



تعیین ثابت‌های مدل آسیب جانسون-کوک برای ورق مس خالص تجاری توسط آزمایش کشش بر روی نمونه های شیاردار

مسعود رخس خورشید^{۱*}، صادق رنجبر^۲ و سید احسان افتخاری شهری^۱

^۱ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران

^۲ کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران

یادداشت تحقیقاتی، تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۱۸؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۱۰/۰۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۲۰

چکیده

امروزه از مدل‌های آسیب جهت شبیه‌سازی و پیش‌بینی مناطق وقوع شکست در فرایندهای تولید استفاده می‌شود. هدف از تحقیق حاضر، تعیین ثابت‌های مدل آسیب جانسون-کوک برای ورق مس خالص تجاری است. بدین منظور ابتدا سه نمونه کشش (یک نمونه بدون شیار و دو نمونه شیاردار با شیارهای متفاوت به شعاع‌های ۱۰ و ۲ میلی‌متر) در راستای نورد از ورق جدا و آزمایش کشش روی آن‌ها در انجام شد. نسبت تنش سه محوره برای هر یک از نمونه‌ها از رابطه بریجمن بدست آمد. سپس، با توجه به وابستگی کرنش شکست به تنش سه محوره در مدل آسیب جانسون-کوک، ثابت‌های این مدل تعیین گردید. در اینجا از اثر دما و نرخ کرنش صرف نظر شد. از شبیه‌سازی عددی آزمایش‌های کشش انجام شده برای ارزیابی موفقیت روش استفاده شده برای تعیین ثابت‌های مدل جانسون-کوک استفاده شد. برای این کار، از معیار خطای جابجایی استفاده شد و مقدار آن برای هر یک از نمونه‌ها تعیین گردید. مقدار میانگین خطای جابجایی برای سه نمونه مورد آزمایش، برابر ۹/۰۷ درصد محاسبه شد که نشان دهنده موفقیت روش مورد استفاده جهت تعیین ثابت‌های مدل آسیب جانسون-کوک در تحقیق حاضر است.

کلمات کلیدی: روش اجزاء محدود؛ آسیب نرم؛ مدل آسیب نرم؛ جانسون-کوک؛ ورق مس خالص تجاری.

Determination of Johnson-Cook Damage Model Constants for commercial Pure Copper Sheet by Tensile Testing on Notched Specimens

M. Rakhshkhorshid^{1*}, S. Ranjbar², S.E. Eftekhari Shahri¹

¹ Assis. Prof., Mech. Eng., Birjand Univ. of Tech., Birjand, Iran.

² MSc., Mech. Eng., Birjand Univ. of Tech., Birjand, Iran.

Abstract

Nowadays, damage models are used to simulate and predict the failure occurrence regions in manufacturing processes. The aim of the present research is to determine the constants of Johnson-Cook damage model for pure commercial copper sheet. For this, three different tensile testing specimens (a smooth (standard) specimen and two notched specimen with different notch radii of 10 and 2 mm) were separated along with the rolling direction and tensile tests were conducted on them. The stress triaxiality was determined for each of the specimens, by using the Bridgeman equation. Next, regards to the dependency of the fracture strain to the stress triaxiality, the constants of Johnson-Cook damage model was determined. Here, the effects of the temperature and the strain rate are neglected. Numerical simulation was used to evaluate the satisfaction of the method used to determine the constants of Johnson-cook damage model. For this, the error in fracture strain was used as the criterion and the value of it was calculated for each of the tensile testing specimens. The average value of error in fracture strain for three tested specimens was obtained as of 9.68 percent that showed the satisfaction of the method used in this research to determine the constants of Johnson-Cook damage model.

Keywords: Finite Element Method, Ductile Damage, Johnson-Cook, Ductile Damage Model, Commercial Pure Copper Sheet

۱- مقدمه

فرایندهای شکل دادن فلزات توأم با تغییر شکل پلاستیک هستند و در برخی موارد در دمای محیط انجام می‌شوند. فرایندهای کشش عمیق، پولک‌زنی، برشکاری و خمکاری ورق‌های فلزی، نمونه‌هایی از فرایندهای شکل دادن فلزات در دمای محیط هستند. برخی از این عملیات توأم با شکست هستند؛ نظیر برشکاری و پولک زنی و در برخی از این فرایندها نظیر، کشش عمیق باید از شکست اجتناب شود [۱].

مس یکی از فلزات مهم مهندسی است و به صورت فلز خالص یا به صورت آلیاژ با سایر فلزات کاربرد وسیعی دارد. مس خالص تجاری ترکیب مناسبی از خواص هدایت الکتریکی، مقاومت به خوردگی و تنش تسلیم مناسب را دارد. این فلز دارای قابلیت کارپذیری سرد و گرم عالی است و از آن جهت ساخت ظروف مسی، اشیاء تزئینی با فرایندهای پولک زنی، کشش و چکش کاری (مسگری) استفاده می‌شود [۲]. به هر حال، جهت شبیه‌سازی فرایندهای تولید نه‌تنها رفتار تنش-کرنش یا به عبارت دیگر پاسخ ماده به بار مکانیکی، بلکه رفتار شکست ماده نیز باید تعیین گردد [۳]. نوع شکست به عواملی مانند، نوع ماده، دما، شرایط تنش و سرعت بار گذاری بستگی دارد. دو نوع عمده شکست، شکست ترد و نرم است. شکست نرم با مقدار قابل توجه تغییر شکل پلاستیک قبل از مرحله پیشرفت ترک و در حین آن همراه است. شکست ترد در فلزات با سرعت سریع پیشرفت ترک و میزان خیلی کم تغییر شکل پلاستیک صورت می‌گیرد. با کاهش دما تمایل به شکست ترد افزایش می‌یابد؛ همچنین افزایش سرعت کرنش و ایجاد شرایط سه بعدی تنش، این تمایل را افزایش می‌دهد. شرایط سه بعدی تنش معمولاً به وسیله شیار به وجود می‌آید. شکست نرم معمولاً با جوانه زنی و رشد حفره صورت می‌گیرد [۴].

