



## تعیین منحنی حد شکست شکل دهی در شکل دهی تدریجی تک نقطه ای برای آلیاژ آلومینیوم ۳۱۰۵

سینا داودی<sup>۱</sup>، ابولفضل طاهرخانی<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، تاکستان، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، تاکستان، ایران

[sinadavoodi69@gmail.com](mailto:sinadavoodi69@gmail.com)

### چکیده:

شکل دهی تدریجی ورق برتری‌های متمایزی را نسبت به فرآیندهای متداول شکل دهی ورق فلزی، مانند هزینه پایین ابزار، نیاز نداشتن به قالب و سادگی فرآیند ارائه نموده است. این فرآیند به عنوان یک فناوری نوین در مجموعه روش‌های نمونه سازی سریع و ساخت قطعات با تعداد کم در سطح دنیا شناخته شده و در سال‌های اخیر توسعه داده شده است [1]. با این حال این روش هنوز دارای محدودیت‌هایی می‌باشد. از جمله این معایب و محدودیت‌ها زمان بالای انجام فرآیند و نازک شدگی منجر به شکست است. همچنین برخی از قطعات به دلیل دارا بودن زاویه دیواره زیاد، نمی‌توانند توسط شکل دهی تدریجی تک نقطه‌ای تولید شوند. در این پژوهش یک روش جدید برای محاسبه و رسم نمودار حد شکست شکل دهی برای آلیاژ آلومینیوم ۳۱۰۵ ارائه گردید. سپس ورق‌های فلزی با ضخامت ۱ میلی متر به روش تدریجی تک نقطه‌ای شکل دهی و نمودار حد شکست برای این آلیاژ مورد نظر رسم گردید.

**کلید واژگان:** شکل پذیری، شکل دهی تدریجی تک نقطه ای، منحنی حد شکل دهی، نمودار حد شکست، آلیاژ آلومینیوم ۳۱۰۵

## Determination Of Fracture Forming Limit Diagram In Single Point Incremental Forming For aluminum alloy 3105

*Sina Davoodi, Abolfazle Taherkhani*

*1- MSc Student, Department of Mechanical Engineering, Takestan Branch, Islamic Azad University, Takestan, Iran*

*2- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University Branch Of Takestan*

*†Corresponding Author Email: [sinadavoodi69@gmail.com](mailto:sinadavoodi69@gmail.com)*

### Absrtact:

Incremental sheet forming has already provided distinct advantages such as inexpensive tools, no need to model and the simplicity of the process over conventional sheet forming processes. This process as a new technology in a method of rapid prototyping and manufacturing parts with few known wold wide and its has been developed in recent years. However the method still has some limitations. One of the disadvantages and limitations high time of process and thinning leads. Also some segment due to large angle of wall can not be produced by single point incremental forming. In this study has been proposed anew way for calculation and charting fracture forming limit for aluminum alloy 3105 . then sheet metals with 1 mm thickness formed dy single point incremental forming methods and charting fracture forming limitation was drawn for this alloy.

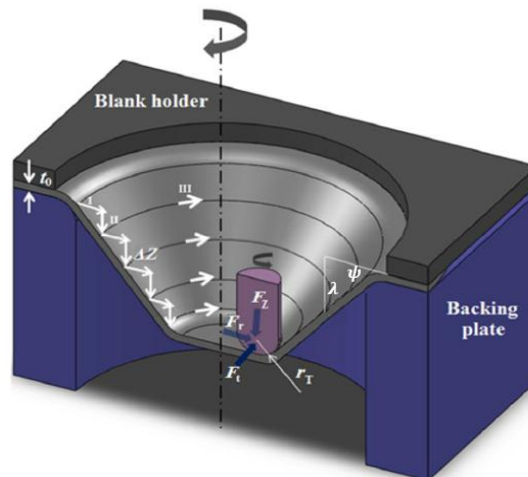
**Keywords:** Formability, Single Point Incremental Forming, Forming Limit Diagram, Fracture Forming Limit Diagram, aluminum alloy 310

## ۱- مقدمه

به منظور تولید قطعات پوسته‌ای شکل با کاربردهای گوناگون، لزوم استفاده از فرآیندی نوین در فرم دهی ورق‌های فلزی امری اجتناب ناپذیر به شمار می‌آید. از جمله این روش‌ها، تکنیکی است که در آن حرکت ابزار فرم دهنده کاملاً تدریجی و کنترل شده باشد. این نوع خاص از عملیات شکل دهی اصطلاحاً فرآیند فرم دهی تدریجی ورق‌های فلزی نامیده می‌شود [2]. فرآیند های شکل دهی تدریجی شامل روش های مختلفی از جمله تک نقطه ای و دو نقطه‌ای می‌باشد که در این میان شکل دهی تدریجی تک نقطه‌ای بیشتر مورد توجه قرار گرفته است [3]. از مزایای این روش می‌توان به موارد زیر اشاره کرد

- ✓ نیاز نداشتن به قالب های مخصوص و گران
- ✓ قابلیت انعطاف پذیری بالا
- ✓ ساخت قطعات با هندسه پیچیده
- ✓ مناسب برای ساخت قطعات با تیراژ پایین
- ✓ مناسب برای ساخت نمونه اولیه
- ✓ کاهش نیروی شکل دهی
- ✓ نبود براده در این فرآیند

به این ترتیب، می‌توان تغییر فرم‌های پیچیده را در ورق‌های فلزی ایجاد نمود. شکل ۱ نمای کلی از این فرآیند را نشان می‌دهد.

