

شبیه سازی و بهینه سازی تاثیر زاویه و شعاع قالب بر فرآیند اکستروژن مستقیم آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱

چکیده: از مشکلات اساسی فرآیند اکستروژن می توان به توزیع غیریکنواخت حرارت، افزایش نامطلوب میزان حداکثر فشار میان شمش و قالب و تغییر شکل ناهمگون شمش اشاره نمود. با انتخاب درست پارامترهای هندسی فرآیند می توان این مشکلات را تا حد قابل قبولی کاهش داد. در این پژوهش ابتدا یک مدل المان محدود برای تحلیل فرآیند اکستروژن مستقیم ایجاد شد و سپس با توجه به نتایج تجربی سایر محققین نتایج این شبیه سازی مورد صحت سنجی قرار گرفت. بر مبنای همین مدل و از آنجایی که حداکثر تنش ایجاد شده در شمش، تاثیر مهمی در خواص فیزیکی و رشد ترک های سطحی در پروفیل نهایی حاصل از این فرآیند دارد، حداقل تنش بیشینه در شمش آلومینیوم مبنای بهینه سازی هندسه قالب قرار گرفت و به کمک پارامترهای بهینه، شرایطی ایجاد گردید تا نیروی مورد نیاز فرآیند اکستروژن به حداقل مقدار خود برسد. علاوه بر این پارامترهای هندسی و مکانیکی فرآیند به کمک نرم افزارهای شبیه ساز و بهینه ساز کتیا، آباکوس و مودفرانتیور مورد بررسی قرار گرفت و سپس بهینه ترین حالت حاصل گردید. نتایج حاصل از بهینه سازی نشان داد زاویه ۴۵ درجه و شعاع ۱۲ میلی متر به ترتیب بهینه ترین مقدار برای زاویه قالب و شعاع قالب است.

واژه های راهنما: اکستروژن، بهینه سازی، هندسه قالب، المان محدود، آلومینیوم ۶۰۶۱، طراحی آزمایش

کامران طاهری سرتنگ
دانشجوی کارشناسی ارشد

محمد مهدی هاشمی
دانشجوی کارشناسی ارشد

فرنود نوروزی نیایی
دانشجوی دکتری

مصطفی آسمانی
کاندیدای دکتری

بهروز آرزو*

استاد،
دانشکده مهندسی مکانیک،
دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۱۹

بازنگری: ۱۴۰۲/۰۹/۱۹

پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۶

**Kamran
Taheri Sartang**
M.Sc. Student

**Mohammad Mahdi
Hashemi**
M.Sc. Student

**Farnood
Norouzi Niyae**
Ph.D. Student

Mostafa Asemani
Ph.D. Candidate

Behrooz Arezoo*
Professor, Department of
Mechanical Engineering,
Amirkabir University of
Technology, Tehran,
Tehran

Simulation and optimization of the direct extrusion process of aluminum alloy 6061

Abstract: During the extrusion process, several key challenges emerge, such as the uneven heat distribution, an unwanted surge in the peak pressure between the billet and the die, and non-uniform deformation of the billet. By choosing suitable geometric parameters for the process, these issues can be mitigated to a tolerable extent. In this research, an initial step was to develop a finite element model to scrutinize the direct extrusion process. The simulation results were then cross-verified with the empirical findings of other researches. Given that the maximum stress produced in the billet significantly influences the physical attributes and surface crack growth of the final profile derived from this process, the die's geometry was optimized to minimize the maximum stress in the aluminum billet. This optimization, aided by the optimal parameters, facilitated the creation of conditions to minimize the force needed for the extrusion process. Besides these geometric and mechanical parameters, the processes were investigated using simulation and optimization software like CATIA, ABAQUS, and ModeFrontier, leading to the attainment of the optimal condition. The optimization outcomes revealed that the die angle and radius's optimal values are a 45-degree angle and a 12-millimeter radius, respectively

Keywords: Extrusion, Optimization, Die geometry, Finite Element, Aluminum 6061, Design of experiments

۱- مقدمه

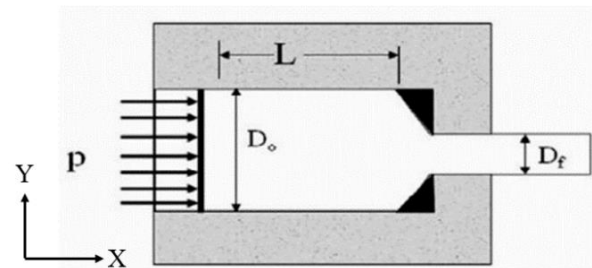
همچنین شکل‌دهی مواد ترد و شکننده است، زیرا ماده در این روش، تنها تحت فشار و تنش برشی قرار می‌گیرد. اکستروژن قادر به تولید قطعات با سطح مقطع بسیار باکیفیت و مستحکم است. از طرفی اکستروژن می‌تواند به صورت پیوسته (تولید قطعات با طول زیاد) یا نیمه‌پیوسته (تولید چندتکه‌ای) باشد [۲]. نوری و همکاران [۲] به بررسی تغییر شکل پلاستیکی شدید جهت ساخت قطعات با دانه‌بندی‌های ریز پرداخته‌اند که به منظور تأثیر فشار برگشتی در اثر کانال اکستروژن مستقیم بر روی توزیع سختی و تغییر شکل یکنواخت انجام گردید. کوالیک و همکاران [۳] به بررسی فناوری اصلی اکستروژن لوله‌های توخالی و تأثیر شعاع قالب بر حداکثر تغییر شکل پرداخته است لیکن علاوه بر شعاع زاویه قالب نیز یک پارامتر اساسی در تعیین حداکثر تغییر شکل است که لازم است تأثیر شعاع و زاویه به‌طور هم‌زمان مورد بررسی قرار گیرد.

شکور و همکاران [۴] نیز تأثیر پارامترهای اکستروژن بر اکستروژن آلومینیوم خالص A1100 را به کمک روش‌های عددی بررسی نمودند و مشاهده شد که افزایش سرعت اکستروژن باعث افزایش قابل توجهی در نیروی شکل‌دهی برای تمام زوایای قالب می‌شود. بر اساس این پژوهش می‌توان نتیجه گرفت که پارامتر سرعت در این فرآیند قابل بهینه‌سازی نبوده و بهترین پارامتر برای بهینه‌سازی، پارامترهای هندسی قالب هستند. لیو و همکاران [۵] شبیه‌سازی یک فرآیند اکستروژن برای پروفیل‌های آلومینیومی با ساختارهای پهن و بزرگ و ضخامت کم را به کمک تئوری جریان پلاستیک فیزی انجام داده و در پایان جهت صحت سنجی نتایج را به صورت شبیه‌سازی عددی تست نمودند.

نامبوری و همکاران [۶] به کمک شبیه‌سازی رایانه‌ای، به بررسی تأثیر پارامترهای فرآیند بر روی توان مصرفی فرآیند اکستروژن پرداخته‌اند و حالت‌های بهینه هر پارامتر را به صورت جداگانه بررسی نمودند. لیکن پارامترهای مورد بررسی بر روی یکدیگر اثر متقابل داشته و بهتر است تأثیر آن‌ها به صورت توأم بررسی شود. در پژوهشی دیگر شنگ و همکاران [۷] یک روش جدید و مؤثر برای اکستروژن همزمان آلیاژهای فلزی با استفاده از چند اکستروژن (co-extrude) شرح داده‌اند که اکستروژن مستقیم و تغییر شکل خمشی - برشی نام‌گذاری شده است. با توجه به این پدیده، مدلی در نرم‌افزار DEFORM-3D برای بررسی تولید و رشد ترک بین آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ و منیزیم AZ31 در طی فرآیند اکستروژن ترکیبی ساخته شده است. رفتار ترک خوردگی میله کامپوزیت آلومینیوم - منیزیم با یک هسته نرم منیزیم AZ31 و یک روکش سخت Al 6061 مورد مطالعه

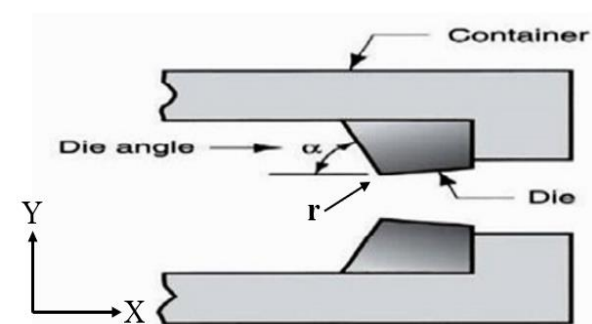
در سال ۱۷۹۷ میلادی جوزف براماح [۱] اولین فرآیند اکستروژن برای تولید لوله از مواد نرم را انجام داد، او ابتدا ماده اولیه فلزی را پیش‌گرم کرد و آن را به وسیله یک پیستون دستی متحرک، به داخل قالب حرکت داد و در سال ۱۸۲۰ توماس بور همین فرآیند را به وسیله یک پرس هیدرولیک انجام داد.

اکستروژن یک فرآیند شکل‌دهی حجمی می‌باشد که در آن شمش فلزی تحت اعمال فشار از دهانه قالب با سطح مقطع کوچک، عبور کرده و باعث کاهش سطح مقطع شمش و نهایتاً شکل گرفتن آن می‌شود. بر اساس شکل (۱)، پارامتر L بیانگر طول بیلت باقی‌مانده، پارامترهای D_0 و D_f به ترتیب بیانگر قطر دهانه خروجی و قطر دهانه ورودی می‌باشد که این پارامترها به مشخصات قطعه نهایی وابسته اند.



