)، میزان مطلوبیت متغیرها بر روی هر یک از خروجی‌های نیرو و زمان تحقیق نشان داده شده است. میزان نسبتاً زیاد تابع مطلوبیت (۱/۰۰۰) متغیرهای قطر ابزار، گام عمودی، دور اسپیندل و سرعت پیشروی به عنوان فاکتورهای مستقل روی تک تک پارامترهای خروجی، حاکی از اثردار بودن قطعی هر یک و برابری با مقدار هدف می‌باشد.



(الف) نیروی شکل دهی



(ب) زمان شکل دهی

شکل ۴- میزان مطلوبیت فاکتورهای تحقیق بر روی مقادیر (الف) نیرو، (ب) زمان

جدول ۴- رگرسیون خروجی بکوارد از آنوا برای مدل رویه پاسخ  $Y1: F_{mean}$

P-value	F-value	Df	Source
۰/۰۰۴۵	۱۰/۳۹	۴	Model
۰/۱۸۱۵	۲/۲۰	۱	A [ قطر ابزار ]
۰/۰۰۱۵	۲۵/۳۱	۱	B [ گام عمودی ]
۰/۷۵۱۹	۰/۱۱	۱	C [ دور اسپیندل ]
۰/۰۰۸۴	۱۳/۱۸	۱	D [ پیشروی ]
		۷	Residual
		۱۱	Cor total



جدول ۵- رگرسیون خروجی بکوارد از آنوا برای مدل رویه پاسخ  $Y_2$ : Time

P-value	F-value	Df	Source
۰/۰۰۰۱	۶/۳۶۶E+۷	۳	Model
۰/۰۰۰۱	۶/۳۶۶E+۷	۱	[گام عمودی] B
۰/۰۰۰۱	۶/۳۶۶E+۷	۱	[پیشروی] D
۰/۰۰۰۱	۶/۳۶۶E+۷	۱	BD
		۸	Residual
		۱۱	Cor total

### ۳-۳-۳- اجرای آزمون های آزمایش

پارامترهای اصطکاکی بدست آمده از جدول (۳)، با استفاده از آزمون های آنوا<sup>۱</sup> و بکوارد<sup>۲</sup> (توسط نرم افزار آماری DOE<sup>۳</sup>) مورد تحلیل قرار گرفتند [۶، ۹] که نتایج آنها در جداول (۴) و (۵) ارائه شده است. آزمون آنوا و بکوارد وجود ارتباط خطی معنی دار بین متغیر پاسخ ( $Y$ ) و فاکتورهای ورودی آزمایش را بررسی می نماید. همان گونه که از جداول فوق بر می آید، اثرات مستقل هریک از فاکتورهای قطر ابزار ( $A$ )، گام عمودی ( $B$ )، دور اسپیندل ( $C$ ) و سرعت پیشروی ( $D$ ) به عنوان فاکتورهای مستقل روی پارامترهای خروجی و همچنین برهم کنش معنی دار بین آنها در سطح اطمینان ۹۹٪، بر روی مقادیر متغیرهای پاسخ نشان داده شده است. بنابر آزمون آنوا، فاکتورهایی که مقادیر  $P$ -value آنها کمتر از ۰/۰۱ باشد، نشان دهنده تاثیردار بودن قطعی آنها بر روی میزان نیرو و زمان عملیات شکل دهی می باشد. نتایج آزمون آنوا از جداول (۴) و (۵) نشان می دهد که دو متغیر گام عمودی ( $B$ ) و سرعت پیشروی ( $D$ )، تاثیر بسیار مهمی بر نیروی شکل دهی ورق های سه لایه آلومینیوم-مس-آلومینیوم دارند. همچنین دو متغیر گام عمودی ( $B$ ) و سرعت پیشروی ( $D$ )، بر زمان عملیات شکل دهی بسیار اثر می گذارند.

### ۳-۳-۳-۱- تاثیر تغییر قطر ابزار بر فرایند شکل دهی ورق سه لایه

نتایج آزمون آنوا از جداول (۴) و (۵) نشان می دهد که تغییرات قطر ابزار ماشین CNC در محدوده تغییرات ۲۰-۱۶ میلیمتر بر روی نیروی شکل دهی و زمان عملیات شکل دهی تاثیر معنی داری ندارد. البته انتخاب قطر ابزار شکل دهی در محدوده بالا به سبب استحکام و ضخامت زیاد ورق سه لایه (۲/۸ میلیمتر) بود که با توجه به احتمال شکستگی ابزارهای با قطر پایین، انجام این تحقیق میسر نبود. نتایج بدست آمده، تا حدودی با تحقیقات پیشین نیز مطابقت داشت [۶].

