

بررسی المان محدود و تجربی فرآیند تغییر شکل شدید لوله آلومینیوم به روش ECAP

محمد قرامحمدی^۲

دانشکده مهندسی مکانیک
دانشگاه پیام نور تهران واحد ری
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۰/۳۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۸/۲۷)

عباس وفایی صفت^۱

دانشکده فنی و مهندسی
دانشگاه جامع امام حسین^(ع)

چکیده

تولید فلزات ریزساختار فوق ریزدانه و نانو در سال‌های گذشته مورد توجه محققان و مهندسان قرار گرفته است. هدف از تولید این مواد با روش‌های خاص، دستیابی به قطعات سبک‌وزن با استحکام و قابلیت بالاست. روش‌های متنوعی برای تولید قطعات توپر با مقاطع گرد و یا مربع با استفاده از فرآیند تغییر شکل شدید توسط محققین ارائه شده است؛ اما در خصوص تولید لوله‌های با استحکام به وزن بالا، کارهای به نسبت کمتری ارائه گردیده است. در این مقاله، یک روش اکستروژن مستقیم برای تولید لوله با استحکام بالا ارائه شده است. آلیاژ استفاده شده در این پژوهش از گروه آلومینیوم به شماره ۳۰۰۳ است که دارای استفاده صنعتی و به لحاظ خصوصیات ساختاری قابلیت تحمل کار سرد خوبی است. اغلب مطالعات گذشته بیشتر روی زاویه کانال 90° صورت پذیرفته است، اما در این پژوهش با دیدی جدید زوایای بالای 90° نیز مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج توزیع کرنش و تنش در نمونه‌های شبیه‌سازی شده جهت به دست آوردن زاویه داخلی و خارجی کانال مورد مطالعه قرار گرفته است. با به دست آوردن زوایای بهینه کانال، قالب مورد نیاز ساخته و نمونه‌ها به صورت تجربی مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از این زوایا در فرآیند تغییر شکل شدید لوله آلومینیوم گروه ۳۰۰۳، باعث افزایش قابل توجه استحکام کششی و سختی می‌شود.

کلید واژگان: ایکپ لوله، شبیه‌سازی المان محدود، آلومینیوم ۳۰۰۳

Finite Element and Experimental Investigation of Aluminum Tube by Equal Channel Angular Pressing

A. Vafaesefat

School of Engineering
Imam Hossein University, Tehran, Iran

M. Gharamohammadi

Mechanical Engineering Department
Payame Noor University, Rey branch, Iran

(Received: 19/January/2017 ; Accepted: 18/November/2017)

ABSTRACT

Productions of metallic ultra-fine and Nano microstructure have been addressed by researchers and engineers in recent years. The purpose of the production of these materials with specific procedures is to achieve lightweight parts with high strength and capabilities. Various methods for manufacturing solid round or square sections using equal channel angular pressing have been offered by researchers. However, few researches have been reported the production of pipes with high strength-to-weight property. A direct extrusion method is proposed for the production of high-strength tubes. Aluminum alloy 3003 that is widely used in industries because of the structural characteristics of a cold working is used in this study. Previous studies have been focused on channel angle of 90° , but in this study, angles above 90° are investigated. Strain and stress distribution results in finite element simulation have been used to obtain the optimal internal and external channel angles. The optimal channel angles are first investigated by simulation results. The required die with optimal channel angles was then manufactured and the samples were experimentally tested. The results showed that the use of these angles with optimal channel angels in equal channel angular presses for aluminum 3003 tube increases significantly the tensile strength and hardness.

Keywords: ECAP Pipe, Finite Element Simulation, Aluminum 3003

۱- استاد (نویسنده پاسخگو): avafaee@ihu.ac.ir

۲- کارشناسی ارشد: rahaiyha@gmail.com

فهرست علائم و اختصارات

ثابت مواد Mooney-Rivlin	C_{km}
مدول الاستیک	E
ضریب پواسان	e
فشار (مگا پاسکال)	MPa

علائم یونانی

زاویه کانال اصلی	ϕ
زاویه گوشه قالب	Ψ
انرژی کرنشی پلی یورتان	σ_{ij}

زیر نویس ها

برینل	BHN
پلی یورتان	Rubber pad tie
چسب	tie

بالا نویس

پرس کاری تحت کانال های هم مقطع زاویه دار	ECAP
اکستروژن تحت کانال های هم مقطع زاویه دار	ECAE
ذرات فوق ریزدانه	UFG

۱- مقدمه

فرآیند پرس کاری در کانال های زاویه دار با مقاطع یکسان^۱ (ECAP) اولین بار توسط سگال^۲ و همکارانش در دهه ۱۹۷۰ معرفی گردید. هدف اساسی در آن زمان ایجاد یک فرآیند شکل دهی با کرنش های بالا در بیلتهای فلزی با برش ساده بود. از دهه ۱۹۹۰ هنگامی که گزارش هایی مبنی بر پتانسیل روش ECAP در تولید مواد فوق ریز دانه^۳ (UFG) در حد زیر میکرون با خواص یکنواخت و جدید مطرح شد تغییر یافت و این گزارش ها یک علاقه مداوم و شدیدی در مقالات علمی، توسعه و نتایج نهایی فرآیند ECAP در کاربردهای صنعتی به وجود آورد [۱-۳].

روش های تغییر شکل پلاستیک شدید با توجه به هندسه محصول را می توان در سه دسته تقسیم بندی کرد. این سه

دسته شامل تغییر شکل شدید مواد بالک، ورق و تغییر شکل شدید لوله ها است. هر چند این فرآیندها از نظر ماهیت تغییرات ریز ساختاری تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند و همگی دچار تغییر شکل پلاستیک شدید می شوند، اما از نظر نحوه توزیع میدان های تنش و کرنش در قطعه تحت تغییر شکل متفاوت خواهند بود [۴-۶].

در سال های گذشته، از روش های تغییر فرم پلاستیک شدید^۴ (SPD) برای ریزدانه کردن شدید مواد و آلیاژهای میله ای شکل استفاده شده است. با استفاده از فرآیند تصحیح اندازه دانه با ریزدانه های شدید دانه ها توسط فناوری تغییر فرم پلاستیک شدید تنوع خواص فیزیکی، مکانیکی، سایش و پیچش افزایش یافته است. این فناوری ها شامل فرآیندهای پرس کاری در کانال های زاویه دار با مقاطع یکسان، پیچش فشار بالا، اکستروژن برگشت تجمعی، پرس کاری شیار اجباری، اتصال نورد تجمعی می باشد. روش دیگری توسط جوانرودی و همکارانش بر روی آلیاژ مس انجام گردیده است. در این روش از قالبی با زاویه کانال ۹۰ و شعاع گوشه داخلی تقریبی ۸ mm استفاده گردید است. برای جلوگیری از فروپاشی لوله از مندرل پلی یورتان در داخل لوله استفاده شده است. این روش به دلیل داشتن قالبی با پیچیدگی ساختاری کمتر و سهولت ساخت می تواند روشی مناسب برای توسعه و مطالعه قرار گیرد. این روش جزو یکی از کارآمدترین فرآیندهای اصلی تغییر شکل پلاستیک شدید است که مورد بررسی در این پژوهش است. ابعاد لوله استفاده شده در آن پژوهش در این پژوهش هم استفاده شده است. [۷]. تأثیر پارامترهای فرآیندی شامل زاویه بین دو کانال، مسیر فرآیند، خواص و مواد، شعاع گوشه داخلی و خارجی و ضریب اصطکاک با روش مدل سازی المان محدود مورد ارزیابی قرار گرفته است. در ایکم میله تاثیر شعاع گوشه داخلی قالب مستقیماً بر روی توزیع کرنش است و از مقدار ۷ mm تا ۹/۵ mm برای قالب در نظر گرفته شده است [۸]. کاهش شعاع از ۸ mm به پایین، با افزایش تمرکز کرنش بیشتری برخوردار است و بیشتر از ۸ mm به دلیل افزایش ناحیه تماس تمرکز توزیع کرنش بهبود می یابد [۹]. با افزایش زاویه میزان کرنش کاهش و با کاهش زاویه میزان کرنش افزایش می یابد. علت کاهش کرنش با افزایش زاویه به دلیل تغییر فرم کمتر می باشد [۱۰]. تحقیقات نشان می دهد که با

1- Equal channel angular pressing

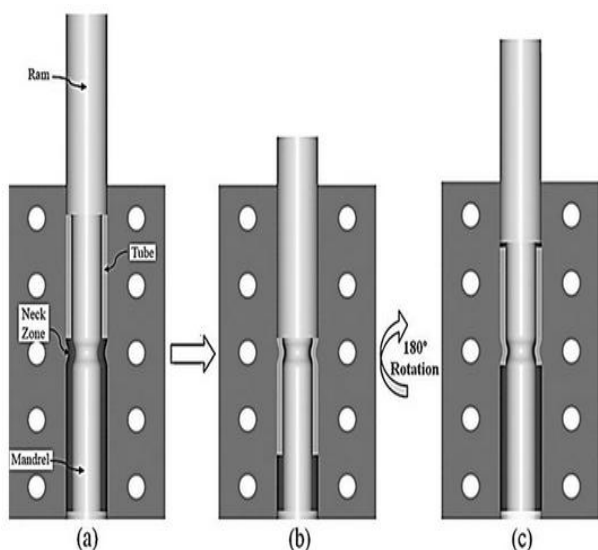
2- Segal

3- Ultra fine-grained

4- Severe plastic deformation

اخیراً روشی برای لوله‌ها مطابق شکل ۲ پیشنهاد شده است که توسط زنگی‌آبادی و کاظمی نژاد با عنوان فشردن در کانال لوله‌ای ارائه شده است [۱۶].

