



تحلیل اجزاء محدود نقش سرعت چرخش در فرایند پیچش پرفشار

شکرواله ناصری^۱، علی محمد رشیدی^{۲*}، محمد حسین یاس^۳^۱ دانشجوی دکتری، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.^۲ دانشیار، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.^۳ استاد، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۳؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۱۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۹

چکیده

هدف کار حاضر پر کردن بخشی از خلاء موجود در زمینه‌ی شاخص حساسیت به نرخ پیچش فولاد ساده کربنی تحت تغییر شکل پلاستیک شدید با فرایند پیچش پرفشار بود. در این راستا اثر نرخ پیچش بر نمودار گشتاور-زاویه پیچش، گشتاور بیشینه و کرنش معادل شکست با روش تحلیل اجزاء محدود (FEA) مطالعه شد. خواص مکانیکی و معادله سیلان ماده، فشار اولیه MPa ۳۰۰ و پنج نرخ پیچش متفاوت از ۰/۵ rad/s تا ۴ rad/s به عنوان داده‌های ورودی مدل‌سازی به کار برده شدند. نتایج نشان دادند که با افزایش نرخ پیچش نمودار گشتاور-زاویه پیچش به سمت مقادیر پائین‌تر جابجا می‌شود. شاخص حساسیت به نرخ پیچش کمیتی منفی و به صورت $M = -0.018\phi$ به میزان پیچش وابسته بود. معادله اصلاح شده جانسون-کوک بر همه نمودارهای گشتاور-زاویه پیچش عالی برآزش شد. با افزایش نرخ پیچش تا ۲ rad/s، گشتاور بیشینه از ۱۱۷۷ N.m تا ۱۳۵۷ N.m و کرنش معادل شکست از ۱/۲۵ تا ۲/۸۰ افزایش یافت. افزایش بیشتر نرخ پیچش تا ۴ rad/s موجب کاهش این دو کمیت به ترتیب به ۱۲۰۹ N.m و ۲/۶۳ شد. بیشینه مقدار کرنش معادل شکست به دست آمده با FEA، نسبت به مقادیر محاسبه شده با معادلات فون میسز، هنکی اصلاح شده و داکتیاریف به ترتیب ۲۲، ۶۱ و ۱۰۴ درصد بیشتر بود.

کلمات کلیدی: پیچش پرفشار؛ نرخ پیچش؛ تحلیل اجزاء محدود؛ گشتاور؛ کرنش معادل؛ مدل جانسون-کوک.

Finite Element Analysis of Twist Rate Role in High Pressure Torsion Process

Shokrolah Naseri¹, Ali Mohammad Rashidi^{2,*}, Mohammad Hossein Yas³¹ Ph.D. Student, Faculty of Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran.² Assoc. Prof., Faculty of Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran.³ Prof., Faculty of Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran.

Abstract

The main goal of this work was to partially fill the existing knowledge gap concerning the twist rate sensitivity of plain carbon steel severe plastic deformed by high pressure torsion (HPT) process. In this regard the twist rate effect on torque-twist angle curve, maximum torque and failure equivalent strain was investigated using finite element analysis (FEA) with Abaqus software. The mechanical properties, flow stress equation, initial pressure of 300 MP and five different twist rates from 0.5 rad/s to 4 rad/s were used as input data in the modeling of the HPT process. According to obtained results, the torque-twist angle diagram shifted towards lower values with increasing twist rate. The twist rate sensitivity index was negative and depended on twist angle as $M = -0.018\phi$. The modified Johnson-Cook equation was an excellent fit to the all torque-twist angle curves. The maximum torque and failure equivalent strain initially increased from 1177 to 1357 N.m and from 1.25 to 2.80, respectively, by increasing twist rate to 2 rad/s, and then decreased to 1209 N.m and 2.63, respectively. The maximum value of failure equivalent strain obtained with FEA was 22%, 61% and 104% higher than the values calculated using von Mises, modified Hencky and Degtyarev equations, respectively.

Keywords: HPT; Twist rate; FEA; Torque, Equivalent strain; Johnson-Cook model.

۱- مقدمه

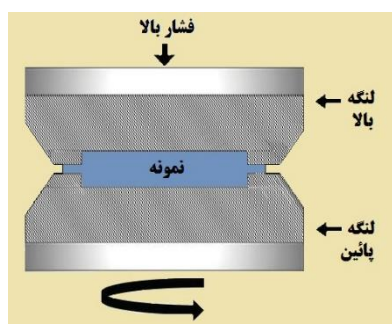
پیچش پرفشار^۱ عنوان پیشنهادی برای یکی از فرایندهای تغییر شکل مومسان شدید^۲ بود که توسط کمیته SPD در سال ۱۹۹۹ میلادی مورد پذیرش قرار گرفت [۱]. در سال‌های اخیر این فرایند مورد توجه زیادی واقع شده، زیرا در مقایسه با دیگر فرایندهای SPD، قادر به ایجاد کرنش معادل بیشتر در مواد فلزی و به تبع آن ریزساختار با دانه‌های ریزتر (تا ابعاد چندین نانومتر) و همچنین فشرده‌سازی ذرات ریز و نوارهای آمورف است [۲]. فرایند HPT در واقع تکامل یافته‌ی ایده ترکیب آزمون پیچش و تنش‌های فشاری هیدرواستاتیکی است که نخستین بار در سال ۱۹۳۵ میلادی توسط بریگمن مطرح و عملیاتی شد [۳]. آزمون پیچش معمولی برای یک دوره طولانی روشی برای بررسی رفتار تنش-کرنش مواد در کرنش‌های مومسان بزرگ (خیلی بیشتر از کرنش‌های ایجاد شده با آزمون کشش) بود. فراهم شدن امکان اعمال یک فشار هیدرواستاتیکی بالا طی پیچش موجب شد مقدار کرنش شکست حتی نسبت به حالت پیچش ساده افزایش زیادی یابد [۴]. به این ترتیب دوره جدیدی از بررسی رفتار تنش-کرنش مواد مختلف از فلزات شکل‌پذیر گرفته تا مواد سرامیکی ترد با استفاده از فرایند HPT آغاز شد. طی ۲۵ سال گذشته تحقیقات زیادی در باره این فرایند و اثر آن بر میکروساختار و خواص مواد انجام شده که برخی از نتایج برجسته آنها را می‌توان در مقاله‌های مروری [۵-۱۰] مطالعه نمود. مزایا و محدودیت‌های فرایند HPT به‌خوبی در مرجع [۱۱] بیان شده و افزایش ظرفیت ابعادی^۳ نمونه در این فرایند نیز اخیراً مورد بحث قرار گرفته است [۱۲].

فرایند پیچش پر فشار از توان بالایی برای تولید صنعتی-تجاری اجزای کوچک سیستم‌های الکترومکانیکی، ایمپلنت‌های پزشکی و دندانپزشکی، مواد مغناطیسی، ذخیره‌سازی هیدروژن، تراشه‌های مکانیکی و انواع واشرهای استحکام بالا برخوردار است [۱۳]. علاوه بر این، امکان دستیابی به استحکام و سختی بالا، ایجاد خواص سوپرپلاستیک عالی، ایجاد خواص حافظه‌داری و بهبود رفتار سودوالاستیک^۴ از دیگر ویژگی‌هایی

است که موجب توجه روزافزون محققان و صنعت‌گران به فرایند HPT شده است [۱۴].

اساس فرایند HPT بر قرارگیری یک نمونه استوانه‌ای کوچک بین دو لنگه یک قالب مانند شکل ۱، اعمال فشار بالا بر سطح نمونه توسط لنگه بالایی و چرخش لنگه پائینی قالب (یا چرخش دو لنگه نسبت به هم) استوار است. در اثر اعمال فشار اصطکاک زیادی بین سطوح درگیر نمونه با لنگه‌های قالب ایجاد می‌شود که قادر به اعمال تنش برشی بیش از استحکام سیلان نمونه است. در نتیجه صفحات اتمی در نیمه بالایی و نیمه پائینی نمونه با چرخش لنگه پائینی قالب نسبت به هم می‌چرخند. به این ترتیب کرنش برشی (γ) در نمونه ایجاد می‌شود که مقدار آن در نمونه‌ای به ارتفاع h به ازای زاویه پیچش φ^۵ در هر فاصله شعاعی r از محور نمونه از رابطه زیر قابل محاسبه است [۱]:

$$\gamma = \frac{r\phi}{h} \quad (1)$$



شکل ۱- نمایش فرایند پیچش پرفشار نیمه مقید

مطابق رابطه ۱ مقدار کرنش در راستای شعاع با دور شدن از مرکز نمونه افزایش یافته و توزیع کرنش در راستای ضخامت (محور) نمونه همگن است. برخی نتایج تجربی با این موضوع هم‌خوان بوده [۴]، اما برخی دیگر [۱۵] نشان می‌دهند این موضوع به ضخامت نمونه و شعاع محل اندازه‌گیری (فاصله از مرکز نمونه) بستگی داشته و میزان ناهمگنی با افزایش ضخامت افزایش می‌یابد.

⁵ Angle of twist

¹ High pressure torsion (HPT)

² Severe plastic deformation

³ Scale-Up

⁴ Pseudoelasticity

معادله تجربی جانسون-کوک به شکل عمومی رابطه (۳) کاربرد گسترده‌تری دارد، هر چند برای بیان حساسیت به نرخ کرنش منفی مناسب نیست [۲۰]:

$$\bar{\sigma} = (\sigma_{ref} + k\bar{\epsilon}^n)(1 + m \ln \epsilon_r^0)(1 - T_h^p) \quad (3)$$

در رابطه بالا $n = \partial \ln \sigma / \partial \ln \epsilon$ توان کارسختی، k ثابت کارسختی، $\epsilon_r^0 = \epsilon^0 / \epsilon_{ref}^0$ نرخ کرنش نسبی بدون بعد، p ضریب نرم‌شوندگی حرارتی، $T_h = (T - T_{ref}) / (T_m - T_{ref})$ دمای همسان شده، T_{ref} دمای مبنا و T_m نقطه ذوب است.