### ۳-۳-۳-۲- تاثیر گام عمودی بر فرایند شکل دهی ورق سه لایه

نتایج ( $P$ -value = ۰/۰۰۰۱) بدست آمده از روش رویه پاسخ و آزمون آنوا جداول (۴) و (۵) نشان می دهد که

<sup>1</sup> ANOVA

<sup>2</sup> Backward

<sup>3</sup> Design Expert

تغییر میزان گام عمودی ماشین CNC، بر روی نیروی شکل دهی و زمان عملیات شکل دهی ورق های سه لایه تحقیق، شدیداً اثرگذار است که نشان دهنده اهمیت این متغیر در پارامترهای شکل دهی می باشد. هرچه اندازه گام کوچکتر باشد، شکل پذیری بیشتر است. بنابراین با تغییر گام عمودی ابزار در محدوده تغییرات ۱-۲۵ میلی متر، بطور قطع میزان نیرو، زمان دستخوش تغییرات می شوند. نتایج بدست آمده، با نتایج تحقیقات پیشین نیز کاملاً مطابقت داشت. نتایج میرنیا و ملائی در فرآیند شکل دهی افزایشی نیز نشان داده بود که با افزایش گام عمودی، نیروهای شکل دهی افزایش می یابند. همچنین لیو و همکارانش در تحقیقات خود، مهمترین پارامتر تاثیرگذار در زمان فرایند شکل را گام معرفی نمودند که منطبق با نتایج این تحقیق است [۶].

### ۳-۳-۳- تاثیر سرعت دورانی بر فرایند شکل دهی ورق سه لایه

نتایج آزمون آنوا از جداول (۴) و (۵) و ( $P\text{-value} = 0/0001$ ) نشان می دهد که تغییرات سرعت دورانی اسپیندل ماشین CNC در محدوده ۸۰۰-۲۰۰۰ دور بر دقیقه، بر مقدار نیروی شکل دهی و همچنین زمان عملیات شکل دهی ورق سه لایه تاثیر چندانی نگذاشت.

### ۳-۳-۴- تاثیر پیشروی بر فرایند شکل دهی ورق سه لایه

نتایج ( $P\text{-value} = 0/0001$ ) بدست آمده از روش رویه پاسخ و نتایج آزمون آنوا از جداول (۴-۳) تا (۴-۵) نشان می دهد که تغییرات سرعت پیشروی ماشین CNC در محدوده ۱۵۰۰-۵۰۰ میلی متر بر دقیقه، شدیداً بر روی نیرو و زمان عملیات شکل دهی ورق سه لایه تاثیرگذار بود.

نتایج تحقیقات همیلتون و همکارانش در بررسی فرایند شکل دهی نمودی با سرعت های پیشروی بالا روی ورق A13003 نشان داده بود که پیشروی تاثیر چندانی بر توزیع ضخامت ندارد. همچنین آزمایشات قاسمی و همکارانش، در مطالعه برخی پارامترهای موثر بر روی تغییر ضخامت قطعه شکل یافته و نیروها در فرآیند شکل دهی تدریجی نشان داده بود که با افزایش سرعت پیشروی عمودی کاهش می یابد که نشان می دهد نتایج بدست آمده، با نتایج تحقیقات پیشین نیز کاملاً مطابقت دارد. بدین ترتیب، شکل پذیری وابسته به سرعت پیشروی ابزار خواهد بود [۷].

### ۳-۳-۵- معادلات نهایی مدل رویه پاسخ

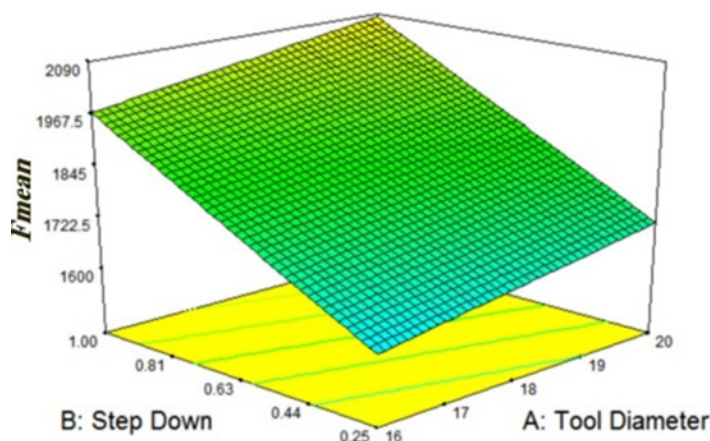
مطابق با نتایج رگرسیون بکوارد، مدل (فرمول) از جواب ها با استفاده از فاکتورهای قطر ابزار (A)، گام عمودی (B)، دور اسپیندل (C) و سرعت پیشروی (D) و همچنین اثر متقابل بین آنها بدست آمد که در جداول (۶) و (۷) نمایش داده شده است.