برای توصیف رفتار شکست ماده از مدل‌های آسیب متفاوتی استفاده می‌شود. مدل‌های آسیب هوپترا^۱ [۵]، کاکرافت و لاتهام^۲ [۶]، گرسون-تی‌ورگارد-نیدلمن^۳ (GTN)

[۷-۹] و جانسون-کوک^۴ [۱۰] نمونه‌هایی از مدل‌های آسیب نرم هستند.

مدل‌های آسیب جانسون-کوک و گرسون-تی‌ورگارد-نیدلمن، نمونه‌هایی از مدل‌های آسیب هستند که در نرم‌افزار تجاری اجزاء محدود آباکوس^۵ [۱۱] جهت شبیه‌سازی فرایندهای تولید و پیش بینی نقاط شکست استفاده می‌شوند. در مدل جانسون-کوک کرنش شکست ماده به عنوان تابعی از تنش سه محوره، نرخ کرنش و دما در نظر گرفته می‌شود [۱۰]. برای استفاده از مدل آسیب جانسون-کوک در شبیه‌سازی رایانه‌ای، اولین گام تعیین ثابت‌های این معادله است. این معادله دارای پنج ضریب ثابت است که برای مشخص شدن آن نیاز به آزمایش‌های عملی است. روش‌های گوناگونی برای کالیبراسیون مدل آسیب جانسون-کوک برای مواد مختلف ارائه شده است [۱۲-۱۴].

در پژوهش انجام شده توسط کیان وانگ [۱۲]، چگونگی بدست آوردن ثابت‌های مدل آسیب جانسون-کوک با انجام آزمون کشش تک محوره روی نمونه‌های صاف و شیار دار گرد در دمای محیط و دماهای بالاتر شرح داده شده است. ثابت‌های بدست آمده با شبیه‌سازی آزمایش کشش و فرایند ماشینکاری متعامد در نرخ کرنش‌های پایین و بالا اعتبارسنجی شده است.

در تحقیق انجام شده توسط بانرجی و همکاران [۱۳]، ثابت‌های مدل ماده و مدل آسیب جانسون-کوک برای یک فولاد زره تعیین شده است. آنها از آزمایش کشش تک-محوره با نمونه‌هایی با تنش سه محوره متفاوت جهت تعیین ثابت‌ها استفاده کردند. آزمایش‌ها در دماها و نرخ کرنش‌های متفاوت انجام شد؛ همچنین برخی مدل‌های آسیب تصحیح شده نیز پیشنهاد شده است. شبیه‌سازی آزمایش کشش در شرایط تنش سه محوره بالا و دمای بالا و نرخ کرنش بالا نیز توسط ایشان انجام شده است. به منظور استفاده از مدل‌های تصحیح شده در شبیه‌سازی از نوشتن سابروتین^۶ در آباکوس استفاده شده است. در نهایت آزمایش ضربه شارپی^۷ توسط مدل‌های ماده و آسیب جانسون-کوک با ثابت‌های بدست آمده

⁴ Johnson-Cook

⁵ ABAQUS

⁶ Subroutine

⁷ Charpy

¹ Hooputra

² Cockcroft and Latham

³ Gurson- Tvergaard-Needleman

انجام آزمون کشش ساده روی نمونه استاندارد تعیین می‌شود؛ سپس، به منظور تعیین رفتار شکست این ماده و تعیین ثابت‌های مدل آسیب جانسون-کوک آزمون کشش روی دو نمونه شیار دار با شیارهای متفاوت به شعاع‌های ۱۰ و ۲ میلی‌متر انجام می‌شود. برای تعیین ثابت‌های این مدل از وابستگی کرنش شکست در راستای طولی به نسبت تنش سه محوره در نمونه‌های کشیده شده استفاده می‌شود. به منظور بررسی موفقیت مدل آسیب جانسون-کوک از شبیه‌سازی آزمایش کشش استفاده می‌شود. علاوه بر این، به منظور راستی آزمایی آزمایش کشش روی نمونه‌ای با شعاع ۶ میلی‌متر نیز انجام و نتایج آن با نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی بر مبنای ثابت‌های بدست آمده در مقاله مقایسه می‌شود. از نتایج تحقیق حاضر، می‌توان جهت شبیه‌سازی فرایندهای تولید ورق مسی مورد مطالعه استفاده کرد.