در فرایند HPT مطابق رابطه (۱) نرخ کرنش در سطح نمونه متغیر و تابع قطر نمونه است [۱۵]. در عوض سرعت چرخش (نرخ پیچش)^۷ ω کمیتی مستقل از ابعاد نمونه است. بنابراین استفاده از آن در مطالعه HPT مناسب‌تر از کمیت نرخ کرنش است. این کمیت به صورت $\gamma^0 = r\omega/h$ به نرخ کرنش برشی γ^0 قابل تبدیل است. به رغم شناخته شدن نرخ کرنش از دیرباز به عنوان یک پارامتر اثرگذار بر رفتار فلزات و قدمت ۹۰ ساله فرایند HPT، طی جستجو در منابع علمی در دسترس تنها چند گزارش مستقل [۲۴-۳۰] یافت شد که در آنها به اثرات نرخ پیچش فرایند HPT اشاره شده است. مطابق نتایج منتشر شده استحکام برشی در فلزات با نقطه ذوب کم مانند قلع و سرب به میزان قابل توجهی با افزایش نرخ چرخش زیاد شده، در فلزات با نقطه ذوب متوسط مانند مس حساسیت کمتری نسبت به تغییر نرخ پیچش داشته و در مواد با نقطه ذوب بالا مستقل از آن است [۲۴]. کسر لغزش سطح قطعه نسبت به سطح قالب (کسر اختلاف بین میزان زاویه چرخش قالب و زاویه واقعی چرخش سطح نمونه) در نرخ پیچش برابر با ۱ rpm بیشتر از ۰/۵ rpm بوده و اثر افزایش فشار بر کاهش آن در نرخ پیچش ۰/۵ rpm بالاتر است [۲۵]. در آلیاژ Al-3Mg افزایش نرخ چرخش از ۰/۵ rpm تا ۰/۵ rpm سبب ریزتر شدن دانه‌های حالت پایا شده است. تغییر سرعت چرخش از ۰/۴۸ rpm به ۰/۱۶ rpm در دمای اتاق و دماهای کمتر از آن اثری بر گشتاور نداشته، اما در دماهای ۱۵۰°C و بالاتر موجب

علاوه بر کرنش برشی، ممکن است کرنش‌های شعاعی و محوری هم در نتیجه سیلان ماده در جهت شعاع ایجاد شوند. این به نوع قالب مورد استفاده بستگی دارد که می‌تواند به یکی از سه شکل: الف) با جریان مقید^۱ (بدون سیلان ماده در راستای شعاع)، ب) با جریان نیمه مقید^۲ (با کمی سیلان شعاعی) و ج) با جریان آزاد^۳ (سیلان شعاعی آزاد) باشد [۱۶].

توزیع کرنش در جهت شعاع در فرایند HPT با جریان آزاد بر خلاف دو فرم دیگر از رابطه ۱ تبعیت نمی‌کند. در این فرایند یک ناحیه مرکزی با شعاع بحرانی وجود دارد که در آن سطح نمونه کاملاً به سطح قالب چسبیده و هیچ لغزشی بین آنها رخ نمی‌دهد اما بعد از آن تا لبه نمونه سیلان شعاعی رخ می‌دهد. در ناحیه کاملاً چسبیده میزان کرنش ایجاد شده بالاتر از ناحیه لغزنده بوده و بیشترین مقدار آن در مرز بین این دو واقع است [۱۳ و ۱۷].

نرخ کرنش ($\dot{\epsilon} = d\epsilon/dt$) یکی از متغیرهای تاثیرگذار بر رفتار فلزات طی فرایندهای تغییرشکل مومسان است. معمولاً با زیاد شدن نرخ کرنش تنش سیلان ماده افزایش و کرنش متناظر با گلوپی شدن کاهش یافته و ماده تردتر می‌شود [۱۸]. با این حال رفتار عکس (منفی) و وجود یک نرخ کرنش انتقال^۴ از اثر منفی به مثبت نیز گزارش شده است [۱۹-۲۱]. معمولاً اثر نرخ کرنش بر تنش جریان^۵ فولادها و دیگر فلزات دارای شبکه بلوری مکعبی مرکزدار^۶ در یک دمای ثابت به ازای یک مقدار معین کرنش به شکل رابطه (۲) بیان می‌شود [۱۸]:

$$\sigma = \sigma_{ref} + m \ln \epsilon^0 \quad (2)$$

در این رابطه $m = \partial \sigma / \partial \ln \epsilon^0$ شاخص حساسیت به نرخ کرنش σ_{ref} تنش سیلان مبنا، تعیین شده در نرخ کرنش مبنا (ϵ_{ref}^0) است. یک رابطه عمومی‌تر رابطه توانی $\sigma = C \epsilon^{om}$ است در جایی که C ثابت استحکام وابسته به نوع ماده، کرنش و دما و $m = \partial \ln \sigma / \partial \ln \epsilon^0$ شاخص حساسیت به نرخ کرنش است. برای بیان اثر هم‌زمان کرنش سختی، نرخ کرنش و دما روابط مختلفی پیشنهاد شده است [۲۲ و ۲۳]. در این میان

⁶ Body centered cubic (BCC)
⁷ Rotational speed or Twist rate

¹ Constrained
² Quasi-constrained
³ Unconstrained
⁴ Transient strain rate
⁵ Flow stress

آزمون کشش بر روی نمونه تخت با ضخامت ۲ mm و طول سنجه ۲۵ mm در دمای اتاق و با نرخ کرنش ۰/۰۰۲/s (معادل سرعت کشش ۰/۰۵ mm/s) با دستگاه کشش STM-250 انجام گرفت. رابطه هاکت-شربی [۳۱] به عنوان معادله مناسب تنش سیلان (جریان) بر نمودار تنش-کرنش حقیقی برازش شد.

جدول ۱- ترکیب شیمیائی فولاد مورد استفاده (wt%)

C	Si	Mn	Cr	Ni	Fe
۰/۱۲۲	۰/۱۵۷	۰/۷۸۲	۰/۰۵۲	۰/۰۲۲	باقی

تحلیل اجزاء محدود با نرم افزار آباکوس ۲۰۲۴ و حلگر صریح انجام شد. نمونه مورد نظر یک نمونه استوانه‌ای توپر با دو کله‌گی در دو انتها مطابق شکل ۱-الف بود. برای طراحی و ایجاد این شکل هندسی با ابعاد قید شده در شکل ۱-الف، ابتدا بعد از اجرا و بازکردن نرم افزار و انتخاب گزینه "مدل استاندارد/صریح"^۲ در پنجره شروع کار (Start session) وارد ماژول قطعه (Part) شده، در آیکون ایجاد قطعه (Create Part) گزینه‌های سه بعدی (3D)، شکل پذیر (Defomable)، توپر (Solid)، و چرخش (Revolution) تیک زده شدند. بعد از آن بدون تغییر عدد پیش فرض ۲۰۰ در جعبه اندازه تقریبی، بر روی گزینه ادامه کار کلیک شد. در گام بعدی در آیکون ایجاد خط (Create Line) مختصات هندسی به صورت (۰، ۰)، (۰، ۱۲)، (۲۵، ۱۲)، (۲۵، ۰)، (۲۵، ۱۱)، (۲/۵، ۱۱)، (۲/۵، ۱۲)، (۲۲/۵، ۱۲)، (۲۲/۵، ۰) و (۲۵، ۰) وارد و در آیکون ایجاد پخ (Create Fillet) شعاع پخ بالا و پائین هر دو برابر یک ثبت گردید. سپس در آیکون ویرایش چرخش (Edite Revolution) زاویه چرخش برابر ۳۶۰ درجه انتخاب شد.

در ماژول خواص (Property) پس از کلیک بر روی آیکون ایجاد ماده (Create Material)، در پنجره ویرایش ماده (Edit Material) نام ماده فولاد قید شد. در زبانه عمومی (General) چگالی معادل با $7/85 \text{ gcm}^{-3}$ و در زبانه مکانیکی (Mechanical) ضریب پواسون برابر ۰/۳ و مدول الاستیک یانگ معادل با ۲۱۰ GPa [۳۲] وارد شد. همچنین خواص مکانیکی به دست آمده با آزمون کشش و محاسبه شده با استفاده از معادله هاکت-شربی در قالب یک جدول به کار برده شدند. در همان ماژول خواص در آیکون ایجاد

کاهش محسوس آن شده است [۲۶]. در آلیاژ یوتکتیکی دوفازی Zn-22Al متشکل از دانه‌های هم‌محور و ساختار لایه‌لایه‌ای فاز یوتکتیکی^۱ با تغییر سرعت چرخش ۰/۲۵ rpm به ۱ rpm مقدار سختی و پهنای لایه‌های فاز یوتکتیکی تغییر معناداری نکرده، اما اندازه دانه‌ها از ۴۵۰ nm به ۴۰۰ nm کاهش یافته است [۲۷]. با افزایش سرعت چرخش از ۰/۵ rpm تا ۲ rpm کسر سطحی دانه‌های با اندازه کمتر از ۵۰۰ nm و میکروسختی آلیاژ پایه منیزیم AZ31 افزایش یافته است [۲۸]. اندازه دانه‌ها، چگالی نابجائی‌ها، میکروسختی و تنش برشی حالت پایا در فلزات خالص آلومینیم، مس، تیتانیم و آهن و آلیاژ برنج Cu-30Zn در محدوده سرعت چرخش ۰/۰۶ rpm تا ۱۰ rpm تغییر معناداری نکرده است [۲۹]. با افزایش سرعت چرخش، دمای نمونه در حین فرایند HPT تا نزدیک به ۱۰۰ °C افزایش یافته است [۳۰].