### جدول ۶- معادلات نهایی نیروی شکل دهی از مدل رویه پاسخ

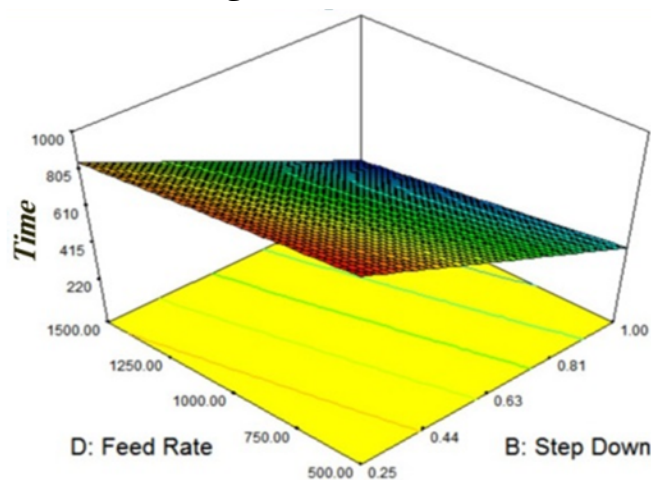
معادله نیروی شکل دهی	نوع
$1842.33 + 54.50A + 184.83B + 12.81C + 141.44D$	Coded
$731.007 + 27.25A + 492.888B + 0.021C + 0.283D$	Actual

جدول ۷- معادلات نهایی زمان شکل‌دهی از مدل رویه پاسخ

معادله زمان شکل‌دهی	نوع
$615 - 305B - 80D - 10BD$	Coded
$1250 - 760B - 0.127D - 0.053BD$	Actual



الف) نیروی شکل‌دهی



ب) زمان شکل‌دهی

شکل ۵- نمودارهای مدل رویه پاسخ برای جواب‌های (نیرو و زمان شکل‌دهی) تحقیق حاصل از اثر متقابل فاکتورها

حوزه روش رویه پاسخ، متشکل از استراتژی تجربی<sup>۱</sup> جهت بررسی متغیرهای مستقل ( $x_i = A, B, C, D$ ) و مدل‌های آماری تجربی<sup>۲</sup> است تا یک نسبت تقریبی مناسب میان جواب‌ها و متغیرهای فرایند بوجود آورد. در جداول (۶) و (۷) ضرایب تخمینی به عنوان ضریب رگرسیون مورد پیش‌بینی در جواب  $y$  نسبت به تغییرات واحد  $x$  می‌باشد. باید توجه داشت که این ضرایب تحت شرایطی بدست می‌آیند که کلیه فاکتورهای باقیمانده ثابت نگه داشته شوند.

<sup>1</sup> Experimental Strategy

<sup>2</sup> Empirical Statistical Modeling

همان گونه که از جدول مذکور مشاهده می شود، بالاترین ضرایب تخمین متعلق به فاکتور گام عمودی (B) می باشد که این امر بیانگر اهمیت زیاد آن بر روی خواص شکل پذیری ورق سه لایه می باشد. در شکل (۵-الف و ب)، نمونه ای از نمودارهای مدل رویه پاسخ برای جواب های بدست آمده تحقیق حاصل از اثر متقابل قطر ابزار (A) و گام عمودی (B) نمایش داده شده است.

### ۳-۳-۶- دستیابی به مقادیر بهینه نیرو و زمان با پارامترهای شکل دهی

در این تحقیق، مقادیر بهینه حاصل از انتخاب فاکتورهای اثرگذار در معادلات رویه پاسخ بر روی نیروی شکل دهی، زمان شکل دهی و تغییرات ضخامت شکل دهی بدست آمد که در جداول (۴-۹)، (۴-۱۰) نتایج ۷ پیش بینی بهینه بدست آمده از مدل رویه پاسخ (با درجه مطلوبیت نزدیک به ۱/۰۰۰) ناشی از انتخاب مناسب فاکتورهای تحقیق نمایش داده شده است. با استفاده از این داده ها می توان محدوده متغیرهای مختلف را تعیین نمود.

