

## مطالعه تجربی شکل دهی قطعات برآمدگی مرکزی توسط فرایند شکل دهی افزایشی با الگوی شکل دهی مثبت - منفی

حامد داداشپور<sup>۱</sup>، مصطفی حبیب نیا<sup>۲\*</sup>، اصغرشمسی سربند<sup>۳</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۹/۶، ش ص: ۴۹-۶۶، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۶)

### چکیده

امروزه با پیشرفت تکنولوژی، کنترل حرکت ابزار در فرایند شکل دهی تدریجی، سبب بهبود مکانیزم عملکرد شکل دهی در ساخت و تولید قطعات متقارن و نامتقارن محوری شده است. به طوری که با تعیین الگوی مسیر ایده آل و نحوه شرایط تماسی ابزار با قطعه کار، سبب بهبود رفتار شکل پذیری ورق فلزی، در شکل دهی هندسه اشکال پیچیده مورد استفاده در صنایع هوافضا و خودروسازی گردیده است. در پژوهش حاضر، شکل دهی افزایشی دونقطه‌ای ورق فلزی با بررسی اولویت حرکت ابزار در محدوده مثبت و منفی پروفیل هندسی قالب حفره‌دار مرکزی، مورد مطالعه تجربی قرار گرفته است. الگوی حرکتی ابزار به صورت چرخان و ثابت محور اسپیندل دستگاه (Z) حول پروفیل هندسی قالب، جهت شکل دهی نوع مثبت و منفی مورد بررسی قرار گرفته است. ورق فلزی مورد استفاده در این پژوهش، آلومینیوم AA-1050 با ضخامت 1.5mm می‌باشد. نتایج حاصل از الگوی حرکتی ابزار و اولویت شکل دهی نوع مثبت و منفی پروفیل هندسی قالب نشان داد، ناحیه بحرانی ماکزیمم نازک شدگی منجر به پارگی در تمامی نمونه‌های شکل داده شده ورق فلزی، در محدوده شکل دهی منفی ایجاد شده است. به طوری که الگوی حرکتی ابزار چرخان، سبب کاهش میزان پارگی و نازک شدگی نسبت به ابزار ثابت در ورق فلزی می‌شود. ماکزیمم میزان عمق شکل گرفته شده در ناحیه بحرانی منفی در پروفیل هندسی قالب، لحظه وقوع پارگی ورق فلزی به مقدار  $Z = -25.2\text{mm}$ ، در حالت چرخشی ابزار با الگوی شکل دهی اول منفی - دوم مثبت ایده آل ترین حالت شکل دهی دونقطه‌ای قطعات حفره‌دار مرکزی می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** شکل دهی تدریجی دونقطه‌ای، الگوی مثبت-منفی، آلومینیوم ۱۰۵۰، قالب حفره‌دار مرکزی.

<sup>۱</sup> - دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد واحد ساری، ساری

<sup>۲</sup> - استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد واحد جویبار، جویبار

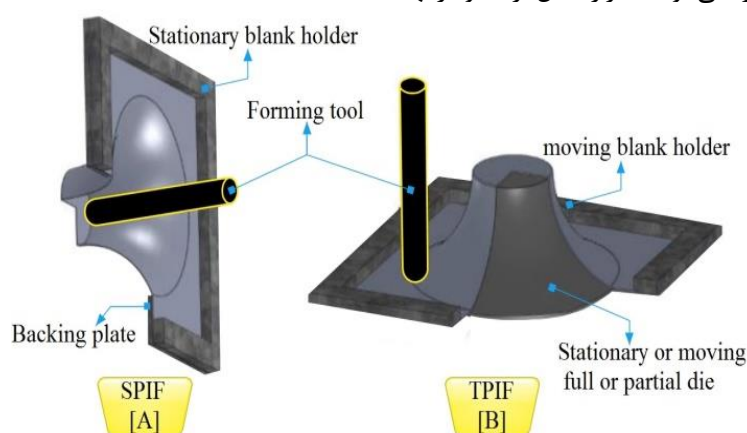
<sup>۳</sup> - استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد واحد ساری، ساری

\*- نویسنده مسئول مقاله: m.habibnia@jouybariau.ac.ir

## پیشگفتار

به محصول نهایی تبدیل می‌شود. این روش معمولاً به دو دسته‌ی شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای<sup>۱</sup> و دو نقطه‌ای<sup>۲</sup> تقسیم‌بندی می‌شود. در شکل (۱) نمایی شکل‌دهی تدریجی تک و دونقطه‌ای نشان داده شده است [۶]. با توجه به اینکه زمان ساخت یک قطعه نسبت به سایر روش‌های شکل‌دهی بالاتر است؛ اما بهترین روش برای تولید نمونه‌ها و قطعات پیچیده در تعداد اندک برای صنایع هوایی، اتومبیل و تجهیزات پزشکی می‌باشد [۷]. شیم و پارک [۸]، در فرایند شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای، میزان شکل‌پذیری ورق آلومینیوم AA-1050 را مورد مطالعه قرار دادند. بدین منظور آن‌ها با تعریف مسیرهای متفاوت حرکت ابزار، تغییر کرنش‌های اصلی را در نمودار FLC مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که میزان شکل‌پذیری ورق نسبت به سایر روش‌های شکل‌دهی بیش‌تر می‌باشد. کیم و پارک [۹]، تأثیر پارامترهای مختلف فرایند شکل‌دهی تدریجی ورق آلومینیوم AA-1050، را به‌صورت تجربی و تحلیل اجزا محدود مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که با کاهش نرخ پیشروی و میزان اصطکاک بین ابزار و ورق، قابلیت شکل‌پذیری ورق افزایش یافت. میکاری و همکاران [۱۰]، به بررسی دقت هندسی و تأثیر پارامترهای فرایند شکل‌دهی تدریجی ورق آلومینیوم AA-1050 پرداختند. برای کاهش میزان خطا و انحراف هندسی، استراتژی‌های متفاوتی از جمله به‌کارگیری فرایند شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای و دونقطه‌ای و همچنین بهینه‌سازی مسیر ابزار مورد مطالعه قرار گرفت.

در دهه‌های اخیر، پیشرفت فناوری موجب تحول اساسی در طراحی و نحوه ساخت محصول شده است. فرآیندهای جدید، ساخت قطعات با طرح‌های پیچیده را ممکن ساخته‌اند. همچنین در صنایع بزرگ، ساخت نمونه اولیه محصول یک مرحله اساسی در توسعه و اصلاح آن پیش از ورود به خط تولید می‌باشد. فضای رقابتی بازار و نیاز به تغییرات سریع در طراحی محصول در کم‌ترین زمان ممکن و با حداقل هزینه موجب شد که تکنولوژی نمونه‌سازی سریع با سرعت بیشتری توسعه یابد. شکل‌دهی تدریجی، یک روش جدید در ساخت قطعات با ورق‌های فلزی است که برای تولید اندک یا نمونه‌سازی سریع در بسیاری از صنایع مورداستفاده قرار می‌گیرد [۱]. ایده اولیه شکل‌دهی تدریجی توسط روناس و لسزاک مطرح شد؛ اما به دلیل عدم توسعه ماشین‌های کنترل عددی در آن زمان، انجام عملیات شکل‌دهی به‌صورت عملی مورد اجرا قرار نگرفت [۲،۳]. با توسعه صنعت و آغاز به کار ماشین‌های کنترل عددی مدرن، این روش مورد توجه محققان قرار گرفت و تحقیقات در این حوزه آغاز شد. در سال‌های اخیر در راستای نیاز صنعت به نمونه‌سازی سریع در حوزه شکل‌دهی ورق‌های فلزی، این فرایند رشد یافت [۴،۵]. شکل‌دهی تدریجی برخلاف دیگر فرآیندها، برای شکل دادن یک ورق فلزی نیاز به قالب خاصی ندارد و از این نظر یک روش انعطاف‌پذیر است. در این روش، ورق فلزی به‌صورت موضعی و با روندی تدریجی توسط ابزار شکل‌گرفته و در نهایت



شکل ۱- شماتیک فرایند شکل‌دهی افزایشی، (A) تک نقطه‌ای، (B)

دونقطه‌ای

شکل‌دهی با اعمال نوسان التراسونیک به مقدار قابل توجهی (بین 33 تا 63.5 درصد) با توجه به شرایط انجام آزمایش، کاهش می‌یابد. میرنیا و ملایی داریانی [۱۸]، به منظور کنترل نازک شدگی در شکل‌دهی هندسه مخروط ناقص آلیاژ آلومینیوم AA-1050، الگوی شکل‌دهی تدریجی چند مرحله‌ای را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها دریافتند که با ارائه یک استراتژی تغییر شکل دومرحله‌ای جدید، بر اساس الگوریتم مناسب ارائه شده، میزان نازک شدگی و زمان انجام فرایند را با طراحی مناسب به شکل‌دهی چندمرحله‌ای می‌توان بهبود داد. همچنین میزان برآمدگی کف ظرف توسط استراتژی طراحی شده، می‌توان به حداقل رساند. زاهدی و همکاران [۱۹]، شکل‌پذیری ورق‌های دولایه آلومینیوم AA-1050 و فولاد کم کربن St12 را توسط فرایند شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای مورد مطالعه عددی و تجربی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که کرنش‌های پلاستیک بیشتری به لایه بیرونی اعمال می‌شود که سبب شکست آن لایه می‌شود. همچنین دریافتند که افزایش شعاع ابزار و اندازه گام عمودی، تأثیر محدودی بر روی زاویه حد شکل‌دهی دارد. بارانی شولی و همکاران [۲۰]، با مطالعه تجربی حد شکل‌دهی آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V، با استفاده از فرایند شکل‌دهی تدریجی گرم الکتریکی پرداختند. آن‌ها دریافتند که دمای شکل‌دهی و مقدار جریان عبوری از مدار، تأثیر زیادی بر شکل‌پذیری ورق داشته است. همچنین دریافتند که با افزایش ضخامت ورق، مقدار جریان لازم به منظور شکل‌دهی افزایش می‌یابد. نیک دوز و همکاران [۲۱]، به بررسی شکل‌پذیری هرم ناقص آلومینیوم AA-1050، پرداختند. در ادامه شکل‌دهی تدریجی تک مرحله را با دو مرحله‌ای مورد مقایسه قرار دادند. مشخص شد که با استراتژی تغییر شکل دومرحله‌ای، می‌توان میزان ضخامت کمینه را دو برابر نسبت به حالت تک‌مرحله‌ای بهبود داد. حبیب نیا و همکاران [۲۲] به بررسی شکل‌پذیری تدریجی ورق آلومینیوم و بررسی پارامترهای این فرآیند از جمله قطر ابزار، زاویه دیواره، سرعت اسپیندل و گام پرداخته است. صفری [۲۳] به بررسی شکل‌دهی تدریجی مثبت و منفی ورق آلومینیوم ۳۱۰۵ پرداخته است و پارامترهای فرآیند مورد نظر را بررسی کرده است.