مرور منابع علمی نشان می‌دهد هرچند مطالعات فراوانی در مورد فرایند HPT انجام شده است اما تعداد تحقیقات انجام شده در مورد اثر سرعت چرخش در فرایند HPT اندک است. علاوه بر آن عمده تمرکز بر فلزات خالص و غیر آهنی بوده و تاکنون شاخص حساسیت به نرخ پیچش فولادها در فرایند HPT به صورت نظام‌مند مطالعه نشده و کار حاضر نخستین بررسی کمی در این مورد است که با هدف پرکردن بخشی از خلاء موجود انجام شده است. نتایج به دست آمده برای نخستین بار نشان می‌دهند سرعت چرخش بر گشتاور لازم برای پیچش نمونه اثر منفی داشته، و علاوه بر آن کرنش معادل و گشتاور متناظر با نقطه شکست با افزایش نرخ پیچش تا ۲ rad/s افزایش یافته و بعد از آن کم شده‌اند. نتایج این تحقیق می‌توانند در طراحی تجهیزات سیستم پیچش پرفشار و انتخاب شرایط مناسب کاری بر اساس توان این سیستم سودمند واقع شوند.

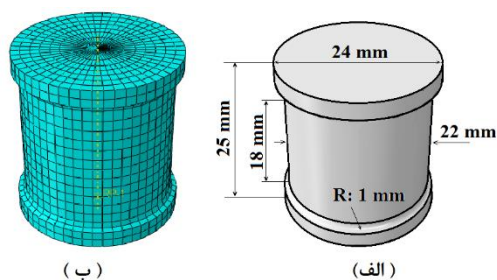
۲- مواد و روش کار

در این تحقیق از یک فولاد ساده کربنی آستنیت‌ه شده در دمای ۹۰۰ °C به مدت ۳۰ دقیقه، کوئنچ شده در آب و سپس تمپر شده به مدت یک ساعت در دمای ۶۰۰ °C با ترکیب شیمیایی ارائه شده در جدول ۱ استفاده شد. مطابق ASTM E8/EM8

² With Standard/Explicit Model

¹ Lamellar structures

لازم به ذکر است که برای تعیین اندازه مش مناسب، عملیات فوق (بجز مرحله کار با نرم‌افزار متلب) برای پیچش با نرخ 1 rad/s با چند اندازه مختلف مش بین ۵ تا ۰/۵ تکرار شد. در هر بار فرایند پیچش نمونه تا لحظه شروع اعوجاج شدید در نمونه ادامه یافت. این لحظه همراه با کاهش ناگهانی در گشتاور اعمالی و در ادامه کم و زیاد شدن نامنظم آن بود. در نهایت بر مبنای همگرایی نتایج و قابل صرف نظر بودن تفاوت مقدار گشتاور بیشینه بین دو اندازه مش متوالی، عدد ۱/۵ به عنوان اندازه مناسب انتخاب و نمونه با ۶۸۶۴ المان C3D8R مش‌بندی گردید (شکل ۲-ب).



شکل ۲- نمایش هندسه و ابعاد نمونه مورد استفاده: (الف) قبل و (ب) بعد از مش‌بندی و پیش از فرایند HPT

۳- نتایج و بحث

۳-۱- معادله تنش سیلان

برای شبیه‌سازی فرایند HPT لازم است مشخصات مکانیکی ماده و معادله تنش سیلان آن مشخص باشد. از آزمون کشش انجام شده، استحکام تسلیم و استحکام نهایی نمونه فولادی مورد استفاده به ترتیب برابر 221 MPa و 412 MPa و درصد ازدیاد طول نهایی و کرنش گلوئی شدن نیز به ترتیب برابر $34/5\%$ و $0/24$ تعیین شدند. نمودار تنش-کرنش مومسان مهندسی و تنش-کرنش مومسان حقیقی تا نقطه گلوئی شدن در شکل ۳ ارائه شده‌اند.

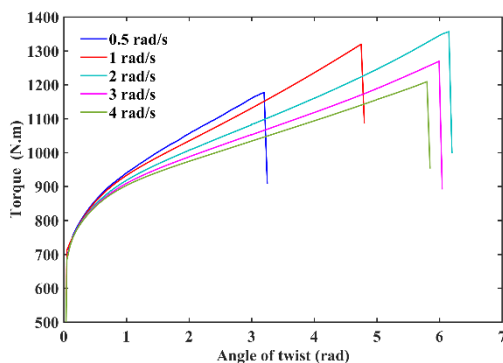
روابط مختلفی مانند رابطه هولمن، لودویک، سوئیفت، ... برای تحلیل رفتار تغییرشکل مومسان فلزات پیشنهاد شده‌اند [۳۳ و ۳۴]. برای تحلیل اجزاء محدود فرایند HPT باید رابطه‌ای را به کاربرد که برای تغییرشکل‌های بزرگ صادق باشد. در این تحقیق چند مدل مختلف به روش برازش با کمترین مربعات^۱ خطا بر داده‌های تنش حقیقی-کرنش حقیقی

مقطع (Create Section)، دسته (category): توپر، نوع: همگن و شکل نمونه: میله انتخاب شد.

بعد از مراحل بالا، در ماژول گام (Step) گزینه‌های دینامیک و صریح (Explicit) تیک زده شدند. طول دوره برابر یک انتخاب گردید. گشتاور، زاویه پیچش، ضخامت، شعاع دو انتها و قسمت میانه نمونه و کرنش معادل به عنوان خروجی‌ها معرفی شدند. در ماژول برهم‌کنش (Interaction)، مرکز سطح زیرین نمونه به عنوان نقطه مرجع با قید از نوع جفت شدن (Coupling) انتخاب شد. کل سطح زیرین به عنوان سطحی که نقطه مرجع به آن جفت شده و گشتاور به آن اعمال می‌گردد، لحاظ گردید. در ماژول بارگذاری (Load) نوع بار: نیروی فشاری معادل 140 kN ، نحوه توزیع: یکنواخت و محل اعمال: نقطه مرجع (سطح زیرین) انتخاب شد. این نیرو فشار اولیه‌ای برابر 300 Mpa در مقطع میانی نمونه ایجاد می‌کند. بعد از کلیک بر روی گزینه شرایط مرزی و انتخاب دسته مکانیکی، سرعت زاویه‌ای به عنوان نوع گام منتخب برگزیده شد. بعد از آن همان نقطه مرجع پیشین انتخاب و روی گزینه انجام (Done) کلیک گردید. در مرحله بعد در پنجره "ویرایش شرایط مرزی" نرخ پیچش سطح جفت شده به نقطه مرجع شامل $0/5$ ، 1 ، 2 ، 3 و 4 رادیان بر ثانیه در پنج گام (Step) جداگانه وارد شد. سطح طرف دیگر نمونه با برابر صفر قرار دادن جابجایی در سه بعد، کاملاً مقید (گیردار) گردید. در ماژول مش بر روی آیکن Seed Part Instance کلیک شد و گزینه سرتاسرنمونه انتخاب گردید. در ادامه در پنجره Global Seeds برای گام (استپ) اول عدد ۶ در کادر اندازه تقریبی مش وارد شد. در پنجره کنترل مش، گزینه‌های Hex، Sweep و Advancing front تیک زده شدند. هر دو گزینه کنترل انحراف و ضریب انحراف انتخاب و در کادرهای مربوط به هر یک عدد $0/1$ ثبت گردید. در نهایت در ماژول Job با لحاظ تنظیمات پیش‌فرض و کلیک بر روی گزینه ارسال، نسبت به اجرای برنامه اقدام شد. بعد از کامل شدن حل مسئله در هر گام، نتایج در ماژول Visualization مشاهده و به صورت تصویر (برای کانتور کرنش معادل) و یا جدول داده‌ها در قالب فایل اکسل استخراج شدند. جدول داده‌ها در نرم‌افزار متلب برای رسم نمودارهای لازم و محاسبه شاخص حساسیت به نرخ پیچش به کار برده شدند.

¹ Least-square fitting method

سخت شده (آستنیته شده در دمای و کوئنچ شده در آب) منفی بوده است. نتایج گزارش شده توسط مانجین و پیتزبورگ [۳۹] نیز حاکی از کاهش استحکام نهایی با افزایش نرخ کرنش تا $s^{-1} 0.01$ و زیاد شدن آن با افزایش بیشتر نرخ کرنش است. در واقع یک نرخ کرنش انتقالی از حالت تاثیر مثبت به منفی وجود داشته است. نتایج تحقیق حاضر نیز در خصوص گشتاور بیشینه (که به نوعی متناظر با استحکام نهایی است) بر وجود یک نرخ کرنش انتقالی صحنه می‌گذارد. مرجع [۴۰] بر اساس پیرکرشی دینامیکی مدلی ارائه کرده که نشان می‌دهد نرخ کرنشی وجود دارد که در آن شیب تغییرات تنش بر حسب نرخ کرنش تغییر می‌کند.



