



مطالعه فرآیند تغییر شکل پلاستیک شدید بر مبنای آنالیز حساسیت ای فست جهت بهینه‌سازی پارامترها

سید حسن بطحائی^{الف*}

^{الف*} دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
h.bathae@modares.ac.ir

| واژگان کلیدی | چکیده |
|---|---|
| آنالیز حساسیت، روش آماری ای فست، طراحی آزمایش‌ها، تغییر شکل پلاستیکی شدید، اکستروژن در کانال‌های زاویه‌دار. | در این مقاله بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر بر فرآیند تغییر شکل پلاستیک شدید اکستروژن در کانال‌های زاویه‌دار پیچشی صفحه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا طراحی آزمایش فرآیند با استفاده از روش رویه‌پاسخ صورت گرفته است و چهار متغیر ورودی اصلی و اثرگذار روی فرآیند تحت عنوان زاویه پیچش، شعاع، زاویه کانال و ضریب اصطکاک استخراج شده و معادلات رگرسیون هر یک از آن‌ها برای خواص مکانیکی نمونه‌های تولیدشده از این روش به دست آورده شده است. با استفاده از آنالیز حساسیت که امروزه در تولید قطعات و صنعت بسیار کاربردی است و با بهره‌گیری از آن می‌توان کیفیت قطعات تولیدشده را تا میزان بسیار بالایی بهبود بخشید و هزینه‌های تولید را تا سطح زیادی کاهش داد، اثر متغیرهای ورودی را بر روی کرنش پلاستیک قطعات بررسی شده است. در این مقاله کرنش میانگین و بیشینه و نیروی بیشینه که تحت تأثیر این متغیرهای ورودی تعریف شده‌اند با استفاده از روش آنالیز حساسیت آماری ای فست مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته‌اند. نتایج حاصل از تحلیل انجام‌شده نشان می‌دهد که کرنش میانگین تنها تحت تأثیر مقادیر زاویه‌ای پیچش و کانال قرار دارد، اما کرنش بیشینه تحت تأثیر ضریب اصطکاک قرار گرفته است و یک رابطه‌ی خطی مستقیم با تغییرات آن دارد. نیروی بیشینه نیز در یک حالت متعادل از تأثیر متغیرها قرار گرفته است. همچنین اثر کمی مقادیر زاویه پیچش ۵۲٪ و زاویه کانال ۴۸٪ بر روی کرنش میانگین و ضریب اصطکاک با میزان ۸۶٪ و زاویه پیچش با ۴۲٪ بیشترین تأثیر را بر روی کرنش و نیروی بیشینه گذاشته‌اند. |
| تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۰۲ | |
| تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۷/۱۵ | |
| تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۱۸ | |

Study of severe plastic deformation process based on E-fast sensitivity analysis to optimize parameters

Seyed Hasan Bathae^{a*}

^a MSc. Student, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

KEYWORDS

Sensitivity Analysis,
E-fast Statistical Method,
Design of experiments,
Extreme plastic deformation,
Extrusion in angled channels.

Received: August 24, 2021

Revised: October 07, 2021

Accepted: October 10, 2021

ABSTRACT

In this paper, the optimization of effective parameters on the process of severe plastic extrusion deformation in the torsional angular channels of the plate is investigated. Initially, the process test was designed using the response procedure method, and four main and influential input variables on the process, torsion angle, radius, channel angle, and coefficient of friction, were extracted, and the regression equations of each for the mechanical properties of the samples produced by this method. Using sensitivity analysis, which is very useful in the production of parts and industry today, and by using it, the quality of manufactured parts can be greatly improved and production costs can be reduced to a large extent, the effect of input variables on plastic strain Parts checked. In this paper, the mean and maximum strain and maximum force, which are defined under the influence of these input variables, have been investigated and analyzed using the e-Fast statistical sensitivity analysis method. The results of the analysis show that the mean strain is affected only by the values of torsional and channel angles, but the maximum strain is affected by the coefficient of friction and has a direct linear relationship with its changes. The maximum force is also in a balanced state from the effect of the variables. Also, the quantitative effect of torsion angle of 52% and channel angle of 48% on mean strain and coefficient of friction with 86% and torsion angle with 42% had the greatest effect on strain and maximum force.

تحلیل حساسیت به مطالعه تأثیرپذیری متغیرهای خروجی از متغیرهای ورودی یک مدل آماری گفته می‌شود. به عبارت دیگر روشی برای تغییر دادن در ورودی‌های یک مدل آماری به صورت سازمان‌یافته است که بتوان تأثیرات این تغییرها را در خروجی مدل پیش‌بینی کرد. روش طراحی آزمایش‌ها^۱ یکی از روش‌های آماری بهبود کیفیت است. آنالیز حساسیت^۲ باعث افزایش صحت و دقت اعتبارسنجی، بهینه‌سازی و ریسک‌پذیری در تجزیه و تحلیل شبیه‌سازی مدل‌ها می‌شود. روش‌های تجزیه و تحلیل به دو دسته‌ی کلاسیک و مدرن طبقه‌بندی شده‌اند. روش کلاسیک برای آزمایش‌ها غیر انعطاف‌پذیر بوده است، اما در روش مدرن که بر پایه‌ی مدل‌های رگرسیون برنامه‌ریزی شده است [۱]. تجزیه و تحلیل حساسیت یک ابزار مهم است که معمولاً برای تأیید دستیابی به مجموعه‌ی بهینه استفاده می‌شود. پارامترهای به دست آمده توسط رگرسیون تجزیه و تحلیل می‌شوند. به حداقل رساندن میزان تابع هدف بر اساس مجموع مربع خطاهای پیش‌بینی شده و بررسی‌های تجربی یکی از راه‌حل‌های بهینه کردن آنالیز حساسیت است [۲]. طراحی آزمایش‌ها یک ابزار ارزشمند و قدرتمند در شناسایی پارامترهای بحرانی، بهینه‌سازی فرآیندهای شیمیایی و تشخیص مناطق کارآمد برای انجام عملیات حیاتی در فرآیندها است. با وجود مزیت‌های آزمایش تجربی، روش طراحی آزمایش‌ها مانند هر تکنولوژی نوین دیگری با مقاومت روبرو شده است [۳]. روش آنالیز حساسیت آماری ای‌فست^۳ تجزیه و تحلیل اثر فاکتورهای ورودی بر عوامل خروجی را انجام می‌دهد. این روش که بسیار دقیق و سریع است توسط طاهری جهت بررسی اثر فاکتورهای ابعادی بر روی نیرو و زمان بحرانی نانومنیپولیشن^۴ استفاده شده است. نانومنیپولیشن یکی از فرآیندهای به روز دنیای نانو تکنولوژی است که در دنیای صنعت و پزشکی کاربرد فراوانی دارد. منیپولیشن به معنای جابه‌جایی است و در این فرآیند با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی ذرات در مقیاس نانو/میکرو جابه‌جا می‌شوند تا ماده جدید ساخته یا ایجاد شود [۴].

فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید^۵ روش‌هایی از شکل‌دهی فلزات هستند که با استفاده از آن‌ها می‌توان کرنش بسیار بالایی را به یک قطعه حجیم اعمال کرد بدون اینکه کاهش قابل ملاحظه‌ای در ابعاد کلی قطعه ایجاد شود [۵]. تغییر شکل پلاستیک شدید بر پایه‌ی افزایش شدید چگالی نابجایی‌ها، تشکیل دیواره‌های متراکم از نابجایی‌ها و تبدیل این دیوارها به مرزخانه‌های جدید می‌باشد. مواد ساخته شده با استفاده از این روش دارای ابعادی در بازه‌ی ۱۰۰۰-۱۰۰ نانومتر می‌باشند [۶-۷]. در یک پژوهش بر روی کانال‌های مقطع زاویه‌دار^۶ اضافه شدن یک کانال میانی در فرآیند اکستروژن مورد بررسی قرار گرفته است. این مطالعه که به منظور شناخت بیشتر خواص مکانیکی و ریزساختار مس خالص است، شامل طراحی و ساخت سه قالب با زوایای داخلی ۶۵، ۷۵ و ۹۰ درجه می‌باشد. نتایج حاصل از چهار پاس اکستروژن نشان می‌دهد، قالب با زاویه ۹۰ و ۷۵ درجه بهبود عمر بهتری داشته‌اند [۸-۹]. شکل‌دهی میکروکانال‌های صفحات دوقطبی در فرآیند شکل‌دهی لاستیکی به ضخامت لایه لاستیکی بستگی دارد. این فاکتور اهمیت بسیاری بر بهبود کیفیت شکل‌دهی می‌گذارد. در یک بررسی بر روی فولاد زنگ نزن با استفاده از نرم‌افزار آباکوس و مقایسه آن با نتایج تجربی نشان داده شد که افزایش ضخامت لاستیک موجب دستیابی به عمق بیشتر کانال بیشتر در نیروی برابر می‌گردد [۱۰]. یکی از روش‌های متداول تولید لوله‌های ریزدانه آلومینیومی فرآیند اکستروژن معکوس اغتشاشی است. اساس این روش نفوذ ابزار دورانی به درون ماده توپر اولیه است [۱۱]. پیچش فشار بالا یکی از اساسی‌ترین و کارآمدترین روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید در تولید مواد حجیم نانو ساختار می‌باشد. در یک آزمایش بر روی دیسک‌های آلیاژ آلومینیوم مرز بین منطقه چسبنده و منطقه لغزنده شعاع بحرانی نامیده می‌شود. فاکتورهای تعداد دور و فشار اعمال شده از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر روی پیچش فشار بالا هستند [۱۲]. بررسی مکانیکی مقطع‌های چندکاناله زاویه‌دار برای اولین بار توسط علوی زاده و همکارانش مطرح شده است. در یک آزمایش تجربی و تئوری با استفاده از نرم‌افزار آباکوس خواص آلومینیوم ۱۰۵۰ بر اساس فرآیند تغییر شکل پلاستیک شدید مورد تحقیق قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد فشار هیدرواستاتیک در طول فرآیند باعث افزایش خواص مکانیکی شده است [۱۳]. صالحی و همکارانش در یک آزمایش به میکروتراشی بر روی تیتانیوم خالص تجارتی پرداخته‌اند. در این فرآیند که با استفاده از اکستروژن زاویه‌ای و با