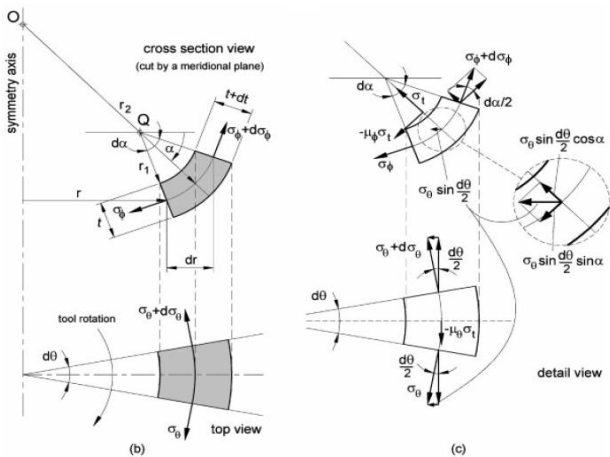


شکل ۱- نمای شماتیک فرآیند شکل دهی تدریجی تک نقطه‌ای

امروزه با توجه به گسترش صنایع پیشرفته، تولید تجهیزات فلزی با استفاده از تکنولوژی‌های نوین اهمیت ویژه‌ای یافته است. در میان تجهیزات صنعتی، قطعات پوسته‌ای شکل به دلیل کاربردهای متعدد و بروز چالش‌های جدی در حین عملیات شکل‌دهی توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده است علیرغم اینکه این تکنیک نو ظهور کاربردهای گسترده‌ای در شکل‌دهی دارد اما تاکنون مطالعات کمی در این زمینه صورت گرفته لذا نیاز است توجه بیشتری به آن صورت گیرد. در این پژوهش سعی بر آن شد تا شکست در قطعات شکل‌دهی شده توسط این روش مورد مطالعه و بررسی قرار گیرد و به منظور پیش بینی شکست در قطعات آزمایشات مربوطه انجام گرفت

و نمودار شکست شکل‌دهی تدریجی تک نقطه برای آلیاژ ۳۱۰۵ استخراج گردید.

فکر و اندیشه شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای بدون قالب در حدود سال ۱۹۶۰ مطرح شد. با این وجود، این تکنولوژی اخیراً با پیشرفت تکنولوژی CNC به میزان کافی، به واقعیت تبدیل شده است. اولین گزارشات در مورد AISF بدون قالب، در سال ۱۹۶۷ توسط ادوارد لیزاک به ثبت رسیده است. در این گزارشات قابلیت شکل دهی بدون قالب اشکال مختلف مورد بررسی قرار گرفته و شکل دهی یک قطعه مخروطی شکل، با ابزار ارزان قیمت ساده شرح داده شده است. لیزاک در این گزارشات نشان داد که می‌توان اشکال مختلف را تنها با تجهیزات استاندارد موجود در کارگاه‌های ماشین ابزار شکل‌دهی نمود. این فرآیند برای ساخت نمونه اولیه قطعات بسیار مفید است [4]. شیم و پارک در سال ۲۰۰۱ اولین مطالعات را بر روی تعیین منحنی‌های حد شکل پذیری در فرآیند شکل دهی تدریجی انجام و با تعیین منحنی حد شکل پذیری برای آلومینیوم نشان دادند که میزان شکل پذیری در فرآیند شکل دهی تدریجی بالاتر از سایر فرآیندهای سنتی است. از این رو منحنی حد شکل پذیری مورد استفاده در فرآیندهای سنتی با منحنی به دست آمده از این فرآیند متفاوت بوده و قابل تعمیم نیست [5]. سورش و همکارش به بررسی شکل پذیری فولاد، تحت فرآیند شکل دهی تدریجی تک نقطه با استفاده از روش شبیه سازی عددی پرداختند. برای این کار مخروط و شکل هرم و مخروط ناقص با زاویه دیوار متفاوت به عنوان هندسه آزمون استفاده شد. این اشکال هندسی به چهار روش مختلف مانند: دایره‌ای، بیضی شکل، سهموی و نمایی شکل طراحی شدند. شکل پذیری تمامی این هشت اشکال هندسی با استفاده از منحنی FLD تحلیل شد. حداکثر زاویه دیوار به دست آمده از شبیه سازی عددی با مقادیر و معیارهای تجربی آزمایشی مقایسه شد [6]. فانگ و همکارانش یک مطالعه تحلیلی و تجربی بر مکانیسم تغییر شکل و رفتار شکست در فرآیند شکل دهی تدریجی تک نقطه ای انجام دادند. در این تجزیه و تحلیل، هر دو اثر خمش و رفتار کرنش سختی بر اساس روش تعادل در نظر گرفته شد. با استفاده از مدل تحلیلی ارائه شده، هر دو پارامتر تغییر شکل ورق های فلزی و مکانیزم شکست با بررسی تاثیر گذاری و تنش هیدرو استاتیک در منطقه تغییر شکل انجام شد. شبیه سازی امان محدود از یک مخروط ناقص برخی از نتایج تحلیلی را تایید می کند [7]. سئونگ و همکاران نشان دادند که به دلیل وجود اختلاف در حالت تنش در راستای ضخامت، پدیده گلوبی شدن در حین شکل دهی تدریجی تک نقطه حذف می‌گردد. حذف گلوبی به عنوان مهمترین عامل افزایش شکل پذیری در این فرآیند محسوب می‌شود [8]. سیلوا و همکاران بیان کردند که تغییرات ضخامت قطعه در راستای شعاعی را می‌توان با استفاده از قانون سینوس تخمین زد. طبق این قانون، ضخامت قطعه را بر حسب ضخامت اولیه ( $t_0$ ) و زاویه دیواره قطعه نسبت به راستای افق ( $\psi$ ) میتوان به صورت  $t = t_0 \sin(90-\psi)$  بیان نمود همچنین آنها رابطه ای بین کرنش ضخامت و زاویه نقطه شکست به دست آوردند [9].