۲- ماده و روش انجام آزمایش

ماده مورد آزمایش در تحقیق حاضر ورق مس تجاری تولید شرکت صنایع مس شهید باهنر است. ترکیب شیمیایی این ورق که به روش کوانتومتری تعیین گردیده است، در جدول ۱ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، مس خالص تجاری مورد مطالعه از ۹۹/۹۵ درصد وزنی مس و مقدار جزئی از سایر عناصر تشکیل شده است. آلومینیوم با ۰/۰۱ درصد وزنی بیشترین مقدار ناخالصی موجود در مس خالص تجاری مورد مطالعه را تشکیل می‌دهد. به منظور انجام آزمایش کشش برای تعیین رفتار مکانیکی ورق مورد مطالعه، آزمون کشش با سرعت ۵ میلی‌متر بر دقیقه روی دستگاه آزمایش کشش زوئیک با ظرفیت ۲۵ تن انجام شد. نمونه آزمون کشش مطابق استاندارد

شبیه‌سازی شده است. نتایج نشان دهنده سازگاری قابل قبول بین نتایج شبیه‌سازی و نتایج آزمایشگاهی بوده است.

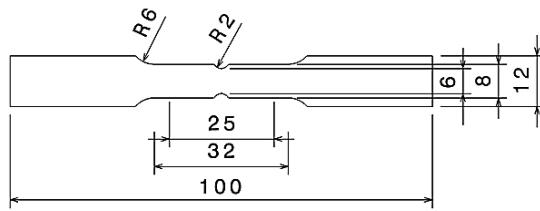
در تحقیق انجام شده توسط سلیم پور ممان و میرزایی [۱۴] پارامترهای آسیب نرم آلومینیوم 2024-O تعیین گردیده است. آنها از آزمون کشش روی نمونه‌های استاندارد و نمونه‌های شیار دار با شعاع‌های شیار متفاوت در شرایط کرنش صفحه‌ای استفاده کرده‌اند. از نسبت تنش سه محوره‌های متفاوت در نمونه‌های با شیار مختلف در محل شیار و تعیین کرنش‌های شکست هر یک از نمونه‌ها، جهت تعیین ثابت مدل آسیب جانسون-کوک استفاده شده است.

طالبی قادیکلایی و دیگران [۱۵]، تاثیر روش‌های کالیبراسیون بردقت معیارهای شکست نرم پدیدار شناختی آیداد، رایس-تریسی و کاکرافت-لاتهام نرماله در فرایند شکل دهی ورق‌های فلزی را مطالعه کرده‌اند. آنها از ترکیبی تجربی-شبیه‌سازی برای این کار استفاده کردند و نشان دادند که معیار کاکرافت-لاتهام نرماله تحت کالیبراسیون با آزمون کشش کرنش صفحه‌ای، مناسب‌ترین معیار و آزمون کالیبراسیون به منظور پیش بینی شکست در مقادیر مثبت پارامتر سه محوری تنش می‌باشند. وحدتی و دیگران [۱۶]، از مدل آسیب جانسون-کوک در تحلیل عددی ساخت کلاهک ضخیم نیم‌مکروی استفاده کرده‌اند. آنها نشان دادند که مطابق تحلیل عددی کلاهک به صورت موفقیت آمیز و بدون پارگی شکل دهی می‌شود.

با توجه به مرور منابع انجام شده توسط نویسندگان ثابت‌های مدل آسیب جانسون-کوک برای مس خالص تجاری تا کنون گزارش نشده است؛ لذا، در تحقیق حاضر، ابتدا رفتار تنش-کرنش ورق مس تجاری با ضخامت یک میلی‌متر با

جدول ۱- ترکیب شیمیایی ورق مس خالص تجاری مورد مطالعه در تحقیق حاضر

Cu	Zr	Bi	Sb	Ag	Be	Co	Cr
۹۹/۹۴۶	۰/۰۰۳	۰/۰۰۵	۰/۰۰۸	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۵	۰/۰۰۳
S	Al	Mg	Si	Mn	P	Pb	Zn
۰/۰۰۲	۰/۰۱۲	۰/۰۰۱	۰/۰۰۳	۰/۰۰۷	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۵

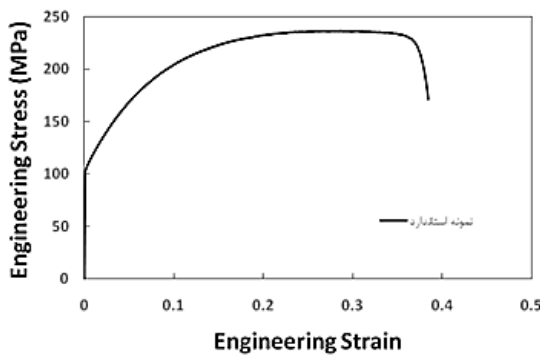


(الف)

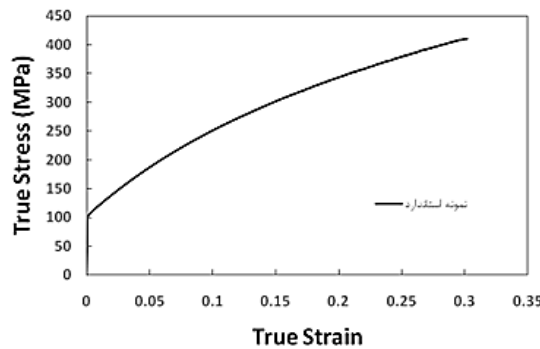


(ب)

شکل ۳- نمونه شیار دار با شعاع شیار ۲ میلی متر (الف) نقشه شماتیک و (ب) نمونه ماشینکاری شده