¹ DOE: Design of Experiments

² Sensitivity Analysis

³ E-fast: Extended Fourier amplitude sensitivity test

⁴ Nanomanipulation

⁵ SPD: Severe Plastic deformation

⁶ ECAP: Equal channel angular extrusion

زاویه 90° درجه صورت گرفته است، نتایج نشان می‌دهد که ناهمگنی سختی سطح قطعه کار پس از اعمال شش مرحله‌ای اکستروژن زاویه‌دار به حد مطلوبی رسیده است [۱۴]. امانی و همکارانش با استفاده از اکستروژن مستقیم و فرآیندهای اکستروژن میکرولوله^۷ به ایجاد منیزیم زیست‌تخریب‌پذیر به منظور تولید انواع استنت‌ها^۸ پرداخته‌اند [۱۵]. از مزایای استفاده از روش تغییر شکل پلاستیک شدید خواص فیزیکی منحصر به فرد و خواص فوق‌العاده خوب ذاتی نانو نام برده می‌شود که در دهه اخیر رشد قابل ملاحظه‌ای داشته است [۱۶]. یکی از روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید افزایش زاویه کانال موازی با کانال لوله‌ای و همگام با آن افزایش دما تا میزان 300° درجه سانتی‌گراد است. نتایج این عملیات باعث افزایش سختی و مقاومت به سایش قطعات شده است [۱۷]. مهم‌ترین هدف فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید ایجاد فلزات گران‌بها و تولید آن‌ها در وزن‌های سبک است که ابزار این فرآیند قدرت بسیار بالا برای حفظ ایمنی و قابلیت اطمینان قطعات است [۱۸]. یانگ و همکارانش تحولات و ویژگی‌های ریزساختار در یک فلز تک فاز را با استفاده از تغییر شکل پلاستیکی شدید مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج نشان می‌دهد مکانیزم‌های تغییر شکل‌پذیری و تحول ساختاری مانند لغزش، انتقال فاز، پالایش دانه، رشد دانه و تغییرات چگالی با استفاده از فرآیند تغییر شکل پلاستیکی شدید نتایج بهینه‌تری داشته است [۱۹]. عدالتی و همکارانش به بررسی پایداری ریزساختار انواع مختلف فلزات بسیار ریزدانه پرداخته‌اند. نتایج نشان داده است که نرم‌شوندگی یا سخت شدن دانه‌های فلزات تماماً به مرز دانه‌ها مربوط است [۲۰]. مارتین مندز و همکارانش یک آلیاژ کوانتومی تولیدشده با استفاده از فرآیند ذوب قوس و ریخته‌گری را در معرض تغییر شکل پلاستیک شدید با استفاده از پیچش فشار بالا قرار داده‌اند. تجزیه و تحلیل با استفاده از میکروسکوپ انتقال الکترونی انجام شده است. نتایج نشان داده است که بعد از انجام فرآیند تغییر شکل پلاستیک شدید یک راهکار برای ثابت بودن تک‌فازی آلیاژ تبدیل آن به مقیاس اتمی است [۲۱]. فرآیند اکستروژن برشی ترکیبی از فرآیندهای جدید در زمینه تغییر شکل پلاستیک شدید است که از ترکیب هم‌زمان دو فرآیند اکستروژن برشی ساده^۹ و اکستروژن برشی خالص تشکیل شده است. این فرآیند بر اساس تعریف برش خالص و برش ساده پایه‌گذاری شده است. یک مربع در اثر برش خالص و یک متوازی‌الاضلاع تحت تأثیر برش ساده ایجاد می‌شود [۲۲]. شمس برهان و همکارانش در یک بررسی بر روی یک روش تغییر شکل پلاستیک شدید تحت عنوان اکستروژن در کانال‌های زاویه‌دار پیچشی صفحه‌ای پرداخته‌اند. آن‌ها با استفاده از روش روبه‌پاسخ^{۱۰} پارامتر تأثیرگذار بر روی این فرآیند تحت عنوان زاویه α ، زاویه Φ ، شعاع و ضریب اصطکاک را به‌عنوان متغیرهای ورودی در نظر گرفته‌اند. با استفاده از تکنیک طراحی آزمایش‌ها و تحلیل رگرسیون به شبیه‌سازی و تحلیل پرداخته‌اند [۲۳].

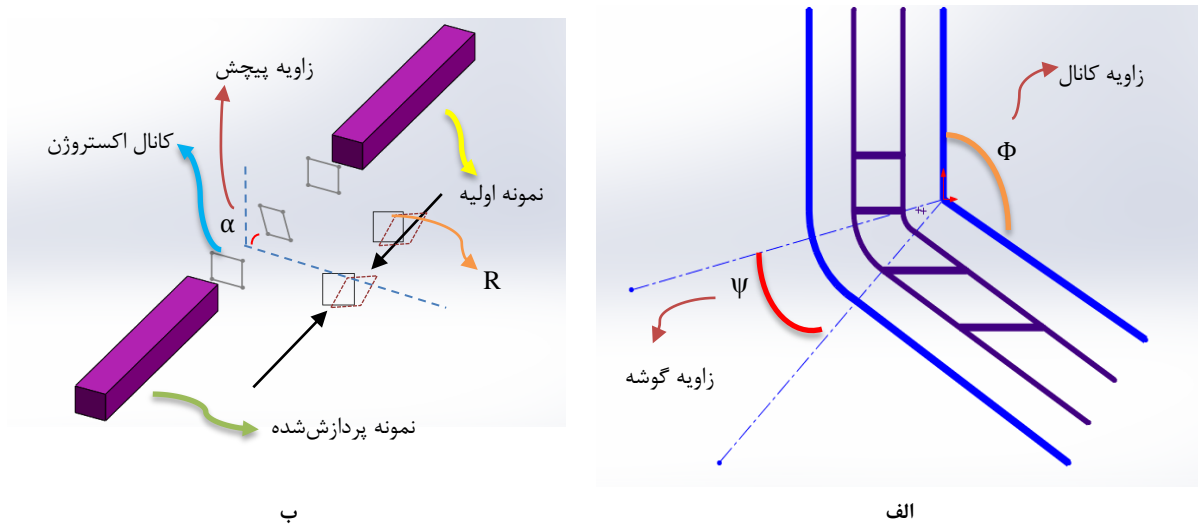
در این مقاله با استفاده از روش آنالیز حساسیت ای فست متغیرهای ورودی فرآیند اکستروژن در کانال‌های زاویه‌دار پیچشی صفحه‌ای از روش‌های نوین تغییر شکل پلاستیکی شدید مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. روش آماری ای فست که بر پایه‌ی تحلیل واریانس است، یک تست حساسیت می‌باشد که بر پایه‌ی سری فوریه شکل گرفته است، این مبنا بر اساس توسعه‌ی دامنه و نوسانات تابع هدف پی‌ریزی شده است. اثر هر یک از فاکتورهای ورودی بر عامل‌های خروجی شامل: کرنش میانگین و بیشینه و نیروی بیشینه نمونه‌ها را نشان می‌دهد. از روش‌های متداول فرآیندهای تغییر شکل پلاستیک شدید، پرس‌کاری در کانال‌های زاویه‌دار با مقاطع یکسان است که شماتیک کلی این فرآیند در شکل ۱-الف نشان داده شده است. از عوامل اصلی در این فرآیند زاویه قالب و زاویه گوشه است. در شکل نشان داده شده این مقادیر با انتخاب یک المان مربعی شکل به دست آمده است. از ویژگی‌های اصلی این فرآیند سادگی و یکنواختی در توزیع کرنش است. همچنین این فرآیند قابلیت صنعتی بسیار وسیعی دارد. Φ زاویه‌ی کانال و ψ زاویه‌ی گوشه است که مقادیر آن‌ها با توجه به نوع المان و شکل هندسی آن به دست می‌آید. همچنین محدودیت در اعمال مقدار کرنش در هر مرحله از فرآیند از معایب آن است. در شکل ۱-ب یکی از روش‌های جدید در فرآیند تغییر شکل پلاستیک شدید نشان داده شده است؛ روش اکستروژن برشی ساده که در این فرآیند با داشتن زاویه‌ی اعوجاج (α) مقدار کرنش محاسبه می‌شود. اگر در فرآیند اکستروژن برشی ساده تغییر شکل پیچشی صورت بگیرد این فرآیند به اکستروژن پیچشی صفحه‌ای تبدیل می‌گردد. همچنین از پارامترهای اصلی در فرآیند تغییر شکل پلاستیک شدید، رسیدن به میزان کرنش پلاستیک مؤثر بالا در یک سیکل است.