شکل ۴- نمودار تغییر گشتاور پیچشی بر حسب زاویه چرخش در چند نرخ پیچش مختلف

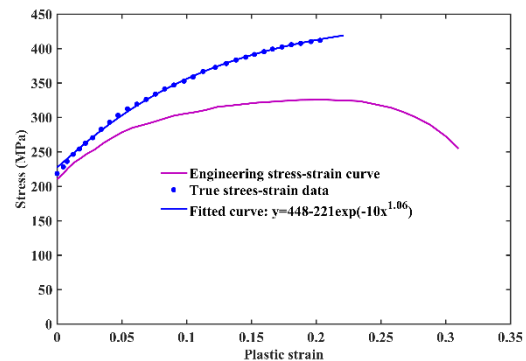
شاخص حساسیت به نرخ پیچش M پارامتر مناسبی برای بررسی اثر نرخ پیچش بر گشتاور مورد نیاز برای پیچش نمونه است. این شاخص به صورت زیر تعریف می‌شود [۴۱]

$$M = \left(\frac{\partial \log T_q}{\partial \log \omega} \right)_\varphi \quad (5)$$

رابطه ۵ نشان می‌دهد برای تعیین شاخص حساسیت به نرخ پیچش کافی است شیب نمودار لگاریتم گشتاور-لگاریتم نرخ پیچش به ازای چند زاویه پیچش معین تعیین گردد. در این تحقیق ابتدا بهترین معادله قابل برازش بر هر منحنی در شکل ۴ با کمک نرم‌افزار متلب به روش برازش با کمترین مربعات تعیین شد. آنگاه با جاگذاری چند زاویه پیچش مختلف در هر معادله مربوط به هر نرخ کرنش، مقدار گشتاور متناظر با آن زاویه و نرخ پیچش محاسبه گردید. در نهایت، همان‌گونه که در شکل ۵ نشان داده شده، این داده‌ها در یک دستگاه

با استفاده از نرم‌افزار متلب بررسی شد. در این بررسی مشخص شد که معادله به فرم رابطه ۴ موسوم به رابطه هاکت-شری [۳۱]، انطباق بهتری بر داده‌ها دارد:

$$\bar{\sigma} = 448 - 221 \exp(-10 \varepsilon^{1.06}) \quad (4)$$



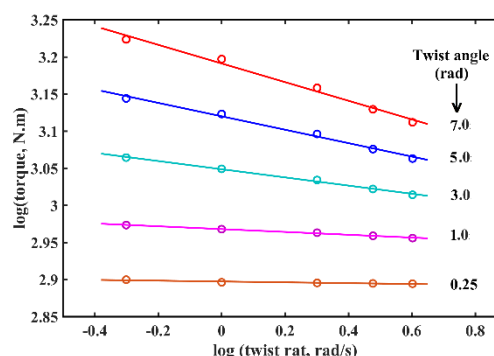
شکل ۳- نمودار تنش-کرنش مهندسی و حقیقی فولاد مورد استفاده

۳-۲- حساسیت به نرخ پیچش

در شکل ۴ نمودار تغییرات گشتاور بر حسب زاویه پیچش در نرخ پیچش‌های مختلف ارائه گردیده است. مشاهده می‌گردد در یک زاویه پیچش معین با افزایش نرخ پیچش، گشتاور لازم برای پیچش نمونه کاهش یافته است. همچنین بیشینه گشتاور پیچشی در ابتدا با افزایش نرخ پیچش تا ۲ rad/s از ۱۲۰۹ N.m تا ۱۱۷۷ N.m تا ۱۳۵۷ N.m افزایش یافته و بعد از آن تا ۱۲۰۹ N.m کم شده است. این نتایج بر خلاف انتظار بود زیرا همان‌گونه که در مقدمه هم ذکر شد اکثر قریب به اتفاق نتایج گزارش شده حاکی از افزایش نیروی لازم برای یک مقدار معین تغییر شکل فلزات است. به عنوان مثال در فولاد St37 با افزایش نرخ کرنش هم استحکام نهایی و هم استحکام تسلیم افزایش یافته‌اند [۳۵]. طی آزمایش کشش چند نوع فولاد ورق مختلف نیز نتیجه مشابهی مشاهده شده است [۳۶]. افزایش نرخ پیچش معمولی نمونه‌های فولادی قبل از آزمون کشش نیز موجب افزایش استحکام و سختی فولاد کم‌آلیاژ گردیده است [۳۷]. با این حال طبق گزارش سنتیکومار و آجیبوی [۳۸] رابطه استحکام فولاد با نرخ کرنش یک رابطه خطی بوده که شیب آن به نوع عملیات حرارتی اعمالی بستگی داشته است. در نمونه‌های نرماله و سخت و تمپر شده این شیب مثبت و در نمونه‌های آنیل و

حل شده (آلیاژی یا ناخالص) بین نشین مانند کربن و نیتروژن به نواحی اطراف نابجائی نفوذ می کنند و با تجمع در اطراف آنها سبب قفل شدن نابجائی ها می شوند [۴۰]. در تنش های اعمالی کم، اتم های حل شده همراه با نابجایی ها مهاجرت کرده و همواره یک نیروی برگشتی اضافی ایجاد می کنند. اما اگر تنش اعمال شده به اندازه کافی زیاد باشد، نابجایی ها می توانند از اتمسفر اتم های حل شونده جدا شوند و بعد از آن تا برخورد به موانع دیگر با تنش سیلان کمتری به حرکت خود ادامه دهند [۴۴]. تنش سیلان تابع قدرت قفل شدن نابجائی هاست قدرت قفل شدن به غلظت اتم های حل شده در هسته نابجائی های موقتا متوقف شده و فضای اطراف آنها بستگی دارد. غلظت بالاتر به قدرت قفل کنندگی بیشتر و در نتیجه تنش سیلان بالاتری منجر می شود. غلظت اتم های حل شده توسط نفوذ کنترل می شود. مدت زمان در اختیار برای نفوذ اتمی همان متوسط زمان انتظار نابجائی بوده که متناسب با عکس نرخ کرنش است. چون نفوذ و به تبع آن غلظت عناصر نفوذی به هسته و فضای اطراف نابجائی ها تابعی از دما، انرژی فعال سازی نفوذ و زمان نفوذ است، بنابراین در نرخ کرنش های میانی چگونگی تغییر تنش سیلان با تغییر نرخ کرنش به نتیجه رقابت بین فعالیت گرمائی و زمان در اختیار برای نفوذ بستگی دارد. هنگامی که اثر دومی غالب باشد شاخص حساسیت به نرخ کرنش حالت پایا منفی خواهد بود [۴۵]. واضح است که این مکانیزم فقط برای موادی صادق است که فرایند کنترل کننده تنش سیلان آنها ایجاد اتمسفر کاترل^۴ توسط اتم های بین نشین است. در حالت کلی می توان تغییر وضعیت کارسختی ماده با تغییر نرخ کرنش را بر اساس توازن بین مکانیزم های کرنش نرمی و کرنش سختی توضیح داد [۴۶]. بروز پدیده کرنش نرمی طی تغییر شکل پلاستیک شدید مس با فرایند پیچش پرفشار گزارش شده است [۴۷]. طبق همین گزارش با افزایش فشار و تعداد چرخه در اثر تبلور مجدد و یا بازیابی دینامیکی چگالی نابجائی ها کاهش یافته و به تبع آن کرنش نرمی رخ می دهد. همان گونه که در بخش مقدمه ذکر شد با افزایش نرخ پیچش دمای نمونه در حین تغییر شکل مومسان با فرایند HPT زیاد می شود [۳۰] زیرا با افزایش نرخ تغییر شکل فرصت انتقال انرژی گرمایی ناشی از انجام کار مکانیکی کمتر می گردد. از آنجا که

مختصات لگاریتم گشتاور-لگاریتم نرخ پیچش برای هر زاویه پیچش انتخابی ترسیم شدند. دیده می شود ضریب زاویه همه خطوط (در واقع شاخص حساسیت به نرخ کرنش) منفی است.



شکل ۵- نمودار تغییر گشتاور پیچشی بر حسب نرخ پیچش در چند زاویه چرخش مختلف

منفی بودن شاخص حساسیت به نرخ کرنش در مواد دیگر نیز گزارش گردیده [۱۹-۲۱] و ناشی از تعامل پیچیده بین عوامل مختلف اثرگذار بر ریزساختار و مکانیزم های تغییر شکل مومسان در مقیاس میکروسکوپی مانند پیرکرنشی دینامیکی^۱، لغزش مرز دانه ای، استحکام بخشی عناصر حل شده، استحکام بخشی نابجائی جنگلی (ایستا)^۲، دراگ ویسکوز^۳، کرنش موضعی و رقابت بین کرنش سختی و کرنش نرمی است [۴۲].