اغلب پژوهش‌های انجام شده در خصوص شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای و دون نقطه‌ای، در محدوده بررسی

سوریاپراکان [۱۱]، شکل‌پذیری ورق آلومینیوم AA-1050 در حالت تک مرحله‌ای و چند مرحله را مورد بررسی قرار داد. در این پژوهش، تأثیر مسیر ابزار و پیشروی آن در شکل‌دهی ورق مورد بررسی قرار گرفت. همچنین تحلیل میزان شکل‌پذیری ورق از دیگر اهداف این پژوهش بود. کیم و پارک [۱۲]، تأثیر پارامترهای هندسی و فرایندی در شکل‌دهی تدریجی را مورد مطالعه قرار دادند. در این پژوهش با بررسی خاصیت ناهمسانگردی ورق، قابلیت شکل‌پذیری ورق را در آزمایش تجربی و تحلیل اجزای محدود مورد مطالعه قرار دادند. مشخص شد که در یک مقدار معین از اندازه ابزار، با کاهش نرخ پیشروی و میزان اصطکاک، قابلیت شکل‌پذیری ورق افزایش می‌یابد. همچنین به دلیل ناهمسانگردی ورق، این ویژگی در جهات مختلف حرکت ابزار تغییر می‌کند. چاو و همکاران [۱۳]، شکل‌دهی تدریجی دونقطه‌ای یک هرم با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود را بررسی کردند. با توجه به نتایج دریافتند که مقدار نازک شدگی ورق در مسیر حرکت ابزار مارپیچ نسبت به مسیر دایره‌ای شکل، کمتر است. افزایش شعاع ابزار، سبب بهبود توزیع ضخامت و نازک شدگی می‌شود. همیلتون و جسیوت [۱۴]، با استفاده از فرایند شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای، شکل‌دهی یک بیضی را در نرخ‌های پیشروی و سرعت‌های چرخشی بالا توسط طراحی آزمایش مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که توزیع ضخامت و میکرو ساختار مشابه حالتی است که از سرعت‌های پایین استفاده می‌شود. مانکو و آمبروگیو [۱۵]، با استفاده از طراحی آزمایش اثر قطر ابزار، گام عمودی، ضخامت ورق و زاویه دیواره را بر ضخامت کمینه در شکل‌دهی تدریجی یک مخروط از جنس آلومینیوم AA-6082 مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با استفاده از نتایج تجربی دریافتند، قطر ابزار تأثیر چشم‌گیری بر ضخامت کمینه ندارد. فیورنتینو [۱۶]، معیاری برای پیش-بینی شکست در فرآیند شکل‌دهی تدریجی دونقطه‌ای معرفی کرد. این معیار با استفاده از نیروهای شکل‌دهی، پارامترهای فرایندی و دو ثابت متفاوت ماده، میزان تنش‌های وارد بر ورق را نسبت به مقاومت نهایی ماده تخمین می‌زند. آن‌ها دریافتند که این روش برای کنترل فرآیند و بررسی تأثیر اندازه گام عمودی بر شکل‌پذیری ماده مناسب است. پاک و همکاران [۱۷]، با اعمال نوسانات التراسونیک، به بررسی تحلیلی و تجربی فرایند شکل‌دهی افزایشی بر روی ورق آلومینیوم AA-1100 پرداختند. آن‌ها دریافتند که نیروی

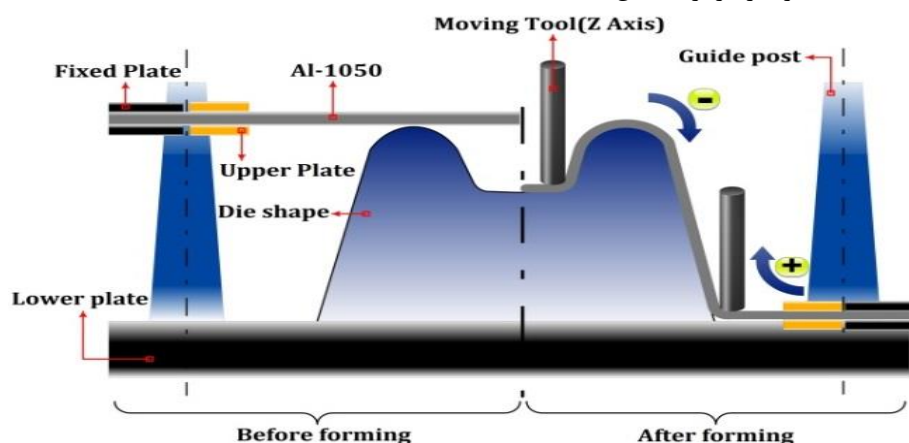
مکانیزم مورد استفاده در این فرایند، با قرارگیری ورق آلومینیوم مابین صفحه نگهدارنده و صفحه بالایی به‌طور کامل عملیات کلمپینگ انجام شده است. قالب حفره‌دار مرکزی بر روی صفحه پایینی به‌طور ثابت قرار گرفته است. ورق فلزی کلمپ شده با اعمال نیروی شکل‌دهی توسط ابزار، در راستای حرکتی بین راهنما، عملیات شکل‌دهی انجام می‌شود.

الگوی مسیر حرکت ابزار متناسب با پروفیل هندسی قالب، با نوع تقدم و تأخر در محدوده شکل‌دهی نوع مثبت و منفی مورد استفاده قرار گرفت. با ایجاد حرکت دورانی ابزار حول محور (Z) و حرکت محیطی در راستای پروفیل قالب حفره‌دار مرکزی، ورق فلزی به تدریج با اعمال نیرو توسط ابزار، شکل پروفیل قالب را به خود می‌گیرد. به‌طوری‌که بررسی حالت‌های ترکیبی الگوی مثبت-منفی، در انجام عملیات شکل‌دهی مناسب بسیار تأثیرگذار می‌باشد. علاوه بر مطالعه عملکرد الگوی شکل‌دهی مثبت و منفی، چرخان و ثابت بودن ابزار حول محور اسپیندل (Z) دستگاه و تنها حرکت گردشی حول پروفیل قالب نقش مهمی در میزان شکل‌پذیری فلزی در شکل‌دهی تدریجی ایجاد می‌نماید. در این پژوهش علاوه بر بررسی شکل‌پذیری تدریجی با الگوی مثبت و منفی، حرکت چرخشی و ثابت بودن ابزار در نحوه شکل‌پذیری ورق مورد مطالعه تجربی قرار گرفته شد. در شکل (۳) نمایی از تجهیزات و قالب شکل‌دهی الگوی مثبت-منفی نشان داده شده است. در این پژوهش، پروفیل قالب حفره‌دار مرکزی، توسط دستگاه (CNC) ساخته شد. مجموعه قالب‌ها، صفحه بالایی و پایینی از جنس (CK45) و پروفیل قالب حفره‌دار مرکزی از جنس (VCN) ساخته شد.

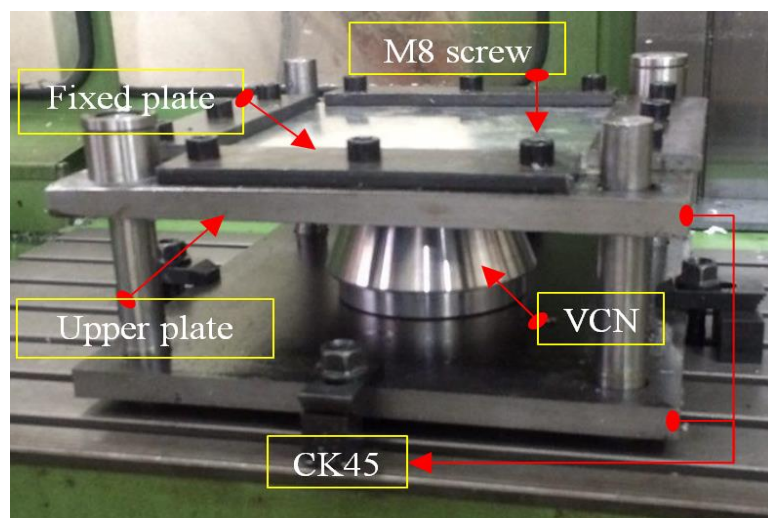
شکل‌پذیری با الگوهای هندسی مختلف مطالعه شده است. تاکنون تحقیقات بسیار محدودی در ساخت و تولید قطعات حفره‌دار مرکزی، توسط فرایند شکل‌دهی افزایشی انجام شده است. مطالعه حرکتی ابزار به‌منظور شکل‌دهی ورق فلزی در پروفیل هندسی قالب حفره‌دار مرکزی (الگوی شکل‌دهی قالب با نوع مثبت و منفی)، از جمله تحقیقات نوین که امروزه مورد توجه محققان قرار گرفته است. در پژوهش حاضر، بررسی شکل‌پذیری ورق فلزی، به‌منظور مطالعه شرایط حرکت ابزار در هندسه قالب حفره‌دار مرکزی با الگوی مثبت و منفی مورد مطالعه تجربی قرار گرفته است. هدف از این پژوهش، تعیین الگوی مناسب شکل‌دهی به‌منظور ساخت و تولید قطعات حفره‌دار مرکزی می‌باشد. پروفیل هندسی قالب‌های حفره‌دار مرکزی، ترکیبی از دو محدوده که شامل ناحیه مثبت و ناحیه منفی می‌باشد. لذا دستیابی به الگوی شکل‌دهی مناسب در تقدم و تأخر حرکت ابزار شکل‌دهی در هندسه قالب، یکی از مهم‌ترین پارامترهای شکل‌دهی محسوب می‌شود. همچنین مطالعه چرخشی و ثابت حرکت ابزار با دو هندسه متفاوت، حول پروفیل هندسی قالب جهت شکل‌دهی از دیگر پارامترهای مورد مطالعه در پژوهش حاضر می‌باشد. نمونه‌های شکل داده شده، با بررسی توزیع ضخامت و معیار خرابی مورد بررسی قرار گرفت.