⁷ Micro tube

⁸ Stents

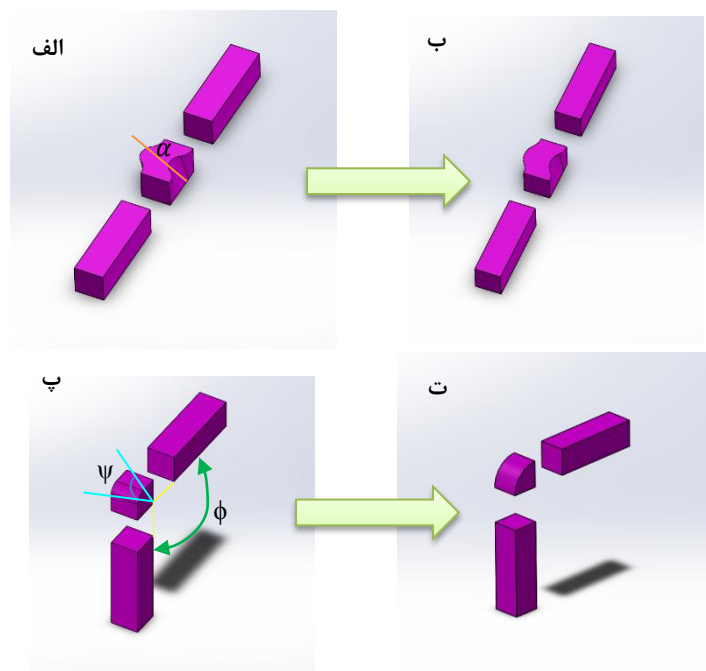
⁹ Simple shear extrusion

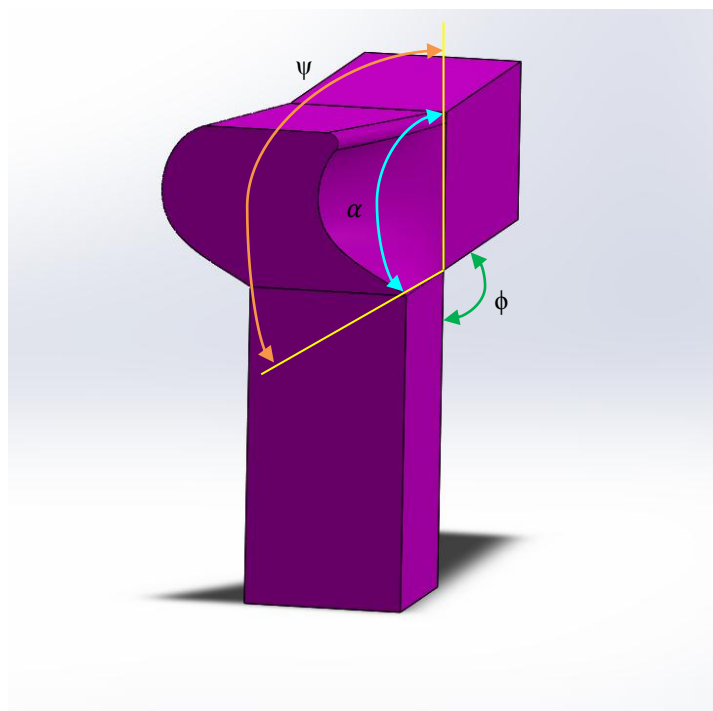
¹⁰ Regression Analysis



شکل ۱ شماتیک فرآیند تغییر شکل پلاستیک شدید، الف) شماتیک فرآیند کانال‌های مقطع زاویه‌دار با زاویه کانال و زاویه گوشه، ب) شماتیک فرآیند اکستروژن برشی ساده

شکل ۲-الف فرآیند اکستروژن برشی ساده را نمایش داده است. در این فرآیند اضلاع بالا و پایین به صورت هم‌زمان کرنش برشی را تحمل می‌کنند، اما در شکل ۲-ب فرآیند کانال‌های زاویه‌دار پیچشی صفحه‌ای کرنش برشی فقط در اضلاع بالا اعمال می‌شود. همچنین در فرآیند کانال‌های زاویه‌دار با مقاطع یکسان در شکل ۲-ب نمایش داده شده است که زاویه‌ی گوشه در حدود ۱۲ درجه قرار می‌گیرد. ولی در فرآیند کانال‌های زاویه‌دار پیچشی صفحه‌ای زاویه گوشه‌ای یک فاز برابر با ۱۸۰ درجه با زاویه کانال اختلاف دارد و از آن کمتر است که در شکل ۲-ت به تصویر درآمده است. در نهایت در فرآیند کانال‌های زاویه‌دار پیچشی صفحه‌ای، قطعه همان مسیر فرآیند کانال‌های زاویه‌دار مقاطع یکسان را طی می‌کند اما با این تفاوت شاخص که کرنش برشی ناشی از زاویه پیچش صفحه‌ای در یک مسیر شعاعی اعمال می‌گردد که در شکل ۲-ث نمایش داده شده است. شکل هندسی فرآیند کانال‌های زاویه‌دار پیچشی صفحه‌ای با سه پارامتر کلی شناخته می‌شود: زاویه کانال، زاویه پیچش و زاویه گوشه که زاویه کانال و گوشه مربوط به فرآیند کانال‌های مقطع زاویه‌دار و زاویه پیچش از فرآیند اکستروژن برشی ساده است. مهم‌ترین مزیت این فرآیند افزایش ظرفیت تغییر شکل قطعه کار با اعمال کرنش پلاستیک برشی در جهت‌های مختلف است.





شکل ۲ شماتیک فرآیندهای اکستروژن پیچشی صفحه‌ای الف) دو جهته، ب) یک جهته، اکستروژن در کانال‌های زاویه‌دار هم‌مقطع با زوایای، پ) Ψ و Φ متغیر و ت) $\Psi = \pi - \Phi$ و ث) اکستروژن در کانال‌های زاویه‌دار پیچشی صفحه‌ای

۲- مدل‌سازی

در این مقاله مدل‌سازی از دو بخش تشکیل شده است:

الف) طراحی آزمایش‌ها با استفاده از روش رویه‌پاسخ

ب) بررسی آنالیز حساسیت آماری ای فست

۲-۱- طراحی آزمایش‌ها (تکنیک رویه‌پاسخ)

یکی از بهترین تکنیک‌های بهینه‌سازی، استفاده از روش رویه‌پاسخ است. همچنین برای توصیف و شرح انواع فرآیندهای مختلف استفاده شده است. این روش خلاصه‌ای از قوانین و دستورات علوم آمار و ریاضی است که به منظور مدل‌سازی و پیش‌بینی نتایج متغیرهای ورودی بر روی فاکتورهای خروجی تحت تأثیر بهینه‌سازی به کار گرفته می‌شود. روش رویه‌پاسخ همچنین ارتباط بسیار خوبی بین بازخوردها و فاکتورهای قابل کنترل ورودی برقرار می‌کند. با استفاده از طرح مرکب مرکزی رویه‌پاسخ چهار متغیر ورودی فرآیند در جدول ۱ آمده است [۲۳].

جدول ۱ متغیرهای ورودی فرآیند

| متغیر | علامت | واحد | بیشینه | کمینه |
|-------------|----------|------|--------|-------|
| زاویه پیچش | α | ° | ۴۰ | ۰ |
| شعاع | R | mm | ۲ | ۰ |
| زاویه کانال | Φ | ° | ۱۳۰ | ۵۰ |
| ضریب اصطکاک | μ | - | ۰/۳ | ۰/۱ |

برای بررسی بهینه‌سازی اکستروژن در کانال‌های زاویه‌دار پیچشی صفحه‌ای ۴ متغیر ورودی در نظر گرفته شده‌اند، تأثیر کمی و کیفی هر یک از آن‌ها با استفاده از روش آنالیز حساسیت ای فست مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲-۲- فاکتورهای خروجی

چهار متغیر ورودی به دست آمده از روش رویه پاسخ شامل: زاویه پیچش، شعاع، زاویه کانال و ضریب اصطکاک برای بررسی کرنش و نیروی بیشینه نمونه‌هایی که از طریق اکستروژن در کانال‌های زاویه‌دار پیچشی صفحه‌ای که از روش‌های نوین تغییر شکل پلاستیک شدید است، مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. اثر هر یک از این پارامترها بر روی کرنش میانگین، کرنش بیشینه و نیروی بیشینه مورد تحلیل قرار گرفته شده است [۲۳]. توابع هدف بهینه‌سازی استخراج شده از معادلات رگرسیون می‌باشد که از طریق طراحی آزمایش‌ها بر مبنای روش رویه پاسخ به دست آمده است.