این فرآیند شامل یک قالب با کانال استوانه‌ای است که در وسط مسیر کانال، دارای یک گلوگاه با قطر کمتر از قطر اولیه است. قطر داخلی لوله توسط مندرل^۲ کنترل می‌شود که در وسط میله مندرل، جایی که به گلوگاه کانال می‌رسد، قطر آن مشابه با گلوگاه کاهش می‌یابد، به طوری که فاصله بین گلوگاه و مندرل همواره برابر قطر اولیه لوله است. سپس با یک سنبه لوله‌ای شکل (هم‌قطر با لوله تحت فرآیند) از بالا، لوله به داخل کانال فشرده می‌شود. طی این فرآیند، لوله با رسیدن به گلوگاه قطرش کاهش یافته و با ادامه حرکت داخل کانال، مجدداً به قطر اولیه باز می‌گردد. با توجه به ابعاد قالب، می‌توان از دو لوله پشت سرهم استفاده کرد تا کل لوله تغییر فرم پلاستیک شدید شده از سمت دیگر خارج شود.



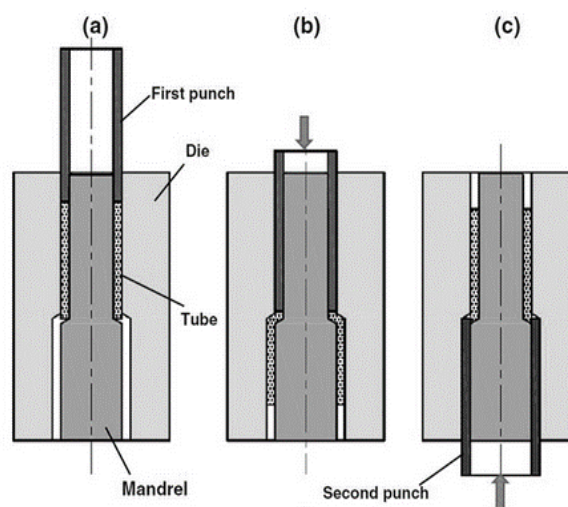
شکل (۲): شماتیک کلی فرآیند فشردن در کانال لوله‌ای [۱۶].

در این مقاله از یک روش اکستروژن مستقیم به نام ایکپ با زاویه‌ی کانال اصلی بیشتری نسبت به تحقیقات گذشته برای تولید لوله‌هایی با استحکام بالا به همراه تغییر شکل پلاستیک شدید و نیروی اکستروژن کمتر پیشنهاد می‌شود. مطالعات انجام شده بر روی اکستروژن لوله به صورت تجربی روی زاویه‌ی ۹۰° انجام شده است و تاکنون مطالعه‌ی تجربی روی

افزایش تعداد پاس‌ها ریزدائگی افزایش می‌یابد. از دیگر عوامل مهم در فرآیند ایکپ زاویه کانال اصلی است. با افزایش زاویه کانال اصلی مقدار تنش بر قطعه و قالب کاهش و با کاهش زاویه کانال اصلی مقدار تنش بر قطعه و قالب افزایش می‌یابد [۱۱].

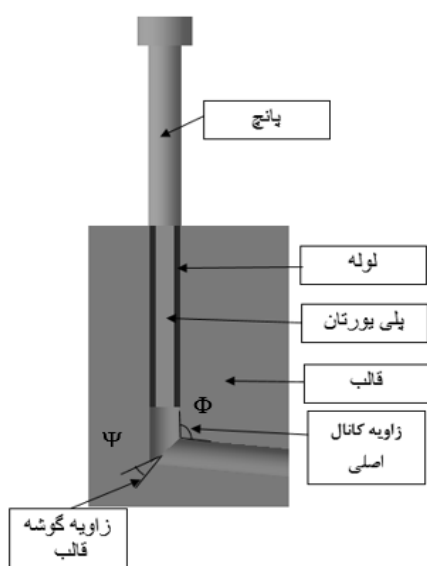
روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید برای لوله‌ها از جمله روش‌های نسبتاً جدید و دارای مطالعات تجربی و تئوری کمتری نسبت به سایر روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید است [۱۲]. اولین روش تغییر شکل پلاستیک شدید که مناسب تولید لوله‌های فوق ریزدانه و نانو ساختار ارائه شده است، توسط توث و همکارانش، در سال ۲۰۰۹ با نام روش پیچش لوله فشار بالا است [۱۳].

روش دیگری توسط فرجی و همکارانش مطابق شکل ۱ بانام روش فشردن در کانال زاویه‌دار لوله‌ای موازی^۱ (PTCAP) ارائه شده که به نوعی شبیه فرآیند ایکپ است [۱۴].



شکل (۱): مراحل مختلف فرآیند PTCAP برای ایجاد تغییر شکل پلاستیک شدید روی لوله‌ها [۱۴].

در این فرآیند دو مرحله‌ای، ابتدا لوله به درون منطقه‌ای با قطر بزرگ‌تر اکستروژد شده که در نتیجه آن، قطر لوله بیشتر می‌شود، سپس مجدداً از همان مسیر اکستروژن معکوس شده تا به قطر اولیه خود بازگردد [۱۵]. دو مرحله‌ای بودن و همچنین افزایش قطر لوله در اثر این فرآیند می‌تواند یکی از عیوب این فرآیند محسوب شود.



شکل (۳): شماتیک فرآیند ایکپ لوله.

۳- مدل سازی المان محدود

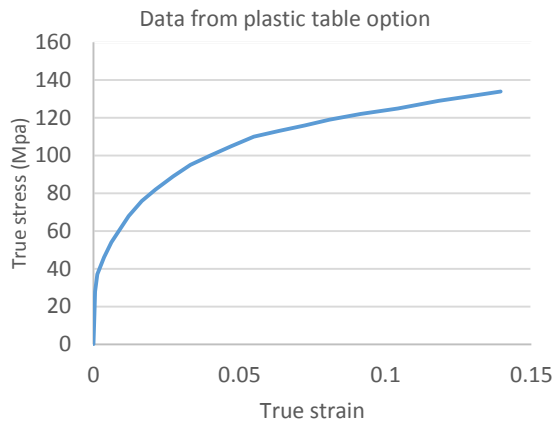
مدل سازی المان محدود به دلیل پیش بینی شرایط قطعه کار در شرایط مرزی مختلف هزینه ها و آسیب های ناشی از آزمایش های تجربی بر ماشین آلات را به مقدار زیادی کاهش می دهد. در این پژوهش به دلیل بالا بودن آزمایش های تجربی مورد نیاز برای تعیین رفتار نمونه آلومینیومی در شرایط مختلف هندسی قالب، از مدل سازی المان محدود استفاده شد. مدل سازی المان محدود توسط نرم افزار آباکوس که توانایی بالایی در مدل سازی فرآیندهای شکل دهی را دارد مورد استفاده قرار گردید. توسط روش اجزاء محدود بررسی پارامتریک برای تعیین تأثیر پارامترهای مختلف از جمله نسبت زوایای گوشه ها، زاویه کانال اصلی و همچنین روش مورد استفاده روی مقدار و توزیع کرنش، همگنی کرنش و نیروی مورد نیاز انجام گرفته است. رفتار مکانیکی دو جزء تغییر پذیر مدل یعنی لوله و میله پلاستیکی را باید برای نرم افزار مشخص نمود. لوله از جنس آلومینیوم است و رفتار آن به صورت الاستیک-پلاستیک کار سخت شونده است و میله پلاستیکی از جنس پلی یورتان است که یک الاستومتر با رفتار مکانیکی فوق العاده الاستیک است. جنس انتخاب شده آلیاژ آلومینیوم ۳۰۳ بود که توسط آزمایش کوانتومتری درصد عناصر آلیاژی استخراج شد. استاندارد مورد استفاده برای آزمایش کوانتومتری براساس منبع با کد ۲۰۱۵: 1251۱۱- ASTM E است. در جدول ۱ درصد عناصر آلیاژی آلومینیوم استفاده شده نمایش داده شده است.

زاویه کانال ۹۰ به بالا انجام نشده است. برای تحلیل فرآیند جدید، شبیه سازی اجزا محدود سه بعدی به منظور بررسی جریان مواد، کرنش پلاستیک اعمالی و حداکثر نیرو فرآیند انجام شد. همچنین آزمایش های تجربی برای بررسی صحت نتایج اجزا محدود انجام گرفت. در ادامه، به نحوه مدل سازی قالب و همچنین تأثیر پارامترهای تأثیرگذار پرداخته می شود.

۲- اکستروژن لوله به روش ایکپ

شکل ۳ فرآیند اکستروژن لوله به روش ایکپ را به صورت شماتیک نشان می دهد. در شروع فرآیند یک لوله که در داخل آن بیلت استوانه ای شکل پلی یورتان قرار گرفته است در داخل کانال قالب قرار گرفته و توسط فشار هیدرولیک دستگاه پرس به واسطه سنبه به انتهای کانال هدایت می شود. سطح مقطع کانال بایستی دارای کیفیت سطح بالایی باشد تا موجب چروکیدگی و ترک برداشتن در اثر اصطکاک بالا نشود. همان طور که در شکل مشخص شده است زاویه بین دو کانال مهم ترین عامل در میزان کرنش و تنش اعمالی به قطعه است. با افزایش زاویه کانال میزان کرنش و تنش به قطعه کاهش می یابد و تأثیر مطلوبی بر روی استحکام قطعه نخواهیم داشت. همچنین با کاهش بیش از اندازه این زاویه انجام فرآیند امکان پذیر نیست و موجب آسیب قالب و ماشین ابزار می شود. در نتیجه برای قطعات توپر زوایای بالای ۹۰ درجه استفاده گردیده است. در این تحقیق سعی شد برای انتخاب میزان حداکثر استحکام در ازای میزان توزیع کرنش مناسب زاویه بالای ۹۰ درجه نیز به طور اساسی مورد مطالعه قرار گیرد.