## مواد و روش‌ها

در این پژوهش، به‌منظور بررسی شرایط الگوی شکل‌دهی تدریجی مثبت-منفی، از ورق آلومینیوم AA-1050 با ضخامت 1.5mm استفاده شد. در شکل (۲)، شماتیکی از عملکرد فرایند شکل‌دهی افزایشی با الگوی شکل‌دهی مثبت-منفی در هندسه قالب حفره‌دار مرکزی نشان داده شده است.



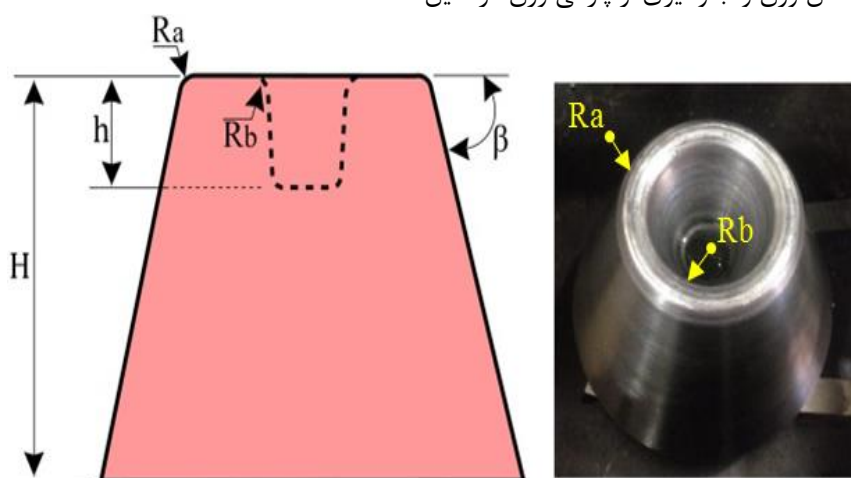
شکل ۲- شماتیک فرایند شکل‌دهی افزایشی با الگوی مثبت-منفی



شکل ۳- مجموعه قالب شکل دهی و اجزای کلمپینگ ورق

فرایند شکل دهی، شعاع ۵ میلی متری در هندسه آن در نظر گرفته شده است.

در شکل (۴) نمایی از ابعاد هندسی قالب مطابق با جدول (۱) نشان داده شده است. در لبه‌ی خارجی ماکزیمم ارتفاع پروفیل قالب و لبه‌ی داخلی حفره دار مرکزی، به منظور سهولت در خم شدن ورق و جلوگیری از پارگی ورق در حین



شکل ۴- نمایی از پروفیل هندسی قالب

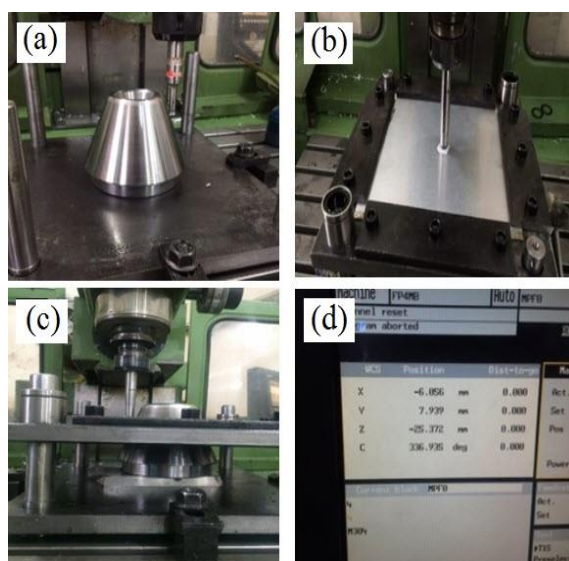
جدول ۱- پارامتر هندسی قالب (mm)

شعاع بیرونی (Ra)	شعاع داخلی (Rb)	ارتفاع حفره (h)	ارتفاع قالب (H)	زاویه خارجی ( $\beta$ )
5	5	40	95	70

در این پژوهش فرایند شکل‌دهی تدریجی با تعیین پارامترها متناسب با الگوهای مثبت و منفی در شکل‌دهی ورق در نظر گرفته شد. به طوری که در نوع الگوی مثبت مطابق با شکل (۶)، ابتدا حرکت محیطی ابزار (در مدل‌های دورانی و ثابت ابزار)، به دور پروفیل هندسی قالب شکل‌دهی با زاویه شیب ۷۰ درجه تا انتهای ارتفاع قالب شکل‌دهی، در راستای محور (Z) حرکت می‌کند. سپس انجام عملیات شکل‌دهی الگوی منفی مطابق الگوی شکل (۷) در پروفیل حفره‌دار مرکزی قالب انجام می‌شود. در الگوی شکل‌دهی منفی، ابتدا حرکت دورانی و ثابت ابزار شکل‌دهی در محدوده محیطی پروفیل حفره‌دار مرکزی قالب با زاویه شیب معکوس نسبت به سطح خارجی، عملیات شکل‌دهی انجام می‌شود. سپس سطوح خارجی زاویه دیواره قالب تا انتهای ارتفاع پروفیل قالب، شکل‌دهی در الگوی مثبت انجام می‌شود.

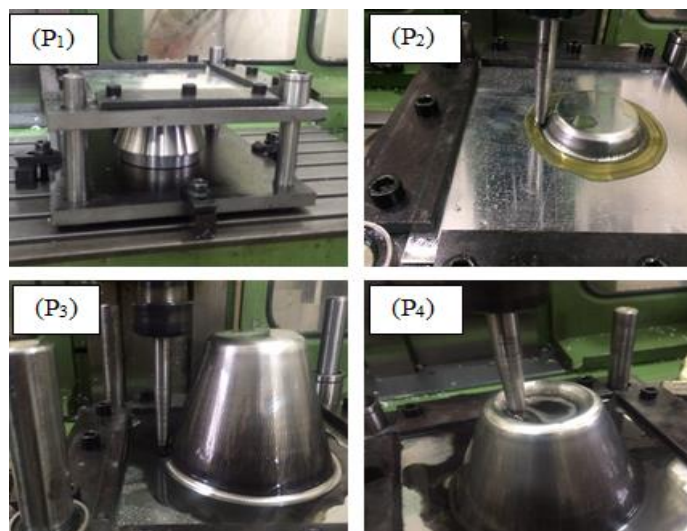
در جدول (۲) شرایط شکل‌دهی تدریجی قالب با الگوی مثبت، منفی نشان داده شده است.

به منظور فراهم کردن حرکت دورانی و چرخشی ابزار در جهت محیطی قالب از یک دستگاه کنترل عددی استفاده شد. از نرم افزار power mill برای استخراج مسیر حرکت ابزار (طول، عرض، ارتفاع و زاویه) و مختصات دهی پروفیل قالب استفاده شد. در شکل (۵) نمایی از دستگاه و نحوه تعیین بررسی پروفیل قالب حفره‌دار مرکزی و بررسی مماسی ابزار با سطح ورق به منظور شروع عملیات شکل‌دهی نشان داده شده است. در ابتدا به منظور آزمایش عملکرد مختصات دهی، بررسی کنترلی سطح تماسی ابزار در پروفیل کامل قالب ساخته شده مورد آزمایش قرار گرفت. به طوری که صحت ابعاد هندسی قالب ساخته شده، مطابق با تلورانس ابعاد هندسی نقشه قالب و صحت سنجی آن مورد بررسی قرار گرفته شد. سپس به منظور تعیین نقطه صفر سطح تماسی ابزار با ورق فلزی کلمپینگ شده در راستای جابجایی ارتفاع در محدوده شکل‌دهی انجام شد. به طوری که توسط دستور مرکز یاب، محور دستگاه با مرکز حفره قالب هم‌مرکز نموده و با تنظیم حرکت دورانی و محوری، در مرحله شروع فرایندی شکل‌دهی افزایشی مثبت-منفی قرار گرفته است.