شکل ۴- نمودار تنش- کرنش برای نمونه استاندارد



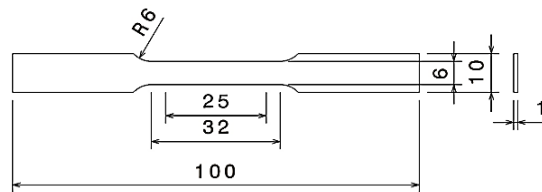
شکل ۵- نمودار تنش- کرنش حقیقی برای نمونه استاندارد

علاوه بر این، خواص مکانیکی استخراج شده از آزمایش کشش نمونه استاندارد در جدول ۲ خلاصه شده است. همچنین، نتیجه آزمایش کشش روی نمونه‌های شیار دار با شعاع‌های ۱۰ و ۲ میلی‌متر بصورت نمودار بار-جابجایی در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است.

ASTM E8 [۱۷] از ورق مس تجاری ماشینکاری شد. برای ماشینکاری از ماشین کنترل عددی سه محور با کنترلر هایدن هاین استفاده شده است. ابعاد نمونه کشش به همراه نمونه ماشینکاری شده به ترتیب در شکل‌های ۱ الف و ب نشان داده شده است.

از نمونه‌های شیار دار با شیارهای متفاوت برای انجام آزمایش‌های کشش با نسبت‌های تنش سه محوره متفاوت استفاده شد. نمونه‌های طراحی و ماشین‌کاری شده شیار دار استفاده شده در تحقیق حاضر با شیارهای متفاوت به شعاع‌های ۱۰ و ۲ میلی‌متر به ترتیب در شکل‌های ۲ الف و ب و ۳ الف و ب نشان داده شده است.

نتایج آزمایش‌های کشش انجام شده بصورت نمودار تنش- کرنش مهندسی و نمودار تنش-کرنش حقیقی برای نمونه استاندارد به ترتیب در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است.

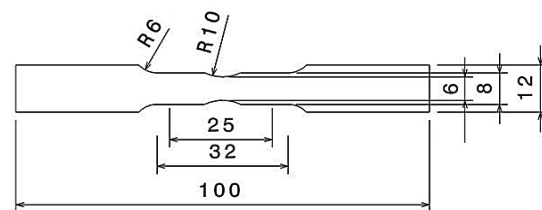


(الف)



(ب)

شکل ۱- ابعاد نمونه آزمایش کشش مطابق استاندارد ASTM E8 (الف) نقشه شماتیک و (ب) نمونه ماشینکاری شده



(الف)



(ب)

شکل ۲- نمونه شیار دار با شعاع شیار ۱۰ میلی متر (الف) نقشه شماتیک و (ب) نمونه ماشینکاری شده

جدول ۲- خواص مکانیکی استخراج شده از نمودار تنش- کرنش حقیقی نمونه استاندارد

مدول یانگ (GPa)	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام کششی نهایی (MPa)	استحکام شکست (MPa)	کرنش استحکام کشی نهایی	کرنش شکست
۱۲۴	۱۰۰/۵۶	۳۱۵/۵۳	۲۳۶/۷۹	۰/۳۰۴	۰/۳۲۶

در این رابطه D_1, D_2, D_3, D_4 و D_5 ثابت‌های ماده و η نسبت تنش سه محوره وارد بر ماده است که از رابطه (۲) بدست می‌آید:

$$\eta = \frac{\sigma_h}{\sigma_{eq}} \quad (۲)$$

که σ_h تنش هیدرواستاتیک است و از رابطه (۳) بدست می‌آید:

$$\sigma_h = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (۳)$$

که در این رابطه σ_1, σ_2 و σ_3 تنش‌های اصلی می‌باشند و σ_{eq} تنش معادل ون میز است:

$$\sigma_{eq} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (۴)$$

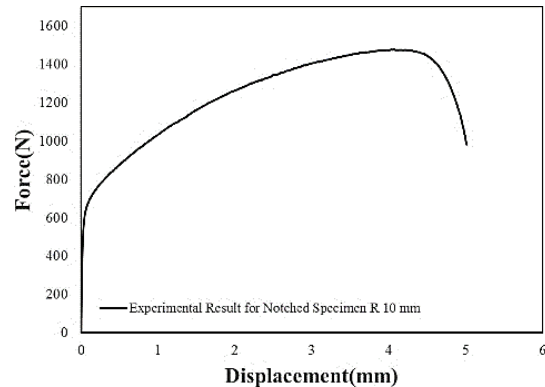
علاوه براین، لازم به ذکر است که در رابطه ۱، $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_r$ نرخ کرنش پلاستیک بدون بعد و $\dot{\epsilon}_r$ نرخ کرنش مرجع است. T^* بیانگر دمای نسبی نرمال شده است و از رابطه (۵) به دست می‌آید:

$$T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \quad (۵)$$

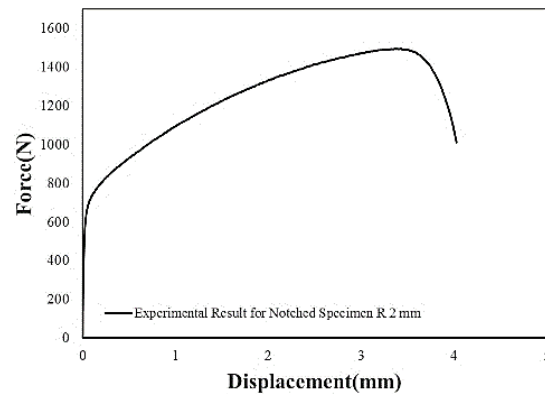
در این معادله T دمای آزمایش، T_m دمای ذوب و T_r دمای مرجع است.