زاویه Φ نقش اساسی در مقدار کرنش و زاویه Ψ نقش اساسی در مقدار توزیع کرنش بر نمونه ایکپ شده در قطعات توپر دارد. انتخاب مقدار هر کدام از زوایا بستگی به شرایط جنس ماده و تعداد مراحل ایکپ دارد. انتخاب زاویه Φ و Ψ مناسب با شبیه سازی های صورت گرفته روی جنس قطعه انجام می شود. روش ایکپ به دلیل ساده بودن از نظر پیچیدگی ساختاری و تولید، انتخاب مناسبی برای توسعه و ارتقای کیفی و کمی آن است. روش های فشردن در کانال زاویه دار لوله ای موازی و فشردن در کانال لوله ای از تغییر ابعادی استفاده می کنند که عاملی برای بالا رفتن هزینه ساخت قالب ها می شود. از این رو، به نظر می رسد انتخاب روشی با پیچیدگی ساختاری کمتر و کارایی برابر انتخاب مناسبی برای توسعه و تحقیق است.



شکل (۴): نمودار تنش و کرنش آلومینیوم ۳۰۰۳.

خصوصیات مندرل پلی‌یورتان از نوع هایپرالاستیک است. رفتار پلی‌یورتان هایپرالاستیک غیرخطی است که شبیه مدل مونی-ریولین^۱ استفاده می‌شود. برای تعریف خصوصیات مندرل پلی‌یورتان به نرم‌افزار ABAQUS از جدول ۲ استفاده شد [۱۸].

خصوصیات مکانیکی موارد rubber pad، تعیین تست فشار مطابق استاندارد ASTM D575 در جدول ۲ لیست شده است.

جدول (۲): خصوصیات مکانیکی مندرل پلی‌یورتان [۱۸].

Hardness shore A	M-R constant C_{01} (MPa)	M-R constant C_{10} (MPa)	Poisson's ratio
۹۰	۰/۹۶۹	۰/۳۹۳	۰/۴۹۹

در این شبیه‌سازی سه نوع تماس در مدل‌سازی وجود داشت. تماس لوله با قالب که مقدار اصطکاک از نوع کلمب و مقدار ۰/۰۵ انتخاب گردید. همچنین در شبیه‌سازی‌های انجام‌شده توسط محققان در انواع دیگر روش‌های سرد مربوط به لوله مقدار ۰/۰۵ نیز انتخاب شده است. تأثیر اصلی اصطکاک بر روی نیروی پانچ است و با افزایش مقدار اصطکاک، نیروی موردنیاز برای تغییر فرم افزایش می‌یابد. تماس بین میله پلاستیکی و لوله آلومینیومی که با توجه به ثابت و بی‌حرکت ماندن میله پلاستیکی در داخل لوله آلومینیومی در کار تجربی در شبیه‌سازی نیز با استفاده از Tie این دو جزء مدل نسبت به هم ثابت شدند (شکل ۵). تماس بین پانچ و سطح بالای لوله آلومینیومی با ضریب اصطکاک ۰/۰۵ و از نوع پنالتی در نظر گرفته شد [۱۹].

جدول (۱): عناصر تشکیل‌دهنده آلومینیوم ۳۰۰۳.

AL	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti
Base	۰/۷۱	۰/۷۲	۰/۱۱	۰/۳	۰/۴۰	۰/۱۶	۰/۲۲	۰/۱۴	۰/۱۶

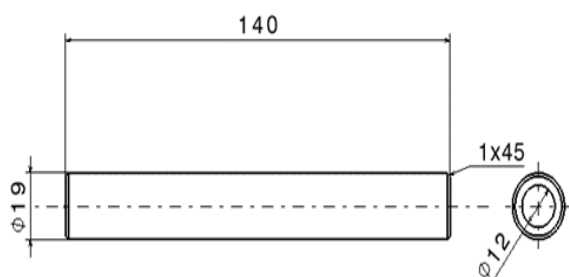
برای وارد کردن مقادیر مربوط به خصوصیات آلومینیوم گروه ۳۰۰۳ از منحنی تنش و کرنش به‌دست‌آمده از تست کشش و هندبوک مهندسی مقادیر $E=69 \text{ Gpa}$ و 0.33 و $d=2700$ لحاظ گردید. برای تعیین مقادیر الاستیک و پلاستیک با توجه به استاندارد ASTM E8/EM8-13a2015 نمونه آلومینیومی آماده شد و مقادیر نمودار تنش و کرنش حاصل‌شده به مقادیر حقیقی تبدیل گردید. برای مدل‌سازی مواد کار سخت‌شونده می‌توان از نتایج آزمایش کشش برای تعیین رفتار ماده استفاده نمود. در این فرآیند به‌علت تغییر فرم زیادی که در قطعه ایجاد می‌شود رفتار ماده بایستی در حالت پلاستیک هم به نرم‌افزار تعریف گردد؛ اما داده‌های حاصل‌شده از آزمایش کشش تا ایجاد گلویی شدن به‌صورت منحنی تنش و کرنش حقیقی قابل استفاده است و بعد از آن باید از منحنی سیلان استفاده کرد. منحنی سیلان در تعدادی از فلزات انعطاف‌پذیر در محدوده تغییر شکل پلاستیکی یکنواخت در دمای محیط معمولی با استفاده از رابطه هولمن و لودویگ توصیف می‌شود [۱۷]:

$$\sigma = K \varepsilon^n \quad (1)$$

در این رابطه، K و n ضرایب ثابتی هستند که به آنالیز شیمیایی ماده فلزی، ساختار کریستالی، ریزساختار، آهنگ کرنش و دما بستگی دارد. n توان (نمای) سختی کرنشی برای منحنی تنش سیلان در محدوده تغییر شکل پلاستیک یکنواخت و K ضریب استحکام نامیده می‌شود. معادله (۲) برای تعیین خصوصیات پلاستیکی از نمودار تنش و کرنش ماده به‌دست آمده است.

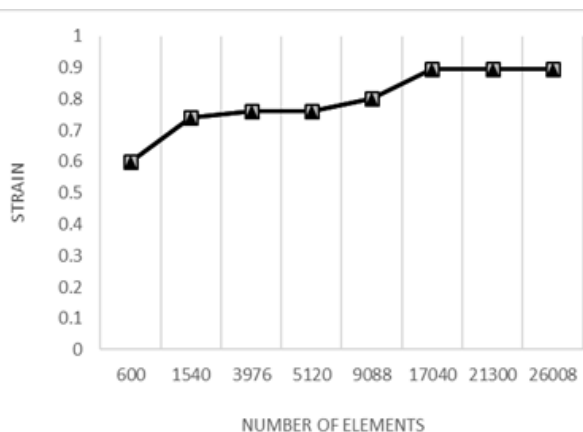
$$\sigma = 226 \varepsilon^{0.2066} \quad (2)$$

در شکل ۴ نمودار تنش و کرنش آلومینیوم استفاده شده نمایش داده شده است.



شکل (۶): ابعاد لوله استفاده شده در تست شبیه‌سازی.

برای مدل‌سازی المان محدود لوله ابتدا حساسیت مش انجام شد. نمودار همگرایی مش در لوله در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل ۷ مشخص گردیده است در تعداد المان ۱۷۰۴۰ مقدار کرنش در ناحیه بررسی شده تغییر چندانی نداشته و برای شبیه‌سازی‌های انجام شده این تعداد المان انتخاب شد. نوع مش لوله از نوع C3D8R مورد استفاده قرار گرفت.

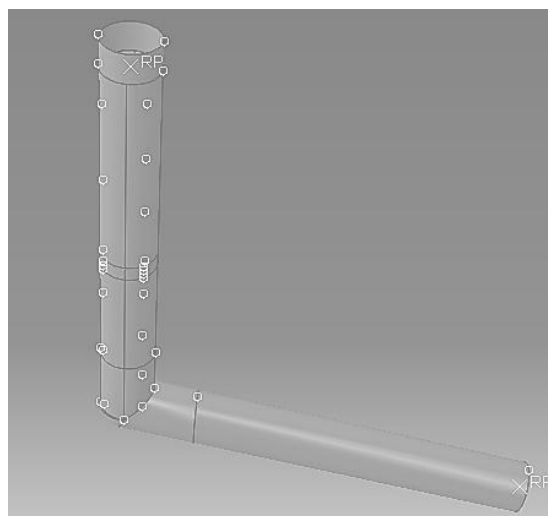


شکل (۷): تعداد المان‌ها و مقدار کرنش به دست آمده ناحیه مشخصی از لوله.

برای بررسی حساسیت مش در مندرل پلی‌یورتان متناسب تعداد مش‌های تغییر یافته در لوله مورد بررسی قرار گرفت. نوع مش مندرل پلی‌یورتان C3D8R با تعداد ۱۹۲۵۰ المان مشخص گردید. لازم به ذکر است که هندسه و ابعاد قطعه استفاده شده در این تحقیق مشابه مرجع [۱۷] بر روی لوله مسی است که برای مقایسه نتایج دو آلیاژ مورد استفاده قرار گرفت.

۴- نتایج و بحث و بررسی

برای مطالعه و بررسی رفتار آلومینیوم شبیه‌سازی‌ها به‌طور دقیق در قسمت خروجی نرم‌افزار بررسی گردید.