جدول ۸- طراحی نقاط بهینه نیروی شکل دهی پارامترهای تحقیق

کد	قطر ابزار (mm)	گام عمودی (mm)	سرعت دورانی (rpm)	پیشروی (mm/min)	نیرو (N)	میزان مطلوبیت
۱	۱۶	۰/۲۵	۸۴۸	۵۰۰	۱۴۵۰	۰/۹۲۸
۲	۱۶	۰/۲۵	۸۰۰	۵۰۰	۱۴۵۰	۰/۹۲۷
۳	۱۶	۰/۲۵	۸۰۰	۵۰۰	۱۴۵۳	۰/۹۲۴
۴	۱۶	۰/۲۵	۱۰۲۹	۵۰۰	۱۴۵۴	۰/۹۲۴
۵	۱۶	۰/۲۵	۹۴۷	۵۰۸	۱۴۵۴	۰/۹۲۳
۶	۱۶	۰/۲۵	۱۰۹۸	۵۰۰	۱۴۵۵	۰/۹۲۲
۷	۱۶	۰/۲۵	۸۰۰	۵۰۰	۱۴۵۷	۰/۹۲۰

جدول ۹- طراحی نقاط بهینه زمان شکل دهی پارامترهای تحقیق

کد	قطر ابزار (mm)	گام عمودی (mm)	سرعت دورانی (rpm)	پیشروی (mm/min)	زمان (Sec)	میزان مطلوبیت
۱	۱۹	۱/۰۰	۱۵۷۸	۱۵۰۰	۲۲۰	۱/۰۰۰
۲	۱۷	۱/۰۰	۸۴۴	۱۵۰۰	۲۲۰	۱/۰۰۰
۳	۱۹	۱/۰۰	۸۵۵	۱۵۰۰	۲۲۰	۱/۰۰۰
۴	۱۸	۱/۰۰	۱۴۴۶	۱۵۰۰	۲۲۰	۱/۰۰۰
۵	۱۷	۱/۰۰	۱۹۲۶	۱۵۰۰	۲۲۰	۱/۰۰۰
۶	۱۸	۱/۰۰	۱۶۵۲	۱۵۰۰	۲۲۰	۱/۰۰۰
۷	۱۷	۱/۰۰	۱۷۷۸	۱۵۰۰	۲۲۰	۱/۰۰۰

#### ۴- نتیجه گیری

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که تغییرات سرعت دورانی، بر نیرو و زمان عملیات شکل‌دهی نقشی ندارد، اما تغییر سرعت پیشروی ماشین CNC شدیداً بر روی نیرو و زمان عملیات شکل‌دهی ورق سه لایه تاثیرگذار بود. همچنین با تغییر میزان گام عمودی ماشین CNC، تاثیر بسیار شدیدی بر نیرو و زمان عملیات شکل‌دهی ایجاد می‌شود البته نتایج مدل رویه پاسخ نیز نشان داد که بالاترین ضرایب تخمین متعلق به فاکتور گام عمودی (B) می‌باشد که نشان دهنده اهمیت این متغیر در پارامترهای شکل‌دهی می‌باشد. مدل رویه پاسخ با انتخاب مناسب فاکتورهای تحقیق، محدوده بهینه‌ای از فاکتورهای اثرگذار شکل‌دهی دارای کمترین نیرو و زمان عملیات شکل‌دهی ورق‌های سه لایه را با درجه مطلوبیت ۱/۰۰۰ تعیین نمود.

#### تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله لازم است که از معاونت پژوهشی دانشگاه کاشان بابت حمایت مالی این مقاله تشکر نمایند. (شماره قرارداد: ۲/۶۸۲۵۸۰)