۲-۲-۱- کرنش میانگین نمونه‌ها

اعمال کرنش پلاستیک بالاتر در یک سیکل فرآیند تغییر شکل پلاستیک شدید در چند صفحه برشی به‌طور هم‌زمان در یک منطقه تغییر شکل می‌تواند در جهت کاهش سیکل‌ها برای ساخت یک ساختار فوق ریزدانه یا نانو ساختار و همچنین کاهش نیروی مورد نیاز فرآیند را به دنبال داشته باشد. با توجه به معادله‌ی رگرسیون برای پیش‌بینی میزان کرنش میانگین با افزایش زاویه α کرنش میانگین نیز افزایش پیدا می‌کند؛ اما بر خلاف آن با افزایش زاویه کانال Φ کرنش میانگین ابتدا افزایش پیدا کرده و سپس کاهش شدید یافته است. معادله کرنش میانگین به شرح زیر است [۲۳]:

$$U_{ave} = 1.32526 + 0.27862\alpha - 0.23757\Phi \quad (1)$$

۲-۲-۲- کرنش بیشینه نمونه‌ها

هر چه میزان کرنش در یک سیکل فرآیند تغییر شکل پلاستیک شدید بالاتر باشد، سرعت ریزدانه‌شدن سریع‌تر و تعداد سیکل‌های مورد نیاز برای به دست آوردن یک ساختار فوق ریزدانه کمتر است. متغیر ورودی زاویه پیچش با مقدار کرنش بیشینه رابطه‌ی مستقیم دارد، به طوری که با افزایش مقدار آن میزان کرنش بیشینه نیز افزایش خواهد یافت. معادله‌ی رگرسیون برای پیش‌بینی میزان کرنش بیشینه به صورت زیر است [۲۳]:

$$U_{max} = 1.74242 + 0.282936\alpha - 0.186018\Phi + 1.1022466\mu - 0.106973\Phi^2 - (0.163493 \times \alpha \times \Phi) \quad (2)$$

۲-۲-۳- نیروی بیشینه

نیروی مورد نیاز در این فرآیند از تماس سطح قالب و قطعه کار به وجود می‌آید. تعامل اثر متغیرهای ورودی ضریب اصطکاک و زاویه کانال بسیار تأثیرگذار در مقدار نیروی بیشینه است؛ اما تمامی متغیرهای ورودی در تعیین میزان نیروی بیشینه مؤثر هستند. معادله‌ی رگرسیون برای پیش‌بینی نیروی بیشینه به شرح زیر است [۲۳]:

$$F_{max} = 18691.1 + 2458\alpha - 937.695R - 2908.89\Phi + 2337.72\mu - (900.047 \times \Phi \times \mu) \quad (3)$$

۲-۳- بررسی روش آنالیز حساسیت آماری ای فست

از ابزارهای مهم و اصلی برای تصمیم‌گیری، آنالیز حساسیت است. استفاده از آن در تمامی مواقع چه هنگامی که یک مدل وظیفه‌ی خود را به خوبی انجام دهد، یا هنگامی که عملکرد صحیح و مناسبی ارائه ندهد، برای بهبود کیفیت فرآیند بسیار مؤثر است. روش ای فست یکی از روش‌های آنالیز حساسیت آماری و مستقل از مدل است که بر پایه‌ی تجزیه واریانس می‌باشد. از این روش می‌توان برای توابع و مدل‌های غیرخطی و غیریکنواخت استفاده کرد [۲۴]. کاربرد روش ای فست در چند مرحله ارائه می‌شود [۲۵]:

الف) مرحله اول: انتخاب دقیق فرکانس‌ها است. در این مرحله مجموعه‌ای از n فرکانس وجود دارد که باید از این مجموعه n فرکانس را انتخاب نمود؛ که n تعداد پارامترهای ورودی می‌باشد.

ب) مرحله دوم: به دلخواه یک فرکانس از مجموعه‌ی فرکانس‌ها انتخاب شده و به پارامترهای ورودی نسبت داده می‌شود.

ج) مرحله سوم: فضایی که پارامترها در اختیار دارند، نیاز به یک کاوش همه‌جانبه دارد که برای این امر یک منحنی جست‌وجو معرفی شده است.

د) مرحله چهارم: اندیس‌های حساسیت مرتبه اول و مرتبه کلی به وسیله‌ی یک ابزار بسیار مهم به نام تحلیل فوریه محاسبه شده‌اند که این امر برای نمایش نتایج خروجی است. همچنین از کاربردهای این روش می‌توان برای توابع و مدل‌های غیرخطی و غیریکنواخت استفاده کرد [۲۵].

لازم است یک مجموعه از فرکانس ورودی به‌طور خطی مستقل انتخاب گردد. معادلات (۴) و (۵) شرط‌های این مجموعه می‌باشند [۲۰]. در این معادلات a_i ضریب فرکانس‌های انتخابی است که مجموع فرکانس‌ها هیچ زمانی با صفر برابر نیست و این ضرایب از جملات یکم تا n ادامه دارند تا میزان حد مجموع به میزان مورد نظر برسد. همچنین M میزان میانگین واحد است.

$$\sum_{i=1}^n a_i \omega_i \neq 0 \quad (۴)$$

$$\sum_{i=1}^n |a_i| \leq M + 1 \quad (۵)$$

فرکانس‌های $\{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\}$ به‌صورت دلخواه به فاکتورهای ورودی نسبت داده می‌شود. این عمل امکان استفاده این روش به‌صورت هم‌زمان برای مدل‌های خطی و غیرخطی را فراهم می‌کند و همچنین نیازمندی به داشتن تعداد نمونه‌های زیاد را از بین می‌برد، پس در نتیجه امکان دسترسی بهتر و بیشتر در زمان کمتر به نتایج تجربی حصول می‌یابد. در ابتدا مدل را به‌صورت تابع $y = f(x)$ فرض می‌کنیم. اگر محدوده تغییرات فاکتورهای ورودی را فوق مکعب واحد معرفی کنیم:

$$K^n = \{x | 0 \leq x_i \leq 1; i = 1, 2, 3, \dots, n\} \quad (۶)$$

اگر هر فاکتور x_i یک تغییر تصادفی با تابع چگالی احتمال باشد، برای محاسبه n -مین گشتاور خروجی y از معادله Y استفاده می‌کنیم. k^n مکعب واحد کران پایین انتگرال گشتاور خروجی و $P(x)$ تابع هدف برای گشتاور خروجی y تعریف شده است.

$$\langle y^{(r)} \rangle = \int_{K^n} f^r(x_1, x_2, \dots, x_n) P(x) = P(x_1, x_2, \dots, x_n) dx \quad (۷)$$

فاکتورها به‌صورت هم‌زمان همگام با تغییرات در دامنه‌ی شان در راستای منحنی که به‌صورت شماتیک k^n را کاوش می‌کند، تغییر می‌کنند. واریانس مدل را می‌توان به واریانس عامل‌ها و عکس‌العمل‌های آن‌ها تقسیم کرد. طبق تئوری ویل^{۱۱} n -مین گشتاور خروجی y در طول منحنی به‌صورت رابطه‌ی ۸ به دست می‌آید [۲۶]:

$$\bar{y}^{(r)} = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{2\tau} \int_{-\tau}^{\tau} f[x_1(s), x_2(s), \dots, x_n(s)] ds \quad (۸)$$

تئوری ویل بر این دلالت دارد که:

$$\langle y^{(r)} \rangle \cong \bar{y}^{(r)} \quad (۹)$$

واریانس مدل برابر است با:

$$D = y^{(2)} - \langle y^{(1)} \rangle^2 \cong \bar{y}^2 - (\bar{y}^{(1)})^2 \quad (۱۰)$$

برای ساده‌سازی تعداد پارامترها، یک معادله تحت عنوان $f(s)$ را می‌توان در یک مسیر بسته تعریف کرد. $f(s)$ را توسط سری فوریه بسط می‌دهیم و رابطه‌ی ۱۱ به دست می‌آید.

$$f(s) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} \{A_j \cos js + B_j \sin js\} \quad (۱۱)$$

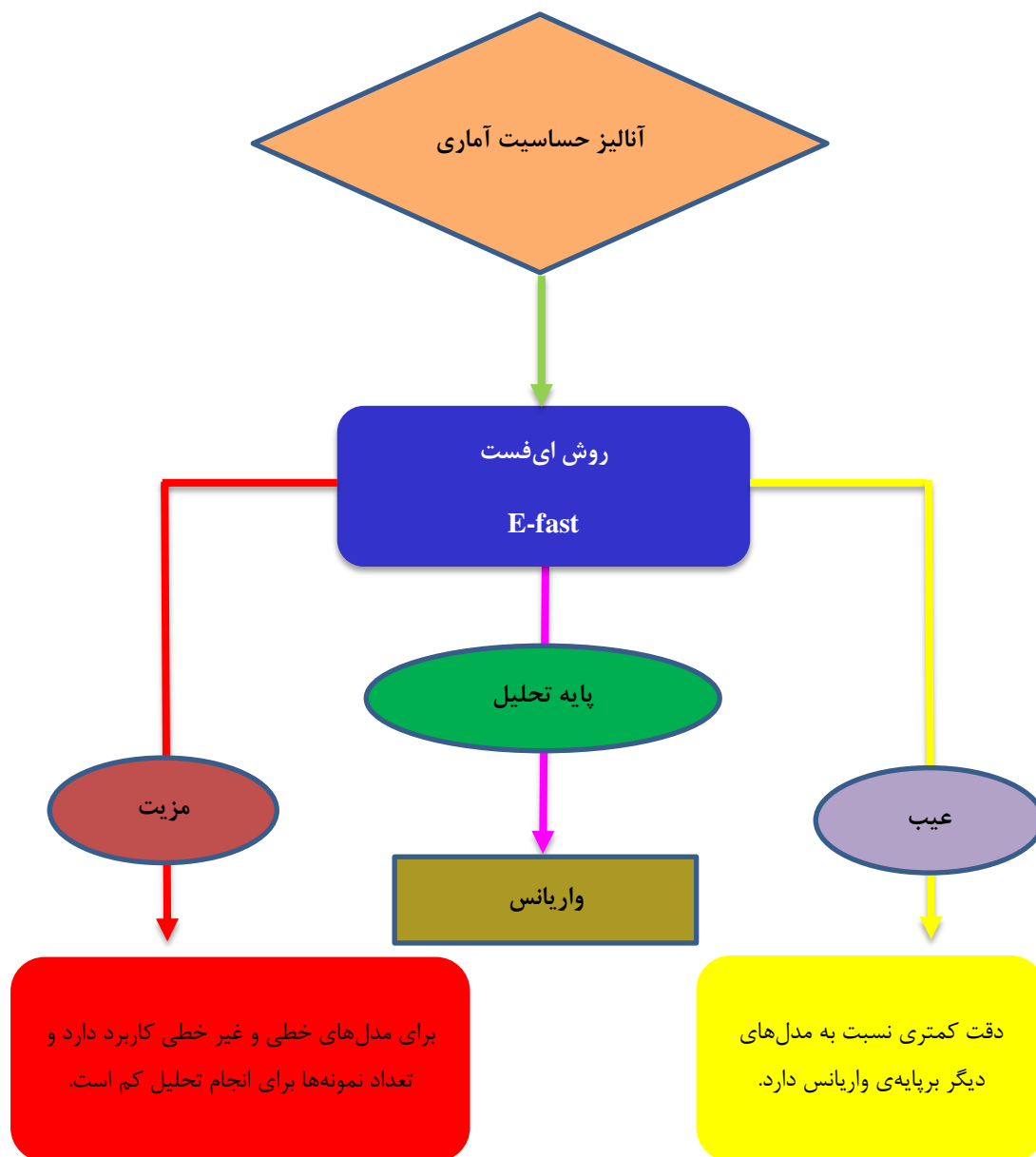
ضرایب فوریه A_j و B_j به‌صورت معادلات ۱۲ و ۱۳ تعریف می‌شوند:

$$A_j = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(s) \cos js ds \quad (۱۲)$$

$$B_j = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(s) \sin js ds \quad (۱۳)$$

^{۱۱} Weyl

در شکل ۳ مکانیزم روش آنالیز حساسیت ای فست نشان داده شده است، همچنین مزیت و عیب عمده‌ی آن نشان داده شده است.



شکل ۳ تحلیل روش آنالیز حساسیت ای فست

۳- شبیه‌سازی

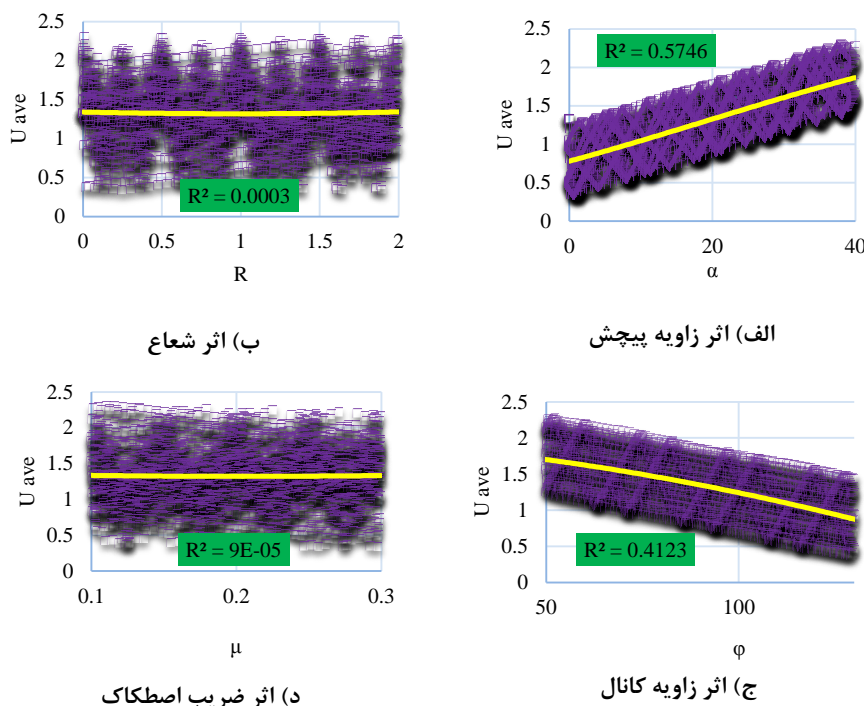
در این بخش به بررسی نمودارهای گرافیکی آنالیز حساسیت پرداخته شده و اثرات هر یک از متغیرهای ورودی جدول ۱ بر روی سه عامل کرنش میانگین و بیشینه و نیروی بیشینه تحلیل و بررسی شده است. روابط آماری و آنالیز حساسیت که در بخش مدل‌سازی بیان شده است با استفاده از نرم‌افزار تحلیل حساسیت و شبیه‌سازی سیملب^{۱۲} مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین برای استخراج فاکتورهای ورودی بر اساس روش رویه پاسخ بر مبنای طراحی آزمایش‌ها از نرم‌افزار مینی‌تب^{۱۳} بهره‌گیری شده است.

^{۱۲} Simlab

^{۱۳} Minitab

۳-۱- اثر متغیرهای ورودی بر روی کرنش میانگین نمونه‌ها

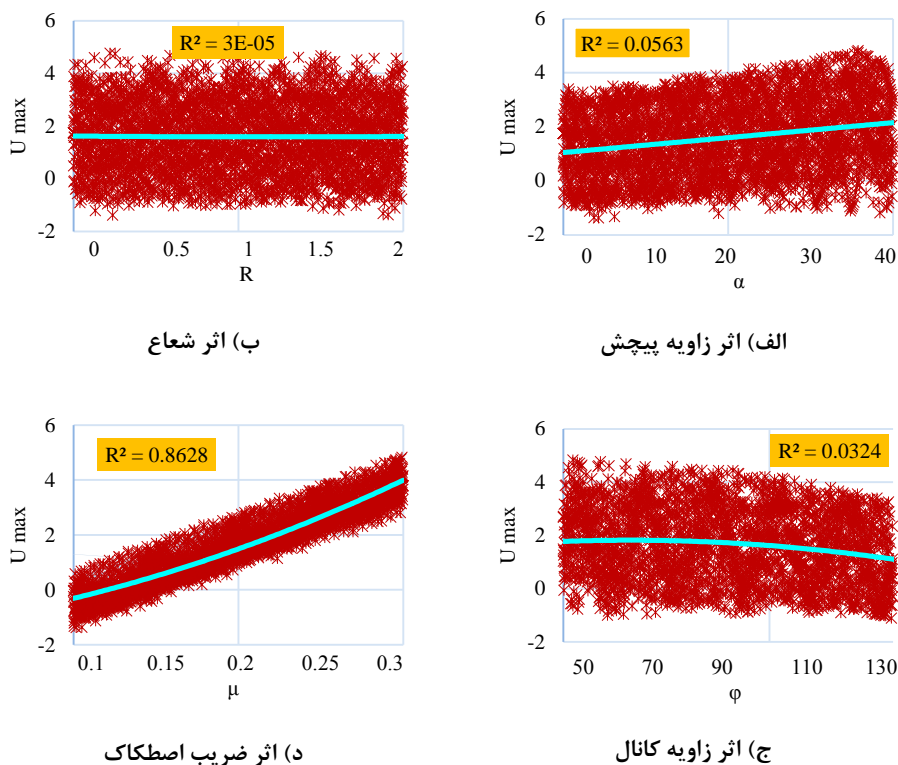
شکل ۴ نشان می‌دهد تنها دو اثر زاویه‌ای، پیچش و کانال بر روی میزان کرنش میانگین تأثیرگذار هستند، اما زاویه پیچش اثر مستقیم داشته و با افزایش آن میزان کرنش میانگین افزایش یافته اما برخلاف آن زاویه کانال تأثیر معکوس داشته و با افزایش آن میزان کرنش میانگین کاهش یافته است. هر دو متغیر ورودی اثر شعاع و ضریب اصطکاک تقریباً هیچ تأثیری بر میزان کرنش یا افزایش میزان کرنش میانگین نداشته‌اند. شکل ۴-الف تأثیرگذاری مستقیم زاویه پیچش بر کرنش میانگین را نشان می‌دهد، یک رابطه‌ی خطی برقرار است؛ اما در شکل ۴-ب برخلاف زاویه پیچش میزان تغییرات شعاع تغییر چندانی بر روی میزان کرنش میانگین ندارد و مطابق شکل افزایش شعاع باعث کاهش یا افزایش مقدار کرنش میانگین نشده است. در شکل ۴-ج زاویه کانال بر خلاف زاویه پیچش که تأثیر مستقیم بر مقدار کرنش میانگین دارد اما این فاکتور به‌صورت خطی باعث کاهش آن شده است. در بیشینه مقدار زاویه کانال مقدار کرنش میانگین به صفر میل پیدا کرده است. در شکل ۴-د اثر اصطکاک نشان داده شده است که با توجه به پراکندگی نمودار تأثیر چندانی بر روی میزان کرنش میانگین نگذاشته است. برآزش استفاده‌شده در این منحنی‌های پراکندگی از نوع چندجمله‌ای درجه دوم می‌باشد. همچنین پراکندگی نتایج نمودارها به دلیل استفاده از روش ای فست است که تمامی پارامترهای ورودی به‌صورت هم‌زمان تغییر می‌کنند. همچنین استفاده از روش آنالیز حساسیت ای فست میزان دقیق واریانس‌ها را استخراج کرده است و اندازه آن‌ها بر روی شکل‌ها نمایش داده شده است. فاکتور ورودی ضریب اصطکاک به دلیل آن که تأثیر بسیار ناچیزی بر روی تغییرات کرنش میانگین دارد واریانس آن نیز بسیار کم بوده زیرا اندازه واریانس رابطه‌ی مستقیمی با اثرگذاری فاکتورهای ورودی بر روی عامل خروجی دارد. ترتیب اثرگذاری فاکتورهای ورودی بر روی کرنش میانگین بر مبنای میزان واریانس به‌صورت زاویه پیچش، زاویه کانال، شعاع و ضریب اصطکاک از بیشترین به کمترین مقدار است. عامل واریانس که پایه و اساس روش آنالیز حساسیت ای فست می‌باشد، معیاری برای تعیین اثرگذاری فاکتورهای ورودی است، به دلیل این که در طراحی آزمایش‌ها تعداد فاکتورهای ورودی بسیار زیاد است و بهره‌گیری از این روش باعث بهینه‌سازی در نتایج تجربی و انجام آزمایش‌ها شده است. همچنین میزان سعی و خطا و هزینه‌های اقتصادی تا میزان چشمگیری کاهش یافته است و رسیدن به نتایج مطلوب تجربی سرعت بیشتری یافته است.