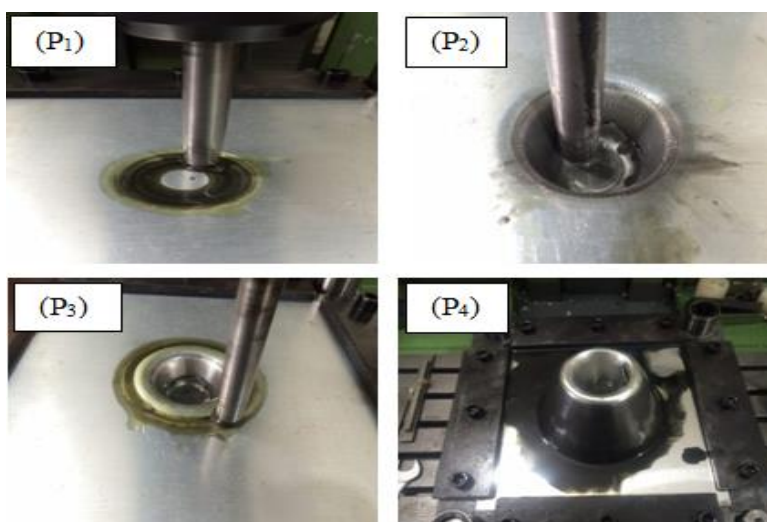


شکل ۵- نحوه انجام آزمایش شکل‌دهی افزایشی، (a) کنترل هندسی قالب توسط ابزار مماسی، (c) کنترل مماسی ابزار با ورق، (d) مختصات دهی توسط نرم‌افزار (power mill)





شکل ۶- الگوی شکل دهی تدریجی مثبت - منفی، (P1) کلمپینگ ورق و آماده شکل دهی، (P2) شروع عملیات شکلی دهی مثبت، (P3) اتمام عملیات شکل دهی مثبت، (P4) انجام شکل دهی تدریجی منفی



شکل ۷- الگوی شکل دهی تدریجی منفی - مثبت، الف) شروع فرایند شکل دهی منفی، ب) اتمام عملیات شکلی دهی الگوی منفی ج) شروع عملیات شکل دهی مثبت، د) اتمام شکل دهی تدریجی مثبت

جدول ۲- پارامترهای فرایندی شکل دهی افزایشی

ابزارهای شکل دهی (T10-T15)	دوران اسپیندل RPM	الگوی شکل دهی
A	400	ابتدا مثبت (خارج)، دوم
B	0	منفی (داخل)
C	400	ابتدا منفی (داخل)، دوم
D	0	ا مثبت (خارج)

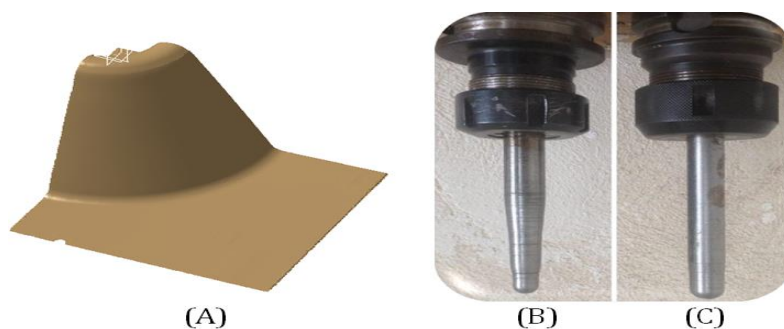
### اندازه‌گیری و نحوه بررسی توزیع ضخامت

در ابتدا تمامی قطعات شکل داده به‌منظور بررسی و مشاهده میزان نازک شدگی از مقطع عرضی تقارن، توسط دستگاه وایرکات برش داده شدند. سپس با مشاهده رفتار نازک شدگی در مقطع، به‌منظور افزایش دقت اندازه‌گیری قطعات شکل داده شده از یک دستگاه اسکرن سه‌بعدی به‌منظور اندازه‌گیری یک‌چهارم مقاطع استفاده شده است. بررسی پارگی در پروفیل‌های شکل داده شده و تشخیص نقاط بحرانی و دقت ابعادی مورد مطالعه قرار گرفت. در این پژوهش، در شرایط مختلف آزمایش‌های تجربی به‌منظور بررسی مقایسه‌ای از پروفیل شکل داده شده، میزان درصد نازک شدگی مطابق با شکل (۹)، با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شده و با دیگر نمونه‌های شکل داده شده مورد مقایسه قرار گرفته است. در این رابطه، میزان ضخامت اولیه ورق برابر  $t_0$  هست. مقدار نازک شدگی در مقطع نقاط اندازه‌گیری ورق شکل داده شده  $t_{min}$  می‌باشد.

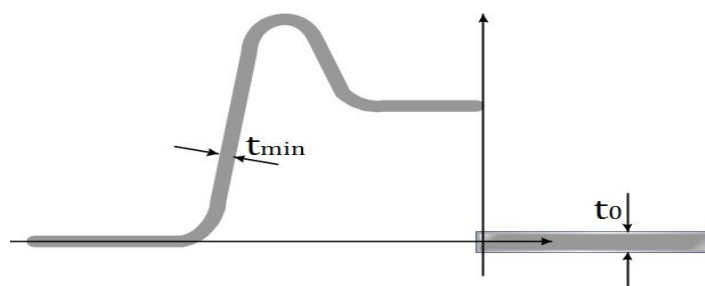
$$\text{درصد نازک شدگی ورق} = \frac{t_0 - t_{min}}{t_0} \times 100 \quad (1)$$

فلزی

با توجه به نوع فرایند شکل‌دهی و اعمال نیرو در تماس سطحی ابزار با ورق، پروفیل هندسی ابزار شکل‌دهی باید به‌گونه‌ای باشد که در مقابل افزایش تماس سطحی با ورق، سایش از سطح ورق و ابعاد هندسی ابزار صورت نگیرد. از طرفی با توجه به استفاده مکرر ابزار شکل‌دهی الگوهای مختلف (چرخش دورانی اسپیندل (S) حول محور (Z) به دور قالب و همچنین حرکت ثابت-بدون چرخش اسپیندل حول محور (Z) به دور قالب) شکل‌دهی تدریجی مثبت-منفی، بایستی دارای مقاومت به خوردگی بالایی داشته باشد. لذا از تغییر ابعاد هندسی ناحیه شعاع گوشه ابزار جلوگیری نماید. بدین منظور ابزارهای شکل‌دهی با شعاع ۱۰ و ۱۵ میلی‌متری (T10-T15) از جنس فولاد (Spk2436) ساخته شده است. به‌طوری‌که از استحکام بالایی برخوردار می‌باشد و اغلب برای ساخت ابزارها و قالب‌های صنعتی در فرآیندهای شکل‌دهی فلزات استفاده از آن استفاده می‌شود. در شکل (۸) نمایی از ابزارهای شکل‌دهی با بررسی مقاطع شکل داده شده از ابر نقاط الگوی یک‌چهارم اندازه‌گیری شده توسط نرم‌افزار نشان داده شده است.



شکل ۸- نمایی از ابزارهای شکل‌دهی تدریجی مثبت-منفی، (A) 1:4 نمای سه‌بعدی، (B) ابزار T10، (C) ابزار T15



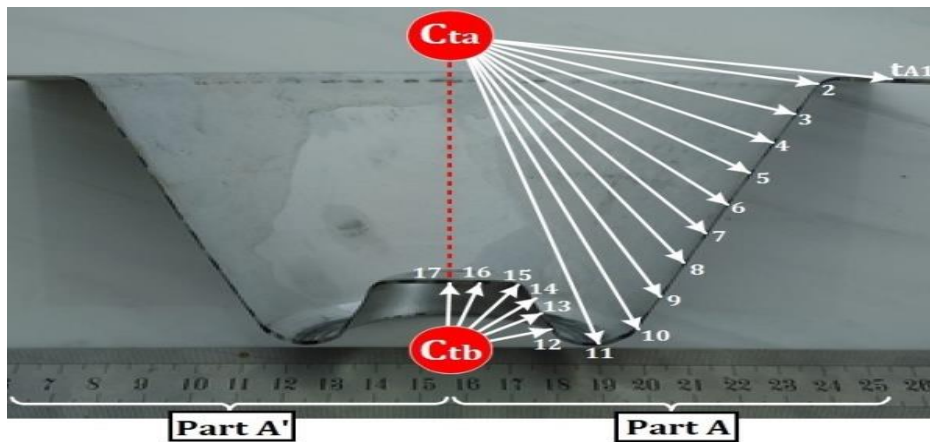
شکل ۹- تعیین درصد نازک شدگی در نقاط پروفیل شکل داده شده



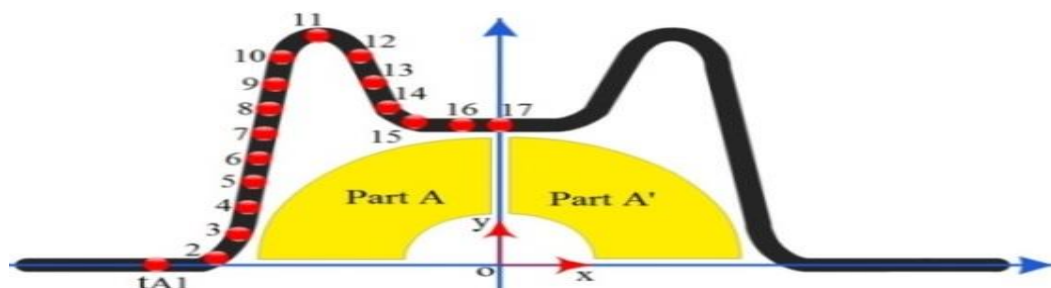
### نتایج و بحث

بررسی الگوهای شکل پذیری تدریجی با تعیین حرکت ابزار (اول مثبت، دوم منفی و بالعکس) به صورت ترکیبی، تأثیر مهمی در تعیین رفتار شکل پذیری قطعات ایجاد می نماید. بررسی پارامترهای فرآیندی، دورانی و ثابت بودن حرکت ابزار شکل دهی (دوران اسپیندل (S)) در راستای محوری (Z) حول پروفیل قالب، میزان پیشروی (f) و مقدار جابجایی ابزار در محور عمودی ( $\Delta Z$ )، نقش عمده ای در تعیین خرابی و پارگی نمونه ها در هندسه ثابت قالب ایجاد می نماید. به گونه ای که نمونه های متقارن محوری شکل داده شده مطابق الگوی شکل (۱۱)، مورد بررسی مقایسه ای قرار گرفته است. مطالعه درصد نازک شدگی در پروفیل شکل داده شده قالب، با توجه به شرایط ابزار چرخان و ثابت، تعیین نواحی بحرانی نازک شدگی از مهم ترین پارامتر بررسی وقوع پارگی در مقاطع شکل داده شده در این پژوهش می باشد.