شکل ۲- المان پوسته ای و تعادل نیرویی در آن

با توجه به نیروهای وارده بر المان مورد نظر، در دو جهت محیطی و در راستای ضخامت به بررسی و تجزیه تحلیل آن می پردازیم. با حل معادلات تعادل در دو راستای مورد نظر خواهیم داشت:

• در جهت محیطی  

$$\sigma_{\theta} r_1 da \left( t + \frac{dt}{2} \right) - \mu_{\theta} \sigma_t r_1 da \left( r + \frac{dr}{2} \right) d\theta = (\sigma_{\theta} + d\sigma_{\theta}) r_1 da \left( t + \frac{dt}{2} \right)$$
 با ساده سازی و صرف نظر از جملات درجه بالا به معادله زیر خواهیم رسید:

$$d\sigma_{\theta} = -\mu_{\theta} \sigma_t \frac{r d\theta}{t} \approx -\mu_{\theta} \sigma_t \quad (1)$$

• راستای ضخامت  

$$\sigma_t r d\theta r_1 da + \sigma_{\theta} r d\theta t \sin\left(\frac{d\alpha}{2}\right) + (\sigma_{\theta} + d\sigma_{\theta})(r + dr)d\theta(t + dt) \sin\left(\frac{d\alpha}{2}\right) + \sigma_{\theta} r_1 da t \sin\left(\frac{d\theta}{2}\right) \cos\alpha + (\sigma_{\theta} + d\sigma_{\theta}) r_1 da t \sin\left(\frac{d\theta}{2}\right) \cos\alpha = 0$$
 با ساده سازی و صرف نظر از جملات درجه بالا به معادله زیر خواهیم رسید:

$$\sigma_t \left( \frac{1}{t} - \frac{\mu_{\theta}}{2r_2} \right) + \frac{\sigma_{\theta}}{r_1} + \frac{\sigma_{\theta}}{r_2} = 0$$

$$\frac{\mu_{\theta}}{2r_2} \ll 1 \rightarrow \frac{\sigma_t}{t} + \frac{\sigma_{\theta}}{r_1} + \frac{\sigma_{\theta}}{r_2} = 0 \quad (2)$$

حالت تنش های به وجود آمده در المان پوسته ای موضعی، مطابق با شکل کروی ابزار، می تواند از معادلات پوسته به دست آید. سه حالت تغییر شکل (شکل ۳ را ببینید) در اینجا به کار برده می شوند. با در نظر گرفتن شرایط مرزی حاکم در سه حالت تغییر شکل، می توان معادلات تعادل در دو راستا را ساده سازی کرد.

سطح تخت تحت شرایط کشش کرنش صفحه ای (بخش AB و EF)

$$d\varepsilon_t = d\varepsilon_{\phi} \quad d\varepsilon_{\theta} = 0 \quad \sigma_{\theta} = \frac{(\sigma_t + \sigma_{\phi})}{2}$$

گوشه ها تحت شرایط کشش دو محوره مساوی (بخش BC و DE)

$$d\varepsilon_{\theta} = d\varepsilon_{\phi} > 0 \quad d\varepsilon_t < 0 \quad \sigma_{\phi} = \sigma_{\theta}$$

سطح متقارن دوار تحت شرایط کشش کرنش صفحه ای (بخش CD)

$$d\varepsilon_{\phi} = -d\varepsilon_{\theta} > 0 \quad d\varepsilon_t < 0$$

حسین و همکارانش به مطالعه تجربی بر روی برخی روش های ارزیابی شکل پذیری در شکل دهی تدریجی منفی پرداختند. قابلیت شکل دهی در SPIF را می توان به عنوان حداکثر زاویه دیوار  $(\psi_{max})$  که یک ورق بدون شکستگی تحمل کند بیان نمود. در این مطالعه، دو آزمون به منظور ارزیابی قابلیت شکل دهی یک ورق آلومینیم انجام شد [10].