شکل ۱ فرآیند اکستروژن [۱]

با توجه به شکل (۲)، α بیانگر نیم زاویه قالب با محور افقی و r شعاع قالب است که پارامترهای اساسی در تعیین نیروها و توان مورد نیاز در فرآیند اکستروژن هستند و با بهینه کردن آن‌ها می‌توان بسیاری از مشکلات اساسی فرآیند اکستروژن مانند افزایش نامطلوب میزان حداکثر فشار میان شمش و قالب و تغییر شکل ناهمگون شمش را تا حد بسیار زیادی کاهش داد.



شکل ۲ زاویه قالب اکستروژن [۱]

دو مزیت اصلی فرآیند اکستروژن نسبت به دیگر روش‌های شکل‌دهی، قابلیت بالا در تولید قطعات با سطح مقطع پیچیده و

هونگ و همکاران [۱۰] در مقاله خود برای مطالعه مکانیزم تغییر شکل و شکست لوله از جنس آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ اکستروژن شده پس از عملیات حرارتی ثانویه تحت تنش‌های مختلف سه محوری، یک مدل شکست جانسون-کوک توسعه داده‌اند. از طریق روش المان محدود (FEM) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، مکانیزم شکست انواع مختلف نمونه‌های کششی آلیاژ آلومینیوم مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که مدل شکست جانسون-کوک می‌تواند تغییر شکل نمونه کششی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ را بهتر شبیه‌سازی کند. با افزایش تنش سه محوری، کرنش شکست به‌طور کلی روند کاهشی را نشان داد و مکانیزم شکست از نوع برشی به متمرکز تغییر می‌کند. تنش سه محوری به تدریج با افزایش شعاع / زاویه بریدگی (ناچ) نمونه آلیاژ آلومینیوم کاهش یافت و تنش سه محوری در مرکز شکاف بیشتر از ریشه شکاف است. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که تنش مهم‌ترین پارامتری است که در تحلیل فرآیند اکستروژن باید مبنای بهینه‌سازی قرار گیرد.

در پژوهش‌ها از روش تحلیلی برای اکستروژن مستقیم مقاطع مختلف قالب‌های از جنس آلیاژهای آلومینیوم ۶۰۶۱ و ۶۰۶۳ استفاده شده است. ابتدا، مقاومت کششی و فشاری برای AA6063-T7 و AA6061 با استفاده از شبیه‌سازی محاسبه شده و با اندازه‌گیری‌های تجربی تأیید می‌شود. مانند آنچه در این پژوهش انجام شده است، در پژوهش مورد بررسی محدودیت‌ها و پیچیدگی‌های راه‌حل تحلیلی برای اشکال پیچیده ساده‌سازی گشته و برای اعتبارسنجی نتایج محاسبه شده تحلیلی، شبیه‌سازی مبتنی بر المان محدود انجام شده است. سپس، مدل تحلیلی برای قالب‌های مختلف مانند شکل‌های بیضی، مربع و مستطیل استخراج گشته و نشان داده شده است که نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها با نتایج بدست‌آمده از روش تحلیلی با خطای کمتر از ۵ درصد برای ضرایب مختلف اصطکاک و نسبت‌های اکستروژن متفاوت مطابقت دارد. از جمله تفاوت‌های مطالعه مذکور و پژوهش پیش‌رو، می‌توان به این مورد اشاره نمود که در مقاله مرجع پروفیل‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند، حال آنکه برخلاف این پژوهش بهینه‌سازی روی قالب صورت نگرفته و علاوه بر آن سیستم اتوماسیون نرم‌افزاری نیز در آن دیده نمی‌شود.

کنیازکین با مطالعه پارامتری بر روی اکستروژن مستقیم قطعات منیزیمی، دریافت سرعت اکستروژن و هندسه قالب متفاوت بوده و منجر به تغییر در رفتار تبلور مجدد، جریان مواد و کرنش می‌شود. علاوه بر این، یک مدل المان محدود برای

قرار گرفت تا تأثیر ریزساختار بر ترک مناطق مختلف بررسی شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که توزیع کرنش و سرعت به دلیل تأثیر ساختار قالب و خواص مواد در مکان‌های مختلف (از یک منطقه)، تفاوت‌های قابل توجهی دارد. نتایج تجربی نشان می‌دهد که در شرایط مشابه، تفاوت‌هایی در تبلور مجدد و تضعیف بافت آلیاژ منیزیم AZ31 و آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ وجود دارد که از عوامل مهم تشکیل ترک هستند. هر دو لایه منیزیم و آلومینیوم دارای ریزساختار همگن هستند [۷].

سیف‌الدین و همکاران [۸] در مقاله خود بیان کرده‌اند که دو سری متداول از آلیاژ آلومینیوم (Al 6005a و Al 6061) وجود دارد که برای ساخت بدنه خودروی حمل‌ونقل ریلی سبک استفاده می‌شوند. نوع Al 6005a استحکام کمتری دارد اما نسبت به Al 6061 ارزان‌تر است. در مطالعه عددی ایشان، ویژگی‌های اکستروژن این آلیاژها با در نظر گرفتن ملاحظات استحکام با استفاده از ANSYS Workbench 18 تجزیه و تحلیل گردید. سپس مدل توپر سه‌بعدی، از مدل‌های نمای داخلی-خارجی خودرو استخراج و برای صرفه‌جویی در زمان محاسباتی، مدل بدنه خودرو از طریق حذف گوشه‌ها و متقارن سازی، ساده شد. با این وجود، اثر حذف گوشه‌ها نیز با معرفی یک ضریب تصحیح بررسی می‌شود. چهار مورد بارگذاری استاتیک برای مشاهده پدیده‌های بارگذاری واقعی که ممکن است رخ دهد، ارائه شده است. علاوه بر این، ساده‌سازی مدل در شبیه‌سازی المان محدود یک بدنه خودروی ریلی با استفاده از نوع المان پوسته و اعمال ضریب تصحیح در نتایج شبیه‌سازی، یک روش شبیه‌سازی پیش‌رو است که می‌تواند دقت نتایج را بهبود بخشد.

بنابر پژوهش چاندلا و همکاران [۹] آلومینیوم ۶۰۶۱ یک آلیاژ اکستروژن شده با عملیات حرارتی است که برای اجزای مختلف مهندسی و سازه‌ای مانند بال‌ها و بدنه هواپیما، ریل‌ها، قاب پنجره‌ها، میل محرک (کاردان)، سوپاپ‌ها و ... استفاده می‌شود. خواص مناسبی مانند استحکام بالا، مقاومت محیطی خوب، چگالی کم، تغییر طول زیاد در هنگام شکست و ماشین‌کاری عالی موجب شده تا Al 6061 از پرکاربردترین آلومینیوم‌ها در سری ۶۰۰۰ باشد. هدف این مقاله بررسی خصوصیات مکانیکی، تریبولوژیکی و ریزساختاری کامپوزیت‌های ریخته‌گری اغتشاشی Al 6061 است. در این مقاله تلاش شده است تا اثر تقویت‌کننده‌های مختلف بر رفتار متالورژیکی کامپوزیت‌های Al 6061 بررسی شود. نتایج تجربی بهبود قابل توجهی در خواص تریبولوژیکی و مکانیکی کامپوزیت‌های Al 6061 در مقایسه با آلیاژ Al 6061 نشان می‌دهد.

۲- روند پژوهش

۲-۱- شرایط هندسی مسئله

جهت بررسی صحیح و استخراج نتایج مناسب از مسائل مهندسی، توجه به انتخاب درست و بهینه پارامترها و شرایط اصلی مسئله به‌ویژه شرایط هندسی بسیار حائز اهمیت است، زیرا انتخاب صحیح این پارامترها می‌تواند به نزدیکی نتایج شبیه‌سازی و نتایج تجربی کمک شایانی کند. لذا در پژوهش حاضر شرایط هندسی قالب و شمش (بیلت) در جدول (۱) مشخص گردید و همچنین جدول (۲) نیز خواص مکانیکی و حرارتی آلیاژ آلومینیوم را معرفی می‌کند.

جدول ۱ ویژگی‌های هندسی قالب و شمش

پارامتر	مقدار
زاویه قالب (α)	۵۶/۵ درجه
شعاع دهانه خروجی (R_i)	۷۰ میلی‌متر
شعاع دهانه ورودی یا شعاع شمش (R_o)	۱۰۰ میلی‌متر
طول اولیه شمش (L_o)	۳۰۰ میلی‌متر

جدول ۲ خواص مکانیکی و حرارتی آلیاژ آلومینیوم

نوع پارامتر	مقدار
چگالی	2700 kg/m^3
مدول یانگ	69 GPa
نسبت پواسون	0.33
رسانش گرمایی	225 W/m.k
گرمای ویژه	88 J/kg.k
ضریب انبساط حرارتی	$1/42 \times 10^{-6} / \text{K}$

همچنین سرعت حرکت شمش درون قالب نیز از پارامترهای مهم فرآیند اکستروژن محسوب می‌گردد؛ که در این پژوهش ۲۵ میلی‌متر بر ثانیه است. با توجه به اینکه رفتار مواد در دماهای گوناگون، متفاوت می‌باشد لذا نمودار تنش و کرنش حقیقی به ازای دماهای گوناگون در شکل (۳) نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل (۳) مشخص است، با افزایش دمای اولیه شمش، ماده در مقدار کرنش ثابت نیاز به میزان تنش کمتری جهت شکل‌دهی (اکستروژن) خواهد داشت لذا در صورت امکان افزایش دمای شمش اولیه یک راه‌حل مناسب برای کاهش نیروی شکل‌دهی است.