۴- کالیبراسیون مدل آسیب جانسون-کوک برای ماده مورد مطالعه

در مدل آسیب جانسون-کوک پیرامون اثر نسبت تنش سه محوره بر کرنش شکست، پیرامون اثر نرخ کرنش و پیرامون سوم بیانگر اثر دما بر کرنش شکست ماده است. در تحقیق حاضر از نتایج آزمایش‌های کشش انجام شده روی نمونه استاندارد و نمونه‌های شیار دار با شعاع‌های ۱۰ و ۲ میلی متر برای کالیبراسیون سه ثابت D_1, D_2, D_3 استفاده می‌شود. در اینجا اثر دما و نرخ کرنش در نظر گرفته نمی‌شود. برای پیدا کردن ثابت‌های D_4 و D_5 نیاز به انجام



شکل ۶- نمودار بار-جابجایی نمونه شیاردار با شعاع ۱۰ میلی‌متر



شکل ۷- نمودار بار-جابجایی نمونه شیاردار با شعاع ۲ میلی‌متر

۳- مدل آسیب جانسون-کوک

جانسون و کوک در سال ۱۹۸۵ یک مدل آسیب برای مواد نرم ارائه دادند [۱۲] که تا امروز نیز یکی از مدل‌های آسیب معتبر به شمار می‌رود. در مدل آسیب جانسون-کوک مدل کرنش شکست ماده به عنوان تابعی از تنش سه محوره، نرخ کرنش و دما در نظر گرفته می‌شود:

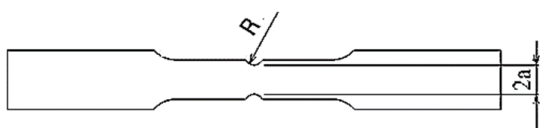
$$\epsilon_f = [D_1 + D_2(\exp D_3 \eta)] [1 + D_4 \ln \dot{\epsilon}^*] [1 + D_5 T^*] \quad (۱)$$

کرنش شکست محاسبه شده (رابطه ۷) در جدول ۴ ارائه شده است.

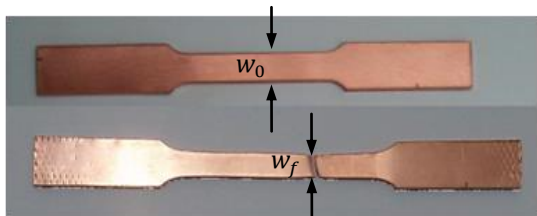
با صرف نظر کردن از اثر دما و نرخ کرنش مدل آسیب جانسون-کوک (رابطه ۱) به شکل رابطه (۱۰) در می‌آید:

$$\varepsilon_f = D_1 + D_2 \exp(D_3 \eta) \quad (10)$$

در این تحقیق، با توجه به مقادیر کرنش شکست قانون حجم ثابت بدست آمده برای نمونه‌های مختلف مورد آزمایش (جدول ۴) از بهینه‌سازی نیوتونی برای برازش منحنی و بدست آوردن ثابت‌های معادله ۸ به روش کمترین مربعات خطا استفاده شد. برای این کار از نرم افزار اکسل استفاده شد (شکل ۱۰) و مقادیر ثابت‌های D_1, D_2, D_3 مطابق جدول ۵ بدست آمد.



شکل ۸- نمایش شماتیک نمونه شیار دار



شکل ۹- اندازه گیری مقادیر ضخامت قبل و بعد از شکست بر روی نمونه استاندارد

آزمایش‌های بیشتر در دماها و نرخ کرنش‌های مختلف است که هدف تحقیق حاضر نیست.

مطابق تحلیل ارائه شده توسط بریجمن [۱۸ و ۱۹] نسبت تنش سه محوره را می‌توان برای نمونه‌های شیاردار از رابطه (۶) بدست آورد:

$$\eta = \frac{1}{3} + \ln\left(1 + \frac{a}{2R}\right) \quad (6)$$

که در رابطه فوق a برابر نصف عرض نمونه تست کشش و R شعاع نمونه‌های شیار دار است (شکل ۸).

در جدول ۳ مقادیر η محاسبه شده بر مبنای رابطه ۶ برای نمونه استاندارد و دو نمونه شیاردار با شیارهای متفاوت به شعاع‌های ۱۰ و ۲ میلی‌متر ارائه شده است.

برای محاسبه مقادیر کرنش شکست برای هر یک از نمونه‌ها، با توجه به قانون حجم ثابت داریم:

$$A_0 = t_0 \times w_0 \quad (7)$$

$$A_f = t_f \times w_f \quad (8)$$

$$\varepsilon_f = \ln\left(\frac{A_0}{A_f}\right) \quad (9)$$

که در روابط فوق t_0 ، w_0 و A_0 به ترتیب ضخامت، عرض و مساحت نمونه اولیه قبل از شکست و تغییر شکل و t_f ، w_f و A_f به ترتیب ضخامت، عرض و مساحت نمونه ثانویه پس از شکست هستند. در شکل ۹ برای نمونه استاندارد چگونگی اندازه‌گیری مقادیر ضخامت قبل و بعد از شکست به عنوان نمونه نشان داده شده است.