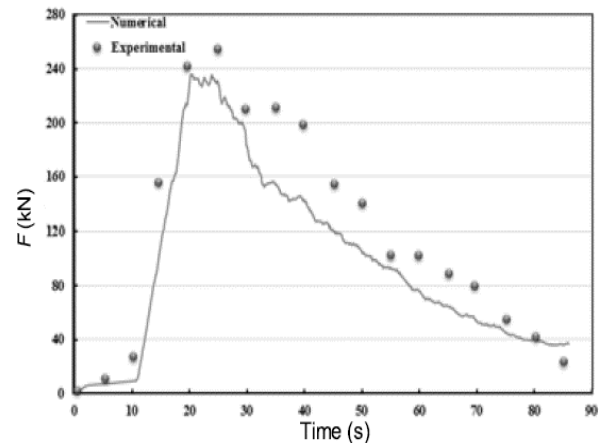
شکل (۵): تصویر بالا مربوط به تماس سطوح نمایش داده شده در نرم‌افزار آباکوس است.

فرآیند شبیه‌سازی همانند کار تجربی بدین گونه مدل شده است که میله پلاستیکی از نوع پلی‌یورتان در داخل لوله آلومینیومی قرار گرفته و لوله نیز در داخل قالب مونتاژ می‌شود و در نهایت قالب را ثابت کرده و سرعت $1/5 \text{ m/s}$ را مطابق روش تجربی به انتها لوله و میله اعمال می‌کنیم. نوع تحلیل برای شبیه‌سازی از نوع Dynamic/Explicit و Mass scaling و مش اویلری- لاگرانژی^۱ به نرم‌افزار تعیین گردید. شیوه مش‌بندی اویلری- لاگرانژی که از آن بیشتر تحت عنوان ALE یاد می‌شود کاربردی وسیعی در مسائل شکل‌دهی و تحلیل‌های دینامیکی دارد. همان‌طور که انتظار می‌رود، در حین فرآیند شکل‌دهی بسیاری از المان‌های مدل، مخصوصاً المان‌های سطحی که در تماس مستقیم با قالب قرار می‌گیرند، به شدت دچار تغییر شکل شده و شکل و ویژگی‌های مطلوب یک المان را از دست می‌دهند. اگر میزان تغییر شکل المان‌ها از حدی تجاوز کند که نرم‌افزار در تحلیل با مشکل همگرایی مواجه شود، طبیعتاً بدون پایان یافتن کامل تحلیل، روند تحلیل با پیغام خطا متوقف می‌شود. در چنین مواردی استفاده از روش ALE در تحلیل بسیاری از مشکلات را برطرف کرده و پاسخی به مراتب بهتر و دقیق‌تر به دست می‌دهد [۲۰].

در شکل ۶ ابعاد دقیق لوله استفاده شده برای شبیه‌سازی‌ها و آزمایش تجربی نمایش داده شده است. برای افزایش دقت شبیه‌سازی پارتیشن‌هایی در طول لوله اعمال شد.

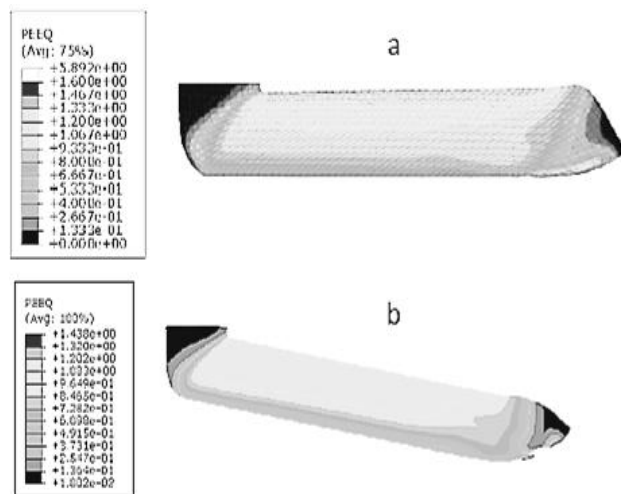
۴-۱- نتایج شبیه‌سازی

برای صحت‌گذاری شبیه‌سازی از نتایج مرجع [۱۷] استفاده شد. شکل ۸ نتایج میزان نیرو را برای نمونه مسی نمایش می‌دهد.



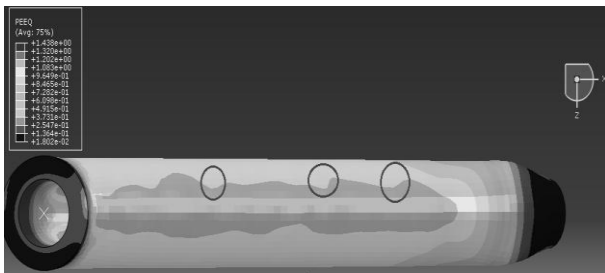
شکل (۸): نمودارهای نیرو مورد نیاز در شبیه‌سازی و فرآیند تجربی آلیاژ مس [۱۷].

همچنین برای مقایسه توزیع کرنش حاصل‌شده با پژوهش‌های دیگر از مرجع [۲۱] استفاده شد. وجود تشابه در کانتورهای کرنش نشان از یکسان بودن نوع شرایط مرزی دارد. البته در مرجع بررسی‌شده زاویه کانال اصلی ۹۰ درجه است که کرنش قسمت بالایی کمی بیشتر است. در شکل ۹ در قسمت a کانتورهای تنش مرجع [۲۱] و در قسمت b کانتورهای حاصل شده از شبیه‌سازی در این پژوهش نمایش داده شده است.

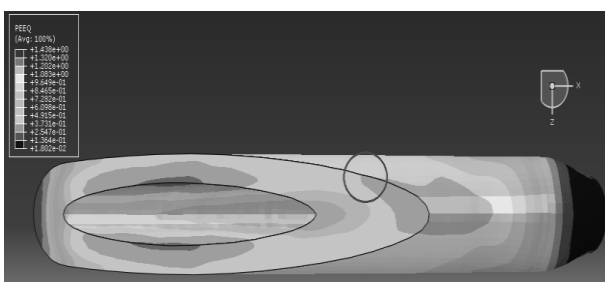


شکل (۹): در شکل بالا مشابهت کانتورهای توزیع کرنش پلاستیک نمایش داده شده است. نمونه a مرجع [۲۱] و نمونه b مربوط به این پژوهش است.

نوع مش قالب و سنبه از نوع R3D4 تعیین شد. ابعاد لوله و مندرل پلی یورتان در بخش آزمایش تجربی مطابق روش عددی می‌باشد و براساس نتایج شبیه‌سازی زاویه کانال قالب ۱۰۰ درجه و شعاع گوشه داخلی ۸ mm استفاده گردید. به‌دلیل وجود لقی بین قطعه و دیواره قالب از شبیه‌سازی متقارن استفاده نشد. البته شبیه‌سازی متقارن زمان را کاهش می‌دهد اما به‌دلیل نیاز بودن به نتایج دقیق از شبیه‌سازی کامل استفاده گردید. شکل ۱۰ و ۱۱ کانتورهای توزیع کرنش بعد از فرآیند ایکپ لوله آلومینیومی را در سطح و برشی از مقطع نمایش می‌دهد که کانتور مرکزی دارای تغییراتی هست. با توجه به تعریف شبیه‌سازی‌های متقارن به‌نظر می‌رسد نتایج خروجی در شبیه‌سازی‌های متقارن برابر است اما همان‌گونه که در شکل مشخص است این تغییرات کانتوری در شبیه‌سازی متقارن دیده نخواهد شد.



شکل (۱۰): توزیع کرنش پلاستیک معادل در سطح لوله را نمایش می‌دهد.

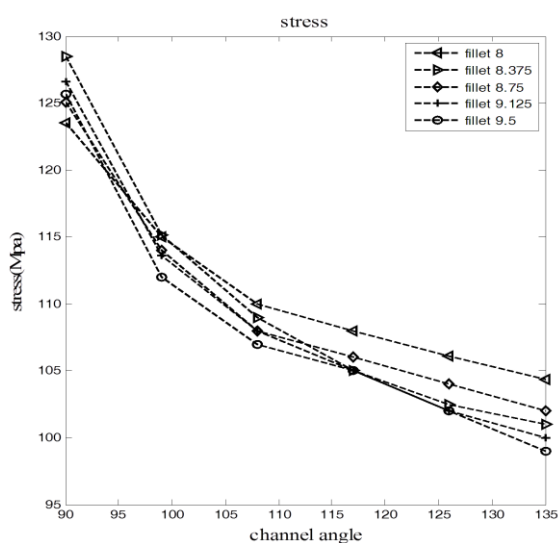


شکل (۱۱): در شکل بالا تفاوت کانتور توزیع کرنش پلاستیک معادل در برشی از مقطع نمایش داده شده است.