AZ31 بر اساس مطالعه پارامتری توسعه داده شد و در مرحله بعد برای کمک به درک جریان مواد و مسیر کرنش در طول اکستروژن مورد استفاده قرار می‌گیرد. نتایج به‌دست‌آمده برای بهینه‌سازی هندسه قالب و پارامترهای فرآیند استفاده می‌شود و امکان توسعه کنترل‌شده ریزساختار و بافت در طول اکستروژن منیزیم را فراهم می‌کند. تغییرات هندسه قالب، توسعه مدل المان محدود و بررسی کرنش ماده از جمله شباهت‌های مرجع [۲] با پژوهش این مقاله است در حالی که تغییرات دمایی در مدل مرجع دیده نشده و مطالعه براساس خواص آلومینیوم در این پژوهش (بجای منیزیم در مقاله مرجع) انجام شده‌است.

در پژوهش نینابرو همکاران، تجزیه و تحلیل دقیق از جریان فلز در داخل قالب‌های اکستروژن ارائه می‌شود و به بررسی تشکیل عیب کم پر شدن پرداخته شده است. وضعیت تنش در مناطق نقص با استفاده از شبیه‌سازی تجزیه و تحلیل شده است. بر این اساس، نشان داده شد که تنش میانگین (فشار هیدرواستاتیک) تنها پارامتری نیست که باید در معیار قرار گیرد تا نتایج قابل اعتمادی به دست آید. این نتیجه بر اساس تجزیه و تحلیل خروجی شبیه‌سازی انجام شده توسط نرم افزار QForm و Extrusion FEM و آزمایش‌های عملی برای انواع مختلف پروفیل‌ها است. مشابه رویه انجام داده‌شده، در این مقاله نیز از روش المان محدود (اما با نرم‌افزار آباکوس) برای شبیه‌سازی استفاده شده است اما از بهبود مدل پیشنهادی مبتنی بر تنش برای جلوگیری از نقص پرنشیدن کمک گرفته شده‌است اما رویکرد این پژوهش بر بهینه‌سازی قالب برای دستیابی به حداقل نیروهای شکل‌دهی و کم کردن نقص‌های فرآیندی است.

در این پژوهش با به‌کارگیری نتایج پژوهش‌های پیشین به سراغ بهینه‌سازی هندسه قالب در فرآیند اکستروژن رفته و با شبیه‌سازی المان محدود بهینه‌ترین مقادیر برای شعاع و زاویه قالب به‌دست‌آمده است. از جمله مهم‌ترین مسائل در بهینه‌سازی فرآیند، پارامتر مورد بررسی جهت بهینه‌سازی است. همان‌گونه که مشاهده شد، در پژوهش‌های گذشته پارامترهایی همچون حداکثر فشار تماسی [۱]، حداکثر تغییر شکل [۴] و حداکثر توان مصرفی [۷] جهت بهینه‌سازی فرآیند مورد بررسی قرار گرفته است. حال آنکه تنش ایجاد شده در طول فرآیند تأثیر بسیار مهمی در خواص فیزیکی و رشد ترک‌های سطحی پروفیل نهایی دارد [۲].

در این پژوهش حداقل تنش ایجاد شده در شمش مبنای بهینه‌سازی قرار گرفته است. همچنین پارامترهای هندسی قالب بر روی یکدیگر تأثیر توأم داشته و برای بهینه‌سازی به‌جای بررسی تک‌تک پارامترها، لازم است تا از یک الگوریتم بهینه‌سازی استفاده‌شده تا تأثیر دو پارامتر شعاع و زاویه قالب بر روی یکدیگر نیز مورد توجه قرار گیرد.

تاب‌گیری محصول خروجی و برش محصولات در اندازه‌های استاندارد.

از طرفی شبیه‌سازی فرآیند اکستروژن در چهار مرحله صورت می‌گیرد که عبارتند از: ۱- ورود شمش به درون قالب و حرکت به سمت مجرای خروجی ۲- شکل گرفتن شمش و افزایش دمای آن (حداکثر فشار تماسی) ۳- خروج شمش از دهانه خروجی ۴- کاهش دمای شمش تا دمای محیط. لذا تمرکز مسئله بر روی مرحله دوم یعنی یافتن مقدار حداکثر فشار تماسی میان شمش و قالب و کمینه کردن مقادیر تنش فون_میسز و معیار ترسکا با کمک پارامترهای هندسی فرآیند می‌باشد.

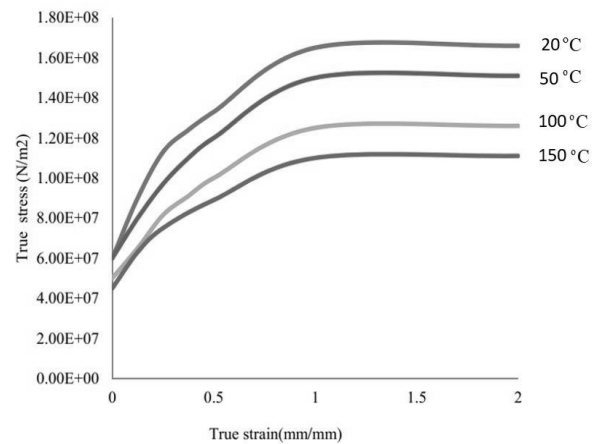
یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در فرآیند شکل‌دهی به روش اکستروژن هندسه قالب است که از مهم‌ترین پارامترها در طراحی قالب تعیین ابعاد و شکل مناسب آن می‌باشد؛ زیرا شکل قالب بر روی پارامترهای مختلف فرآیند اکستروژن مؤثر می‌باشد که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به زاویه و شعاع قالب اشاره نمود. انتخاب زاویه و شعاع بهینه سبب کاهش مقدار نیروی موردنیاز شکل‌دهی، افزایش عمر قالب و غیره می‌گردد.

باتوجه به اینکه زاویه قالب علاوه بر تاثیرات ذکرشده در بالا نقش مهمی در حرکت جریان مواد درون قالب دارد، لذا در این بخش از پژوهش شبیه‌سازی فرآیند اکستروژن تحت زوایای مختلف قالب صورت می‌گیرد شکل (۴).

در این تحلیل قالب به‌عنوان جسم صلب و شمش به‌عنوان جسم باقابلیت تغییر شکل در نظر گرفته شد، همچنین ضریب اصطکاک میان قالب و شمش $0/1$ و سرعت حرکت شمش درون قالب ۲۵ میلی‌متر بر ثانیه انتخاب گردید، سپس نتایج مورد ارزیابی و صحت آن‌ها با مقایسه گزارش نهایی پژوهش یاداو و همکاران [۱] و محاسبه درصد خطا (میزان خطا یک درصد) موردبررسی قرار می‌گیرد (پیوست ۱).

همان‌طور که در بخش قبل ذکر گردید یکی از مهم‌ترین پارامترهای هندسی قالب اکستروژن، شعاع قالب است. با افزایش شعاع قالب حجم ماده اکستروژن شده افزایش می‌یابد و به دنبال آن نیرو و هزینه موردنیاز جهت شکل‌دهی شمش نیز افزایش می‌یابد. همچنین افزایش و کاهش شعاع قالب به مقدار مشخص سبب تغییر در سرعت فرآیند اکستروژن خواهد شد، لذا شعاع قالب باید به‌گونه‌ای تنظیم گردد که حجم ماده اکستروژن شده، نیروی مورد نیاز، هزینه فرآیند، سرصورت بهینه حاصل گردد.

در این مرحله نیز به بررسی حداکثر فشار تماسی میان قالب و شمش تحت شعاع‌های مختلف و مقایسه نتایج حاصله با نتایج اعلامی از طرف یاداو و همکاران [۱] و همچنین محاسبه میزان خطا (میزان خطا یک درصد) پرداخت شده است (پیوست ۱).



شکل ۳ تنش و کرنش حقیقی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ تحت دماهای مختلف [۱]

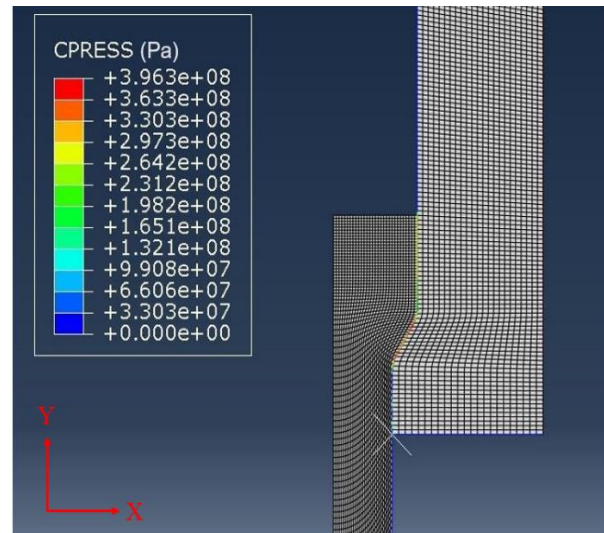
۲-۲- شبیه‌سازی المان محدود فرآیند تحت زوایا و شعاع‌های مختلف قالب

نرم‌افزار آباکوس نرم‌افزار تحلیلی بسیار قوی مهندسی در زمینه تحلیل‌های مهندسی مبتنی بر المان محدود می‌باشد. برنامه آباکوس در مدل‌سازی، شبیه‌سازی و تحلیل المان محدود مسائل مهندسی کاربرد دارد. یکی از کاربردهای اصلی این نرم‌افزار، استفاده از آن به‌عنوان ابزاری برای انجام تحقیقات آکادمیک بر روی مسائل مختلف مهندسی است که قابلیت حل مسائل از یک تحلیل خطی ساده تا پیچیده‌ترین مدل‌سازی غیرخطی را دارا می‌باشد. این نرم‌افزار دارای مجموعه المان‌های بسیار گسترده‌ای است که هر نوع هندسه‌ای را می‌توان توسط این المان‌ها مدل کرد. در این مرحله به بررسی و صحت سنجی نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش یاداو و همکاران [۱] و محاسبه اختلاف مقادیر گزارش‌شده در پژوهش موردنظر با مقادیر به‌دست‌آمده در نرم‌افزار پرداخته شده است (پیوست ۱) [۱].