با توجه به اندازه گیری‌های انجام شده توسط کولیسی با دقت ۰/۰۲ میلی‌متر، مقادیر ضخامت و عرض اولیه و ثانویه برای هر یک نمونه‌های آزمایش کشش به همراه مقادیر

جدول ۳- مقادیر η محاسبه شده برای نمونه استاندارد و دو نمونه شیار دار با شیارهای متفاوت به شعاع‌های ۱۰ و ۲ میلی‌متر به همراه کرنش شکست با توجه به قانون حجم ثابت

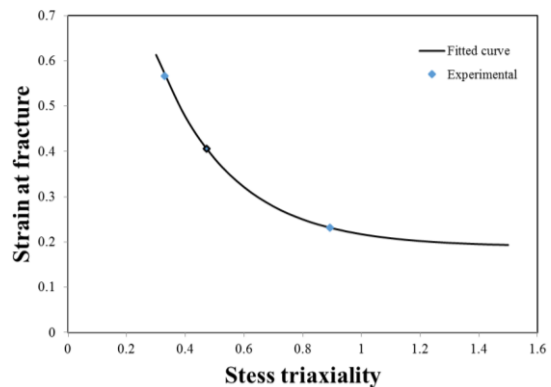
نمونه	η	کرنش شکست با توجه به قانون حجم ثابت ε_f
استاندارد	۰/۳۳	۰/۵۶۶۸۰۷
شیار دار با شعاع ۱۰ mm	۰/۴۷	۰/۴۰۵۴۶۶
شیار دار با شعاع ۲ mm	۰/۸۹	۰/۲۳۱۵۱۲

جدول ۴- مقادیر بدست آمده کرنش شکست با توجه به قانون حجم ثابت برای نمونه استاندارد و دو نمونه شیار دار با شعاع‌های ۱۰ و ۲ میلی‌متر

نمونه	عرض اولیه W_0	عرض ثانویه W_f	ضخامت اولیه t_0	ضخامت ثانویه t_f
نمونه استاندارد	۶	۴/۶	۱	۰/۷۴
	-	کرنش شکست با توجه به قانون حجم ثابت ϵ_f	مساحت سطح مقطع ثانویه A_f	مساحت سطح مقطع اولیه A_0
	-	۰/۵۶۷	۳/۴۰۴	۶
نمونه شیار دار با شعاع ۱۰ میلی‌متر	عرض اولیه W_0	عرض ثانویه W_f	ضخامت اولیه t_0	ضخامت ثانویه t_f
	۶	۵	۱	۰/۸
	-	کرنش شکست با توجه به قانون حجم ثابت ϵ_f	مساحت سطح مقطع ثانویه A_f	مساحت سطح مقطع اولیه A_0
	-	۰/۴۰۵	۴	۶
نمونه شیار دار با شعاع ۲ میلی‌متر	عرض اولیه W_0	عرض ثانویه W_f	ضخامت اولیه t_0	ضخامت ثانویه t_f
	۶	۵/۶	۱	۰/۸۵
	-	کرنش شکست با توجه به قانون حجم ثابت ϵ_f	مساحت سطح مقطع ثانویه A_f	مساحت سطح مقطع اولیه A_0
	-	۰/۲۳۲	۴/۷۶	۶

۵- شبیه‌سازی اجزاء محدود

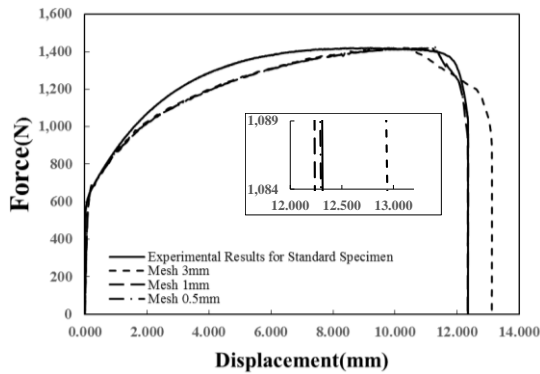
در این تحقیق از روش حل عددی اجزاء محدود برای شبیه‌سازی و ارزیابی موفقیت این روش‌های تعیین ثابت‌های مدل آسیب جانسون-کوک شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس انجام شد. آزمون‌های تجربی انجام گرفته روی هر سه نمونه مورد آزمایش (نمونه استاندارد و نمونه‌های شیار دار با شعاع‌های ۱۰ و ۲ میلی‌متر) در نرم‌افزار آباکوس با استفاده از مدل آسیب نرم جانسون-کوک شبیه‌سازی گردید. جهت اعمال خواص ماده ورق مس خالص تجاری برای شبیه‌سازی هر سه نمونه از نمودار تنش-کرنش حقیقی ماده تا استحکام کششی نهایی که از انجام آزمایش کشش روی نمونه استاندارد بدست آمده است (شکل ۵) به همراه مدول ینگ ارائه شده در جدول ۲ استفاده شد. برای شبیه‌سازی آسیب و ارتباط کرنش شکست در راستای طولی و نسبت تنش سه محوره از ثابت‌های مدل جانسون-کوک حاصل از انجام آزمایش‌های تجربی مطابق روابط ۷-۹ و جدول ۵ استفاده شد. جهت اعمال شرایط مرزی در شبیه