پیرکرنشی دینامیکی اصطلاحی است که برای ناپایداری تنش سیلان (مضرس شدن نمودار تنش-کرنش) در اثر اندرکنش نابجائی های متحرک و اتم های نفوذی، یا کاهش تنش سیلان ماده (کرنش نرمی) ناشی از تشکیل میکرو حفره ها و نوارهای برشی بی دررو^۴ به کار می رود [۴۲]. منفی شدن اثر نرخ کرنش بر تنش سیلان مواد یکی از پیامدهای پیرکرنشی دینامیکی است [۴۳]. در نظریه کلاسیک پیرکرنشی دینامیکی، در حالت کلی، حرکت نابجائی ها در صفحه لغزش خود یک فرایند ناپیوسته بوده و مدتی طول می کشد تا نابجائی توانائی لازم برای غلبه بر سدهای انرژی موجود بر سر راه خود را کسب کند. در این فاصله زمانی (موسوم به زمان انتظار) اتم های

^۴ Adiabatic shear bands

^۵ Cottrell

^۱ Dynamic strain ageing

^۲ Forest dislocation

^۳ Viscous drag

لازم به ذکر است که مدل رفتار ماده را نمی‌توان با انتگرال‌گیری از رابطه $d\log T_q = M d\log \omega$ تعیین نمود زیرا M شیب نمودار $\log T_q - \log \omega$ در حالت خاصی بوده و با تحلیلی مشابه روش قوش [۴۹] می‌توان نشان داد که شیب نمودار $\log T_q - \log \omega$ در حالت کلی علاوه بر M شامل عبارت‌های دیگری هم هست. به جای استخراج مدل تغییرشکل مومسان ماده از شیب نمودار $\log T_q - \log \omega$ می‌توان فرض کرد که رفتار ماده با یکی از مدل‌های پیشنهادی پیشین [۲۳ و ۲۲] قابل بیان است و سپس به ارزیابی آن پرداخت. در اینجا فرض می‌کنیم رفتار ماده تحت فرایند HPT از مدل جانسون-کوک به شکل عمومی زیر پیروی می‌کند:

$$T_q = f(\varphi)(1 + M \ln \omega) \quad (7)$$

در جایی که $f(\varphi)$ تابع کرنش سختی ماده است که در نرخ پیچش واحد قابل تعیین است. در معادله اصلی جانسون-کوک این تابع به صورت $f(\varphi) = A + B\varphi^Q$ (معادله لودویک) بیان شده است. با برازش آن بر نمودار گشتاور-زاویه پیچش مربوط به نرخ پیچش 1 rad/s شکل ۴ با محدوده اطمینان $1/95$ مقدار ثابت‌های A و B و Q به ترتیب برابر 0.722 ، 191 و 0.694 به دست آمد. برای دو نرخ کرنش 0.5 rad/s و 4 rad/s نمودار حاصل از رابطه ۷ حاوی تابع کرنش سختی لودویک با منحنی تحلیل اجزاء محدود در شکل ۷-الف مقایسه شده است. همان طور که دیده می‌شود میزان هم‌خوانی نتایج جالب نیست. علت آن است که تابع کرنش سختی لودویک معادله کاملاً مناسبی برای بیان تغییرشکل‌های بزرگ نیست. ما معادله لودویک در مدل جانسون-کوک را با رابطه نمائی ۸، که مشابه مدل پیشنهادی چن و همکاران [۵۰] است، جایگزین کردیم:

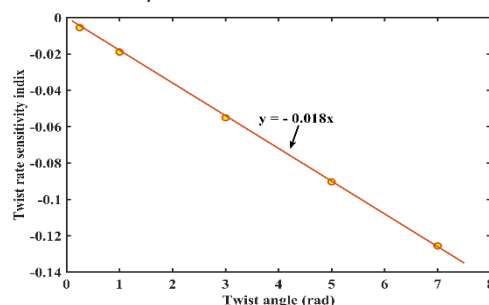
$$f(\varphi) = a \exp(b\varphi) - c \exp(-e\varphi) \quad (8)$$

با استفاده از نرم افزار متلب مقدار ثابت‌های a، b، c و e را با برازش معادله بر نمودار گشتاور-زاویه پیچش مربوط به نرخ پیچش 1 rad/s شکل ۴ با محدوده اطمینان $1/95$ به ترتیب برابر $0.867/5$ ، $0.0851/3$ و $2/436$ تعیین و در ارزیابی مدل به کار برده شدند. نتیجه برازش مدل جانسون-کوک اصلاح شده در شکل ۷-ب نشان داده شده است. به لحاظ

پدیده بازیابی و تبلور مجدد با افزایش دما تشدید می‌شوند، بنابراین افزایش نرخ پیچش می‌تواند منجر به غلبه مکانیزم کرنش نرمی و در نتیجه حساسیت به نرخ پیچش منفی، مانند آنچه در شکل ۵ نشان داده شده، گردد.

شکل ۵ به خوبی گویای این موضوع است که شاخص حساسیت به نرخ پیچش (M) به زاویه پیچش بستگی دارد. برخی تحقیقات پیشین نیز حاکی از وابستگی شاخص حساسیت به نرخ کرنش (m) به میزان کرنش [۴۸]، تنش برشی [۴۶] و یا نرخ کرنش [۴۲] است. به عنوان مثال البیج [۴۸] مقدار پارامتر حساسیت به نرخ کرنش ظاهری فولاد کم کربن تعریف شده بر اساس رابطه ۲ را در کرنش‌های برشی 0.05 ، 0.10 ، 0.25 و 0.5 به ترتیب برابر $0.7/58$ ، $6/2$ ، $5/45$ و $5/1$ مگاپاسکال ذکر نموده‌است که بیانگر وجود یک رابطه توانی بین m و کرنش برشی γ است. استیو و لس [۴۶] نیز وابستگی m تعیین شده با استفاده از رابطه $m = \partial \ln \tau / \partial \ln \gamma^0$ به تنش برشی τ را به فرم $m \sim \tau^{0.136}$ تعیین کرده‌اند. مطابق شکل ۵ شاخص حساسیت به نرخ پیچش M به دست آمده در تحقیق حاضر نیز تابعی از زاویه پیچش است. برای یافتن این تابع ابتدا به روش کمترین خطای مربعات با نرم‌افزار متلب شیب بهترین خطوط راست برازش شده بر داده‌های مربوط به هر زاویه پیچش در شکل ۵ محاسبه شد. سپس مقادیر به دست آمده بر حسب زاویه پیچش ترسیم گردید. شکل ۶ چگونگی این تغییرات را نشان می‌دهد. دیده می‌شود مقدار همه شیب‌ها منفی بوده است و با افزایش زاویه پیچش مقدار شاخص حساسیت به نرخ پیچش مطابق رابطه خطی ۶ به سمت مقادیر منفی‌تر پیش رفته است.

$$M = -0.018\varphi \quad (6)$$



شکل ۶- نمودار تغییر شاخص حساسیت به نرخ پیچش بر حسب نرخ پیچش

¹ Confidence bounds

$$R_{adj}^2 = 1 - SSE(n-1)/SST(n-p) \quad (د-۹)$$

$$RMSE = \sqrt{SSE/(n-p)} \quad (ه-۹)$$

در روابط فوق y_i مقدار گشتاور برآورد شده توسط FEA، $\hat{y}_i$ مقدار گشتاور محاسبه شده با استفاده از مدل، $\bar{y}$ مقدار میانگین آنها، n تعداد داده‌ها و p تعداد ضرایب مدل است.

جدول ۲- مقدار کمیت‌های مجموع مربعات باقیمانده‌ها، مربع ضریب همبستگی و جذر خطای استاندارد برازش مدل‌های جانسون-کوک و جانسون-کوک اصلاح شده

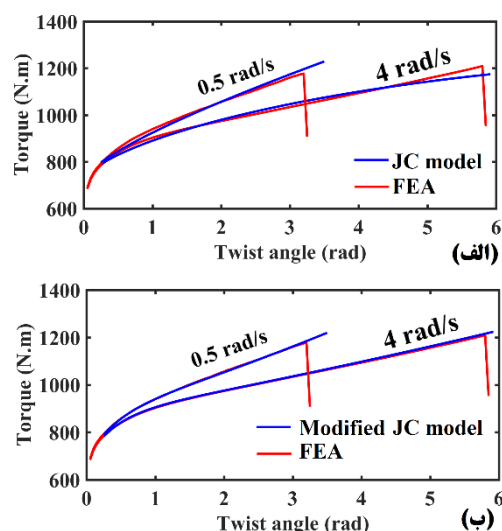
نرخ پیچش (Rad/s)	مدل	SSE	R ²	RMSE
۰/۵	JC	۱۰۵۳۸	۰/۹۷۹۰	۱۳/۳۵
	MJC	۸۳۸	۰/۹۹۹۱	۳/۷۴
۱	JC	۱۰۹۵۹	۰/۹۸۴۸	۱۰/۹۱
	MJC	۸/۰	۰/۹۹۹۶	۱/۱۲
۲	JC	۸۳۲۸۰	۰/۹۶۳۹	۲۵/۹۲
	MJC	۲۳۳۵	۰/۹۹۹۳	۴/۳۴
۳	JC	۴۵۱۷۳	۰/۹۷۰	۱۹/۲۴
	MJC	۲۶۷۸	۰/۹۹۸۸	۴/۶۸
۴	JC	۳۰۲۵۰	۰/۹۷۲۱	۱۷/۰۸
	MJC	۲۳۹۰	۰/۹۹۸۶	۴/۵۲

۳-۳- کرنش معادل (موثر)^۱

ساده‌سازی (معادل‌سازی) یک حالت پیچیده تنش یا کرنش با یک تابع نامتغیر از تنش^۲ یا کرنش روش سودمندی برای هم استفاده از نتایج آزمایش‌های ساده مانند کشش در طراحی‌ها و هم برای مقایسه نتایج روش‌های مختلف تغییر شکل و اعمال بار مکانیکی است. این معادل‌سازی معمولاً بر اساس نتیجه مورد بررسی انجام می‌شود. به عنوان مثال اگر بررسی نمودار تنش-کرنش پلاستیک (منحنی جریان) مورد نظر باشد، منحنی جریان به دست آمده با آزمایش کشش تک محوری با منحنی‌های جریان حاصل از دیگر آزمایش‌ها مانند پیچش لوله نازک با فشار داخلی مشابه خواهند بود اگر تنش‌ها و کرنش‌ها در حالت دوم با توابع نامتغیر تنش برشی و کرنش برشی هشت وجهی^۳ معادل‌سازی شوند. با این حال، متداول‌ترین تابع نامتغیر برای توصیف تغییر شکل پلاستیک، تنش موثر یا کرنش موثر است [۵۱].