فرآیند اکستروژن به‌صورت کلی در چند مرحله صورت می‌گیرد که شامل: ۱- انتخاب مناسب شمش و نوع فرآیند اکستروژن جهت شکل‌دهی ۲- افزایش دمای شمش تا رسیدن به دمای موردنظر و اعمال چربی مخصوص (دوده) به دیواره شمش جهت روان‌سازی حرکت شمش درون قالب و جلوگیری از چسبیدن به دیواره قالب ۳- حرکت شمش درون قالب توسط رام جهت شکل‌دهی و هدایت آن تا انتهای مسیر ۴- حفظ حداکثر سرعت عملیات اکستروژن توسط سنسورهای دمای نصب شده ۵- تزریق نیتروژن مایع در هنگام خروج شمش از قالب تا باعث افزایش طول عمر قالب گردد ۶- برش محصول توسط اره مخصوص ۷- خنک کردن محصول بر روی میز خنک‌کننده ۸-

فون-میسز و معیار ترسکا گردد. از میان روش‌های مختلف طراحی آزمایش (DOE)، الگوریتم فاکتوریل کامل انتخاب گردید تا تمامی حالت‌های مسئله را تک به تک پوشش دهد.

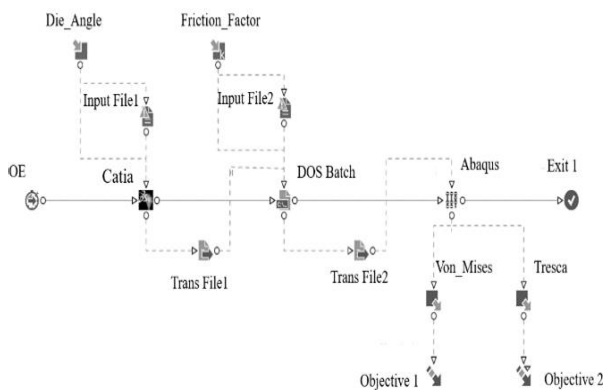
همانطور که از شکل (۵) دریافت می‌گردد، در این نرم‌افزار پس از وارد کردن نتایج خروجی نرم‌افزارهای کتیا و آباکوس، متغیرهای شعاع قالب یا زاویه قالب تعریف و قیود مسئله مانند ضریب اصطکاک میان قالب و شمش و سرعت حرکت شمش درون قالب تعیین می‌گردند. سپس نوع الگوریتم طراحی آزمایش (فاکتوریل کامل) انتخاب می‌گردد، با تعیین سایر شرایط نرم‌افزاری خروجی نرم‌افزار بر روی تنش فون-میسز و معیار ترسکا تنظیم می‌گردد تا با بررسی شرایط مختلف و تغییر زاویه یا شعاع قالب در هر مرحله نتایج خروجی ثبت و روی نمودار نمایش داده شوند سپس با بررسی و تحلیل نمودار مورد نظر با توجه به شرایط مورد نیاز در هر مرحله زاویه و شعاع مناسب قالب انتخاب می‌شود که منجر به کاهش زمان و هزینه تولید و افزایش کیفیت و راندمان خواهد شد.



شکل ۴ شبیه‌سازی فرآیند اکستروژن تحت زوایای مختلف قالب در راستای محور Y

۲-۳- انتخاب بهینه تنش فون-میسز و معیار ترسکا با بررسی زاویه و شعاع‌های مختلف قالب

یاداو و همکاران [۱] به بررسی اثرات پارامترهای هندسی مورد بحث پرداخته‌اند اما روش ارزیابی آن‌ها روش سنتی تغییر یک پارامتر و ثابت نگه‌داشتن سایر پارامترها است که نمی‌تواند به درستی اثر پارامترها را مشخص و درصد تأثیرگذاری و احتمال صحت نتیجه‌گیری را بیان نماید. از این رو جهت بررسی مناسب با قابلیت اطمینان بالا اثرات مقادیر تنش فون-میسز و معیار ترسکا یک طرح فاکتوریل کامل ایجاد و با در نظر گرفتن سه پارامتر تعیین‌کننده زاویه قالب، شعاع قالب و ضریب اصطکاک، در دو آزمایش مجزا طراحی و اجرا گردید. روند طراحی در پژوهش حاضر بدین شرح است که ابتدا به دلیل نیاز به بررسی دو پارامتر هندسی مورد نظر مسئله (زاویه و شعاع قالب) به کمک نرم‌افزار طراحی قطعه (CATIA) شمش و قالب اولیه مورد نظر طراحی گردید، سپس جهت بررسی شرایط مختلف تعریف‌شده وارد نرم‌افزار المان محدود (ABAQUS) می‌شود تا با تعیین شرایط اولیه مسئله از قبیل: دمای اولیه، نوع بارگذاری، سرعت حرکت شمش، نوع و سایز مش بندی و غیره تحلیل فرآیند اکستروژن انجام گردد. سپس داده‌های خروجی از این دو نرم‌افزار را با چیدمانی خاص درون نرم‌افزار بهینه‌ساز مودفرانتیر (ModeFrontier) وارد کرده تا آماده بهینه‌سازی گردند. نرم‌افزار مودفرانتیر شامل الگوریتم‌های بهینه‌ساز متعددی جهت حل مسائل گوناگون است، بهینه‌سازی به کمک تعدادی گره ورودی و خروجی، توابع هدف و قیود است که با توجه به خواسته مسئله تعریف می‌شوند تا با بررسی بهینه‌ترین حالت میان حالت‌های گوناگون پیشنهادی، منجر به کاهش و کمینه کردن مقادیر تنش



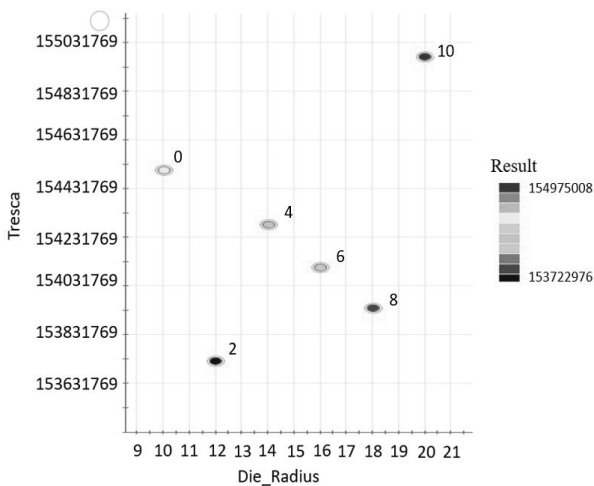
شکل ۵ نحوه بلوک چینی خروجی نرم‌افزارهای مختلف جهت بررسی بهینه‌ترین زاویه قالب در نرم‌افزار مودفرانتیر

هدف فرآیند بهینه‌سازی در این مرحله بررسی زاویه‌های قالب گوناگون در بازه ۴۵ الی ۶۰ درجه با افزایش یک درجه‌ای نسبت به زاویه مرحله قبل و انتخاب زاویه بهینه جهت کمینه کردن مقدار تنش فون-میسز و معیار ترسکا می‌باشد. لذا در این فرآیند به کمک الگوریتم طراحی فاکتوریل کامل تعداد ۱۶ مرحله آزمایش با اعمال ضریب اصطکاک ۰,۱ پیشنهاد و بررسی گردید شکل (۶). به صورت کلی اطلاعات این مسئله عبارتند از:

۱: ورودی فرآیند = زاویه قالب، ضریب اصطکاک ۲: داده‌های مسئله = مدل کتیا، مدل آباکوس ۳: نتایج خروجی = حداکثر فشار تماسی بهینه‌شده با بررسی نرم‌افزار مودفرانتیر مشخص می‌شود که به ازای زاویه قالب ۴۵ درجه (آزمایش شماره صفر) مقادیر تنش فون-میسز و معیار ترسکا کمترین میزان خود را دارا است و با افزایش زاویه قالب در این بازه مقادیر تنش خروجی افزایش

مرحله قبل با استفاده از الگوریتم فاکتوریل کامل و بلوک چینی مناسب، تعداد ۶ آزمایش با لحاظ کردن ۲ میلی متر افزایش شعاع در هر مرحله نسبت به مرحله قبل پیشنهاد و بررسی گردید. به صورت کلی اطلاعات این مسئله عبارتند از:

۱- ورودی فرآیند= شعاع قالب، ضریب اصطکاک ۰.۲- داده های مسئله= مدل کتیا، مدل آباکوس ۳- نتایج خروجی= حداکثر فشار تماسی بهینه شده با بررسی نرم افزار مودفرانتیر مشخص می شود که به ازای شعاع قالب ۱۲ میلی متری مقادیر تنش فون_میسز و معیار ترسکا کمترین میزان خود را دارا است شکل (۷)، لذا این امر سبب کاهش نیروی موردنیاز شکل دهی و کاهش هزینه تولید، افزایش عمر قالب و صرفه جویی در مصرف انرژی می شود.