شکل ۱۰- منحنی برازش شده برای تعیین ثابت‌های مدل آسیب جانسون-کوک

جدول ۵- ثابت‌های مدل آسیب جانسون-کوک بدست آمده برای ورق مس خالص تجاری

D_1	D_2	D_3
۰/۱۸	۱/۳۶	-۳/۸۹



شکل ۱۲- پاسخ همگرایی مش روی نمودار بار-جابجایی نمونه استاندارد

قابل مشاهده است)، از معیار قابلیت پیش بینی جابه‌جایی مطابق رابطه ۱۱ جهت ارزیابی موفقیت شبیه‌سازی‌های انجام شده استفاده شد:

$$Error (\%) = \frac{|disp_{sim} - disp_{exp}|}{disp_{exp}} \times 100 \quad (11)$$

که در این رابطه $disp_{sim}$ جابه‌جایی شبیه‌سازی شده و $disp_{exp}$ جابه‌جایی تجربی است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی انجام شده با اندازه مش مختلف با نتیجه آزمون کشش برای نمونه استاندارد در شکل ۱۳ مقایسه شده است.

همانطور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، ریز شدن اندازه مش در محل آسیب از ۱ میلی‌متر به ۰/۵ میلی‌متر منجر به کاهش چشمگیر در خطای شبیه‌سازی نمی‌شود؛ بنابراین در تحقیق حاضر از اندازه مش ۱ میلی‌متر برای انجام شبیه‌سازی‌ها استفاده شد. در شکل ۱۴ مدل المان محدود برای نمونه استاندارد و دو نمونه شیار دار با اندازه مش یک میلی‌متر نشان داده شده است.

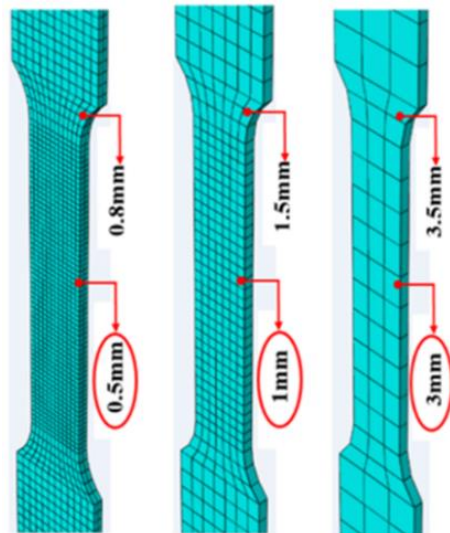
۶- نتایج حاصل از شبیه‌سازی و بحث

در این بخش از مقاله نتایج حاصل از شبیه‌سازی آزمون کشش روی نمونه استاندارد و نمونه‌های شیار دار با شعاع‌های ۱۰ و ۲ میلی‌متر و با نتایج تجربی مقایسه می‌شود. در شکل ۱۵ کانتور^۱ تنش فون مایزس^۲ در لحظه شکست و شکل

سازی هر سه نمونه، نمونه‌ها از یک طرف مقید شدند و با تعریف نقطه مرجع روی صفحه بالایی حرکت فک بالای دستگاه آزمون کشش با سرعت ثابت سرعت 5 mm/min (معادل $0/083 \text{ mm/s}$) شبیه‌سازی شد. جهت اعمال سرعت مورد نظر (تغییر مکان نسبت به زمان) از دامنه استفاده شد. از شبکه‌بندی متغیر روی سطح قطعه استفاده شد. بطوری که قسمت سنجح نمونه و محل ایجاد آسیب، دارای المان‌های با اندازه کوچک‌تر و قسمت‌های گیره‌بندی فک دستگاه دارای اندازه المان بزرگتر انتخاب شد. از المان C3D8R برای شبکه‌بندی نمونه استفاده شد.

به منظور بررسی همگرایی مش، مطابق شکل ۱۱ اندازه المان در محل آسیب ۳، ۱ و ۰/۵ میلی‌متر در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی آزمون کشش روی نمونه استاندارد به شکل نمودار نیرو-جابجایی برای شبیه‌سازی‌های انجام شده با اندازه مش مختلف ۳، ۱ و ۰/۵ میلی‌متر در محل آسیب در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

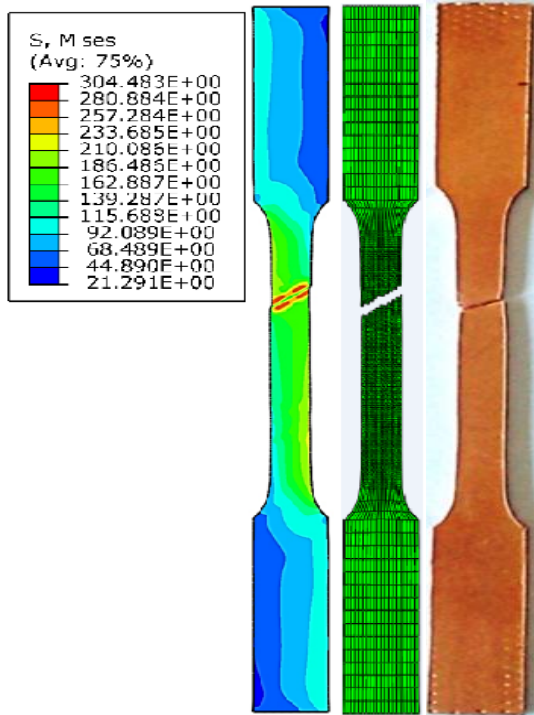
همانطور که مشاهده می‌شود، با ریزتر شده اندازه مش انطباق بهتری بین نمودارهای بار-جابجایی تجربی و شبیه‌سازی مشاهده می‌شود. از آنجا که در مطالعه حاضر در تمامی شبیه‌سازی‌های انجام شده تغییرات بار حداکثر قابل تحمل توسط ماده ناچیز بود (بعداً در قسمت نتایج مقاله