تعیین نقاط اندازه گیری شده مطابق الگوی شکل (۱۰) محاسبه شده است. بررسی نقاط بحرانی، با میزان درصد نازک شدگی در پروفیل شکل داده شده قالب حفره دار مرکزی به طور مقایسه ای بررسی شد. رفتار توزیع ضخامت ورق شکل داده شده در شرایط فرایندی مختلف آزمایش، یک مطالعه منطقی از شکل پذیری ورق فلزی و دستیابی به نتایج مطلوب شکل دهی می باشد. به طوری که با بررسی یک طرف از نواحی متقارن محوری (Part A) و (Part A')، رفتار شکل پذیری ورق قابل پیش بینی می باشد. محاسبه میزان نازک شدگی توسط ابر نقاط، نواحی بحرانی در شکل دهی قطعات برآمدگی مرکزی، در محدوده شکل دهی مثبت (Cta) و محدوده شکل دهی منفی (Ctb) مورد بررسی قرار گرفته است. به طوری که بررسی رفتار شکل پذیری، نازک شدگی و پارگی، پیش بینی قابلیت شکل پذیری با هندسه ای مشابه قابل حدس اولیه می باشد. از طرفی امکان سنجی این نوع شکل پذیری با تعیین رفتار خرابی، قابلیت تولید قطعات برآمدگی مرکزی تا مقدار عمق ایده آل توسط این روش قابل تشخیص می باشد.



شکل ۱۰- الگوی اندازه گیری شکل دهی افزایشی مثبت (Cta) و محدوده شکل دهی منفی (Ctb)



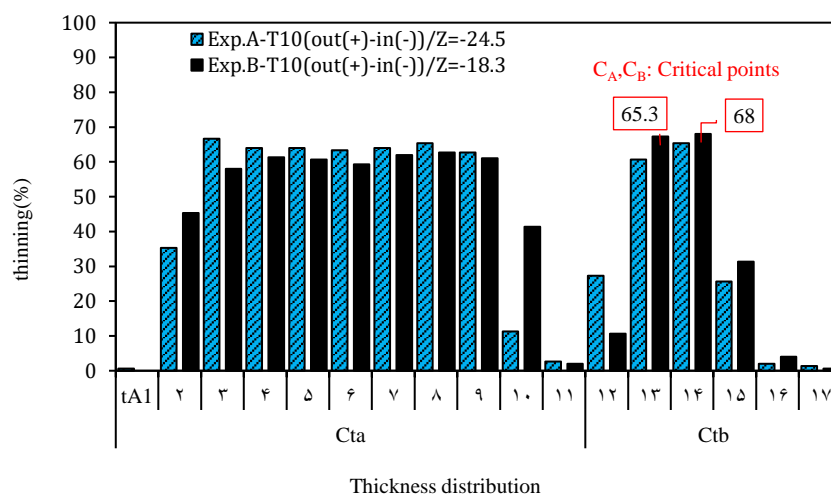
شکل ۱۱- تعیین الگو ثابت به منظور بررسی مقایسه ای میزان درصد نازک شدگی از پروفیل شکل داده شده

توسط ابزار (T10)، به صورت چرخان ( $S:1000\text{rpm}$ ) و ثابت ( $S:0\text{rpm}$ ) حول محور ( $Z$ ) نشان داده شده است. بررسی‌ها نشان داد که مقدار درصد نازک شدگی محدوده ( $C_{ta}$ )، در الگوی شکل‌دهی اول منفی، دوم مثبت در شکل (۱۲) نسبت به حالت شکل‌دهی الگوی شکل‌دهی اول مثبت، دوم منفی در شکل (۱۳)، از کاهش نسبتاً خوبی برخوردار می‌باشد. به طوری که مقدار نازک شدگی در این محدوده در نوع ابزار ثابت مدل ( $Exp.C$ )، از یکنواختی مقدار نازک شدگی کمینه‌ای برخوردار می‌باشد. همچنین با بررسی نواحی بحرانی، منجر به پارگی در محدوده ( $C_{tb}$ ) حالت‌های متغیر الگوی ابزار مثبت-منفی، نشان داد که ماکزیمم میزان نازک شدگی بحرانی در حالت حرکت ابزار الگوی اول منفی، دوم مثبت مطابق شکل (۱۲) به مراتب بیش‌تر از حالت الگوی چرخشی و ثابت ابزاری اول مثبت، دوم منفی می‌باشد. به طوری که میزان نازک شدگی بیشینه در مدل ( $Exp.A$ ) نسبت به ( $Exp.C$ )، در شرایط متناسب ابزار چرخشی با تغییر جهت الگو به میزان ۱۱ درصد کاهش و ۱/۱ میلی‌متر افزایش عمق تا لحظه وقوع پارگی شکل گرفته شده است. همچنین در حالت نمونه ( $Exp.D$ )، نسبت به ناحیه بحرانی ( $Exp.B$ ) در محدوده ( $C_{tb}$ )، ماکزیمم مقدار نازک شدگی به میزان ۳/۳ درصد افزایش یافته و با عمق شکل داده شده پارگی بیشتری تا ۳/۷ میلی‌متر در ناحیه برآمدگی مرکزی الگوی منفی اتفاق می‌افتد.

### تأثیر شکل‌دهی تدریجی مثبت-منفی توسط ابزار (T10)، در مدل ابزار چرخان و ثابت

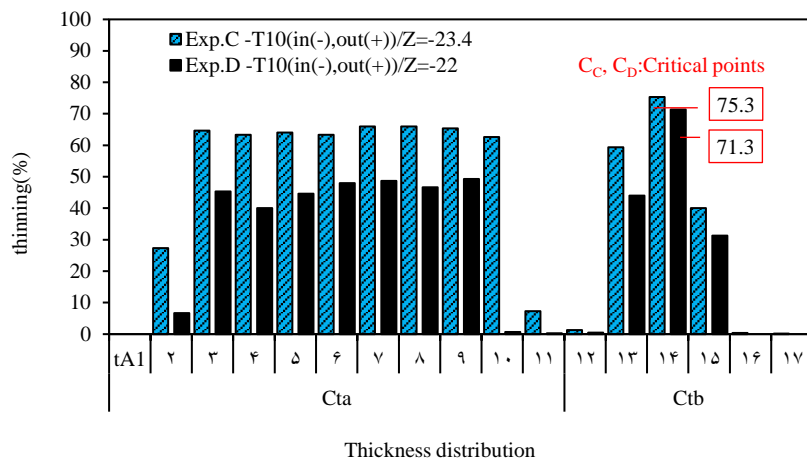
در شکل (۱۲) بررسی مقایسه‌ای میزان نازک شدگی تدریجی اول (مثبت) و دوم (منفی) نشان داده شده است. نتایج حاصل از الگوی شکل‌دهی تدریجی نشان می‌دهد که مقدار درصد نازک شدگی در نقاط بحرانی ( $C_{ta}$ ) در حالت ابزار چرخشی نسبت به ابزار ثابت افزایش یافته است. همچنین بررسی‌ها نشان داد که ماکزیمم نازک شدگی بحرانی در منطقه ( $C_{tb}$ ) از حساسیت بیشتری نسبت به محدوده ( $C_{ta}$ ) برخوردار می‌باشد. به طوری که ماکزیمم تنش کششی، منجر به خرابی نمونه در حالت شکل‌پذیری منفی در محدوده بحرانی ( $C_A, C_B$ ) اتفاق می‌افتد. الگوهای شکل‌دهی تدریجی با تقدم در حرکت الگوی ابزار شکل‌دهی (مثبت-منفی) با شعاع ۱۰ میلی‌متری نقش مهمی در میزان عمق شکل‌گیری و خرابی در نمونه ایجاد می‌نماید. رفتار نازک شدگی بحرانی، منجر به پارگی در الگوی اول مثبت، دوم منفی در ابزار چرخان از مقدار ۶۵/۳ درصد نسبت به حالت ابزار ثابت به مقدار ۶۸ درصد افزایش یافته است. به طوری که علاوه بر بهبود کاهش میزان نازک شدگی، افزایش عمق شکل‌گیری در نوع ابزار چرخان نسبت به الگوی شکل‌دهی ابزار ثابت، به مقدار ۶/۲ افزایش یافته است.

در شکل (۱۳) بررسی مقایسه‌ای مقدار درصد نازک شدگی حاصل از شکل‌پذیری تدریجی اول (مثبت) و دوم (منفی)



شکل ۱۲- بررسی مقایسه‌ای توزیع ضخامت از مسیر نقاط پروفیل شکل داده‌شده در الگوی شکل‌دهی اول مثبت - دوم منفی

توسط ابزار شکل‌دهی T10 با حرکت چرخشی ( $Exp.A$ ) و ثابت ( $Exp.B$ )



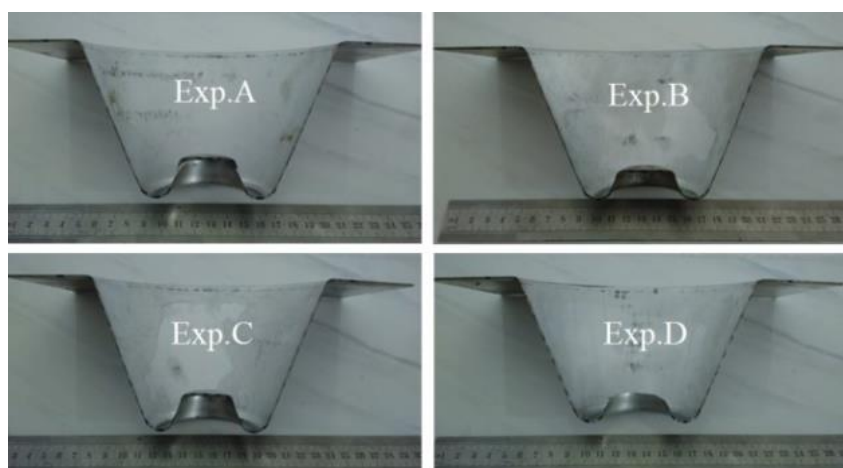
شکل ۱۳- بررسی مقایسه‌ای توزیع ضخامت از مسیر نقاط پروفیل شکل داده شده در الگوی شکل‌دهی اول منفی- دوم مثبت توسط ابزار شکل‌دهی T10 با حرکت چرخشی (Exp.C) و ثابت (Exp.D)

در شکل (۱۴) نمایی از قطعات شکل داده شده با استفاده از فرایند شکل‌دهی تدریجی مثبت، منفی توسط ابزار ثابت و چرخان ۱۰ میلی‌متری، با حالت‌های متغیر چرخش ابزار حول پروفیل شکل‌دهی قالب برآمدگی مرکزی نشان داده شده است.