شکل ۴ اثر متغیرهای ورودی بر روی کرنش میانگین

۳-۲- اثر متغیرهای ورودی بر روی کرنش بیشینه نمونه‌ها

شکل ۵ نشان می‌دهد تنها متغیر اصطکاک تأثیر عمده‌ای بر روی میزان کرنش بیشینه داشته است. اثر پیچش زاویه تأثیر بسیار کمی بر روند تغییرات کرنش بیشینه داشته است. یک نکته بسیار مهم تغییرات شعاع بر میزان کرنش بیشینه است که یک خط ثابت را در طی مسیر نشان داده است. این بدان معنا است، شعاع هیچ اثری بر میزان کرنش بیشینه نداشت است یا به‌طور دیگر این‌که اثر ثابتی بر میزان آن دارد. اثر ضریب اصطکاک یک رابطه‌ی مستقیم با میزان کرنش بیشینه دارد و با افزایش مقدار آن میزان کرنش بیشینه نیز افزایش یافته است. در شکل‌های ۵-الف تا ۵-ج پراکندگی نمودارها حاکی از آن است که میزان تغییرات فاکتورهای ورودی از کمینه تا بیشینه مقدار تأثیر چندانی بر روی میزان کرنش بیشینه نداشته است و باعث کاهش یا افزایش میزان آن نشده است، اما در شکل ۵-د یک رابطه‌ی مستقیم خطی بین فاکتور ورودی ضریب اصطکاک و کرنش بیشینه وجود دارد به‌طوری‌که با افزایش ضریب اصطکاک کرنش بیشینه نمونه‌ها به حداکثر میزان خود رسیده است. برآزش منحنی‌های متغیرهای ورودی بر روی کرنش بیشینه نیز از نوع چندجمله‌ای از درجه دوم است. اندازه واریانس‌های نمایش داده شده بر روی منحنی‌ها متناسب با تغییرات آن‌ها و اثر پارامترهای ورودی بر روی عوامل خروجی است، هر چه میزان تغییرات و تأثیرگذاری فاکتور ورودی بر روی عامل خروجی بیشتر باشد میزان واریانس آن منحنی نیز بیشتر است. با توجه به میزان واریانس‌های فاکتورهای ورودی ترتیب اثرگذاری آن‌ها به‌صورت ضریب اصطکاک، زاویه پیچش، زاویه کانال و شعاع از بیشترین به کمترین فاکتور تأثیرگذار بر روی عامل خروجی کرنش بیشینه است. میزان واریانس اثر شعاع که به صفر میل کرده است حاکی از بی‌اثر بودن آن و میزان واریانس اثر ضریب اصطکاک که به ۱ میل کرده است نشان‌دهنده تأثیرگذاری بالای این فاکتور ورودی بر روی کرنش بیشینه است.

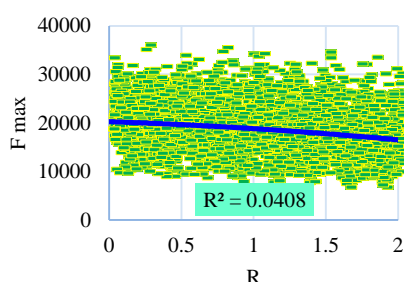


شکل ۵ اثر متغیرهای ورودی بر روی کرنش بیشینه

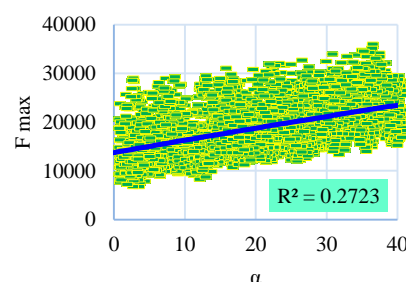
۳-۳- اثر متغیرهای ورودی بر روی نیروی بیشینه

شکل ۶ روند اثرگذاری متغیرهای ورودی بر میزان تغییرات نیروی بیشینه را نشان داده است. در مقایسه با شکل قبل و اثر متغیرهای ورودی بر روی میزان کرنش بیشینه، تأثیر متغیرها بر روی میزان نیروی بیشینه حالت متوازن‌تری دارد، به‌طوری‌که

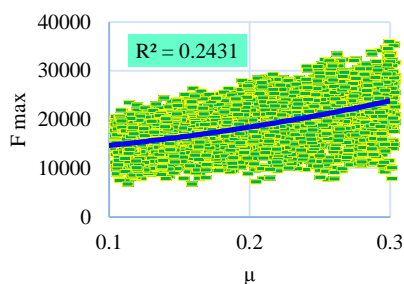
با افزایش مقدار زاویه پیچش و ضریب اصطکاک میزان نیروی بیشینه نیز افزایش یافته است. درحالی‌که نیروی بیشینه با اثر زاویه کانال یک رابطه‌ی معکوس دارد و با افزایش آن مقدار نیروی بیشینه کاهش یافته است. شکل ۶-الف و ۶-د پراکندگی فاکتورهای زاویه‌ی پیچش و ضریب اصطکاک را نشان می‌دهد که هر دو یک رابطه‌ی مستقیم با نیروی بیشینه دارند، افزایش این فاکتورها باعث بیشینه شدن مقدار نیروی بیشینه شده است؛ اما در شکل ۶-ب اثر شعاع تغییر چندانی بر روی میزان نیروی بیشینه نداشته است و شکل ۶-ج اثر زاویه کانال را نشان داده است که یک رابطه‌ی معکوس بین آن و نیروی بیشینه است که با افزایش این فاکتور نیروی بیشینه کاهش یافته است. اثرگذاری فاکتورهای ورودی بر روی نیروی بیشینه به نمودارهای پراکندگی قابل تفکیک نیست زیرا میزان افزایش یا کاهش آن‌ها به صورت دقیق قابل تشخیص نیست، اما با استفاده از معیار واریانس ترتیب دقیق اثرگذاری آن‌ها به صورت زاویه کانال، زاویه پیچش، ضریب اصطکاک و شعاع از بیشترین به کمترین مقدار و اثرگذاری است. تأثیرگذاری زاویه پیچش و ضریب اصطکاک بسیار به هم نزدیک می‌باشد اما زاویه پیچش با مقدار ۰/۲۷ بیشتر از ۰/۲۴ میزان ضریب اصطکاک است.