شکل ۷ نتایج بهینه سازی مقادیر تنش فون_میسز و معیار ترسکا مربوط به شعاع قالب با نرم افزار مودفرانتیر

۲-۴- نتایج

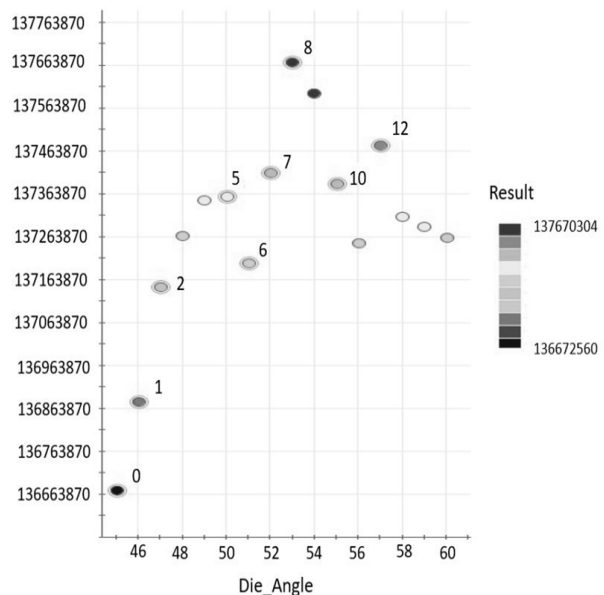
پس از بهینه سازی پارامترهای هندسی قالب برای اعتبارسنجی نتایج به دست آمده از روش المان محدود، این نتایج با نتایج به دست آمده در مقاله مرجع یاداو و همکاران [۱] مقایسه شد (پیوست ۱).

پارامترهای فرآیند نیز مطابق پارامترهای در نظر گرفته شده در مقاله مرجع لحاظ گردید. در بخش اول که به بررسی صحت سنجی نتایج پرداخته شد، تمامی پارامترهای مسئله با دقت مناسبی مطابق با مقاله مرجع لحاظ گردید و سپس تأثیر تغییر زاویه و تغییر شعاع بر کاهش مقادیر تنش فون_میسز و معیار ترسکا مورد بررسی قرار گرفت. در آزمایش اول که مربوط به بررسی زاویه قالب است، مشاهده گردید که بهینه ترین زاویه قالب جهت کمینه کردن مقادیر تنش فون_میسز و معیار ترسکا مربوط به زاویه قالب ۴۵ درجه است شکل (۸).

می یابند شکل (۶)، لذا این امر سبب کاهش نیروی موردنیاز شکل دهی و کاهش هزینه تولید، افزایش عمر قالب و صرفه جویی در مصرف انرژی می شود.

جدول ۳ نتایج بهینه سازی زاویه قالب با نرم افزار مودفرانتیر

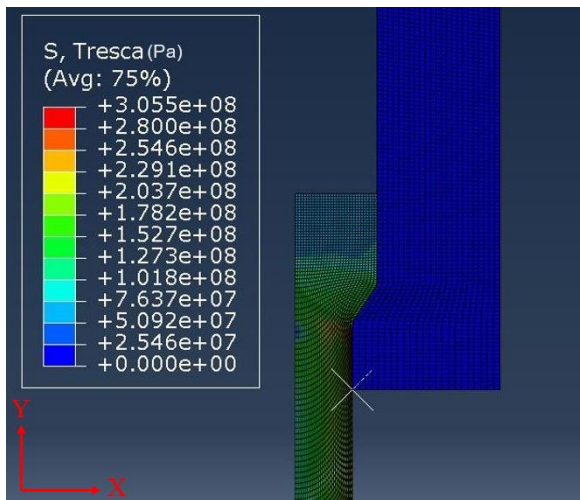
ID	Algorithm	Die Angle	Friction Factor	Tresca	Von_Mises
0	FULLF	45	0.1	1.508E+08	1.367E+08
1	FULLF	46	0.1	1.509E+08	1.369E+08
2	FULLF	47	0.1	1.514E+08	1.371E+08
3	FULLF	48	0.1	1.517E+08	1.373E+08
4	FULLF	49	0.1	1.521E+08	1.374E+08
5	FULLF	50	0.1	1.524E+08	1.374E+08
6	FULLF	51	0.1	1.528E+08	1.372E+08
7	FULLF	52	0.1	1.531E+08	1.374E+08
8	FULLF	53	0.1	1.534E+08	1.377E+08
9	FULLF	54	0.1	1.540E+08	1.376E+08
10	FULLF	55	0.1	1.545E+08	1.374E+08
11	FULLF	56	0.1	1.549E+08	1.372E+08
12	FULLF	57	0.1	1.550E+08	1.375E+08
13	FULLF	58	0.1	1.552E+08	1.373E+08
14	FULLF	59	0.1	1.554E+08	1.373E+08
15	FULLF	60	0.1	1.555E+08	1.373E+08



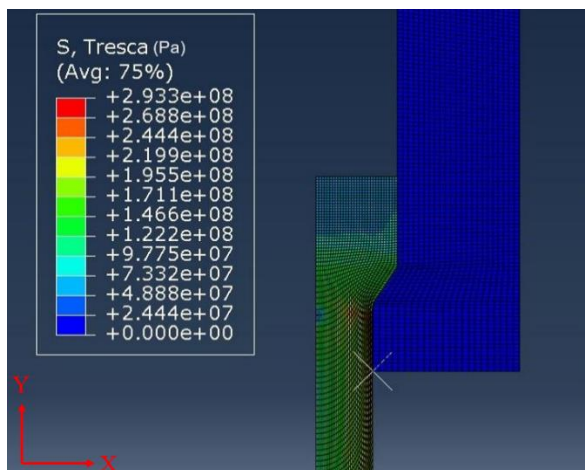
شکل ۶ نتایج بهینه سازی مقادیر تنش فون_میسز و معیار ترسکا مربوط به زاویه قالب با نرم افزار مودفرانتیر

هدف این مرحله نیز کمینه کردن نتایج خروجی پژوهش (تنش فون_میسز و معیار ترسکا) با بررسی شرایط گوناگون شعاع قالب در بازه ۱۰ الی ۲۰ میلی متر است؛ مانند طراحی آزمایش

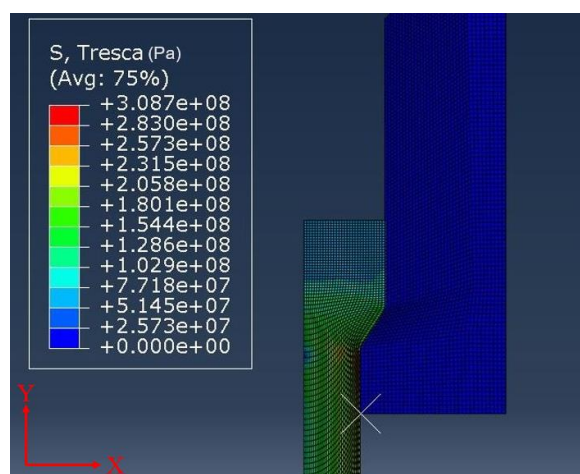
متر شاهد افزایش تنش فون_میسز و معیار ترسکا خواهیم بود، در نهایت با بررسی نتایج مشخص گردید که بهینه ترین حالت شعاع قالب، مربوط به شعاع ۱۲ میلی متر است (شکل ۹).