#### مراجع

- [1] Powell, N., and Andrew, C., "Incremental Forming of Flanged Sheet Metal Components without Dedicated Dies", IMECHE Part , J. Engineering Manufacture, Vol. 206, pp. 41- 47, (1992).
- [2] Sedighi, M., and Honarpisheh, M., "Investigation of Cold Rolling Influence on Near Surface Residual Stress Distribution in Explosive Welded Multilayer", Strength of Materials, Vol. 44, No. 6, pp. 693-698, (2012).
- [3] Akbari Mousavi, S.A.A., and Farhadi Sartangi, P., "Effect of Post-weld Heat Treatment on the Interface Microstructure of Explosively Welded Titanium–Stainless Steel Composite", Materials Science and Engineering A, Vol. 494, pp. 329–336, (2008).
- [4] Hussain, G., Gao, L., and Zhang, Z. Y., "Formability Evaluation of a Pure Titanium Sheet in the Cold Incremental Forming Process", Int J Adv Manuf Technol, Vol. 37, pp. 920–926, (2008).
- [5] Mirnia, M. J., and Dariani, B. M., "Analysis of Incremental Sheet Metal Forming using the Upper-bound Approach", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B, Journal of Engineering Manufacture, Vol. 226, No. 8, pp. 1309-1320, (2012).
- [6] Liu, Z.B., Li, Y.L., Daniel, W.J.T.B., and Meehan, P., "Taguchi Optimization of Process Parameters for Forming Time in Incremental Sheet Forming Process", Materials Science Forum, Vols. 773-774, No. 137143, pp. 773-774, (2014).

- [7] Hamilton, K., and Jeswiet, J., "Single Point Incremental Forming at High Feed Rates and Rotational Speed: Surface and Structural Consequences", *CIRP Annals Manufacturing Technology*, Vol. 59, pp. 311-314, (2010).
- [8] Ghasemi, H., and Solttani, B., "Experimental Investigation on the Effective Parameters on Forming Force, Dimensional Accuracy and Thickness Distribution in Single Point Incremental Forming", *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 1, pp. 89-96, (2014). (In Persian).
- [9] Shanmuganatan, S. P., and Kumar, V. S., "Modeling of Incremental Forming Process Parameters of Al 3003 (O) by Response Surface Methodology", *Procedia Engineering*, Vol. 97, pp. 346– 356, (2014).
- [10] Honarpisheh, M., Abdolhoseini, M. J., and Amini, S., "Experimental and Numerical Investigation of the Hot Incremental Forming of Ti-6Al-4V Sheet using Electrical Current", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 83, No. 9, pp. 2027-2037, (2016).
- [11] Gheysarian, A. and Honarpisheh, M., "Process Parameters Optimization of the Explosive-Welded Al/Cu Bimetal in the Incremental Sheet Metal Forming Process", *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, doi.org/10.1007/s40997-018-0205-6, (2018).
- [12] Gheysarian, A. and Honarpisheh, M., "An Experimental Study on the process parameters of Incremental Forming of Explosively-Welded Al/Cu Bimetal", *Journal of Computational & Applied Research in Mechanical Engineering (JCARME)*, Vol. 7, No. 1, pp. 73-83, (2017).
- [13] Honarpisheh, M., Niksokhan, J., and Nazari, F., "Investigation of the Effects of Cold Rolling on the Mechanical Properties of Explosively-welded Al/St/Al Multilayer Sheet", *Metallurgical Research & Technology*, Vol. 113, No. 1, pp. 105, (2016).
- [14] Asemabadi, M., Sedighi, M., and Honarpisheh, M., "Investigation of Cold Rolling Influence on the Mechanical Properties of Explosive-welded Al/Cu Bimetal", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 558, pp. 144-149, (2012).
- [15] Myers, H. R., and Montgomery, D. C., "*Response Surface Methodology*", John Wiley & SONS, INC, (2002).
- [16] Ambrogio, G., Filice, L., and Micari, F., "A Force Measuring Based Strategy for Failure Prevention in Incremental Forming", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 177, pp. 413-416, (2006).

**Abstract**

Incremental sheet metal forming is one of methods more innovation in science and industrial zone. The purpose of this research is the study of influence of factors such as tool diameter, step down, rotation speed and feed rate on metallurgical properties of explosive-welded Al/Cu/Al multilayer. In order to this purpose, a sample of explosive-welded Al/Cu/Al multilayer was produced. Then, a statistical model (RSM) was used for the experimental plan (with these variables) to determine the runs of experiment (or selected points). Next, forces and times values of sheet metal forming were measured. The experimental results showed that force and time forming of Al/Cu/Al multilayer is highly sensitive to factors like step down and feed rate. Also the most effective coefficient on the incremental forming is belonged to step down factor that showed it is very important in machining parameters.

Finally, by using coefficient estimates of (RSM) model, relation between input variables and response was obtained. Finally, this model was predicted the optimum design points of machining parameters.