## ۲- تئوری مسئله

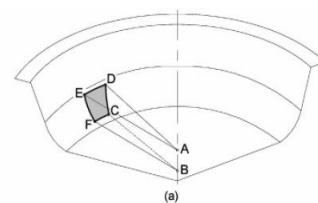
شکل دهی توسط کشیده شدن با نیروی غشاء ابزاری با نوک کروی از طریق یک سطح تماس بین ابزار و بخشی از ورق فلزی ایجاد می شود. تولید قطعاتی با اشکال پیچیده توسط SPIF امکان پذیر است اما، به طور کلی، همه مسیرهای ابزار به عنوان ترکیبی از حالت هایی که در شکل ۲-۳ نشان داده شده است امکان پذیر است. این امر منجر به سه حالت اساسی تغییر شکل است که در زیر بیان می شود.

۱. سطوح تخت تحت شرایط کشش کرنش صفحه ای

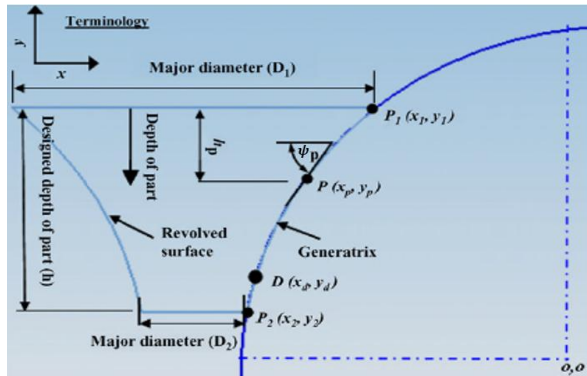
۲. سطوح متقارن دوار تحت شرایط کشش کرنش صفحه ای

۳. گوشه ها تحت شرایط کشش دو محوره مساوی

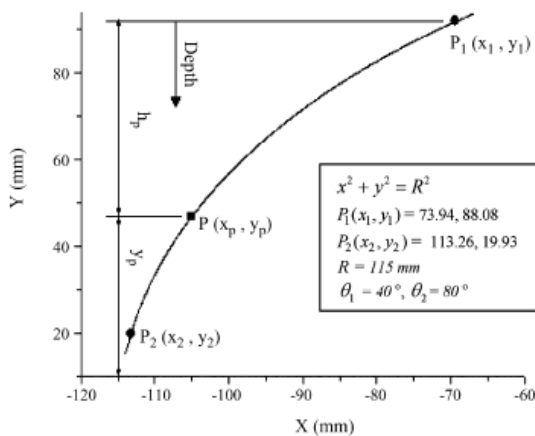
شایان ذکر است که در بین این حالت های تغییر شکل احتمالات دیگری نیز وجود دارد که در آن نه کشش کرنش صفحه و نه کشش دو محوره برابر باشد ظاهر شود اما این سه حالت بیشتر در این فرآیند وجود دارند لذا در این تحقیق مدل تحلیلی ارائه خواهد شد که تنها در حالت های مفرط تغییر شکل یافته ای که به احتمال زیاد در SPIF یافت می شود متمرکز شده است. سطح یک ورق شکل داده شده توسط فرآیند شکل دهی تدریجی تک نقطه ای در شکل ۲ مشخص شده است. سطح نرمال المان پوسته محلی در جهت محور Z در نقطه O برش داده شده و  $R_2$  به عنوان شعاع مربوطه تعریف شده است. در حالت عادی مرکز انحناء در نقطه Q قرار گرفته و  $R_1$  شعاع انحناء المان پوسته محلی در جهت امتداد ضخامت است.



دایروی مد نظر قرار گرفت که در شکل ۴ قابل مشاهده است.  $\Psi_{max}$  معمولاً در مقالات جهت تعیین خاصیت شکل دهی دیده می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که  $\Psi_{max}$  با ضخامت اولیه  $t_0$  نسبت مستقیم دارد. بنابراین باید یک ارتباط بین زاویه ماکزیمم و ضخامت در قالب مباحث تئوریک پیدا کرد، که قابل قیاس با نمودارهای آزمایشگاهی باشد. اگر این هدف محقق شود تعریف شکل دهی براساس زاویه ماکزیمم، مهیا می‌گردد.