الف) شعاع ۱۰ میلی متر

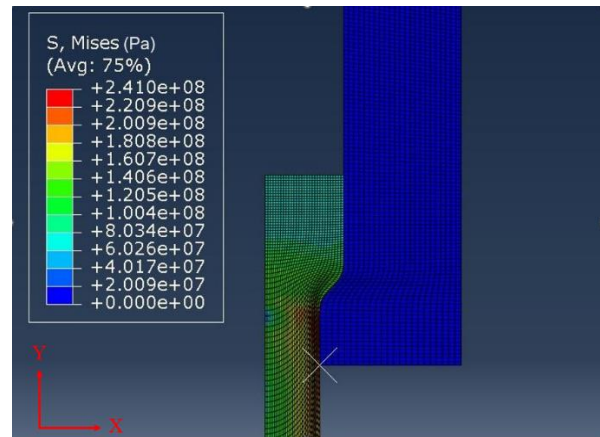


ب) شعاع ۱۲ میلی متر

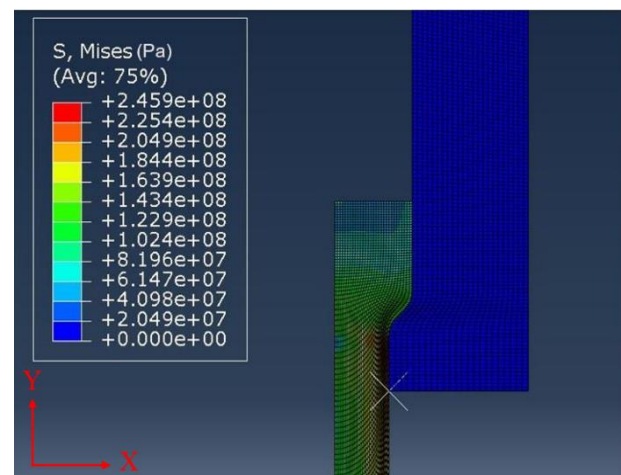


ج) شعاع ۱۴ میلی متر

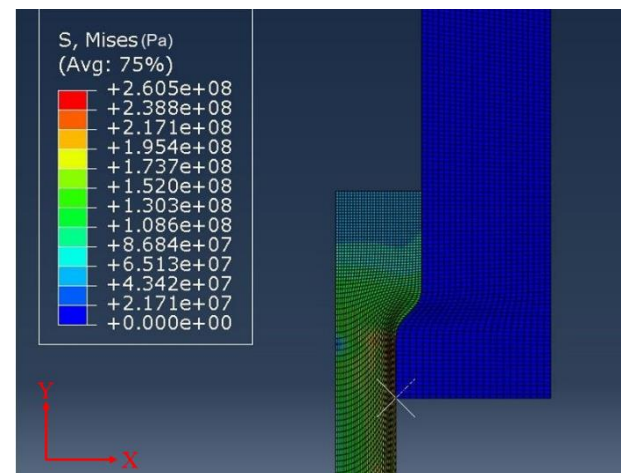
شکل ۹ مقایسه تغییرات معیار ترسکا به ازای شعاع های مختلف در راستای محور Y (الف) ۱۰ میلی متر (ب) ۱۲ میلی متر (ج) ۱۴ میلی متر



الف) تنش فون_میسز به ازای زاویه ۴۵ درجه



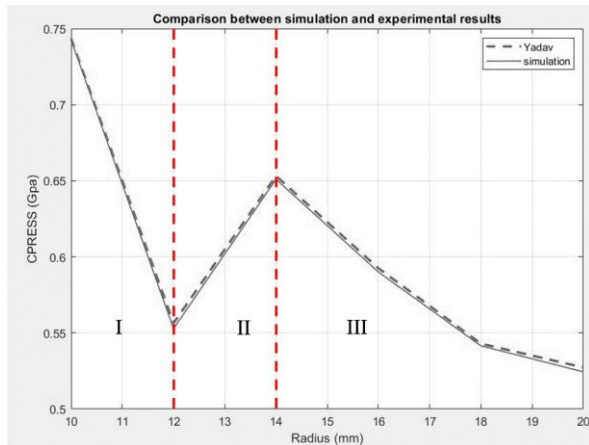
ب) تنش فون_میسز به ازای زاویه ۴۶ درجه



ج) تنش فون_میسز به ازای زاویه ۴۷ درجه

شکل ۸ مقایسه تغییرات تنش فون_میسز به ازای زاویه های متفاوت در راستای محور Y

در آزمایش دوم نیز مشاهده گردید که با افزایش شعاع قالب در بازه ۱۰ الی ۲۰ میلی متر، نتایج متفاوتی حاصل می گردد که نشان دهنده اهمیت بالای میزان شعاع قالب در فرآیند اکستروژن می باشد. با افزایش و کاهش شعاع قالب در مقادیر بالای ۱۲ میلی



شکل ۱۱ مقایسه نتایج شبیه سازی (خط چین) شعاع قالب با نتایج یاداو و همکاران [۱] (خط ممتد)

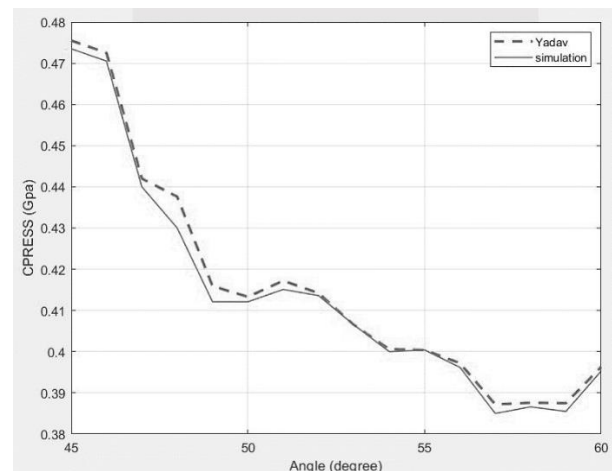
۳- نتیجه گیری

در این پژوهش ابتدا یک مدل المان محدود برای تحلیل فرآیند اکستروژن مستقیم ایجاد شد و سپس با توجه به نتایج تجربی سایر محققین نتایج این شبیه سازی مورد صحت سنجی قرار گرفت. بر مبنای همین مدل و از آنجایی که حداکثر تنش ایجاد شده در شمش، تأثیر مهمی در خواص فیزیکی و رشد ترک های سطحی در پروفیل نهایی حاصل از این فرآیند دارد، حداقل تنش در شمش آلومینیوم مبنای بهینه سازی هندسه قالب قرار گرفت تا با بهینه سازی پارامترهای هندسی قالب، کمینه مقدار نیروی مورد نیاز فرآیند اکستروژن حاصل گردد. نتایج شبیه سازی و طراحی آزمایش نشان داد:

- برخلاف پژوهش یاداو و همکاران [۱] (بررسی تک پارامتری ورودی بر خروجی فرآیند) با به کارگیری روش طراحی آزمایش، معنادار بودن تأثیر زاویه قالب و شعاع قالب و همچنین تقابل اثر این دو پارامتر بر حداکثر فشار تماسی میان قالب و شمش (CPRESS) به خوبی مشهود است.
 - حداکثر فشار تماسی میان قالب و شمش (CPRESS) با افزایش زاویه قالب (α) و افزایش شعاع قالب (R) کاهش می یابد.
 - کمینه مقدار CPRESS در زاویه ۶۰ درجه، کمینه مقدار VON MISES و کمینه مقدار TRESCA در زاویه ۴۵ درجه (پیوست ۲) قابل دستیابی است.
 - کمینه مقدار تنش فون میسز و معیار ترسکا در شعاع قالب ۱۲ میلی متر قابل دستیابی است (پیوست ۲). همچنین کمینه مقدار CPRESS در شعاع ۲۰ میلی متر است.
- لذا با بررسی عملکرد و تأثیرات مثبت و منفی دو زاویه پیشنهادی، زاویه ۴۵ درجه بدلیل نکات مثبت بیشتر (کاهش سطح تماس شمش اولیه با سطح قالب در زاویه ۴۵ درجه نسبت به زاویه ۶۰ درجه، کاهش اصطکاک و نیروی لازم جهت شکل دهی در زاویه ۴۵ درجه، افزایش عمر ابزار و قالب) پیشنهاد می گردد.

پس از صحت سنجی نتایج حاصله و مقایسه با نتایج پژوهش یاداو و همکاران [۱]، نتایج پژوهش حاضر با میزان خطای قابل قبولی (میزان خطا یک درصد) تأیید گردید. شکل های ۸ تا ۱۱ نتایج حاصل از این پژوهش و مقایسه آن با نتایج حاصل از یاداو و همکاران [۱] را نشان می دهد.

با توجه به شکل ۱۰ با افزایش زاویه قالب، حداکثر فشار تماسی میان قالب و شمش (CPRESS) کاهش می یابد. با توجه به شکل ۱۱ تأثیر شعاع قالب بر روی CPRESS را می توان به سه بخش تقسیم نمود. با توجه به شکل ۱۱ در بخش I با افزایش شعاع قالب تا ۱۲ میلی متر CPRESS کاهش می یابد. در بازه ۱۲ تا ۱۴ میلی متر (بخش II) و ۱۴ تا ۲۰ میلی متر (بخش III) افزایش شعاع قالب بر روی CPRESS به ترتیب تأثیر منفی و مثبت را نشان می دهد. با مقایسه نتایج حاصل از پژوهش پیش رو و نتایج حاصل از کار تجربی یاداو و همکاران [۱]، همان طور که قبلاً بیان شد، شاهد تطابق خوبی بین نتایج حاصل از شبیه سازی و کار تجربی هستیم (شکل ۱۰ و ۱۱).



شکل ۱۰ مقایسه نتایج شبیه سازی (خط چین) زاویه قالب با نتایج یاداو و همکاران [۱] (خط ممتد)

برای شبیه سازی المان محدود فرآیند از نرم افزار ABAQUS/Standard استفاده شده است. تحلیل فرآیند در چهار مرحله ورود شمش به قالب، شکل دهی شمش، خروج قطعه مورد نظر و سرد شدن تا دمای محیط انجام شد. تحلیل به صورت متقارن محوری (Axisymmetric) انجام شد که در آن شمش به صورت (Deformable) و قالب (Discrete Rigid) تعریف شده است.

در این تحلیل شمش به تعداد ۲۷۰۰ المان مربعی از نوع (CAX4T) مش بندی شده است. خواص ماده مطابق خواص آلومینیوم ۶۰۶۱ به صورت الاستیک-پلاستیک و حرکت شمش نیز به صورت حرکت خطی در مرحله شکل دهی شمش تعریف شده است.