پس از تعیین شرایط مرزی و خصوصیات مواد مورد استفاده در نرم‌افزار المان محدود به بررسی زوایا و فرم‌های هندسی که در فرآیند ایکپ قابل دستیابی است پرداخته شد. در چند شبیه‌سازی مجزا ابتدا به تعیین فرم هندسی شعاع گوشه قالب پرداخته شد. چهار شعاع متفاوت ۶، ۷، ۸، ۹ در قالب مورد بررسی قرار گرفت. بعد از شبیه‌سازی مشخص

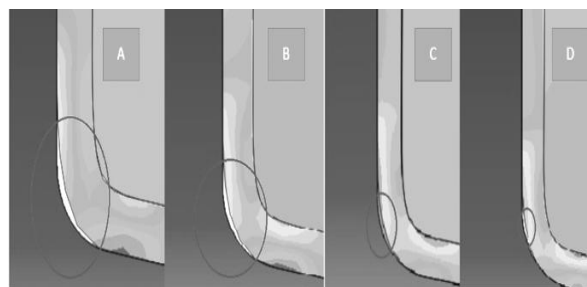
۱۰۰ می‌تواند یک زاویه مناسب برای لوله‌ها باشد. البته زوایای بیشتر از ۱۰۰ هم را می‌توان انتخاب کرد اما بایستی تعداد مراحل ایکپ را افزایش داد که این یک اشکال است. همان‌گونه که در نمودارها مشخص گردیده است شعاع گوشه ۸ به لحاظ تنش وارد شده بر قطعه بهترین مقدار خود را نسبت به شعاع‌های دیگر نشان داده است. شعاع گوشه ۸ mm در زاویه ۹۰ تا ۱۰۰ درجه می‌تواند بهترین انتخاب برای کاهش دادن تنش بر قطعه کار که ممکن است منجر به شکست لوله شود باشد.

در شکل ۱۴ نمودار کرنش متوسط براساس زاویه کانال اصلی و شعاع گوشه قالب از شبیه‌سازی‌های انجام گرفته رسم شده است. همان‌گونه که در شکل مشخص است بیشترین کرنش در زاویه ۹۰ درجه به دست آمده و با افزایش زاویه کانال اصلی مقدار کرنش متوسط کاهش یافته است. در زوایای بالای ۱۲۰ درجه مقدار کرنش تقریباً به نصف مقدار در زوایای کمتر از ۱۰۰ درجه رسیده است. با کاهش کرنش دیگر نمی‌توان انتظار رسیدن به ریزساختار و استحکام بالاتر داشت. هرچه مقدار کرنش افزایش داشته باشد به همان میزان به هدف اصلی این فرآیند که رسیدن به ساختار اصلاح شده است نزدیک‌تر می‌شویم از طرفی محدودیت‌های قالب از نظر استحکام در استفاده از زوایای کم وجود دارد که ما را در انتخاب زاویه مناسب حساس‌تر می‌کند.



شکل (۱۳): نمودارهای تنش متوسط لوله بر اساس زاویه کانال اصلی و مقدار شعاع گوشه قالب در دو شعاع گوشه مختلف.

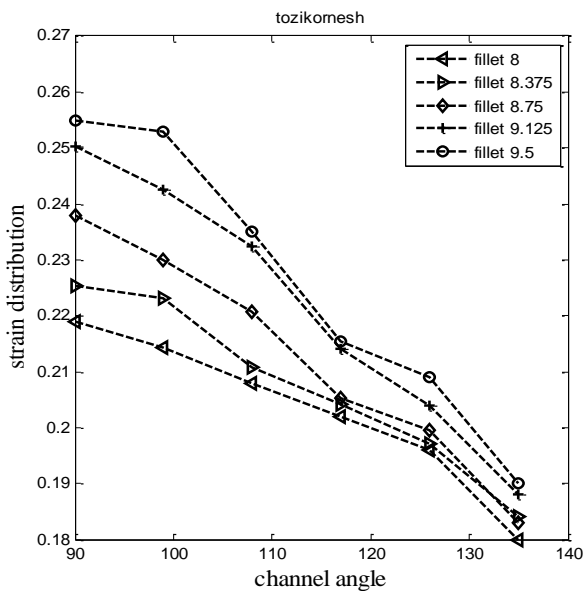
گردید که شعاع‌های کمتر از ۸ به دلیل ایجاد ناحیه مرده نمی‌توانند مورد مناسبی برای انتخاب باشند زیرا باعث تحمل فشار زیاد به علت تمرکز تنش در ناحیه درگیر می‌باشند. از طرفی با افزایش بیش از اندازه شعاع گوشه، ناحیه تغییر فرم شدید کمتر شده و تأثیری که این فرآیند روی قطعه ایجاد می‌کند از بین می‌رود. براساس کانتورهای تنشی که در شکل ۱۲ مشخص شده است، بهترین شعاع گوشه برای قالب‌های ایکپ لوله ۸ mm تا ۹/۵ mm می‌باشد.



شکل (۱۲): سطوح درگیر لوله و سطح قالب (A=6, B=7, C=8, D=9) را نمایش می‌دهد.

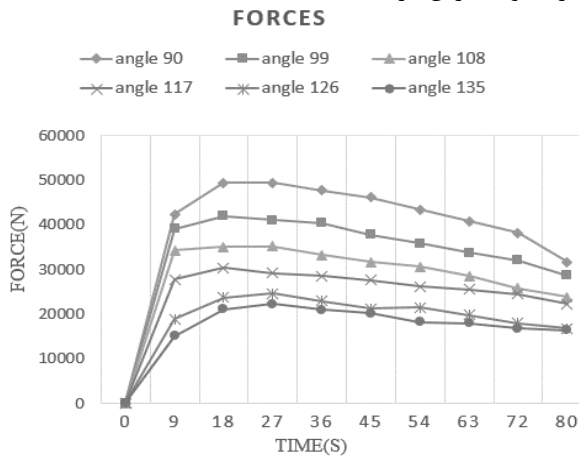
دلیل دیگر احتمال ترکیدگی در لوله به علت کاهش سطح مقطع تماس و افزایش تنش و فشار در نواحی دیگر افزایش یافته و احتمال شکست و گیرکردن لوله بالا می‌رود. پس از تعیین محدوده پارامترهای تأثیرگذار با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی‌هایی انجام شد تا با استفاده از نتایج حاصل شده رفتار ماده بدون انجام آزمایش‌های تجربی متعدد پیش‌بینی کند. در حقیقت با تثبیت رفتار ماده در نرم‌افزار المان محدود و آزمایش تجربی می‌توان با انجام شبیه‌سازی‌های مختلف مطالعه مناسبی از رفتار ماده داشت و به انتخاب بهترین پارامترهای که بیشترین بازدهی دارند دست یافت.

پس از شبیه‌سازی‌های صورت گرفته نقش زاویه کانال و فیلت گوشه بر روی تنش، کرنش و توزیع کرنش بررسی شدند. در شکل ۱۳ نمودار تنش متوسط در لوله مشخص گردیده است. همان‌طور که مشخص گردیده است در زوایای ۹۰ تا ۹۵ بیشترین تنش اعمال شده به لوله حاصل شده است. با توجه به نیروی مورد نیاز و سطح مقطع قطعه مورد آزمایش که لوله است انتخاب زوایای کمتر از ۱۰۰ باعث تنش اعمالی بالایی می‌شود که احتمال شکست لوله و آسیب ماشین‌ابزار وجود دارد. با توجه به شرایط جنس قالب و ماشین‌ابزار مقدار زاویه

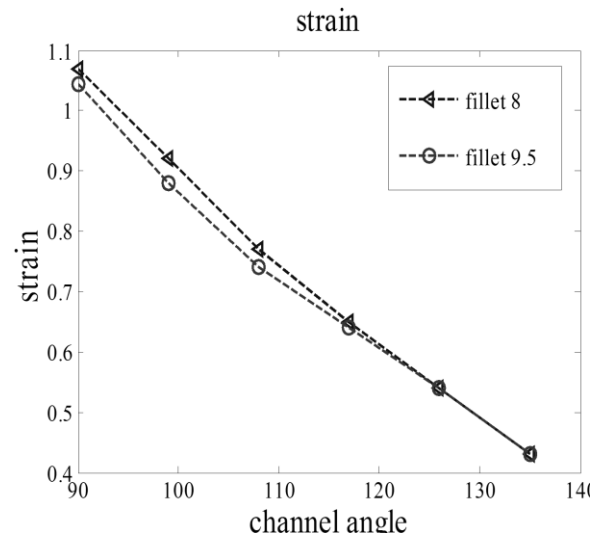


شکل (۱۵): توزیع کرنش براساس زاویه کانال اصلی و مقدار شعاع گوشه قالب.

با توجه به شکل‌های (۱۳-۱۵) به نظر می‌رسد استفاده از زوایای بین ۱۰۰ تا ۱۱۵ درجه برای رسیدن به کرنش و توزیع کرنش مناسب مطلوب‌تر هستند. کاهش تنش از زاویه ۹۰ تا ۱۰۰ درجه با شیب بیشتری از ۱۰۰ تا ۱۲۰ درجه می‌باشد و می‌توان این‌گونه توضیح داد که ما برای داشتن نیروی مورد نیاز کمتر پرس‌کاری و توزیع کرنش مناسب‌تر زاویه ۱۰۰ را به جای ۹۰ درجه با توجه به کرنش بیشتری که زوایای نزدیک ۹۰ دارند انتخاب می‌کنیم. در شکل ۱۶ نیروهای پرس‌کاری در زوایای مختلف کانال اصلی و شعاع گوشه ۸ mm نمایش داده شده است. بیشترین نیروی حاصل گشته در زاویه کانال ۹۰ درجه و کمترین در ۱۳۵ است.



شکل (۱۶): نیروهای به‌دست‌آمده در زوایای مختلف کانال اصلی و شعاع گوشه ۸ mm نمایش داده شده است.



شکل (۱۴): نمودارهای کرنش متوسط براساس زاویه کانال اصلی و مقدار شعاع گوشه قالب در دو شعاع گوشه مختلف.