شکل ۴- هندسه قطعه شکل دهی شده



شکل ۵- مختصات نقاط و منحنی دیوار دایروی

در SPIF، فلزات تغییر شکل یافته از قانون سینوس پیروی می‌کنند که به زبان ریاضی به صورت زیر بیان شود:

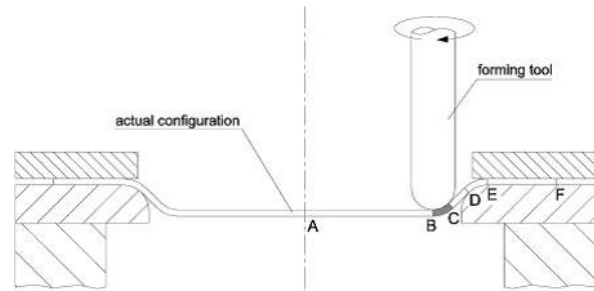
$$t = t_0 \sin \lambda = t_0 \sin (90 - \psi) = t_0 \cos \psi \quad (9)$$

که در آن  $t$  ضخامت نهایی،  $t_0$  ضخامت توخالی،  $\lambda$  نصف زاویه راس و  $\psi$  زاویه شیب دیواره است. یک منحنی دایره ای با زاویه  $\Delta\psi$  برای ایجاد یک سطحی که زاویه دیوار متفاوتی دارد انتخاب شده است. شکل دهی رخ می‌دهد. نقطه دلخواه بر روی سطح  $P(x_p, y_p)$  در این نقطه را می‌توان با استفاده از روابط محاسبه کرد برای سطح طراحی شده با محور دوران منحنی دایره (شکل ۴) خواهیم داشت

$$\psi_p = \cos^{-1} \left( \frac{y_p}{R} \right) = \cos^{-1} \left( \frac{y_1 - h_p}{R} \right) \quad (10)$$

$$t_p = t_0 \frac{y_p}{R} = \frac{t_0}{R} (y_1 - h_p) \quad (11)$$

که در آن  $y_1 - h_p = y_p$  شعاع منحنی دایره است.



شکل ۳- نواحی و حالت های تغییر شکل در این فرآیند

با در نظر گرفتن شرایط مرزی حاکم در سه حالت تغییر شکل، می‌توان معادلات تعادل در دو راستا را ساده سازی کرد. در المان‌های AB, CD  $r_2 \gg t$  و  $r_2 \gg r_1$  نسبت تنش محیطی به شعاع عمود به محل المان صرف نظر می‌شود.

$$\frac{\sigma_\theta}{r_2} = 0 \rightarrow \frac{\sigma_t}{t} + \frac{\sigma_\phi}{r_1} = 0$$

$$\sigma_t = -\sigma_\phi \frac{t}{r_{tool}} \quad (3)$$

با توجه به معیار تراسکا داریم:

$$\sigma_\phi - \sigma_t = \sigma_y \rightarrow \sigma_\phi + \sigma_\phi \frac{t}{r_{tool}} = \sigma_y \rightarrow \sigma_\phi = \frac{\sigma_y}{1 + \frac{t}{r_{tool}}}$$

به همین روش تنش در گوشه های زاویه دار نیز قابل محاسبه است

$$\sigma_\theta = \sigma_\phi = \frac{\sigma_y}{1 + \frac{2t}{r_{tool}}} \quad (4)$$

$$\sigma_t = -2\sigma_\phi \frac{t}{r_{tool}} \quad (5)$$

با جایگذاری  $t$  بوسیله قانون سینوسها یعنی معادلات تعادل بار دیگر ساده سازی شده و به صورت زیر خلاصه می‌گردد

$$\frac{\sigma_\phi}{\sigma_y} = \frac{1}{1 + kt_0 \sin \lambda / r_{tool}}$$

$$\rightarrow \sin \lambda = \left( \frac{\sigma_y}{\sigma_\phi} - 1 \right) \frac{r_{tool}}{kt_0} \quad (6)$$

زوایای  $\lambda$  و  $\psi$  متمم هم هستند بنابراین

$$\psi = \frac{\pi}{2} - \left( \frac{\sigma_y}{\sigma_\phi} - 1 \right) \frac{r_{tool}}{kt_0} = \frac{\pi}{2} - \left( \frac{kt}{r_{tool}} - \frac{kt_0}{r_{tool}} \right) \frac{r_{tool}}{kt_0}$$

$$\psi = \frac{\pi}{2} - \exp^{\epsilon t} \quad (7)$$

$$\epsilon t = \ln \left( \frac{\pi}{2} - \psi_{max} \right) \quad (8)$$

برای به دست آوردن زاویه شکست نیاز به انجام تست‌های متداول است به این صورت که نمونه‌هایی با اشکال مختلف مانند هرم‌های ناقص، با زوایای دیوار مختلف، شکل دهی شده و با سعی و خطا زاویه شکست به دست می‌آید. در این پژوهش روشی جدید معرفی می‌شود که تعداد تست‌های انجام شده را به حداقل می‌رساند. اساس این روش بر متغییر بودن زاویه دیوار متنی است به این صورت که بجای اینکه چندین قطعه با زوایای دیواره مختلف شکل دهی شود به قطعه با هندسه قوس استفاده شود تا تمامی دیواره تمامی زوایا را شامل شود. برای این امر می‌توان از منحنی‌های دایروی، نیضوی، نمایی و هیپربولیک استفاده کرد که در اینجا هندسه