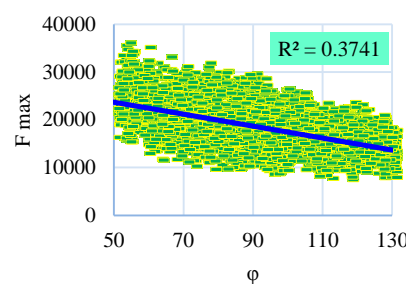
ب) اثر شعاع



الف) اثر زاویه پیچش



د) اثر ضریب اصطکاک



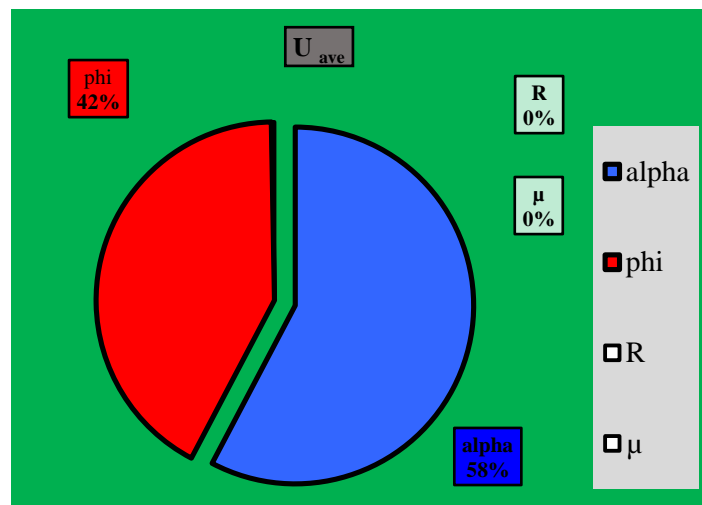
ج) اثر زاویه کانال

شکل ۶ اثر متغیرهای ورودی بر روی نیروی بیشینه

۳-۴- بررسی کمی متغیرهای ورودی بر روی کرنش میانگین با استفاده از روش آماری ای فست

شکل ۷ اثر کمی متغیرهای ورودی بر روی کرنش میانگین را نشان داده است. به منظور بهینه‌سازی یک فرآیند بررسی کمی همگام با کیفی لازم و ضروری است. در بررسی کیفی نوع رابطه مخالف، موافق و بی‌تأثیر از مهم‌ترین نتایج آن است؛ اما پس از مشخص شدن نوع رابطه میزان تأثیرگذاری کمی آن بسیار حائز اهمیت می‌باشد زیرا در روند کاهش یا افزایش کیفیت و بهره‌وری یک فرآیند بسیار بسزا بوده است. اگر فاکتور ورودی با عامل خروجی رابطه‌ای مخالف دارد پس از بررسی کمی باید میزان آن را به حداقل مقدار ممکن و اگر رابطه‌ی موافق داشته باشد باید مقدار آن را افزایش داد. همچنین استخراج میزان دقیق کمی هر یک از فاکتورهای ورودی به مقدار واریانس‌ها که در نمودارهای پراکندگی مورد بحث و استدلال قرار گرفت وابسته است. تنها دو متغیر از چهار متغیر ورودی بر روی میزان کرنش میانگین تأثیرگذار بوده‌اند. به ترتیب زاویه پیچش با ۵۸٪ بیشترین میزان و پس از آن زاویه کانال با ۴۲٪ بر روی میزان تغییرات کرنش میانگین تأثیر گذاشته‌اند. اثر شعاع و ضریب اصطکاک هیچ‌گونه اثرگذاری بر روی مقدار کرنش میانگین نداشته‌اند. همچنین از نمودارهای پراکندگی کیفی استنباط می‌گردد که میزان اثرگذاری شعاع و ضریب اصطکاک به صورت بسیار کم و بدون تغییر و اثرگذاری بوده است، پس در اثرگذاری

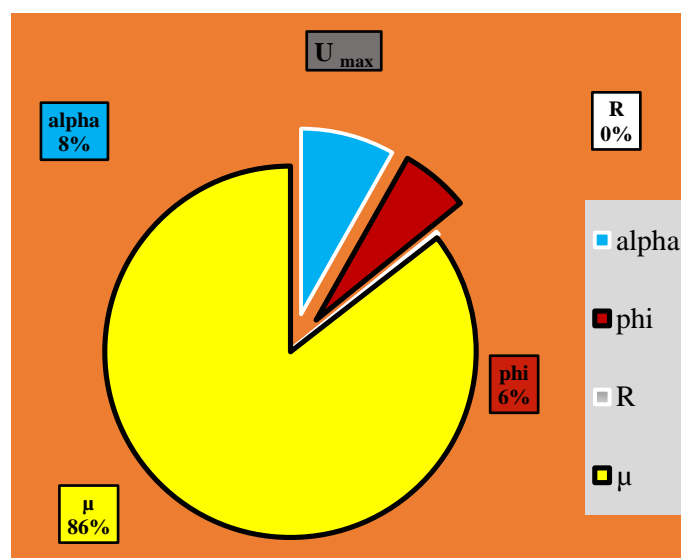
کمی این دو فاکتور نقشی نداشته و میزان آن‌ها صفر بوده است؛ اما زاویه پیچش رابطهی مستقیم و زاویه کانال رابطهی عکس بر روی میزان تغییرات کرنش میانگین داشته است. بدیهی است که برای بهینه‌سازی باید میزان زاویه پیچش افزایش یافته و در همان حین زاویه کانال تا حدود بسیار زیادی کاهش بیابد.



شکل ۷ اثر کمی متغیرهای ورودی بر روی کرنش میانگین

۳-۵- بررسی کمی متغیرهای ورودی بر روی کرنش بیشینه با استفاده از روش آماری ای‌فست

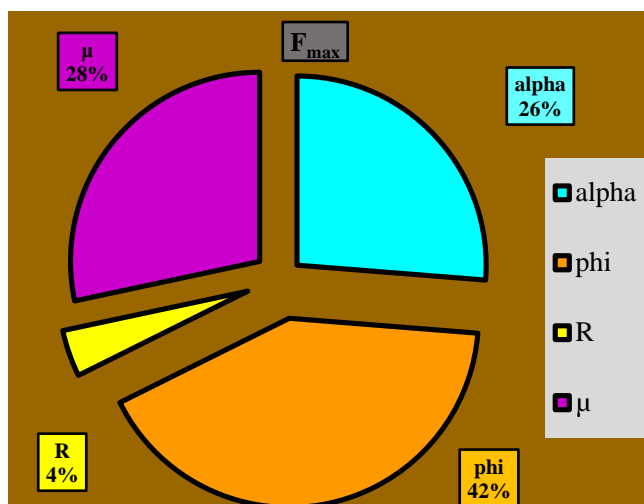
شکل ۸ اثر کمی متغیرهای ورودی بر روی کرنش بیشینه را نشان داده است. متغیر ورودی اثر اصطکاک عمده‌ترین مقدار تأثیر را با میزان ۸۶٪ بر روی کرنش بیشینه گذاشته است؛ و پارامتر اصلی و تعیین‌کننده‌ی کرنش بیشینه است. نکته‌ی حائز اهمیت این است که متغیر ورودی شعاع هیچ تأثیری بر میزان کرنش بیشینه نداشته است و فاکتور کرنش بیشینه مستقل از متغیر ورودی شعاع است. زاویه پیچش با ۸٪ و زاویه کانال با ۶٪ در رتبه‌های بعدی متغیرهای ورودی اثرگذار قرار گرفته‌اند. نوع ارتباط فاکتورهای ورودی با کرنش بیشینه نیز به این صورت است، شعاع به صورت کاملاً بی‌اثر بوده است؛ اما زاویه کانال بر خلاف شعاع مقدار ناچیزی بر روی تغییرات کرنش میانگین نقش داشته است که سبب کاهش یا افزایش آن شده است. هر دو فاکتور ورودی ضریب اصطکاک و زاویه پیچش رابطهی مستقیم با میزان کرنش بیشینه داشته‌اند، به طوری که مجموع اثرگذاری این دو فاکتور به میزان ۹۴٪ است.



شکل ۸ اثر کمی متغیرهای ورودی بر روی کرنش بیشینه

۳-۶- بررسی کمی متغیرهای ورودی بر روی نیروی بیشینه با استفاده از روش آماری ای فست

اثر کمی متغیرهای ورودی بر روی مقدار نیروی بیشینه در شکل ۹ نمایش داده شده است. زاویه کانال با ۴۲٪ بیشترین اثر را بر روی میزان نیروی بیشینه گذاشته است. ضریب اصطکاک و زاویه پیچش به ترتیب با ۲۸٪ و ۲۶٪ در رده‌های بعدی اثرگذاری قرار دارند. توازن اثرگذاری متغیرهای ورودی بر روی نیروی بیشینه از مزیت‌های بسیار مناسب به شمار می‌رود. همانند کرنش بیشینه نیز، شعاع با درصد بسیار ناچیز به مقدار ۴٪ کمترین تأثیر را بر روی میزان نیروی بیشینه داشته است. نوع رابطه‌های اثرگذاری فاکتورهای ورودی بر روی نیروی بیشینه با استفاده از واریانس بر مبنای تأثیر کیفی دارای تقارن است. بدین صورت که زاویه پیچش و ضریب اصطکاک رابطه‌ی مستقیم با میزان تغییرات نیروی بیشینه و زاویه کانال و شعاع رابطه‌ی معکوس با میزان نیروی بیشینه داشته است. اگر آنالیز حساسیت مبنای چینه‌ی این فاکتورهای ورودی بر اساس دسته‌بندی کمی و کیفی باشد، به ترتیب ضریب اصطکاک و زاویه پیچش با بیشینه مقدار قرار می‌گیرند و سپس زاویه کانال و شعاع در رده‌های بعدی اما با کمترین مقدار ممکن به جهت بهینه‌سازی هرچه بیشتر فرآیند قرار می‌گیرند.

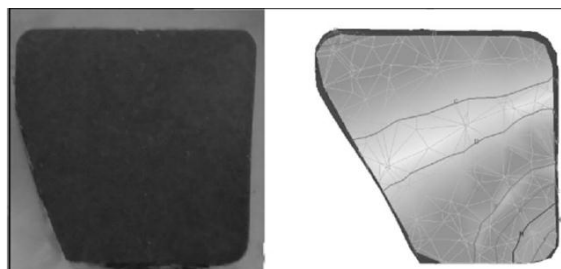


شکل ۹ اثر کمی متغیرهای ورودی بر روی نیروی بیشینه

در فرآیند تغییر شکل پلاستیک شدید برای اکستروژن در کانال‌های زاویه‌دار پیچشی صفحه‌ای بررسی شده است که اجزای اصلی و تأثیرگذار این فرآیند از طریق یک قالب ثابت و فقط در یک ناحیه تغییر شکل، در سه صفحه برشی هم‌زمان کرنش برشی و با مقدار بیشتری نسبت به فرآیند کانال‌های مقطع زاویه‌دار به وجود آمده است. از روش عددی المان محدود برای بررسی این فرآیند تحت زوایا، شعاع و ضرایب اصطکاک مختلف استفاده شده است و با انجام بهینه‌سازی، پارامترهای بهینه فرآیند در اندازه‌های $\alpha = 45^\circ$ ، زاویه $\Phi = 45^\circ$ و $R = 2\text{mm}$ ضریب اصطکاک 0.1 به دست آمده است [۲۳].



شکل ۱۱ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه فراوری شده بعد از یک پاس فرآیند PTCAE [۲۳].



شکل ۱۰ سطح مقطع به دست آمده از آزمایش و شبیه‌سازی عددی فرآیند PTCAE [۲۳].