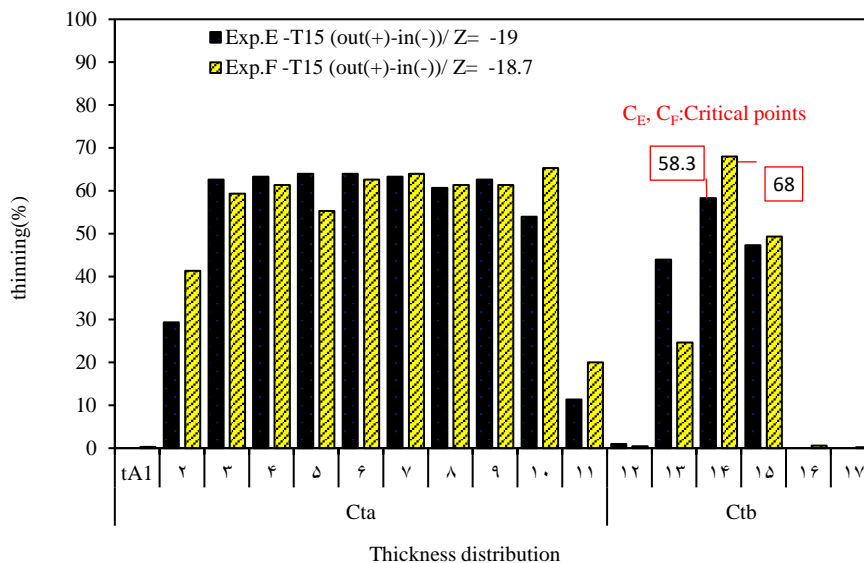
در شکل (۱۵) بررسی مقایسه‌ای درصد نازک شدگی الگوی شکل‌دهی مثبت- منفی در حالت ابزار چرخان و ثابت با شعاع

۱۵ میلی‌متری نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که رفتار نازک شدگی در منطقه (Cta) در الگوهای شکل‌دهی حالت‌های ابزار چرخان و ثابت حول پروفیل قالب، متناسب با یکدیگر می‌باشند. مقدار درصد نازک شدگی در محدوده بحرانی منجر به پارگی (Ctb)، در ابزار ثابت در ماکزیمم مقدار ۶۸٪ دارای بیشترین مقدار نازک شدگی نسبت به الگوی ابزار چرخان با درصد نازک شدگی بیشینه به مقدار ۵۸/۳٪ می‌باشد. از طرفی نتایج نشان داد که میزان عمق شکل‌گیری در ناحیه برآمدگی مرکزی در الگوی ابزار چرخان نسبت به ثابت به مقدار ۳٪ افزایش یافته است.

#### تأثیر شکل‌دهی تدریجی مثبت-منفی توسط ابزار (T15)، در مدل ابزار چرخان و ثابت



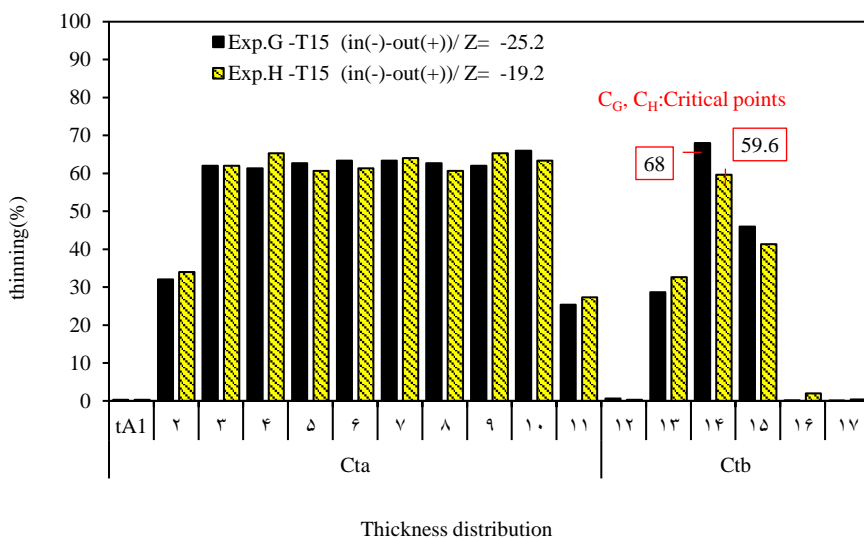
شکل ۱۴- شکل‌دهی افزایشی توسط ابزار T10، (Exp.A) اول مثبت- دوم منفی/ حرکت چرخشی ابزار، (Exp.B) اول مثبت- دوم منفی/ حرکت ابزار ثابت حول پروفیل قالب، (Exp.C) اول منفی- دوم مثبت/ حرکت چرخشی ابزار، (Exp.D) اول منفی- دوم مثبت/ حرکت ابزار ثابت حول پروفیل قالب



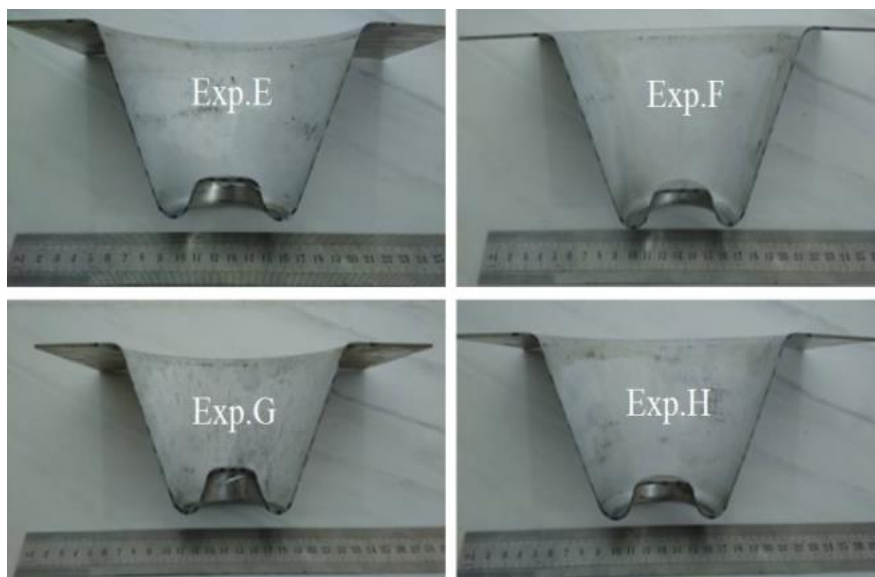
شکل ۱۵- بررسی مقایسه‌ای توزیع ضخامت از مسیر نقاط پروفیل شکل داده‌شده در الگوی شکل‌دهی اول مثبت - دوم منفی توسط ابزار شکل‌دهی T15 با حرکت چرخشی (Exp.E) و ثابت (Exp.F)

منجر به پارگی و خرابی در ناحیه شکل‌دهی منفی در بیش-ترین میزان عمق ۲۵/۳ میلی‌متر در الگوی ابزار چرخان ایجاد شده است. در شکل (۱۷) نمونه قطعات شکل داده شده در شرایط فرآیندی آزمایش با استفاده از فرایند شکل‌دهی تدریجی مثبت، منفی توسط ابزار ثابت و چرخان ۱۵ میلی‌متری، باحالت‌های متغیر چرخش ابزار حول پروفیل شکل‌دهی قالب برآمدگی مرکزی نشان داده شده است.

در شکل (۱۶) نمایی از بررسی مقایسه توزیع ضخامت در الگوی شکل‌دهی تدریجی اول منفی، دوم مثبت نشان داده شده است. بررسی توزیع ضخامت در نواحی نقاط محدوده (Cta) نشان می‌دهد که چرخش ابزار و ثابت بودن آن، رفتار نازک شدگی (Exp.G) مشابه (Exp.h) می‌باشد. همچنین محدوده درصد نازک شدگی آن مطابق باحالت الگوی ابزار اول مثبت، دوم منفی در نمونه‌های (Exp.E) و (Exp.F) می‌باشد. در محدوده بحرانی (Ctb)، ماکزیمم نازک شدگی،



شکل ۱۶- بررسی مقایسه‌ای توزیع ضخامت از مسیر نقاط پروفیل شکل داده‌شده در الگوی شکل‌دهی اول منفی - دوم مثبت توسط ابزار شکل‌دهی T15 با حرکت چرخشی (Exp.G) و ثابت (Exp.H)