### ۳- روند انجام آزمایش

برای انجام آزمایش از ورق آلیاژ آلومینیم ۳۱۰۵ با ضخامت ۱ میلی متر استفاده شد که به دلیل قابلیت شکل پذیری بالا و کارپذیری خوبی که دارند در ساخت بدنه قوطی ها و لوازم پخت و پز، تجهیزات شیمیایی، مخازن تحت فشار و... مورد استفاده قرار می-گیرد. در جدول ۱ ترکیب شیمیایی این آلیاژ آلومینیم گردآوری شده است. ورق ها به منظور تنش زدایی و بالا بردن قابلیت شکل دهی در دمای ۳۵۰ درجه آنیل شدند و بعد از اتمام مرحله آنیلینگ کوره خاموش و پس از ۴۸ ساعت اقدام به خارج کردن ورق ها گردید.

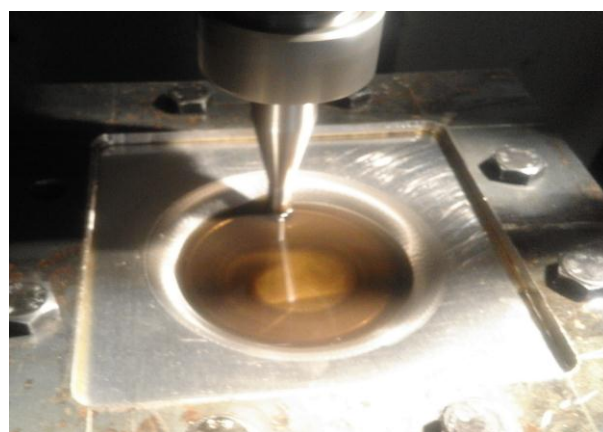
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
0.6	0.7	0.3	0.3-0.8	0.2-0.8	0.2	0.4	0.1

جدول ۱- ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیم ۳۱۰۵

در این آزمایشات به منظور شکل دهی تدریجی تک نقطه ای ورق از دستگاه CNC سری VMC850 مدل M.S.T استفاده شد. برای اینکه ورق مقید گردد نیاز به فیکسچر بود به این منظور فیکسچری به شکل مکعب تو خالی با ورق فولادی با ضخامت ۴ میل ساخته شد. شکل ۵ نحوه قرار گیری ورق بر روی فیکسچر در مراحل انجام فرآیند را نشان می دهد.



شکل ۷- شکست در ورق پس از اتمام شکل دهی

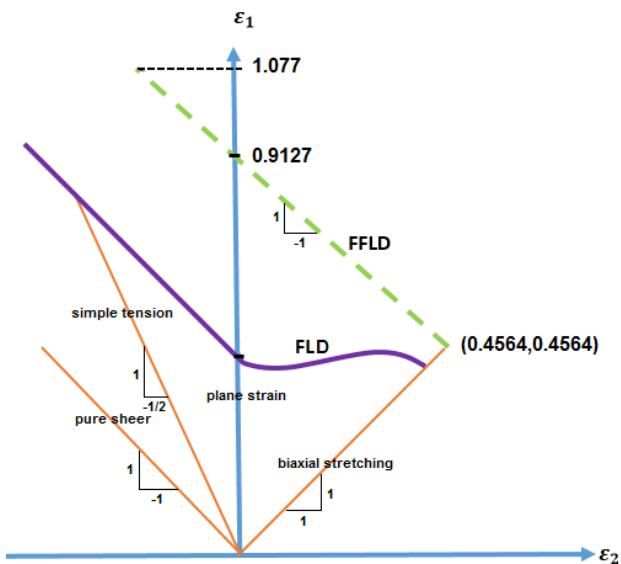


شکل ۶- نمایی از روند پیش روی و شکل دهی ورق

(XC , YC) یک نقطه انتقال است که در آن مقدار ضخامت واقعی و نظری قطعه در تطابق است. از این رو، با توجه به [10]، زاویه دیواره در این نقطه به عنوان  $\psi_{max}$  در نظر گرفته می شود که حداکثر زاویه دیواره است که یک ورق بدون شکستگی تحمل کنند به منظور پیدا کردن نقطه C در قطعه در نزدیکی محل شکست نقاطی را با فاصله ۰.۱ میلی متر انتخاب می کنیم (به شکل ۷ نگاه کنید). برای اندازه گیری دقیق ابتدا یک چهارم قطعه را با استفاده از دستگاه لیزر برش می دهیم تا ضخامت قطعه در نقاط مختلف مشخص و قابل اندازه گیری شود سپس لبه برش خورده قطعه را با دقت یک میلی متر مدرج می کنیم. از آنجایی که حساسیت اندازه گیری در این مرحله از اهمیت بسیاری برخوردار است نیاز بود قطعه به نحوی برش داده شود که در لبه ها پلیسه ایجاد نشود به همین منظور از دستگاه لیزر برای برش و همچنین از کولیس پایه دار برای اندازه گیری عمق نقاط استفاده شده است. با توجه به اینکه در نقطه شکست ضخامت باید نسبت به ضخامت اولیه از معادله (۱۱) پیروی کند، ضخامت نقاط لبه برش خورده قطعه اندازه گیری شد و با بررسی این ضخامت ها، مختصات نقطه انتقال C مشخص گردید. حال با دانستن عمق و ضخامت نقاط، می توان زاویه شکست را محاسبه نمود.