۴- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

تغییر شکل پلاستیک شدید نیز همانند هر فرآیند دیگری در دنیای صنعت و تکنولوژی نیازمند افزایش کیفیت و بهبود بهینه‌سازی است. فرآیند اکستروژن در کانال‌های زاویه‌دار پیچشی صفحه‌ای یک روش نوین برای تولید قطعات از زیرمجموعه‌ی ساخت و تولید قطعات به روش تغییر شکل پلاستیکی شدید است. چهار متغیر ورودی شامل: زاویه پیچش، شعاع، زاویه کانال و ضریب اصطکاک به‌عنوان فاکتورهای ورودی تأثیرگذار بر روی دو عامل مهم مکانیکی قطعات شامل: کرنش میانگین و بیشینه و نیروی بیشینه با استفاده از روش آنالیز حساسیت ای‌فست مورد بررسی قرار گرفته است. برای کرنش میانگین مقادیر زاویه پیچش و کانال بیشترین مقدار تأثیرگذاری را داشته‌اند، اما اثر شعاع و ضریب اصطکاک هیچ‌گونه تأثیری بر روند تغییرات میزان کرنش میانگین نداشته‌اند. همچنین برای کرنش بیشینه نیز ضریب اصطکاک بیشترین تأثیر را از نظر کمی و کیفی داشته است و متغیرهای زاویه پیچش و زاویه کانال نیز در مراتب بعدی اثرگذاری قرار داشته‌اند. نیروی بیشینه نیز تحت تأثیر یک حالت تعادلی از متغیرهای ورودی قرار گرفته است، از نظر کمی به ترتیب زاویه کانال، ضریب اصطکاک و زاویه پیچش در تعیین میزان نیروی بیشینه نقش داشته‌اند. متغیر ورودی شعاع نیز برای کرنش بیشینه کاملاً بی‌تأثیر و برای نیروی بیشینه تأثیر بسیار ناچیزی داشته است. در جدول‌های ۲ تا ۴ تحلیل و بررسی کلی فاکتورهای ورودی بر روی عامل‌های خروجی تغییر شکل پلاستیک شدید اکستروژن در کانال‌های زاویه‌دار پیچشی صفحه‌ای آمده است که رابطه‌های کیفی و کمی هر یک از چهار فاکتور مؤثر مشخص شده است.

جدول ۲- تحلیل و بررسی کرنش میانگین

| فاکتور ورودی | رابطه‌ی کیفی | رابطه‌ی کمی |
|--------------|--------------|-------------|
| زاویه پیچش | مستقیم | ۵۸٪ |
| شعاع | بدون تأثیر | صفر |
| زاویه کانال | معکوس | ۴۲٪ |
| ضریب اصطکاک | بدون تأثیر | صفر |

کرنش میانگین

جدول ۳ تحلیل و بررسی کرنش بیشینه

| فاکتور ورودی | رابطه‌ی کیفی | رابطه‌ی کمی |
|--------------|--------------|-------------|
| زاویه پیچش | مستقیم | ۸٪ |
| شعاع | بدون تأثیر | صفر |
| زاویه کانال | معکوس | ۶٪ |
| ضریب اصطکاک | مستقیم | ۸۶٪ |

کرنش بیشینه

جدول ۴ تحلیل و بررسی نیروی بیشینه

| فاکتور ورودی | رابطه‌ی کیفی | رابطه‌ی کمی |
|--------------|--------------|-------------|
| زاویه پیچش | مستقیم | ۲۶٪ |
| شعاع | معکوس | ۴٪ |
| زاویه کانال | معکوس | ۴۲٪ |
| ضریب اصطکاک | مستقیم | ۲۸٪ |

نیروی بیشینه

۵- فهرست علائم

| عنوان | علامت اختصاری |
|------------------|---------------|
| ضریب فوریه | A_j |
| ضریب فوریه | B_j |
| نیروی بیشینه (N) | F_{max} |
| شعاع (mm) | R |
| کرنش میانگین | U_{ave} |
| کرنش بیشینه | U_{max} |
| زاویه پیچش [°] | α |
| زاویه کانال [°] | Φ |
| ضریب اصطکاک | μ |

۶- مراجع و منابع

- [1] Kleijnen J P. An overview of the design and analysis of simulation experiments for sensitivity analysis. *European Journal of Operational Research*. 2005;164:287-300.
- [2] Félix G, Ancheyta J, Trejo F. Sensitivity analysis of kinetic parameters for heavy oil hydrocracking. *Fuel*. 2019;241:836-844.
- [3] Dennis L, Martin O, Sonya G. DOE (Design of Experiments) in Development Chemistry: Potential Obstacles. *Organic Process Research & Development*. 2001;145:324-327.
- [4] Taheri M. Sensitivity analysis of 3D manipulation of spherical nanoparticles by using E-fast method. *Modares Mechanical Engineering*. 2018;17:59-69. (In Persian).
- [5] Raab G J, Valiev R Z, Lowe T C, Zhu Y T. Continuous processing of ultrafine grained Al by ECAP-Conform. *Materials Science and Engineering*. 2004;382:30-34.
- [6] Valiev R Z, Islamgaliev R K, Alexandrov I V. Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation. *Progress in materials science*. 2000;45:103-189.
- [7] Pouryan s, Naeini H, Safdarian R, Shirani Bidabadi B. The effect of process parameters on thinning defect in the cold roll forming process of channel section. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2016;3:11-18. (In Persian).
- [8] Shafeie M R, Elyasi M, Hosseinzadeh M, Aghajani H, Derazkola M. Experimental Investigation of the Effect of Equal Channel Angular Pressing Intermediate Canal of on the Mechanical Properties of copper. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2019;6:32-41. (In Persian).
- [9] Kashfi M, Bakhtiyari D, Ghavamian A, Kashfi M, Kahal P. A numerical-experimental investigation on spring back in rectangular section thin wall hollows and extracting a relation to estimate twisted angle by considering strain harden behavior. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2017;4:38-43. (In Persian).
- [10] Talebi Ghadikolaee H, Elyasi M, Hosseinzadeh M. Investigate the effect of rubber layers thickness on forming of bipolar plate's microchannels in rubber pad forming process. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2016;2:57-69. (In Persian).
- [11] Ahmad Khan Beigi M, Shahbazi Karami J, Sheikhi. Experimental and numerical study of friction stir back extrusion process for producing ultra-fine-grained tubes. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2016;3:34-44.
- [12] Ghaemi Khiavi S, Emadodddin E. Plastic deformation behavior of Aluminum 5452 alloy under unconstrained high pressure torsion and effect of turns and applied pressures on their r^* . *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2016;3:40-47. (In Persian).
- [13] Alavizadeh S M, Abrinia K, Parvizi A. Twisted Multi Channel Angular Pressing (TMCAP) as a Novel Severe Plastic Deformation Method. *Metals and Materials International*. 2020;1:1-12.
- [14] Attarilar Sh, Salehi M, Djavanroodi F. Microhardness evolution of pure titanium deformed by equal channel angular extrusion. *Metallurgical Research & Technology*. 2019;116:408-418.

- [15] Amani S, Faraji Gh, Kazemi Mehrabadi H, Baghani M. Manufacturing and mechanical characterization of Mg-4Y-2Nd-0.4Zr 0.25La magnesium microtubes by combined severe plastic deformation process for biodegradable vascular stents. *Proc IMechE Part B: J Engineering Manufacture*. 2019;223:1196-1205.
- [16] Bagherpour E, Pardis N, Reihanian M, Ebrahimi R. An overview on severe plastic deformation: research status, techniques classification, microstructure evolution, and applications. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019;100:1647-1694.
- [17] Fata A, Eftekhari M, Faraji G, Mosavi Mashhadi M. Enhanced Hot Tensile Ductility of Mg-3Al-1Zn Alloy Thin-Walled Tubes Processed Via a Combined Severe Plastic Deformation. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2018;27:2030-2337.
- [18] Saltelli A, Sobol I M. about the use of rank transformation in sensitivity analysis of model output. *Reliability Engineering & System Safety*. 1995;50:225-239.
- [19] Saltelli A, Chan K, Scott E. sensitivity analysis. *Wiley series in probability and statistics*, Wiley, New York, 2000.
- [20] Cukier R, Levine H, Shuler K. Nonlinear sensitivity analysis of multiparameter model systems. *Journal of computational physics*. 1978;26:1-42.
- [21] Saltelli A, Tarantola V, Chan KnS. A quantitative model independent method for global sensitivity analysis of model output. *Technometrics*. 1999;41:39-56.
- [22] Mahmoudi M, Shokuhfar A, Nakhodchi S. A new severe plastic deformation technique based on simple and pure shear. *Modares Mechanical Engineering*. 2016;16:145-154. (In Persian).
- [23] Shamsborhan M, Moradi M, Shokuhfar A. Numerical optimization of “Planar twist channel angular extrusion” as a novel severe plastic deformation method by DOE method. *Modares Mechanical Engineering*. 2017;16:135-144. (In Persian).
- [24] Korayem M, Zakeri M. Sensitivity analysis of nanoparticles pushing critical conditions in 2-D controlled nanomanipulation based on AFM. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2009;41:714-726.
- [25] Sobol M. Sensitivity analysis for non-linear mathematical models. *Mathematical modelling and computational experiment*. 1993;1:407-414.
- [26] Frey H, Patil S R. Identification and Review of Sensitivity Analysis Methods. *Risk Analysis*. 2002;22:553-578.