۴- فهرست علائم و اختصارات

علایم انگلیسی

D_0 قطر شمش یا قطر دهانه خروجی قالب
 D_f قطر دهانه ورودی قالب

علایم یونانی

σ تنش نرمال
 μ ضریب اصطکاک

۵- مراجع

- Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 107, pp. 1115-1129, 2020, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-020-04971-1>.
- [7] K. P. V. Namburi, A. F. Kothasiri, and V. S. M. Yerubandi, "Modeling and simulation of Aluminum 1100 alloy in an extrusion process," *Materials Today: Proceedings*, vol. 23, pp. 518-522, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.05.398>.
- [8] K. Sheng, L. Lu, Y. Xiang, M. Ma, and Z. Wu, "Crack behavior in Mg/Al alloy thin sheet during hot compound extrusion," *Journal of Magnesium and Alloys*, vol. 7, no. 4, pp. 717-724, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jma.2019.09.006>.
- [9] A. Syaifudin, E. M. Nurfadillah, A. R. Farid, and A. Windharto, "Strength consideration on car body of light rail transit making from aluminum extrusion," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, vol. 1034, no. 1: IOP Publishing, p. 012025, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1034/1/012025>.
- [10] N. K. Chandla, S. Kant, and M. Goud, "Mechanical, tribological and microstructural characterization of stir cast Al-6061 metal/matrix composites—a comprehensive review," *Sādhanā*, vol. 46, pp. 1-38, 2021, doi: <https://doi.org/10.1007/s12046-021-01567-7>.
- [11] T. Hong, F. Ding, F. Chen, H. Zhang, Q. Zeng, and J. Wang, "Study on the Fracture Behaviour of 6061 Aluminum Alloy Extruded Tube during Different Stress Conditions," *Crystals*, vol. 13, no. 3, p. 489, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/cryst13030489>.
- [1] R. R. Yadav, Y. Dewang, J. Raghuwanshi, and V. Sharma, "Finite element analysis of extrusion process using aluminum alloy," *Materials Today: Proceedings*, vol. 24, pp. 500-509, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.302>.
- [2] S. Kalpakjian and S. R. Schmid, "Manufacturing Engineering," *Technology; Prentice Hall: London, UK*, ISBN-13:978-0-13-522860-9, pp. 568-571, 2009.
- [3] M. Nouri, H. Mohammadian Semnani, and E. Emadoddin, "Computational and experimental studies on the effect back pressure on twist extrusion process," *Metals and Materials International*, vol. 27, pp. 2910-2918, 2021, doi: <https://doi.org/10.1007/s12540-020-00668-y>.
- [4] M. Kowalik, P. Paszta, T. Trzepieciński, and L. Kukielka, "Non-Symmetrical Direct Extrusion—Analytical Modelling, Numerical Simulation and Experiment," *Materials*, vol. 14, no. 24, p. 7856, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/ma14247856>.
- [5] J. J. Shukur and A. S. Jaber, "Experimental and finite element analysis study of die geometrical affect the forming load during extrusion process," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 881, no. 1: IOP Publishing, p. 012045, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/881/1/012045>.
- [6] Z. Liu, L. Li, G. Wang, and J. Yi, "Analysis and improvement of material flow during extrusion process using spreading pocket die for large-size, flat-wide, and multi-ribs profile," *The International*

پیوست ۱

محاسبه مقدار خطای صحت سنجی نتایج مقاله مرجع [۱]:

$$\delta = \left| \frac{v_A - v_E}{v_E} \right| \cdot 100\%$$

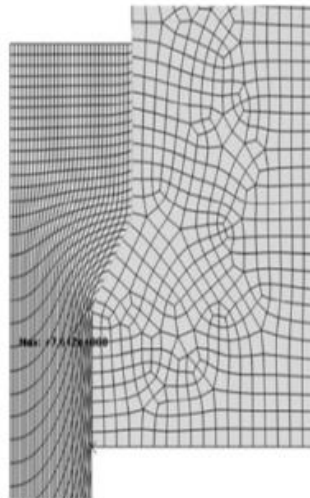
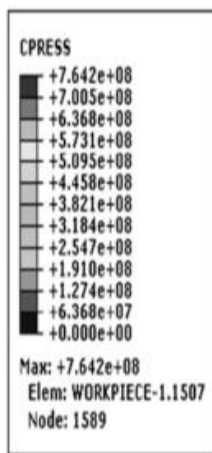
δ = percent error

v_A = actual value observed

v_E = expected value

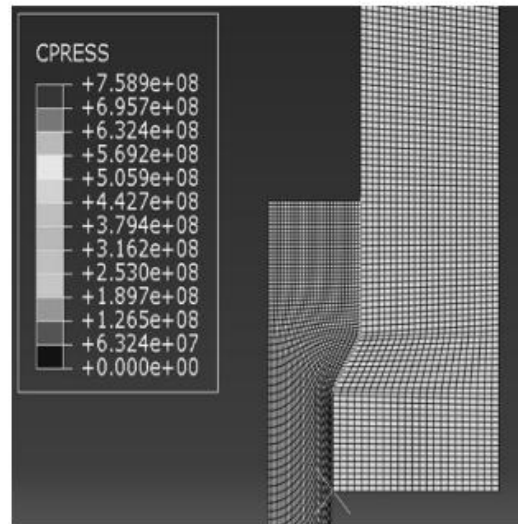
۱- صحت سنجی نتایج شعاع قالب ۱۲ میلی متری:

میزان خطا: ۱ درصد



R = 12 mm

ب

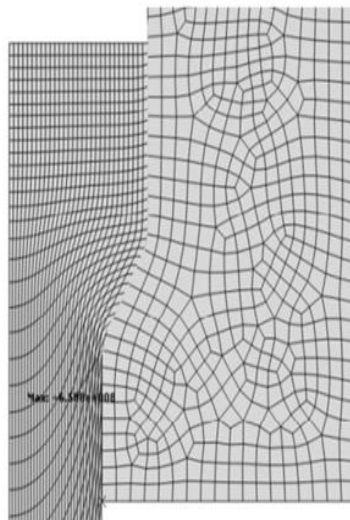
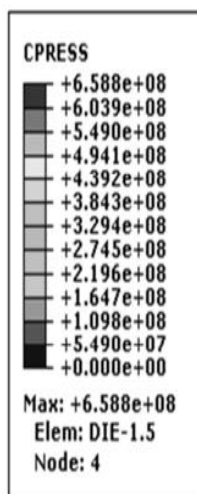


الف

الف- شبیه سازی جهت صحت سنجی، ب- شبیه سازی در مقاله مرجع

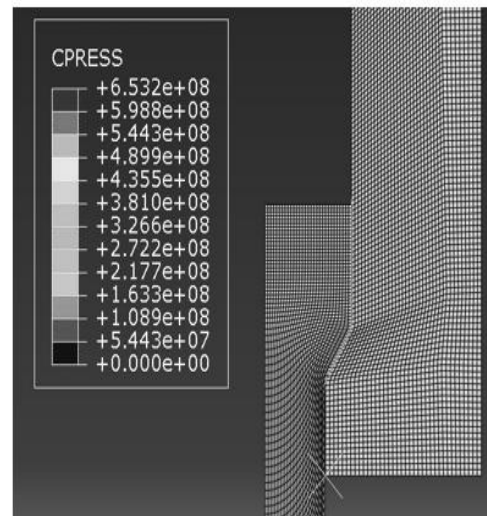
۲- صحت سنجی نتایج شعاع قالب ۱۴ میلی متری:

میزان خطا: ۱ درصد



R = 14 mm

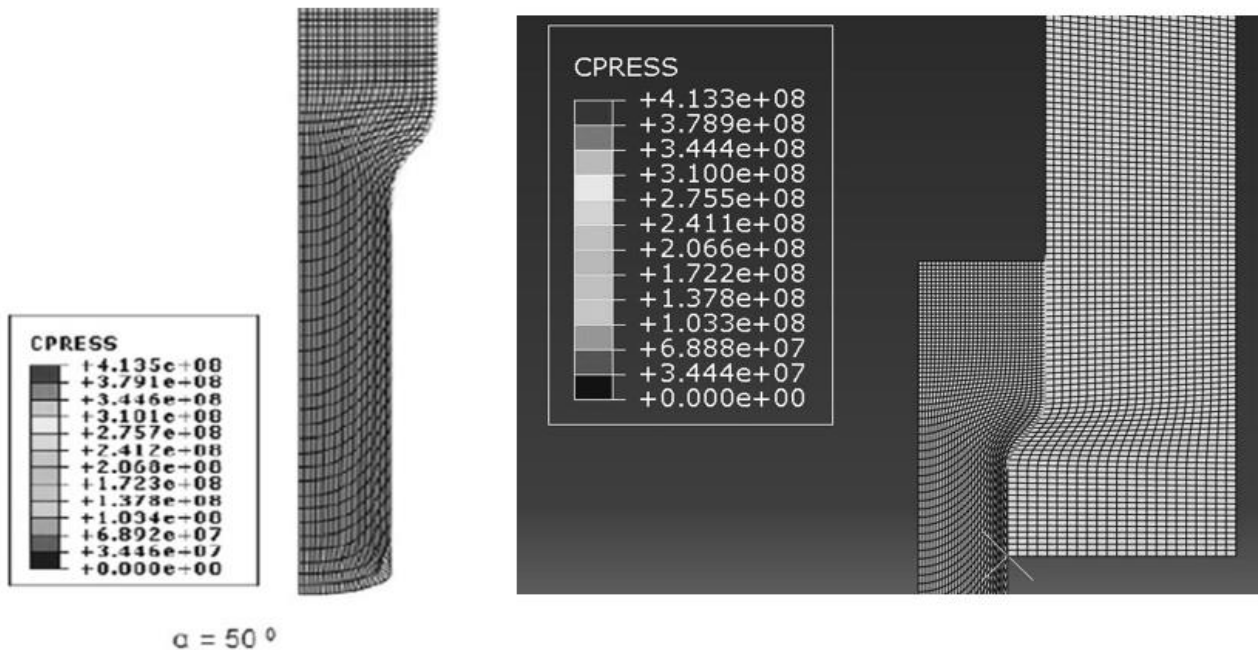
ب



الف

الف- شبیه سازی جهت صحت سنجی، ب- شبیه سازی در مقاله مرجع

۳- صحت سنجی نتایج زاویه قالب ۵۰ درجه
میزان خطا: ۱ درصد



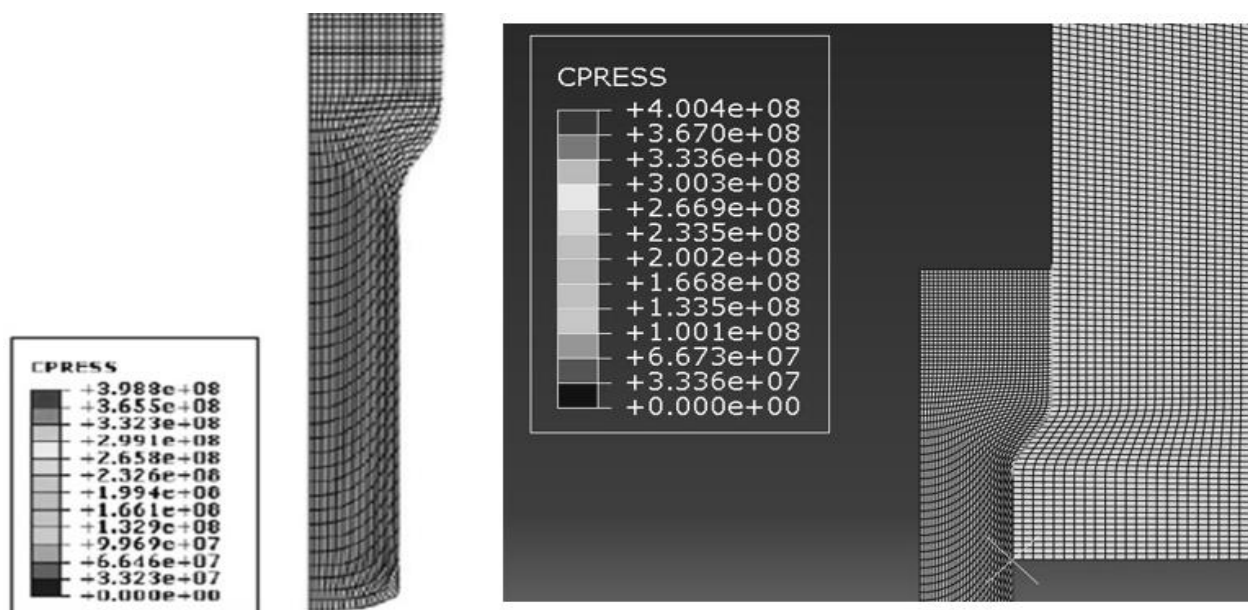
$\alpha = 50^\circ$

ب

الف

الف- شبیه سازی جهت صحت سنجی، ب- شبیه سازی در مقاله مرجع

۴- صحت سنجی نتایج زاویه قالب ۵۵ درجه
میزان خطا: ۱ درصد



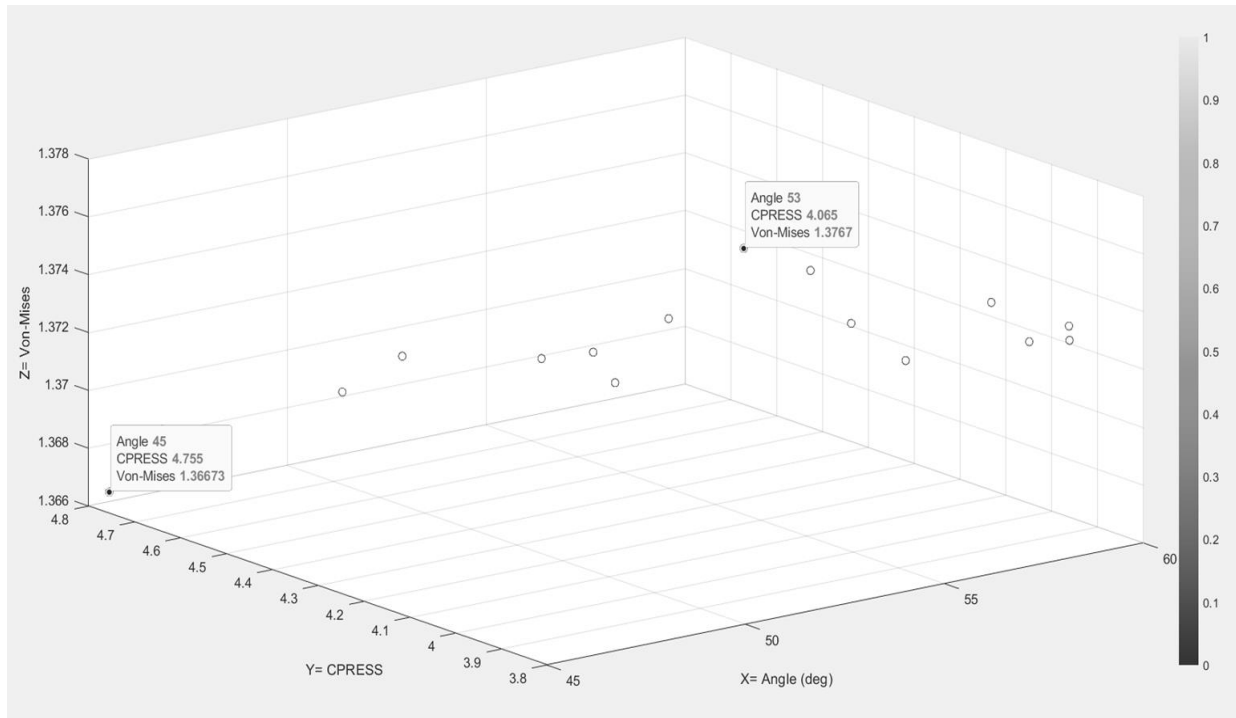
$\alpha = 55^\circ$

ب

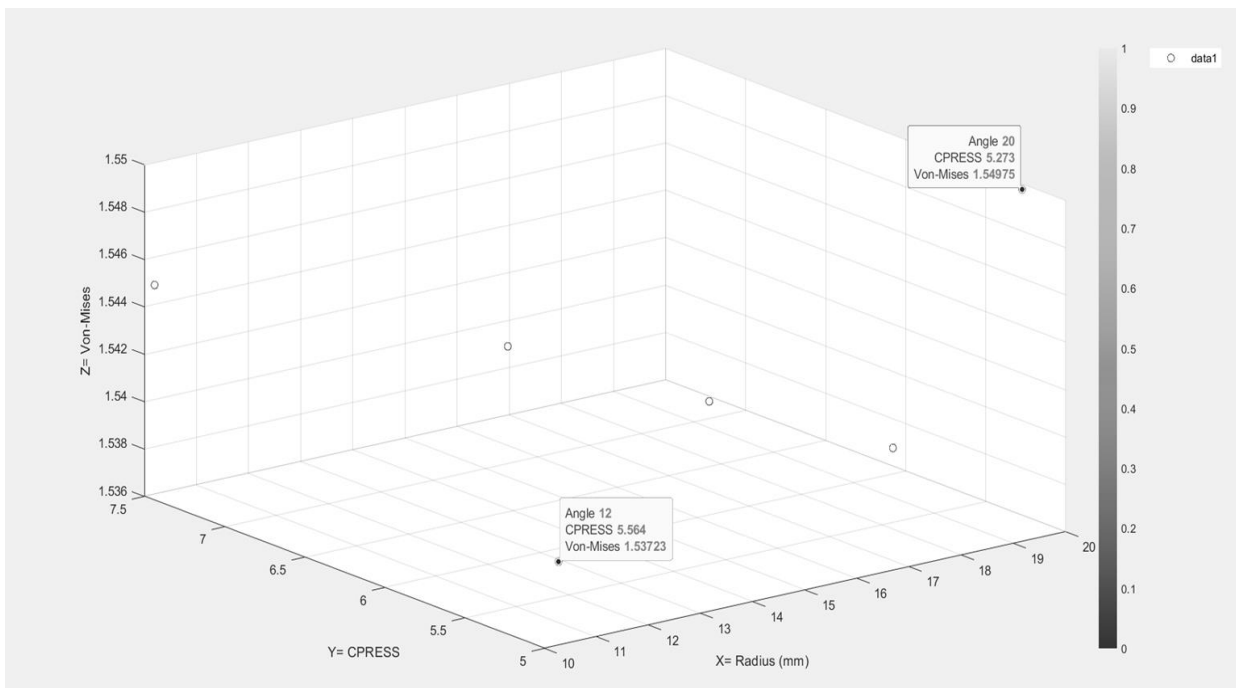
الف

الف- شبیه سازی جهت صحت سنجی، شکل ب- شبیه سازی در مقاله مرجع

پیوست ۲



محاسبه مقادیر مربوط به حداکثر فشار تماسی در حالت‌های مختلف تنش فون-میسز برای زاویه‌های متفاوت قالب



محاسبه مقادیر مربوط به حداکثر فشار تماسی در حالت‌های مختلف تنش فون-میسز برای شعاع‌های متفاوت قالب