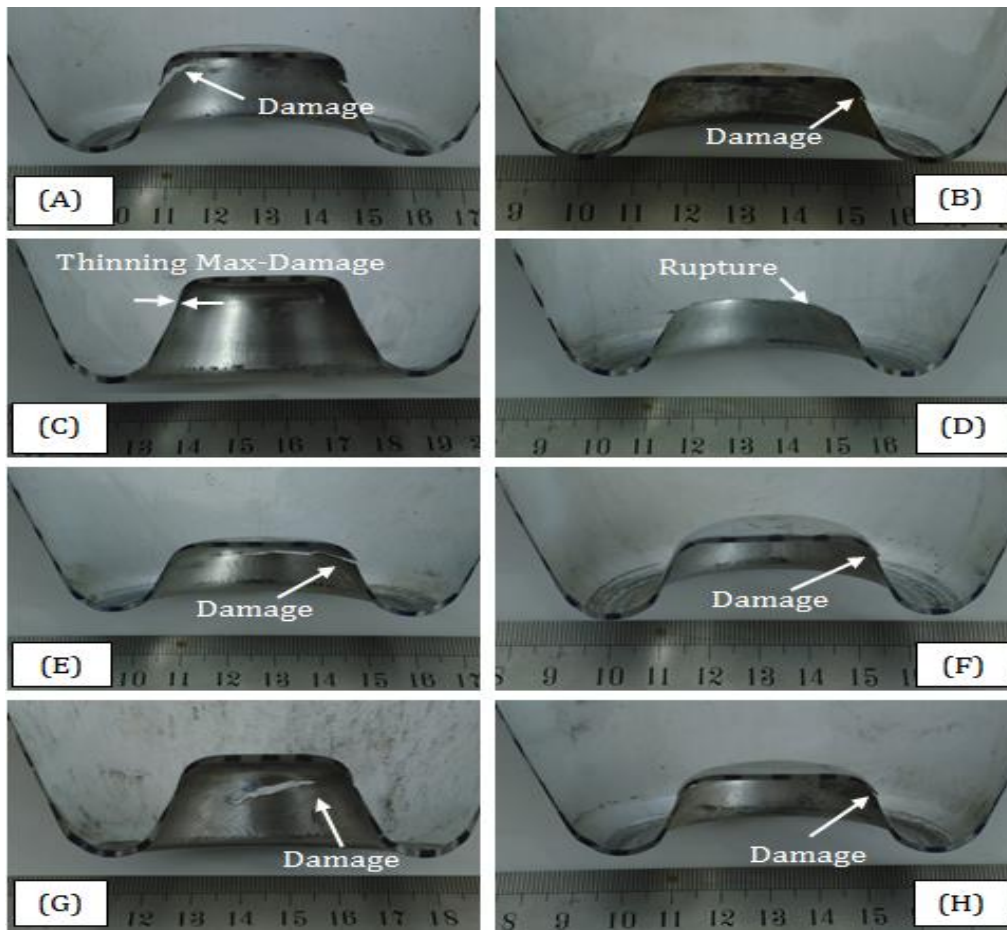


شکل ۱۷- شکل دهی افزایشی توسط ابزار (Exp.A, T15) اول مثبت-دوم منفی / حرکت چرخشی ابزار، (Exp.B) اول مثبت-دوم منفی / حرکت ابزار ثابت حول پروفیل قالب، (Exp.C) اول منفی-دوم مثبت / حرکت چرخشی ابزار، (Exp.D) اول منفی-دوم مثبت / حرکت ابزار ثابت حول پروفیل قالب

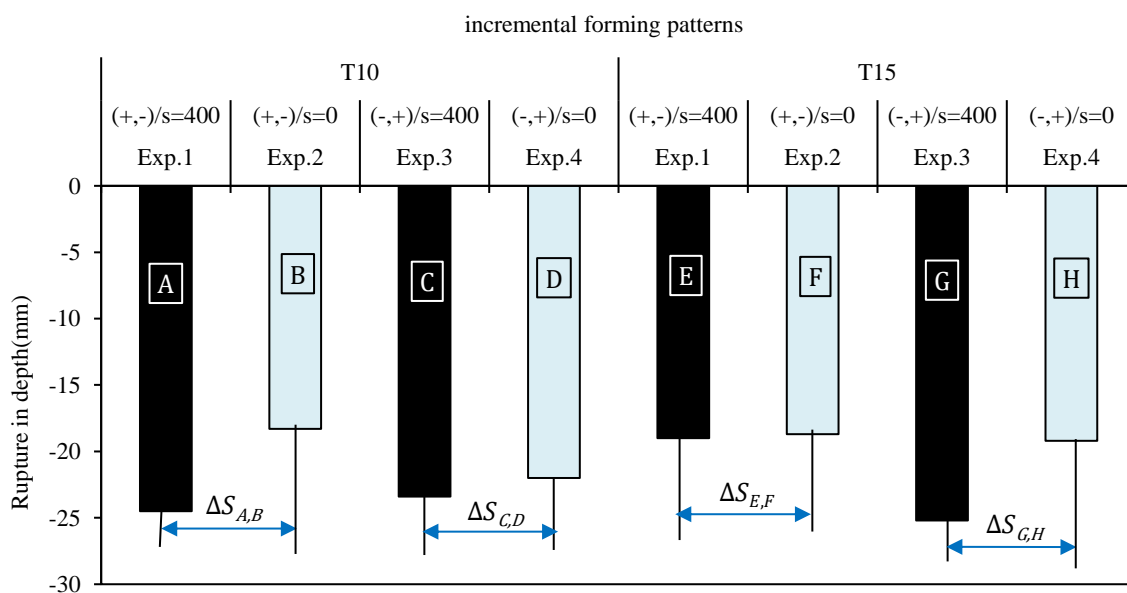
تدریجی اول مثبت، دوم منفی (A)، رفتار شکل دهی مطلوب تری نسبت به ابزار (T15) در الگوی متناسب با همین نوع در نمونه (E) ایجاد می نماید. از طرفی در نوع ابزار (T15)، در نمونه (G) با الگوی شکل دهی اول منفی-دوم مثبت، مقدار عمق شکل دهی به مراتب نسبت به ابزار (T10) در نمونه (C) بهبود یافته است. نمونه (G) با الگوی ابزار چرخان (T10) اول مثبت-دوم منفی، دارای ماکزیمم مقدار عمق شکل گیری تا لحظه ی قبل از وقوع پارگی در پروفیل برآمدگی مرکزی شکل داده است. در شکل (۱۹) هر یک از نمونه های تجربی (Exp: A, B, C, D, E, F, G)، مقدار عمق شکل دهی، منجر به پارگی در الگوی شکل دهی نوع منفی نشان داده شده است. نتایج تجربی نشان داد که ماکزیمم عمق شکل گیری در حفره قالب مرکزی تا لحظه ی وقوع پارگی به ترتیب در هر یک از الگوهای انجام آزمایش دارای بیش ترین میزان عمق شکل گیری تا لحظه وقوع پارگی می باشد. در نمونه G، ابزار چرخان (T15)، شکل دهی تدریجی اول منفی-دوم مثبت،  $Z = -25.2$  در نمونه A، ابزار چرخان (T10)، شکل دهی تدریجی اول مثبت-دوم منفی،  $Z = -24.5$  در نمونه C، ابزار چرخان (T10)، شکل دهی تدریجی اول منفی-دوم مثبت،  $Z = -23.4$

### بررسی پارگی توسط ابزارهای چرخان و ثابت در شکل دهی تدریجی مثبت-منفی

نتایج حاصل از این پژوهش با بررسی شکل پذیری تدریجی مثبت، منفی نشان داد که در الگوی شکل دهی منفی میل به پارگی در ورق را افزایش می دهد. به طوری که در هیچ یک از نمونه ها شکل داده شده، پارگی در ناحیه شکل دهی مثبت ایجاد نشده است. در شکل (۱۸) مقایسه میزان عمق شکل گیری تا لحظه وقوع پارگی توسط ابزارهای شکل دهی (T10) و (T15) نشان داده شده است. ماکزیمم عمق ایجاد شده در شکل دهی الگوی منفی تا لحظه وقوع پارگی در هر یک از روش های انجام شکل دهی ابزار چرخان و ثابت متفاوت می باشد. نتایج نشان داد که رفتار شکل پذیری در هر یک از نمونه ها، عامل چرخان و ثابت بودن ابزار ( $\Delta S$ ) حول پروفیل قالب، نقش مهمی در ماکزیمم مقدار عمق شکل گیری ایجاد می نماید. به طوری که عامل چرخش ابزار حول محور (Z)، جهت شکل دهی ناحیه برآمدگی مرکزی، سبب بهبود میزان عمق شکل گیری نسبت به حالت ابزار ثابت شده است. در این میان رفتار شکل پذیری ایده آل تا لحظه قبل از وقوع پارگی در نوع ابزار (T10)، در الگوی شکل دهی



شکل ۱۸- مناطق بحرانی قطعات شکل داده شده در الگوی مثبت- منفی، استفاده از ابزار سرکروی ۱۰ میلی‌متر، [A]{+,-}/S:400, B){+,-}/S:0, C){- ,+}/S:400, D){- ,+}/S:0}، استفاده از ابزار سرکروی ۱۵ میلی‌متر [E){+,-}/S:400, F){+,-} /S:0 G){- ,+}/S:400, H){- ,+}/S:0}

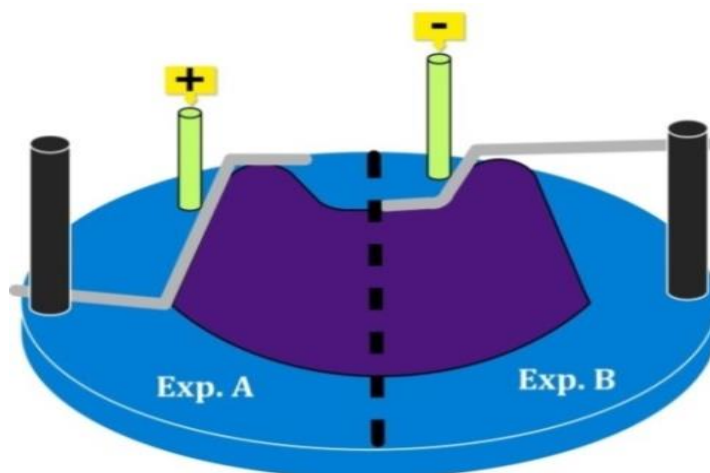


شکل ۱۹- بررسی ایجاد پارگی در مقاطع شکل‌دهی افزایشی



نشان داد که رفتار شکل‌پذیری در شکل‌دهی تدریجی با الگوی منفی تا ارتفاع شکل‌گیری بیشتری قابل انجام است. وقوع پارگی در ابزار (T15) نشان داد که رفتار شکل‌پذیری در الگوی منفی نمونه (E) با ارتفاع شکل‌گیری (Z=-19) در حالت مقایسه‌ای با نمونه (F) با ارتفاع شکل‌گیری (Z=-18.7) رفتار شکل‌پذیری الگوی ابزار ثابت و چرخان در شکل‌دهی مثبت (اول) - منفی (دوم) تفاوت زیادی در لحظه شروع به پارگی ندارد. بلکه ناحیه پارگی حول حرکت ابزار دارای مقدار بیشتری می‌باشد.