^۳ Octahedral shear stress and strain

بصری هم‌خوانی بسیار خوبی بین نتایج تحلیل اجزاء محدود و مدل جانسون-کوک اصلاح شده مشاهده می‌گردد.



شکل ۷- مقایسه نتایج تحلیل اجزاء محدود (FEA) با مدل الف) مدل جانسون-کوک (ب) مدل اصلاح شده جانسون-کوک

برای مقایسه کمی همبستگی (میزان انطباق) دو مدل مختلف بر داده‌های مورد بررسی معمولاً کمیت‌هایی مانند مجموع مربعات باقیمانده‌ها (SSE)، مربع ضریب همبستگی (R^2) و جذر میانگین مربعات خطا یا خطای استاندارد برازش (RMSE) به کار برده می‌شوند. این کمیت‌ها با استفاده از روابط ۹-الف تا ۹-ه برای هر دو مدل جانسون-کوک متداول (JC) و جانسون-کوک اصلاح شده (MJC) محاسبه شدند. نتایج در جدول ۲ ارائه شده است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که میزان تطابق مقادیر برآورد شده توسط مدل جانسون-کوک اصلاح شده بر نتایج FEA بهتر از مدل جانسون-کوک است.

$$SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (۹-الف)$$

$$SST = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (۹-ب)$$

$$R^2 = 1 - SSE/SST \quad (۹-ج)$$

^۱ Effective (equivalent) strain

^۲ Invariant function of stress

مشاهدات با نتایج تجربی اندازه‌گیری میکروسختی گزارش شده همخوان است [۱۵]. علت متفاوت بودن توزیع کرنش مشاهده شده با توزیع پیش‌بینی شده توسط رابطه ۱ را می‌توان به تفاوت شرایط بارگذاری واقعی با شرایط اثبات رابطه ۱ نسبت داد. رابطه ۱ با لحاظ اعمال فقط گشتاور (تنش برشی) و پیچش (کرنش برشی) ناشی از آن به‌دست آمده است [۵۴]. اما در فرایند HPT نامقید علاوه بر پیچش ناشی از اعمال گشتاور، در اثر فشار اعمالی نمونه در راستای محور فشرده شده و هم‌زمان در راستای شعاع (به صورت محیطی) منبسط می‌گردد. در نتیجه علاوه بر مولفه کرنش برشی، مولفه‌های کرنش نرمال نیز ایجاد می‌شوند [۱۳ و ۱۰]. هنگامی که ارتفاع نمونه زیاد می‌گردد، احتمال بشکته‌ای شدن نمونه و تغییر ضخامت آن نیز افزایش می‌یابد. مجموعه این عوامل باعث می‌شوند که توزیع واقعی کرنش در نمونه متفاوت از الگوی پیش‌بینی شده توسط رابطه ۱ باشد.

کرنش معادل ایجاد شده طی مرحله پیچش فرایند HPT معمولاً براساس رابطه خطی ۱۱ (کرنش معادل فون میسز^۵) یا رابطه لگاریتمی ۱۲ (رابطه اصلاح شده هنگی^۶ یا کرنش معادل آچینگر^۷) محاسبه می‌گردد [۱ و ۵۵]:

$$\bar{\epsilon} = \frac{\gamma}{\sqrt{3}} \quad (11)$$

$$\bar{\epsilon} = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln(\sqrt{1 + \gamma^2/4} + \frac{\gamma}{2}) \quad (12)$$

روابط فوق برای تعیین کرنش موثر فرایندهای HPT مقید و نیمه مقید مناسب‌اند اما برای فرایند نامقید لازم است عبارت کرنش معادل کرنش‌های محوری و شعاعی هم اضافه گردد. با این عبارت با فرض افزایش یکنواخت شعاع از r_0 به r و کاهش

هرچند اخیراً پروفیسور سگل [۵۲] بین کرنش موثر و کرنش معادل تمایز قائل شده‌اند، اما در اینجا همانند مرجع [۵۳] این دو عبارت به یک معنا به کار برده می‌شوند. کرنش معادل در یک مفهوم عام عبارت است از مقدار کرنش ناشی از تنش کششی تک محوره که اثر آن با تاثیر نهایی کرنش‌های نرمال و برشی ایجاد شده توسط تنش‌های چند بعدی یکی است. این تاثیر می‌تواند سیلان ماده، رخ دادن شکست یا صرف انرژی برای تغییر شکل (کار تغییرشکل) باشد. بنابراین بر اساس معیار مورد استفاده برای بیان نقطه‌اثر کرنش، روابط متفاوتی می‌تواند بین کرنش معادل و مولفه‌های کرنش چند بعدی برقرار گردد. به عنوان مثال براساس معیار تسلیم فون میسز^۱ کرنش معادل به صورت رابطه زیر بیان می‌شود [۱۸]:

$$\bar{\epsilon} = \sqrt{\frac{2}{3}(\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2 + \epsilon_3^2)} \quad (10)$$

در این رابطه $\bar{\epsilon}$ کرنش معادل (موثر) و ϵ_1 ، ϵ_2 و ϵ_3 کرنش‌های اصلی^۲ هستند. رابطه ۱۰ حالت خاصی از کرنش معادل بوده و برای مواد ایزوتروپیک در غیاب اثر بوشینگر^۳ صادق است. برای مواد غیرایزوتروپیک باید معیارهای دیگری مانند معیار تسلیم هیل^۴ را به کار برد [۵۳].

در شکل ۸ تصویرهای توزیع کرنش معادل برای نمونه‌های تحت HPT با نرخ پیچش‌های مختلف در لحظه متناظر با شروع شکست هر یک از نمونه‌ها ارائه شده‌اند. همان‌گونه که بر اساس رابطه ۱ انتظار می‌رفت کرنش معادل در تمام نمونه‌ها در لبه‌ها بیشترین مقدار را داشته و با حرکت به سمت مرکز نمونه (محور استوانه) مقدار آن کمتر و کمتر شده است. اما در راستای ارتفاع نمونه برخلاف پیش‌بینی توزیع یکنواخت (مطابق رابطه ۱)، بیشترین مقدار در محل اتصال به کله‌گی‌های بالا و پائین نمونه و کمترین آن در نواحی میانی نمونه ایجاد شده است. این

⁵ Von Mises equivalent strain

⁶ Modified Hencky equation

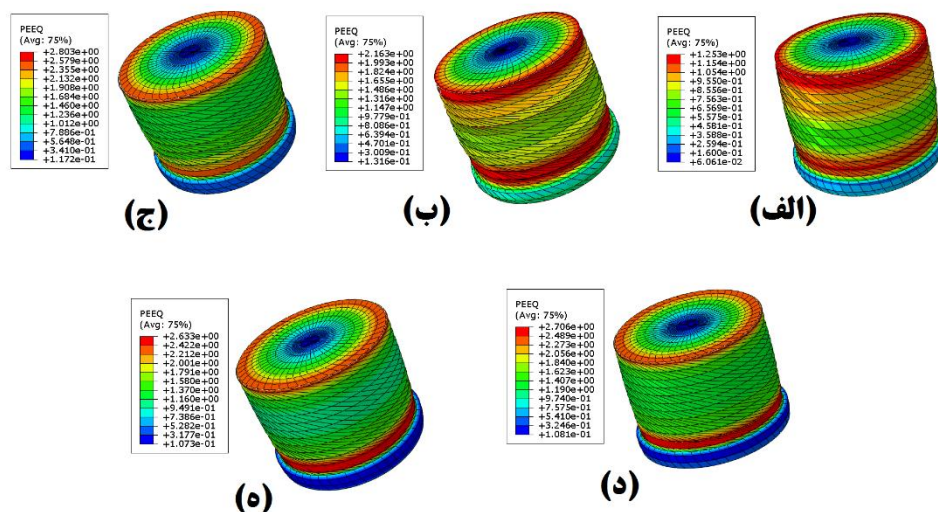
⁷ Eichinger equivalent strain

¹ Von Mises' yield criterion

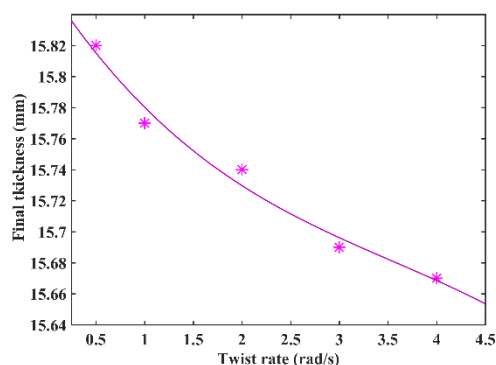
² Principal strains

³ Bauschinger effect

⁴ Hill



شکل ۸- تصاویر توزیع کرنش موثر بعد از اعمال HPT با نرخ پیچش الف) ۰/۵، ب) ۱، ج) ۲، د) ۳ و ه) ۴ رادیان بر ثانیه



شکل ۹- اثر نرخ کرنش بر ضخامت نمونه بعد از اعمال فرایند HPT

تغییر مقادیر به دست آمده به همراه مقدار کرنش موثر تعیین شده با تحلیل اجزاء محدود (بیشینه ارقام ذکر شده در جعبه بار گوشه تصاویر شکل ۸) برحسب نرخ پیچش در یک دستگاه مختصات کرنش موثر-نرخ پیچش ترسیم شدند. شکل ۱۰ نتیجه را نشان می‌دهد. دیده می‌شود در همه نمودارها با افزایش نرخ پیچش تا ۲ rad/s مقدار کرنش معادل با شیب نسبتاً تندی زیاد شده و بعد از آن با شیب کمی کاهش یافته است. این نتیجه تقریباً با نتیجه گزارش شده توسط مانجویین

ضخامت از h_0 به h طی مرحله فشرده شدن^۱ با فشار ثابت P ، برابر $\ln(\frac{h_0}{h})$ است [۱۸]. کرنش موثر کل برابر مجموع کرنش مرحله فشرده و کرنش برشی مرحله پیچش است. بر این اساس داکتیاروف و همکاران [۵۶] رابطه ۱۳ را برای محاسبه کرنش موثر پیشنهاد نموده‌اند:

$$\bar{\epsilon} = \ln\left(\frac{h_0}{h} \sqrt{1 + \gamma^2}\right) \approx \ln\left(\frac{h_0}{h} \gamma\right) \quad (13)$$

در شکل ۹ تغییرات ضخامت نهایی نمونه بر حسب نرخ پیچش ارائه شده است. به رغم اینکه فشار اعمالی یکسان بوده، با افزایش نرخ پیچش ضخامت کاهش یافته است. علت احتمالی آن پدیده کرنش نرمی بوده است.