برای شروع شکل دهی نیاز است که مسیر حرکت ابزار بر روی ورق به منظور رسیدن به فرم نهایی قطعه مشخص شود به این منظور ابتدا مدل را با توجه به ابعاد مورد نظر در محیط یکی از نرم افزارهای Cad-Cam موجود در بازار طراحی نموده و سپس از پارت موجود G Code گیری شد.

پس از اتمام فرآیند شکل دهی در عمق ۶۸ میلی متری، مشاهده می شود که در آخرین مراحل شکل دهی، ورق دچار شکست شده که در شکل زیر ترک ایجاد شده به صورت واضح قابل مشاهده است.



شکل ۹- نمودار حد شکست شکل دهی تدریجی تک نقطه ای آلیاژ ۳۱۰۵

همانطور که در شکل قابل مشاهده است نمودار FFLD بالاتر از نمودار FLD قرار میگیرد که نشان دهنده قابلیت شکلپذیری بیشتر این نمودار است. همچنین در نمودار FFLD که به صورت خط رسم شده مشکل گلوبی شدن برطرف شده و این پدیده قبل از شکست رخ نمی دهد.

#### ۴- نتیجه گیری

کارخانجات صنعتی اخیرا کوشش می کنند تا قابلیت انعطاف پذیری بیشتری را در شکل دهی ورق داشته و پاسخگوی نیاز مشتری باشند. این کوششها روند شکل دهی را به سمت روشهای جدید شکل دهی ورق که انعطاف پذیری بیشتری نسبت به روشهای سنتی دارند، متمایل کرده است. امروزه فرآیندهای جدید، با انعطاف پذیری بالا وجود دارد که به وسیله تغییر شکل پلاستیک ورق فلزی در یک موضع نقطه ای قادر به تولید قطعات پیچیده می باشند. در میان تجهیزات صنعتی، قطعات پوسته ای شکل به دلیل کاربردهای متعدد و بروز چالش های جدی در حین عملیات شکل دهی توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده است علیرغم اینکه این تکنیک نو ظهور کاربردهای گسترده ی در شکل دهی دارد اما تا کنون مطالعات کمی در این زمینه صورت گرفته لذا نیاز است توجه بیشتری به آن صورت گیرد از این رو در پژوهش حاضر بحث بهبود طراحی در این فرآیند مورد توجه قرار گرفت که برخی از نتایج حاصل به صورت زیر است:

- شکل دهی ورق به صورت سنتی نیاز به قالبهای مخصوص و گران قیمت دارد و ساخت قالب علاوه بر هزینه، زمان زیادی را به خود اختصاص می داد. هرگونه تغییر در هندسه محصول نیاز به ساخت مجدد قالب و یا اصلاح قالب بوده که این مسئله مشکلات زیادی را برای سازنده گان به وجود می آورد از این رو



شکل ۸- نحوه اندازه گیری عمق و ضخامت نقاط

برای قطعه شکل دهی شده ، مقادیر  $h_p$  با در نظر گرفتن درجه بندی اندازه گیری شده به فاصله ۱ میلی متر توسط کولیس پایه دار و نیز اندازه گیری ضخامت  $t_p$  هر نقطه مورد بررسی قرار گرفت که در یکی از نقاط با درصد خطای بسیار ناچیز تساوی زیر حاصل گردید:

$$t_p = \frac{t_0}{R} (y_1 - h_p) \longrightarrow 0.37 = \frac{1}{115} (88 - 44.92)$$

با توجه به تساوی بالا و مشخص شدن  $h_p$  زاویه ی شکست به صورت زیر حاصل شد:

$$\varphi = \text{Arc cos} \left( \frac{y_1 - h_p}{R} \right) = \text{Arc cos} \left( \frac{88 - 44.95}{115} \right) = 68.01$$

با محاسبه زاویه شکست حال می توان نمودار حد شکست را برای شکل دهی تدریجی تک نقطه ورق آلیاژ آلومینیم ۳۱۰۵ به صورت زیر رسم نمود. برای رسم یک خط نیاز به مختصات دو نقطه از خط خواهد بود که به این منظور با بررسی حالت های کرنش صفحه ای و کرنش دو محوری نقاط مورد نظر از طریق معادلات استخراج می گردد. با استفاده از معادله ۸ مقدار  $\epsilon_t$  را به دست می آوریم.