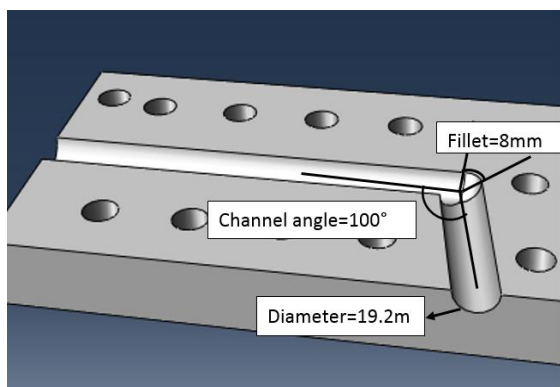
معادله ۳ توزیع کرنش بر اساس انحراف معیار استاندارد است که با تقسیم بر میانگین کرنش پلاستیک معادل مقدار توزیع کرنش را می‌دهد. هرچه این عدد پایین‌تر باشد قطعه دارای توزیع مناسب‌تری نسبت به میانگین کرنش است.

$$CV \varepsilon_p = \frac{Stdev \varepsilon_p}{Avg \varepsilon_p} \quad (3)$$

که در آن، $CV \varepsilon_p$ مقدار توزیع کرنش پلاستیک، $Stdev \varepsilon_p$ انحراف معیار استاندارد کرنش پلاستیک معادل و $Avg \varepsilon_p$ متوسط کرنش پلاستیک معادل در نمونه است. هرچه مقدار عدد به‌دست‌آمده پایین‌تر باشد قطعه همگن‌تر است و دارای توزیع کرنش مناسبی است. همان‌طور که در شکل ۱۵ مشخص است تا زاویه ۱۳۵ درجه کانال اصلی توزیع کرنش کاهش دارد. این سیر نزولی حاکی از پیروی توزیع کرنش نسبت به زاویه کانال قالب می‌باشد. هرچه زاویه افزایش بیشتری دارد توزیع کرنش نیز کاهش می‌یابد و قطعه تولید شده همگن‌تر می‌باشد. همگن بودن به این معنی است که کرنش‌های به‌دست‌آمده در تمامی نقاط مشابه هستند.

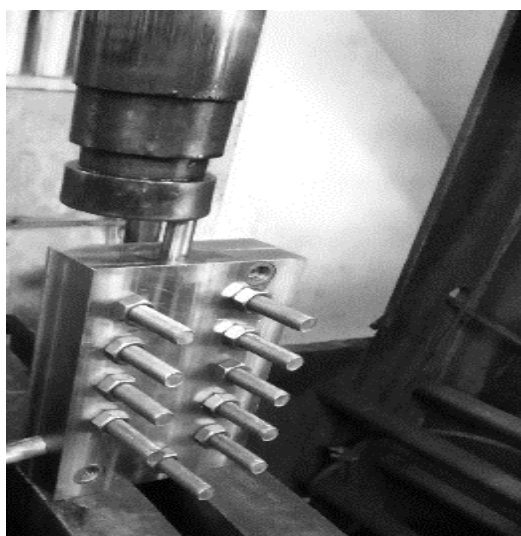
با توجه به نمودارهای شکل ۱۵ بهترین توزیع کرنش وقتی که زاویه شعاع گوشه قالب ۸ mm باشد به‌دست می‌آید. این توزیع کرنش با در نظر گرفتن مقدار کرنش متوسط لوله می‌باشد. اگر چه زوایای بالای ۱۲۰ درجه توزیع کرنش مناسب‌تر می‌باشد ولی مقدار کرنش متوسط مناسب نمی‌باشد.

جنس قالب از فولاد Mo60 و جنس سنبه از فولاد قالب گرم کار استفاده گردید. برای روان کاری از دو نوع روغن با ویسکوزیته بالا و نوعی پودر خشک استفاده شد. در شکل ۱۹ هندسه قالب استفاده شده نمایش داده شده است. برای افزایش کیفیت سطح داخل کانال از استراتژی با پیشروی بسیار پایین استفاده گردید تا حداکثر کیفیت سطح حاصل گردد.



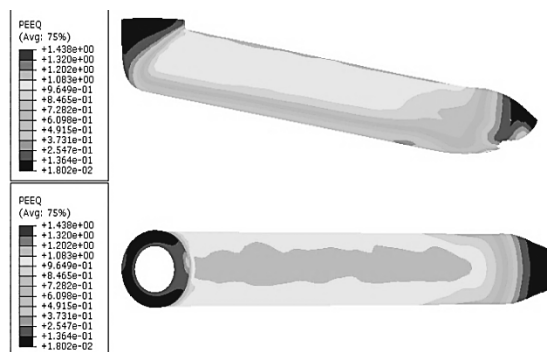
شکل (۱۹): هندسه یک کفه متقارن استفاده شده در آزمایش تجربی.

در شکل ۲۰ نحوه انجام فرآیند ایکپ و موقعیت‌دهی نمایش داده شده است. بعد از آماده‌سازی نمونه‌ها، توسط قالب ساخته شده فرآیند ایکپ انجام گردید. همان‌گونه که در شکل ۲۰ قابل ملاحظه است باید کف قالب با سطح سنبه قالب موازی باشد و محور عمودی کانال با محور سنبه دقیقاً هم‌محور باشد. وجود هرگونه انحراف در موقعیت‌دهی باعث آسیب قالب می‌شود. در شکل ۲۱ یک نمونه قطعه قبل و بعد فرآیند نشان داده شده است.



شکل (۲۰): نحوه اجرا فرآیند ایکپ و مسیر حرکت پرس.

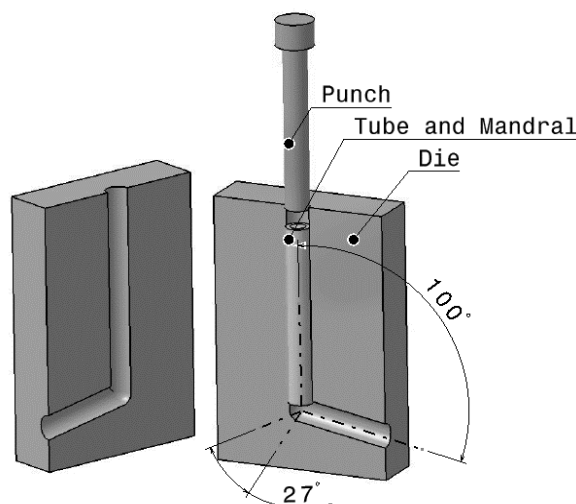
در شکل ۱۷ توزیع کرنش به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی در زاویه کانال ۱۰۰ و فیلت ۸ mm نشان داده شده است. کرنش به‌دست‌آمده در ناحیه بالایی نمونه دارای یکنواختی بسیاری خوبی هست. ابتدا و انتهای لوله نیز به‌علت در معرض قرار نرفتن تغییر فرم پلاستیک شدید کرنش بالایی را نشان نمی‌دهند.



شکل (۱۷): نمایش کانتورهای توزیع کرنش لوله توسط نرم‌افزار المان محدود در دو نمای روبرو و بالا.

۴-۲ - آزمایش تجربی

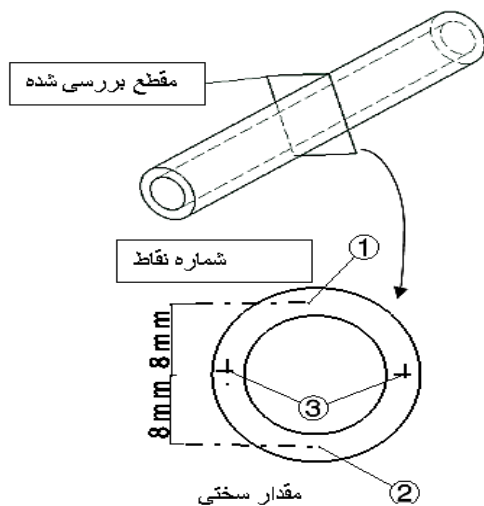
شکل ۱۸ مقطع قالب ساخته شده را نشان می‌دهد. کانال قالب با زاویه ۱۰۰ درجه و شعاع گوشه ۸ mm که تقریباً معادل زاویه ۲۷ درجه است استفاده گردید. به‌دلیل تفسیر و بررسی نتایج شبیه‌سازی، استفاده از پارامترهای عنوان‌شده از نظر مقدار کرنش و توزیع کرنش مناسب هستند. چون فرم هندسی قالب در این پژوهش یک‌بار ماشین‌کاری شده است سعی بر این شد که پارامترهای انتخاب شده مناسب باشند و برای صحت‌گذاری در شبیه‌سازی نیز مورد استفاده قرار گیرند.



شکل (۱۸): مدل مقطع قالب ساخته شده.

میزان سختی در سه نقطه مشابه در قبل و بعد از فرآیند انجام شد. در شکل ۲۳ تغییرات سختی نمایش داده شده است. همان‌گونه که در شکل مشخص شده است میانگین سختی در قبل فرآیند ۵۵ برینل بوده که به ۸۳ برینل افزایش پیدا کرده است؛ بنابراین، میزان سختی نمونه‌های ایکپ شده، نسبت به نمونه خام اولیه به طور میانگین ۶۰ درصد افزایش داشت. بیشترین مقدار سختی در قسمت بالای سطح مقطع نمونه و کمترین آن در قسمت پایین است. با توجه به هندسه قالب در قسمت پایین لوله، علاوه بر خمش، برش نیز وجود دارد. این دو تغییر شکل باعث تغییر شکل شدیدتر در این قسمت از لوله و به تبع آن افزایش سختی در این منطقه از سطح مقطع لوله می‌شود. در دو طرف سطح مقطع لوله (راست و چپ) تقریباً میزان سختی برابر است که این مهم را نیز می‌توان به تقارن نمونه و مشابهت شرایط هندسی قطعه نسبت داد.