برای تعیین کرنش معادل کل بر اساس روابط ۱۰ تا ۱۳ و مقایسه آن با مقدار حاصل از تحلیل اجزاء محدود، ابتدا با جاگذاری بیشینه زاویه پیچش هر نمونه (شکل ۴) در رابطه ۱ مقدار γ لحظه شکست محاسبه شد. در مرحله بعد با قرار دادن مقادیر به دست آمده در روابط ۱۱ و ۱۲ کرنش معادل فون میسز و آیچینگر (هنکی) مربوط به هر نرخ پیچش تعیین و با مقدار $\ln(\frac{h_0}{h})$ جمع گردید. همچنین مقادیر کرنش موثر شکست بر اساس رابطه ۱۳ محاسبه شد. در نهایت نمودارهای

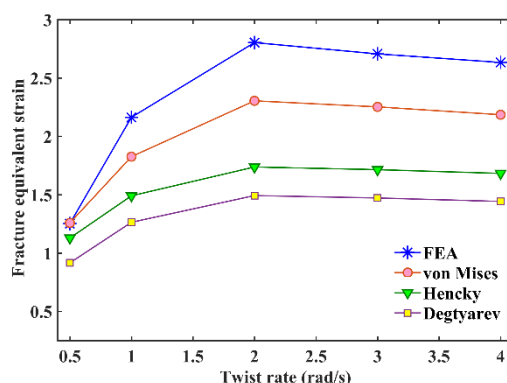
^۱ Upsetting

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق اثر نرخ پیچش یک فولاد ساده کربنی با فرایند HPT تحت فشار اولیه ۳۰۰ MPa بررسی گردید و رابطه شاخص حساسیت به نرخ پیچش با زاویه پیچش تعیین شد. همچنین برای انطباق بهتر مدل جانسون-کوک بر نمودار تغییرات گشتاور بر حسب زاویه پیچش در چند نرخ پیچش مختلف، عبارت مربوط به کرنش سختی، یعنی معادله توانی لودویک با معادله‌ای نمایی جایگزین گردید. علاوه بر آن مقادیر کرنش معادل شکست به دست آمده با تحلیل اجزاء محدود با مقادیر محاسبه شده با استفاده از روابط فون میسز، هنکی و داکتیاروف مقایسه شد. بر اساس نتایج به دست آمده و تجزیه و تحلیل‌های انجام شده، به طور خلاصه می‌توان چنین نتیجه‌گیری نمود:

- ۱- نمودار تنش حقیقی-کرنش پلاستیک حقیقی از معادله نمایی هاکت-شربی تبعیت نمود.
- ۲- گشتاور لازم برای پیچاندن نمونه تا یک زاویه پیچشی معین با افزایش نرخ پیچش کاهش یافت و شدت این کاهش در زوایای پیچشی بزرگتر، بیشتر بود.
- ۳- در یک زاویه پیچش معین، تغییرات لگاریتم گشتاور بر حسب لگاریتم نرخ پیچش به صورت خطی بود به گونه‌ای که شیب آن با افزایش زاویه پیچش افزایش یافت.
- ۴- رابطه شاخص حساسیت به نرخ پیچش (شیب تغییرات خطی لگاریتم گشتاور-لگاریتم نرخ پیچش) با زاویه پیچش به صورت یک خط راست گذرنده از مبدا مختصات با ضریب زاویه منفی بود که بیانگر غلبه مکانیزم کار نرمی است.
- ۵- مدل متداول جانسون-کوک که حاوی رابطه لودویک در بخش کار سختی است، انطباق خوبی بر نتایج FEA نداشت اما با جایگزین کردن رابطه لودویک با یک معادله متشکل از مجموع دو عبارت نمایی، همخوانی عالی بین نتایج FEA و مدل جانسون-کوک اصلاح شده به وجود آمد.
- ۶- با افزایش نرخ پیچش تا ۲ rad/s هم بیشینه گشتاور قابل اعمال و هم کرنش معادل شکست افزایش یافته و بعد از آن هر دو کاهش یافتند اما شیب کاهش کرنش معادل کم بود.
- ۷- کرنش فون میسز نسبت به کرنش هنکی و داکتیاروف به مقادیر کرنش به دست آمده با FEA نزدیکتر بود. اختلاف بین این دو با افزایش نرخ پیچش تا ۲ rad/s زیاد شد.

و پیتزبورگ [۳۹] سازگار است. نمودار ارائه شده توسط آنها نشان می‌دهد که درصد ازدیاد طول فولاد طی آزمون کشش در ابتدا با افزایش نرخ کرنش تا ۰/۰۱ زیاد شده و بعد از آن تقریباً ثابت مانده است.



شکل ۱۰- مقایسه کرنش موثر تعیین شده با FEA، با مقادیر محاسبه شده با استفاده از روابط فون میسز، هنکی اصلاح شده و داکتیاروف در نرخ پیچش‌های مختلف

مطابق شکل ۱۰ درصد اختلاف نسبی بین بیشینه مقدار FEA و بیشینه مقادیر محاسبه شده با استفاده از روابط ۱۱ تا ۱۳ به ترتیب ۲۲، ۶۱ و ۱۰۴ درصد و از آن کمترین مقدار FEA با کمترین مقادیر روابط مذکور نیز به ترتیب حدود ۰/۴، ۱۰ و ۳۷ درصد است. این به معنای آن است که مقادیر محاسبه با استفاده از رابطه فون میسز نسبت به دیگر روابط به مقادیر تحلیل اجزاء محدود نزدیک‌تر است. شکل ۱۰ همچنین نشان می‌دهد اختلاف بین مقادیر FEA با مقادیر کرنش معادل فون میسز با افزایش نرخ پیچش تا ۲ rad/s زیاد شده است. یک علت این تفاوت عدم لحاظ بشکته‌ای شدن نمونه در محاسبه کرنش مرحله فشردن است. علاوه بر این، روابط پیشنهادی برای تعیین کرنش موثر مرحله پیچش بر مبنای ایجاد فقط کرنش برشی به دست آمده‌اند. درحالی‌که نتایج تجربی گزارش شده [۵۷] و شبیه‌سازی عددی [۵۸] نشان می‌دهند علاوه بر مرحله فشردن اولیه، هم‌زمان با پیچش نیز ضخامت کاهش می‌یابد. به تبع آن مولفه‌های کرنش متفاوت از حالت پیچش خالص خواهد بود. بررسی کرنش معادل با لحاظ این اثر به همراه اثر بشکته‌ای شدن می‌تواند موضوع تحقیق جدیدی باشد.