شکل‌دهی تدریجی با الگوی مثبت، منفی در پروفیل قالب برآمدگی مرکزی مطابق شکل (۲۰) در پژوهش انجام شد. در نمونه (A) با ارتفاع شکل‌گیری (Z=-24.5) در حفره قالب برآمدگی، در مقایسه‌ای با نمونه (B) با ارتفاع شکل‌گیری (Z=-18.3)، رفتار شکل‌پذیری بیش‌تر و در نهایت مشاهده پارگی در مقطع تا ارتفاع بیشتری مشاهده شد. همچنین در نمونه (C) ابزار چرخان (T10) با ارتفاع شکل‌گیری (Z=-23.4) در حالت مقایسه‌ای با نمونه (D) با ارتفاع شکل‌گیری شروع به پارگی (Z=-22) در الگوی ابزار ثابت،



شکل ۲۰- شکل‌دهی افزایشی با الگوی مثبت - منفی

بررسی نازک شدگی و مشاهده پارگی در مقطع شکل داده شده در تمامی الگوهای شکل‌دهی مثبت-منفی، ابزار چرخان و ثابت نشان داد که بیش‌ترین نازک شدگی منجر به پارگی در مقاطع حفره داخلی (در شکل‌دهی نوع منفی) با شیب معکوس نسبت به سطح بیرونی ایجاد شده است.

- ❖ بررسی‌ها نشان داد، الگوی شکل‌دهی اول منفی-دوم مثبت در شکل‌دهی تدریجی، رفتار شکل‌پذیری در پروفیل قالب حفره‌دار مرکزی با افزایش قطر ابزار سرکروی، میزان شکل‌پذیری ورق افزایش می‌یابد.
- ❖ نتایج نشان داد که اثر ابزار چرخشی در شکل‌دهی تدریجی مثبت-منفی، نقش مهمی در میزان ارتفاع شکل‌گیری و وقوع پارگی دارد. به طوری که پارگی در نمونه‌ها توسط ابزار شکل‌دهی بدون چرخش (ثابت)، به مراتب زودتر از نوع ابزار چرخان در شکل‌دهی تدریجی الگوی قالب منفی ایجاد شده است.
- ❖ در تمامی نمونه‌های شکل‌دهی تدریجی مثبت-منفی الگوی ابزار ثابت، میزان عمق شکل داده شده در

## نتیجه‌گیری

در این پژوهش بررسی امکان شکل‌دهی قطعات حفره‌دار مرکزی با کمک فرآیند شکل‌دهی افزایشی ترکیبی مثبت-منفی مورد مطالعه تجربی قرار گرفت. اثر برخی از پارامترهای فرایندی (تقدم و تاخر حرکت ابزار در هندسه پروفیل قالب، چرخان و ثابت بودن ابزار حول پروفیل هندسی قالب) در هندسه ثابت قالب حفره‌دار مرکزی (پروفیل قالبی با دو هندسه ترکیبی مثبت-منفی) بررسی شده است. در این پژوهش بررسی امکان شکل‌پذیری ورق در پروفیل قالب حفره‌دار مرکزی و مطالعه تجربی معیار خرابی در شکل‌دهی مثبت-منفی قطعات متقارن محوری با زاویه شیب معکوس می‌باشد. هدف اصلی این پژوهش، تعیین الگوی مناسب شکل‌دهی نوع مثبت-منفی، در شکل‌دهی قطعات حفره‌دار مرکزی توسط فرایند شکل‌دهی افزایشی می‌باشد. ورق مورد استفاده در این پژوهش از آلیاژ آلومینیوم AA-1050 با ضخامت ۱/۵ میلی‌متر است. نتایج تجربی به دست آمده از این پژوهش در زیر شرح داده شده است.

برعکس، دارای شکل‌پذیری بیش‌تر ورق در پروفیل قالب حفره‌دار مرکزی می‌باشد.

❖ با کاهش شعاع ابزار سرکروی، اگرچه میزان نازک‌شدگی یکنواخت‌تری در زاویه دیواره الگوی منفی ایجاد می‌شود؛ اما پارگی در عمق شکل‌دهی کم‌تر اتفاق می‌افتد.

حفره قالب (شکل‌دهی منفی) نسبت به الگوی ابزار چرخان دارای ارتفاع شکل‌پذیری کم‌تر و لحظه وقوع پارگی به‌مراتب زودتر اتفاق افتاده است.

❖ تأثیر ابزار چرخان (T10) در الگوی شکل‌دهی اول مثبت-دوم منفی، ارتفاع شکل داده‌شده ورق در حفره قالب تا لحظه وقوع پارگی، در شکل‌دهی محدوده منفی قالب تا عمق بیشتری نسبت به الگوی شکل‌دهی اول مثبت-دوم منفی ابزار (T15) می‌باشد.

❖ رفتار شکل‌پذیری ورق تا لحظه وقوع پارگی در الگوی شکل‌دهی اول منفی-دوم مثبت در ابزار چرخان (T15)، بهتر از حالت مشابه شکل‌دهی در ابزار (T10) می‌باشد. به‌طوری‌که رفتاری مشابه در عمق شکل‌گیری شده الگوی منفی، متناسب با شکل‌دهی اول مثبت-دوم منفی در ابزار (T10) ایجاد می‌نماید.

❖ نتایج نشان می‌دهد که الگوی ابزار چرخان در هر یک از حالت‌های شکل‌دهی اول مثبت-دوم منفی و

### References:

1- L. Van Sy, "Modeling of single point incremental forming process for metal and polymeric sheet", University of padua, Ph.D. Thesis, 2009.

۲- محمدرضا ساختمانیان، محمد هنرپیشه و سعید امینی، بررسی تأثیر ارتعاشات فراصوت بر خواص مکانیکی ورق دو لایه فولاد کم کربن تیتانیوم خالص در فرآیند شکل‌دهی افزایشی، مجله مواد نوین/ جلد ۸/ شماره ۴/ تابستان ۱۳۹۷.

3- E. Leszak, "Apparatus and process for incremental dieless forming", Google Patents, 1967.

4- K. Kitzawa, "Incremental Sheet Metal Stretch-Expanding with CNC Machine Tools", In Proc. of the 4th ICTP conference, 1993.

5- N. Powell and C. Andrew, "Incremental forming of flanged sheet metal components without dedicated dies", In Proc. of the IMechE, Journal of Engineering Manufacture - Part B, vol. 206, pp. 41-47, 1992.

6- I. Paniti1, J. Somló "Novel Incremental Sheet Forming System with Tool-Path Calculation Approach", Acta Polytechnica Hungarica 11(7):43-60 · January 2014.

7- C. Henrard, " Numerical Simulations of the Single Point Incremental Forming Process", Universite de Liege, Ph.D. Thesis, 2008.

8- M. S. Shim and J. J. Park, "The formability of aluminium sheet in incremental forming", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 113, p.p. 654-658, 2001.

9- Y.H. Kim, J.J. Park, "Effect of process parameters on formability in incremental forming of sheet metal", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 130-131, No.2, pp. 42-46, 2002.

10- F. Micari, G. Ambrogio, and L. Filice, "Shape and dimensional accuracy in Single Point Incremental Forming: State of the art and future trends", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 191, p.p. 390-395, 2007.

- 11- P. Suriyapraikan, "Single Point Incremental Forming and Multi-Stage Incremental Forming on Aluminium Alloy 1050", Thammasat University, Master Thesis, 2013.
- 12- Y.H. Kim, J.J. Park, "Effect of process parameters on formability in incremental forming of sheet metal", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 130-131, No.2, pp. 42-46, 2002.
- 13- L. Jun-chao, L.Chong, Z. Tong-gui, "Thickness distribution and mechanical property of sheet metal incremental forming based on numerical simulation", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 22, Suppl.1, pp. s54-s60, 2012.
- 14- K. Hamilton and J. Jeswiet, "Single point incremental forming at high feed rates and rotational speeds: Surface and structural consequences", *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 59(1), p.p. 311-314, 2010.
- 15- G. L. Manco, G. Ambrogio, "Influence of thickness on formability in 6082-T6", *International Journal of Material Forming*, Vol. 3, Suppl.1, pp.983-986, 2010.
- 16- A. Fiorentino, "Force-based failure criterion in incremental sheet forming", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 68, p.p. 557-563, 2013.
- 17- A. Pak, H. Deilami Azodi, M. Mahmoudi, Investigation of Ultrasonic assisted incremental sheet metal forming process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 11, pp. 106-114, 2014 (In Persian).
- 18- M. J. Mirnia, B. Mollaei Dariani, An investigation on multistage incremental forming to control thinning in a truncated cone of an aluminum alloy sheet, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 14, pp. 262-270, 2015 (In Persian).
- 19- A. Zahedi, B. Mollaei-Dariani, M. R. Morovvati, Numerical and experimental investigation of single point incremental forming of two layer sheet metals, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 14, pp. 1-8, 2015 (In Persian).
- 20- A. Barani Shooli, S. Amini Nahjafabadi, M. Farzin, Experimental Formability Investigation of Titanium Alloy in Hot Incremental Sheet Forming Process, *Modares Mechanical Engineering* Vol. 15<sup>ā</sup> No. 6, pp. 107-114, 2015 (In Persian).
- 21- A. H. Nikdooz, M. J. Mirnia, H. Baseri, Study of formability of aluminum truncated pyramid in single-stage and two-stage incremental sheet forming, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 5, pp. 210-220, 2016 (in Persian).
- 22- Seyed Ali Asghar Asghari, Asghar Shamsi Sarband and Mostafa Habibnia, Optimization of multiple quality characteristics in two-point incremental forming of aluminum 1050 by grey relational analysis, *Proc IMechE Part C*, 2017.
- 23- M. Safari, Two Point Incremental Forming of a Complicated Shape with Negative and Positive Dies, *IJMF, Iranian Journal of Materials Forming*, Vol. 4, No. 2, pp 51-61, Printed in The Islamic Republic of Iran, 2017.