همچنین نمونه‌های ایکپ شده از لحاظ تغییر ضخامت مورد بررسی قرار گرفتند. ضخامت لوله ۳/۵ mm است. همان‌طور که در شکل ۲۴ مشخص شده است ضخامت لوله در مرکز بیشتر از ابتدا و انتها آن است. بیشترین اختلاف در ضخامت‌ها ۰/۱۲ است که به علت تغییر فرم سرد مقدار آن قابل قبول است. این بررسی در ۴ مقطع لوله پس از برش در چهار نمونه انجام شد تا تغییر فرم لوله بررسی شود.



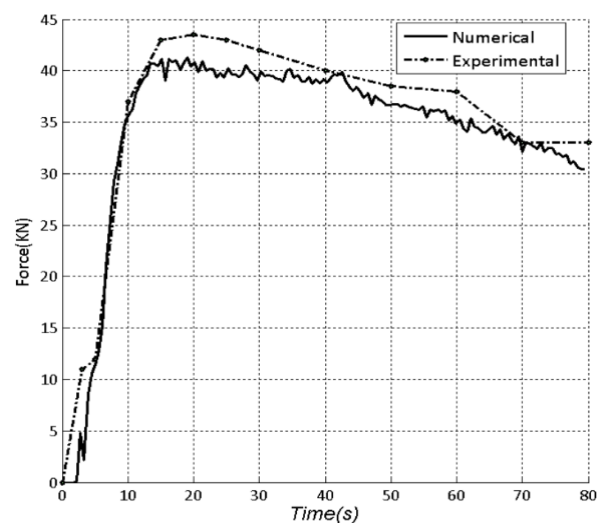
موقعیت	لیکپ شده	لیکپ نشده	جدول سنجی
۱	۸۴	۵۴	نقطه ۱
۲	۸۲	۵۶	نقطه ۲
۳	۸۳	۵۵	نقطه ۳

شکل (۲۳): سختی سه نقطه مشابه از لوله.



شکل (۲۱): لوله قبل و بعد فرآیند ایکپ.

برای صحت‌گذاری شبیه‌سازی مقدار نیرو خوانده شده از روی دستگاه پرس با مقدار نیرو شبیه‌سازی مورد مقایسه قرار گرفتند. شکل ۲۲ میزان نیرو مورد نیاز را برای فرآیند ایکپ لوله آلومینیومی در حالت تجربی و عددی را نشان می‌دهد. خطای حاصل از شبیه‌سازی حدود ۶/۸ درصد است که نشان‌دهنده مطابقت مناسب می‌باشد.



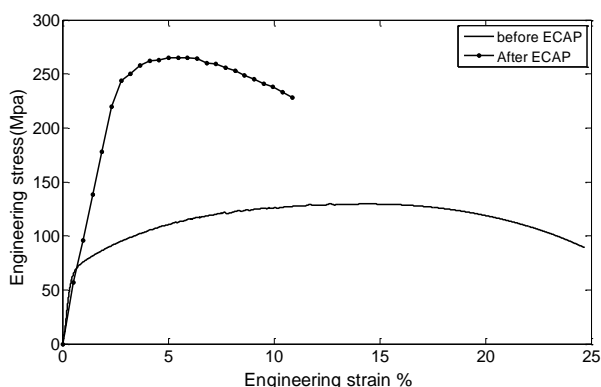
شکل (۲۲): نمودارهای نیروی مورد نیاز در شبیه‌سازی و فرآیند تجربی آلیاژ آلومینیوم.

۳-۴- نتایج آزمایشگاهی

قطعات ایکپ شده برای بررسی دقیق ساختار به دست آمده بعد از ایکپ، به طور دقیق بررسی گردید.

۳-۴-۱- نتایج آزمایش سختی سنجی و ضخامت لوله

برای تعیین میزان سختی تغییر کرده در قطعه مورد آزمایش، قبل و بعد فرآیند ECAP از روش سختی سنجی برینل با کد استاندارد مرجع ASTM E10-14:2015 استفاده شد.

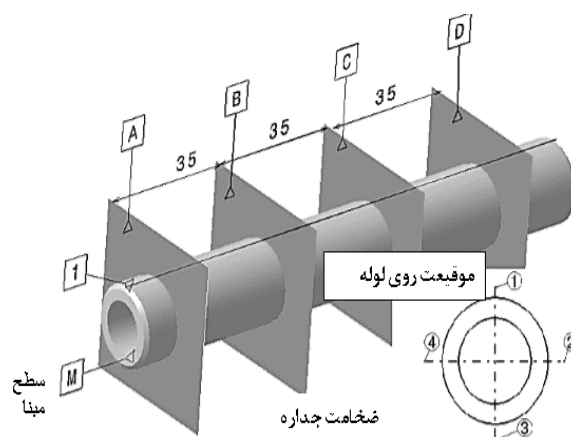


شکل (۲۵): مقایسه نمودار تنش و کرنش مهندسی نمونه قبل و بعد از فرآیند ایکپ.

۴-۳-۳- نتایج آزمایش متالوگرافی

برای آماده‌سازی نمونه‌های متالوگرافی از استاندارد (ASTM E3-11 2015) و برای حکاکی شیمیایی از استاندارد (ASTM E 407-07 2015) و برای تصاویر میکروسکوپ نوری از استاندارد (ASTM E 883-11 2015) و اندازه‌گیری میانگین اندازه دانه از استاندارد (ASTM E 112-12 2015) استفاده شد. تصاویر ریزساختاری حاصل از میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی برای نمونه‌های اولیه خام قبل و بعد از فرآیند ایکپ در شکل‌های ۲۹-۲۶ آورده شده است. با بررسی نمونه‌های خام قبل از فرآیند ایکپ و تحلیل ساختار میکروسکوپی بعد از حکاکی شیمیایی به بافت کشیده دانه‌های محلول جامد α به همراه ترکیبات بین فلزی نامحلول به صورت پراکنده در زمینه برمی‌خوریم.

با بررسی‌های صورت گرفته بر روی تصاویر تهیه شده از ریزساختار نمونه‌های خام و ایکپ شده، مشخص گردید که این آلیاژ دارای ساختار α همراه یوتکتیک $\alpha + \beta$ در مرز دانه‌های خود هست که به دلیل وجود ساختار Si در مرز دانه‌ها که به صورت یوتکتیک $\alpha + \beta$ است موجب شکننده شدن فلز می‌شود ولی پس از سرد شدن تعادلی فلز در اثر فرآیند آنیل، دانه‌های فلز بزرگ‌تر شده که از یوتکتیک $\alpha + \beta$ تشکیل شده که البته از میزان فراوانی این دانه‌ها کاسته شده در نتیجه ساختار، از انعطاف‌پذیری و مقاومت به ضربه بهتری نسبت به حالت ایکپ نشده برخوردار است و به همین جهت قطعات ایکپ شده گسیختگی و نابجایی‌های کمتری نسبت به مواد خام اولیه دارند. همچنین بررسی‌های بیشتر این تصاویر نشان داد که اندازه دانه‌بندی قطعات، به‌طور تقریبی از $254 \mu\text{m}$ به $89 \mu\text{m}$ رسیده است.

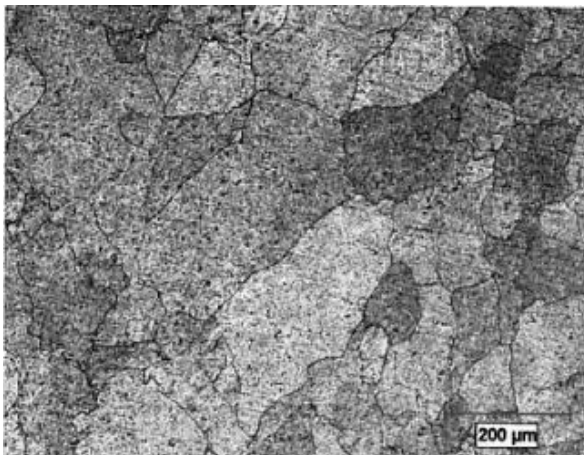


	A	B	C	D
شماره مسیر	۳/۴	۳/۴۱	۳/۴۳	۳/۴۲
بررسی شده	۳/۴۳	۳/۵۲	۳/۵۱	۳/۴۷
	۳/۴۴	۳/۵۱	۳/۵۲	۳/۴۸
	۳/۴۱	۳/۴۵	۳/۴۷	۳/۴۵

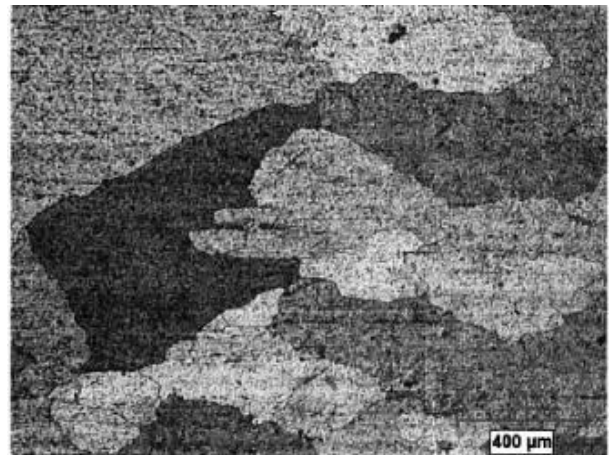
شکل (۲۴): تغییرات ضخامت در ۴ مقطع از لوله (ابعاد به میلی‌متر).