مراجع

- [15] Figueiredo RB, Aguilar MTP, Cetlin PR, Langdon TG (2012) Analysis of plastic flow during high-pressure torsion. *J Mater Sci* 47: 7807–7814.
- [16] Zhilyaev AP, McNelley TR, Langdon TG (2007) Evolution of microstructure and microtexture in fcc metals during high-pressure torsion. *J Mater Sci* 42:1517.
- [17] Halloumi A, Busquet M, Descartes S (2014) Parametric study of unconstrained high-pressure torsion- Finite element analysis. *IOP Conf Ser: Mater Sci Eng* 63: 012036.
- [18] Hosford WF, Caddell RM (2011) *Metal Forming: Mechanics and Metallurgy*, 4th edition. Cambridge University Press, New York.
- [۱۹] اسدی خانوکی مت (۱۳۹۹) تأثیر دما و نرخ کرنش بر رفتار تغییر شکل مومسان شیشه فلز حجمی آلیاژ $Zr_{46}(Cu_{4.5}/_{5.5}Ag_{1.5}/_{5.5})_{46}Al_8$ فصلنامه علمی پژوهشی مواد پیشرفته در مهندسی ۳۹(۳): ۱۴۰-۱۲۹.
- [20] Chen G, Lu L, Ren C, Ge X (2018) Temperature dependent negative to positive strain rate sensitivity and compression behavior for 2024-T351 aluminum alloy. *J Alloys Compd* 765: 569-585.
- [21] Huang CP, Wang M, Zhu KY, Perlade A, Huang MX (2023) Carbon-induced negative strain-rate sensitivity in a quenching and partitioning steel. *Acta Mater* 255: 119099.
- [22] Salvado FC, Teixeira-Dias F, Walley SM, Lea LJ, Cardoso JB (2017) A review on the strain rate dependency of the dynamic viscoplastic response of FCC metals. *Prog Mater Sci* 88: 186-231.
- [23] Liang R, Khan AS (1999) A critical review of experimental results and constitutive models for BCC and FCC metals over a wide range of strain rates and temperatures. *Int J Plast* 15(9): 963-980.
- [24] Bridgman PW (1937) Flow phenomena in heavily stressed metals. *J Appl Phys* 8: 328-336.
- [25] Edalati K, Horita Z, Langdon TG (2009) The significance of slippage in processing by high-pressure torsion. *Scripta Mater* 60: 9-12.
- [26] Bachmaier A, Hafok M, Pippan R (2010) Rate independent and rate dependent structural evolution during severe plastic deformation. *Mater Trans* 51: 8-13.
- [27] Kawasaki M, Ahn B, Langdon TG (2010) Microstructural evolution in a two-phase alloy processed by high-pressure torsion. *Acta Mater* 58: 919-930.
- [28] Serre P, Figueiredo RB, Gao N, Langdon TG (2011) Influence of strain rate on the characteristics of a magnesium alloy processed by high-pressure torsion. *Mater Sci Eng A* 528: 3601-3608.
- [29] Edalati K, Wang Q, Enikeev NA, Peters L-J, Zehetbauer MJ, Schafner E (2022) Significance of
- [1] Edalati K, Horita Z (2016) A review on high-pressure torsion (HPT) from 1935 to 1988. *Mater Sci Eng A* 652: 325-352.
- [2] Sakai G, Nakamura K, Horita Z, Langdon TG (2005) Developing high-pressure torsion for use with bulk samples. *Mater Sci Eng A* 406: 268–273.
- [3] Bridgman PW (1935) Effects of high shearing stress combined with high hydrostatic pressure. *Phys Rev* 48: 825-847.
- [4] Pippan R (2009) High-Pressure Torsion – Features and Applications. In: Zehetbauer MJ and Zhu YT (eds) *Bulk Nanostructured Materials*. Weinheim, Germany, Wiley VCH. 217–233.
- [5] Edalati K (2025) Review of Advances in High-Pressure Torsion of Titanium and Ti-Based Materials (Alloys, Intermetallics, Oxides and High-Entropy Compounds). *Mater Trans* 65(5): 464-478.
- [6] Beygelzimer Y, Estrin Y, Kulagin R (2023) Some Unresolved Problems of High-Pressure Torsion. *Mater Trans* 68(8): 1856–1865.
- [7] Gunderov DV, Asfandiyarov RN, Astanin VV, Sharafutdinov AV (2023) Slippage during High-Pressure Torsion: Accumulative High-Pressure Torsion—Overview of the Latest Results. *Metals* 13(8): 1340.
- [8] Edalati K (2019) *Metallurgical Alchemy by Ultra-Severe Plastic Deformation via High-Pressure Torsion Process*. *Mater Trans* 60(7): 1221-1229.
- [9] Borodachenkova M, Wen W, Pereira AM de B (2017) High-Pressure Torsion: Experiments and Modeling. In: Cabibbo M (ed) *Severe Plastic Deformation Techniques*. InTech. Available at: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.69173>.
- [10] Zhilyaev AP, Langdon TG (2008) Using high-pressure torsion for metal processing: Fundamentals and applications. *Prog Mater Sci* 53(6): 893-897.
- [11] Pippan R, Scheriau S, Hohenwarter A, Hafok M (2008) Advantages and limitations of HPT: a review. *Mater Sci Forum* 584-586: 16-21.
- [12] Reis LM, Hohenwarter A, Kawasaki M, Figueiredo RB (2024). Evaluating High-Pressure Torsion Scale-Up. *Adv Eng Mater* 26(19): 2400175.
- [۱۳] قائمی خیاوی س، عمادالدین ا (۱۳۹۵) رفتار تغییر شکل پلاستیک دیسک های آلیاژ آلومینیوم ۵۴۵۲ تحت فرایند پیچش فشار بالای مقید نشده و تأثیر پارامترهای دور و فشارهای اعمالی بر شعاع بحرانی آن‌ها. *مجله مهندسی ساخت و تولید ایران دوره ۳(۳): ۴۰-۴۷*.
- [۱۴] کوه‌دار ح (۱۴۰۰) بررسی ریزساختار و رفتار سودوالاستیک در آلیاژ Fe-10Ni-7Mn (wt.%) قبل و بعد از اعمال فرایند پیچش تحت فشار بالا. *مهندسی متالورژی ۲۴(۳): ۲۱۶-۲۲۷*.

- [42] Yan SL, Yang H, Li HW Li, Yao X (2016) Variation of strain rate sensitivity of an aluminum alloy in a wide strain rate range: Mechanism analysis and modeling. *J Alloys Compd* 688: 776-786.
- [43] Picu RC (2004) A mechanism for the negative strain-rate sensitivity of dilute solid solutions. *Acta Mater* 52: 3447-3458.
- [44] Yan N, Li Z, Xu Y, Meyers MA (2021) Shear localization in metallic materials at high strain rates. *Prog Mater Sci* 119: 100755.
- [45] Mesarovic S (1995) Dynamic Strain Aging and Plastic Instabilities. *J Mech Phys Solids* 43(5):671-701.
- [46] Stüwe HP, Les P (1998) Strain rate sensitivity of flow stress at large strains. *Acta Mater.* 46(18): 6375-6380.
- [47] Kahnooj SAH, Vaseghi M, Sameezadeh M (2022) Softening and Microstructure Evolution of Pure Copper Disks Processed by High Pressure Torsion. *Met Mater Int* 28: 2646-2651.
- [48] Eleiche ASM (1982) Strain-rate History and Temperature Effects on the Torsional-shear Behavior of a Mild Steel. *Exp. Mech* 22: 285-294.
- [49] Ghosh AK (2007) On the measurement of strain-rate sensitivity for deformation mechanism in conventional and ultra-fine grain alloys. *Mater Sci Eng A* 463: 36-40.
- [50] Chen H, Chen Z, Liu J, Wu Y, Dan C, Zhong S, Wang H, Bréchet Y (2021) Constitutive modeling of flow stress and work hardening behavior while considering dynamic strain aging. *Materialia* 18: 101137.
- [51] Dieter GE (1988) *Mechanical Metallurgy- SI Metric ed.* McGraw-Hill Book Company (UK) Limited, London.
- [52] Segal VM (2019) Equivalent and effective strains during severe plastic deformation (SPD). *Phi Mag Let* 98(11): 511-520.
- [53] Johnson W, Mellor PB (1983) *Engineering-plasticity*. Ellis Horwood Limited, England.
- [54] Beer FP, Johnston ER, Dewolf JT (2012) *Mechanics of materials*. 6th ed., McGraw-Hill Companies Inc. p 147.
- [55] Jonas JJ, Ghosh C, Toth LS (2014) The equivalent strain in high pressure torsion. *Mater Sci Eng A* 607: 530-535.
- [56] Degtyarev MV, Chashchukhina TI, Voronova LM, Patsevov AM, Pilygin VP (2007) Influence of the relaxation processes on the structure formation in pure metals and alloys under high-pressure torsion. *Acta Mater* 55: 6039-6050.
- strain rate in severe plastic deformation on steady-state microstructure and strength. *Mater Sci Eng: A* 859: 144231.
- [30] Edalati K, Miresmaeili R, Horita Z, Kanayama H, Pippan R (2011) Significance of temperature increase in processing by high-pressure torsion. *Mater Sci Eng A* 528: 7301-7305.
- [31] Hockett JE, Sherby OD (1975) Large strain deformation of polycrystalline metals at low homologous temperatures. *J Mech Phys Solid* 23: 87-98.
- [32] Eurocode 3, Table of design material properties for structural steel, <https://eurocodeapplied.com/design/en1993/steel-design-properties>
- [33] Cao J, Li F-g, Ma X-k, Sun Z-k (2017) Tensile stress-strain behavior of metallic alloys. *Trans Nonferrous Met Soc China* 27: 2443-2453.
- [34] Gonoring TB, Salustre MG de M, Caetano GA, Martins JBR, Orlando MTD (2022) A constitutive model for the uniaxial tensile plastic behavior of metals based on the instantaneous strain-hardening exponent. *J Mater Res Technol* 20: 2421-2443.
- [۳۵] سردار د. م، باستی ع، زعیمی م (۱۳۹۳) بررسی عددی اثر نرخ کرنش بر پیش‌بینی آسیب به کمک معیار حدشکل‌دهی دینامیکی در فرایند شکل‌دهی ورق‌های فلزی با سرعت بالا. *مجله مهندسی مکانیک مدرس* ۱۴(۱۶): ۲۱۲-۲۲۲.
- [36] Huh H, Lim JH, Park SH (2009) High speed tensile test of steel sheets for the stress-strain curve at the intermediate strain rate. *Inter J Auto Technol* 10(2): 195-204.
- [37] Jantasorn P, Thamma U (2022) Effects of Angle and Rate of Twist via Pre-Torsional Deformation on Tensile Properties and Hardness of Hot-Rolled, Low-Alloy Steel Rods. *Trends Sci* 19(17): 5770.
- [38] Senthilkumar T, Ajiboye TK (2012) Effect of Heat Treatment Processes on the Mechanical Properties of Medium Carbon Steel. *J Min Mater Charac Engin* 11(2): 143-152.
- [39] Manjoine MJ, Pittsburgh E (1944) Influence of Rate of Strain and Temperature on Yield Stresses of Mild Steel. *J Appl Mech* 11(4): A211-A218.
- [40] van den Beukel A (1975) Theory of the effect of dynamic strain aging on mechanical properties. *physica status solidi* 30(1): 197-206.
- [41] Jonas JJ, Montheillet F, Toth LS, Ghosh C (2014) Effects of varying twist and twist rate sensitivities on the interpretation of torsion testing data. *Mater Sci Eng A* 591: 9-17.