$$\epsilon_t = \ln \left( \frac{\pi}{2} - \psi_{max} \right) = \ln \left( \frac{\pi}{2} - \frac{67\pi}{180} \right) = \ln \left( \frac{23\pi}{180} \right) = \ln(0.4014)$$

$$\Rightarrow \epsilon_t = -0.9127$$

در حالتی که کرنش صفحه ای باشد  $\epsilon_2 = 0$  و  $\epsilon_1 = -q$  در نتیجه خواهیم داشت

$$\epsilon_1 + \epsilon_2 = q \Rightarrow \epsilon_1 = 0.9127$$

با محاسبه مقدار  $\epsilon_1$ ، محل تلاقی خط FFLD با محور عمودی مشخص شد حال با بررسی حالت کرنش دو محوری نقطه بعدی به دست خواهد آمد. در حالت کرنش دو محوری  $\epsilon_1 = \epsilon_2$  پس خواهیم داشت

$$\epsilon_1 + \epsilon_2 = q \Rightarrow \epsilon_1 = \frac{q}{2} \longrightarrow \epsilon_1 = 0.4564 \quad \epsilon_2 = 0.4564$$

با توجه به این نکته که خطای بین برآورد کرنش شکست برای ضخامت ۱ میلی متر برای شکل مخروطی ۱۸ درصد است مقدار ماکزیمم  $\epsilon_1$  را به صورت زیر محاسبه نمود

$$0.9127 * \frac{18}{100} = 0.1643 \longrightarrow \epsilon_1 = 1.077$$

با داشتن مختصات دو نقطه و بازده خط می توان نمودار FFLD را به صورت نشان داده شده در شکل ۸ رسم نمود.

8. D. Y. Seong, M. Z. Haque, J. B. Kim, T. B. Stoughton, J. W. Yoon, Suppression of necking in incremental sheet forming, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 51, No. 15, pp. 2840–2849, 2014
9. M. B. Silva, M. Skjoedt, A. G. Atkins, N. Bay, P. A. F. Martins, Single-point incremental forming and formability– failure diagrams, *Journal of Strain Analysis*, Volume 43, pp. 15-35, 2008
10. G. Hussain, L. Gao, N.U. Dar, An experimental study on some formability evaluation methods in negative incremental forming, *Journal of Materials Processing Technology*, Volum 186, pp. 45–53, 2007
11. G. Palumbo, M. Brandizzi, Experimental investigations on the single point incremental forming of a titanium alloy component combining static heating with high tool rotation speed, *Journal of Materials and Design*, Volume40, pp. 43-51,2012
12. G. Hussain, L. Gao, Anovel method to test the thinning limit of sheet-metal in Negative Incremental Forming, *Int. J. Mach. Tools Manuf*, 2006

فرآیند شکل دهی تدریجی جایگزین مناسبی برای ساخت نمونه‌ها با تیراژ پایین خواهد بود

- پیش از این مهندسان برای طراحی و ساخت از نمودار های حد شکل دهی استفاده می کردند اما با معرفی و بررسی این نمودار این نتیجه حاصل شد که نمودار حد شکست شکل دهی به دلیل دارا بودن ناحیه امن وسیع تر، جایگزین مناسبی برای طراحی به جای نمودار حد شکل دهی خواهد بود.
- نمودار حد شکست شکل دهی برای فرآیند شکل دهی تدریجی ورق نموداریست منحصر به فرد و نمی توان به منظور طراحی و شکل دهی قطعات با این فرآیند از نمودارهای حاکم بر کشش در فرآیند های سنتی استفاده کرد بنابراین استخراج نمودارهای حد شکست این فرآیند برای مواد مختلف از اهمیت ویژه ای برخوردار است.
- نمودارهای FFLD به صورت تجربی به دست می آیند به این منظور برای به دست آوردن این نمودار نیاز به شکل دهی چندین قطعه بود که این امر سبب افزایش هزینه و زمان می شد بنابراین در این تحقیق روشی ارائه شد که با انجام کمترین تعداد شکل دهی بتوان نمودار حد شکست شکل دهی را استخراج کرد.

#### ۵- مراجع

1. S. B. M. Echrif and M. Hrairi, Research and Progress in Incremental Sheet Forming Processes, *Mater. Manuf. Process.*, vol. 26, no. February 2015, pp. 1404–1414, 2011
2. S. B. M. Echrif and M. Hrairi, Research and Progress in Incremental Sheet Forming Processes, *Mater. Manuf. Process.*, vol. 26, no. February 2015, pp. 1404–1414, 2011
3. J. Jeswiet, F. Micari, G. Hirt, A. Bramley, J. Dufloy and J. Allwood, Asymmetric single point incremental forming of sheet metal, *Annals of CIRP*, Volume 54, 623-650, 2005.
4. E. Leszak, Apparatus and process for incremental dieless forming, *Google Patents*, 1967
5. M. S. Shim, J. J. Park, The formability of aluminum sheet in incremental forming, *Journal of Material Processing and Technology*, Volume 113, No. 1, pp. 654–658, 2001
6. K. Suresh and S. P. Regalla , Analysis of formability in single point incremental forming using finite element simulations , *Procedia Materials Science*, PP. 430 – 435, 2014
7. Y. Fang, B. Lu, J. Chen, D.K. Xu, H. Ou, Analytical and experimental investigations on deformation mechanism and fracture behavior in single point incremental forming, *Journal of Materials Processing Technology*, PP 1503–1515, 2014