۴-۳-۲- نتایج آزمایش کشش

آزمون کشش یکی از آزمون‌های مخرب علم مواد است که در آن یک نمونه تحت اثر کشش تک‌محوری تا حد شکست مورد مطالعه قرار می‌گیرد. برای مقایسه هرچه بهتر نتایج تست کشش، ابتدا به بررسی و تست کشش نمونه خام اولیه پرداخته شد. از این‌رو آماده‌سازی قطعه، طبق استاندارد ASTM B557M-06 انجام شد. پس از آزمایش استحکام اولیه 130 Mpa به دست آمد. سپس به بررسی استحکام کششی لوله تحت فرآیند ایکپ با مندرل پلی‌یورتان با یک پاس پرداخته شد. پس از تست کشش مقدار استحکام نهایی به 265 Mpa رسید. تغییرات استحکام نشان می‌دهد که با انجام ایکپ قطعه به شرایط مطلوب‌تری رسیده است و این به علت فرآیند کار سردی است که روی آن پیاده‌سازی شده است. در شکل ۲۵ منحنی تنش و کرنش مهندسی آلومینیوم استفاده شده نمایش داده شده است. نتایج تست کشش نشان داد که استحکام نهایی از 130 Mpa به 265 Mpa رسیده است. نمونه قبل از فرآیند ایکپ نرم‌تر بوده و مقدار کرنش بیشتری را متحمل شده است اما بعد از فرآیند ایکپ به دلیل تغییرات ساختاری تردتر شده و کرنش کمتری تحمل کرده است. استحکام نمونه بعد از فرآیند ایکپ به دلیل بالاتر رفتن میزان تنش نهایی بهبود قابل‌ملاحظه‌ای داشته است.



شکل (۲۹). ریزساختار نمونه بعد از فرآیند ایکپ (بزرگ‌نمایی ۵۰x).



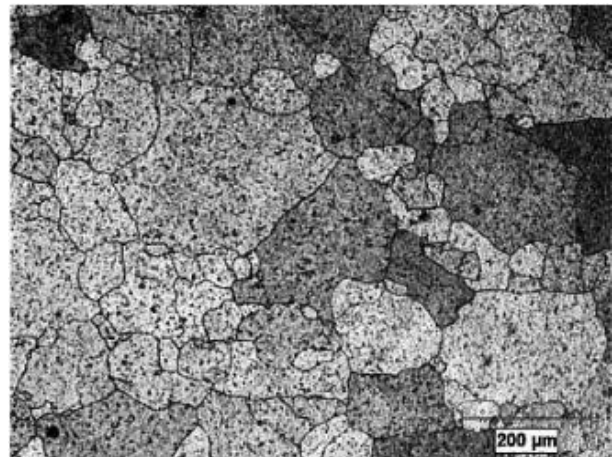
شکل (۲۶): ریزساختار نمونه قبل از فرآیند ایکپ (بزرگ‌نمایی ۲۵x).

۵- نتیجه‌گیری

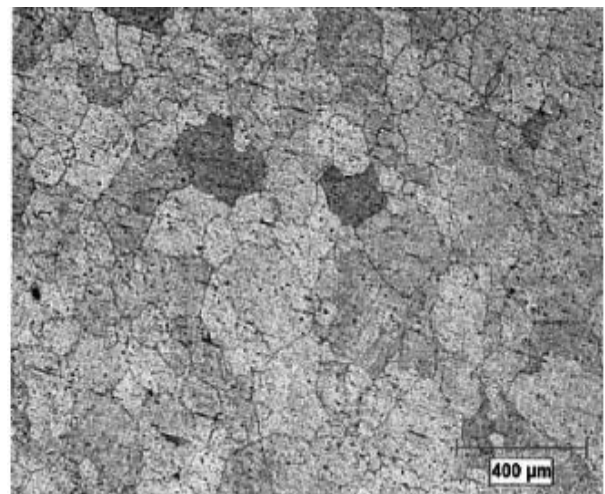
در این مقاله تأثیر زاویه کانال اصلی و شعاع گوشه قالب در فرآیند ایکپ لوله بر روی سختی، استحکام کششی و تغییرات ضخامت لوله از جنس آلیاژ آلومینیوم ۳۰۰۳ مورد بررسی عددی و تجربی قرار گرفت. در شبیه‌سازی عددی مشخص شد که جهت کاهش احتمال شکست لوله، زاویه ۱۰۰ درجه برای قالب مناسب است. نتایج تجربی نشان داد که با استفاده از فرآیند ایکپ می‌توان استحکام کششی لوله آلومینیومی را ۱۰۰ درصد و سختی را حدود ۶۰ درصد افزایش داد. کاهش شدید اندازه دانه‌بندی قطعات ایکپ شده در آزمایش‌های متالوگرافی لوله‌های ایکپ شده نیز نشان دهنده افزایش استحکام لوله است.

۶- مراجع

1. Valiev, R. Z., and Langdon, T.G. "Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement", Int. Progress in Materials Science, Vol. 51, No. 7, pp.881-981, 2006.
2. Iwahashi, Y., Wang, J., Horita, Z., and Terence, G. "Principle of Equal Channel Angular Pressing for the processing of ultra-fine grained material", Scripta Materially, Vol.35, No. 2, pp.143-146, 1996.
3. Lokesh, T., Matsuki, and Mallik, U.S. "Effect of Equal Channel Angular Pressing on the Microstructure and Mechanical Properties of Al6061-sic Composites"; Proc. Int. Conf. Data. Eng. India, 2016.



شکل (۲۷): ریزساختار نمونه قبل از فرآیند ایکپ (بزرگ‌نمایی ۵۰x).



شکل (۲۸). ریزساختار نمونه بعد از فرآیند ایکپ (بزرگ‌نمایی ۲۵x).

13. Toth, L.S., Arzaghi, M., Funderberger, J. J., Beausir, B., Bouaziz, O., and Arruffat, M. R. "Severe plastic deformation of metals by high-pressure tube twisting", *Int. Scripta Materialia*, Vol. 60, No. 3, pp.175-177, 2009.
14. Faraji, G.H., Babaei, A., Mashhadi, M.M., and Abrinia, K. "Parallel tubular channel angular pressing (PTCAP) as a new severe plastic deformation method for cylindrical tubes", *Int. Materials Letters*. Vol. 77, pp.82-85, 2012.
15. Ghadiri, M., Mahmoud, M.M., Ghamami, M. "Study of effective parameters of Parallel Tubular Channel Angular Pressing (PTCAP)", *Int. Modares Mechanical Engineering*. Vol. 14, No. 16, pp. 27-33, 2015.
16. Zangiabadi, A., and Kazeminezhad, M. "Development of a novel severe plastic deformation method for tubular materials", *Materials Science and Engineering*, Vol. 528, pp.5066-5072, 2001.
17. Djavanroodi, F., Zolfaghari, A.A., Ebrahimi, M., and Nikbin, K.M. "Equal Channel Angular Pressing of Tubular Samples", *Int. Acta Metall. Sin.* Vol. 26, No. 5, pp.574-580, 2013.
18. Borhani, M., and Djavanroodi, F. "Rubber pad-constrained groove pressing process: Experimental and finite element investigation", *Int. Materials Science and Engineering*. Vol. 546, pp.1-7, 2012.
19. Faraji, Gh., Mashhad, M.M., Kim, H.S. "Deformation Behavior in Tubular Channel Angular Pressing (TCAP) Using Triangular and Semicircular Channels", *Int. Materials Transactions*. Vol. 53, No. 1, pp.8-12, 2012.
20. Abaqus, D. S. "ALE adaptive meshing"; <http://abaqus.software.polimi.it/v6.14/books/usb/default.htm?startat=pt04ch12s02.html#usbaremesh>
21. Riazat, M., and Faraji, G. "Size Effect Channel Angular Pressing (ECAP) Process", Vol. 3, No. 3, pp.3-12, 2015.
4. Basavaraj, V., Chakkingal, U., and Kumar, T.S. "Study of channel angle influence on material flow and strain inhomogeneity in equal channel angular pressing using 3D finite element simulation", *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 209, No. 1, pp.89-95, 2009.
5. Safdarian, R. "Experimental and Numerical Investigation of Forming Limit Diagram of 6061 Aluminum Sheet", *Aerospace Mechanics Journal*. Vo 13, No 3, pp.77-86, 2016.
6. Hashemi, S. J., Moslemi, H., Liaghat, G. H. and Deylami, H. "Forming Limit Curve at Neck and Forming Limit Curve at Fracture in Hydroforming of Aluminum Tubes", *Aerospace Mechanics Journal*. Vo 11, No 1, pp.77-86, 2013.
7. Djavanroodi, F., Ebrahimi, M., Nikbin, K.M. "Experimental investigation of three different tube equal channel angular pressing techniques", *Int. Kovove Mater*. Vol. 53, No 9, pp.27-34, 2015.
8. Hyung, S. K. "Finite element analysis of equal channel angular pressing using a round corner dies", *Materials Science and Engineering*. Vol. 315, pp.122-128, 2015.
9. Jong, P., Jin, S. "Effect of Die Shape on the Deformation Behavior in Equal-Channel Angular Pressing", *Metallurgical and materials transaction*. Vol. 32, No. 2, pp.26-30, 2014.
10. Guoqun, Z., Shubo, X., Yiguo L., Yanjin, G., Ning, L., and Xufang, R. "Grain refinement mechanism analysis and experimental investigation of equal channel angular pressing for producing pure aluminum ultra-fine grained materials", *Materials Science and Engineering*. Vol. 3, No. 4, pp. 281-292, 2006.
11. Dumoulin, S. H., Roven, H.J., Werenskiold, H., and Valberg, H.S. "Finite element modeling of equal channel angular pressing: Effect of material properties, friction and die geometry", *Materials Science and Engineering*. Vol. 221, No.4, pp.248-251, 2005.
12. Mohebbi, M.S., and Akbarzadeh, V. "Accumulative spin-bonding (ASB) as a novel SPD process for fabrication of nanostructured tubes", *Int. Materials Science and Engineering*, Vol. 528, No.1, pp.180-188, 2010.