شکل ۱۱- به منظور بررسی همگرایی مش، اندازه المان در محل آسیب ۳، ۱ و ۰/۵ میلی‌متر در نظر گرفته شد

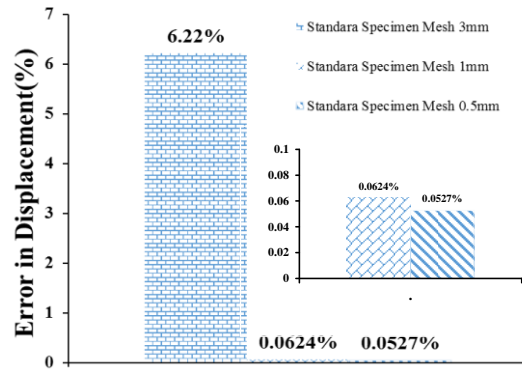
¹ Contour

² Von Mises

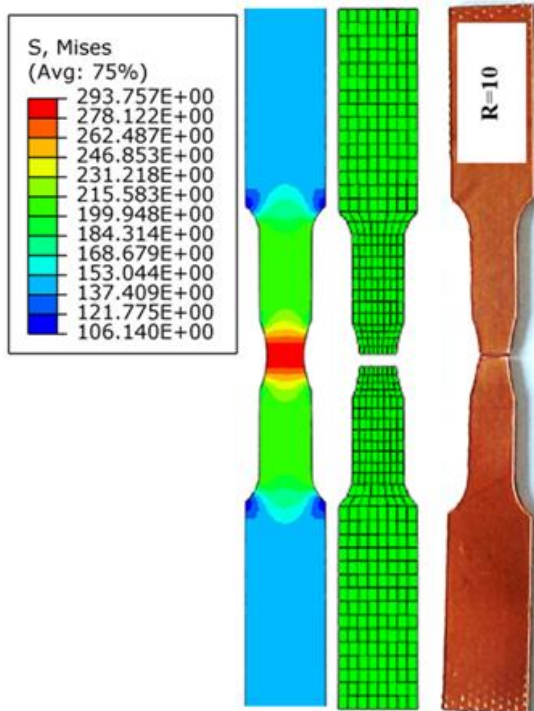


(الف)

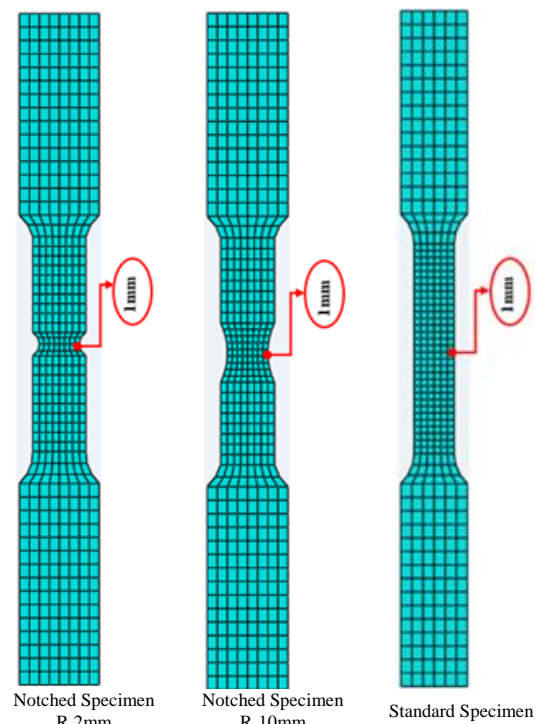
نمونه‌ها پس از شکست نشان داده شده و با نمونه‌های تجربی شکسته شده مقایسه گردیده است.



شکل ۱۳- خطای جابه‌جایی برای نمونه تست کشش استاندارد با اندازه مش ۳، ۱ و ۰/۵ میلی‌متر در ناحیه شکست



(ب)



(ج)

(ب)

(الف)

شکل ۱۴- مدل اجزاء محدود آزمون کشش برای نمونه (الف) استاندارد، (ب) شیار دار با شعاع ۱۰ میلی‌متر و (ج) شیار دار با شعاع ۲ میلی‌متر

۲ میلی‌متر) در شکل ۱۶ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، شبیه‌سازی عددی انجام شده به کمک ثابت‌های بدست آمده از تحقیق حاضر به خوبی توانسته است، اثر وجود شیار در نمونه‌ها را در نمودارهای بار-جاب‌جایی ظاهر سازد؛ همچنین به منظور مقایسه کمی از درصد خطای جابه‌جایی مطابق رابطه ۱۱ برای نمونه‌های استاندارد و نمونه‌های شیار دار با شعاع‌های شیار ۱۰ و ۲ میلی‌متر استفاده شد. نتایج این مقایسه در شکل ۱۷ ارائه شده است.

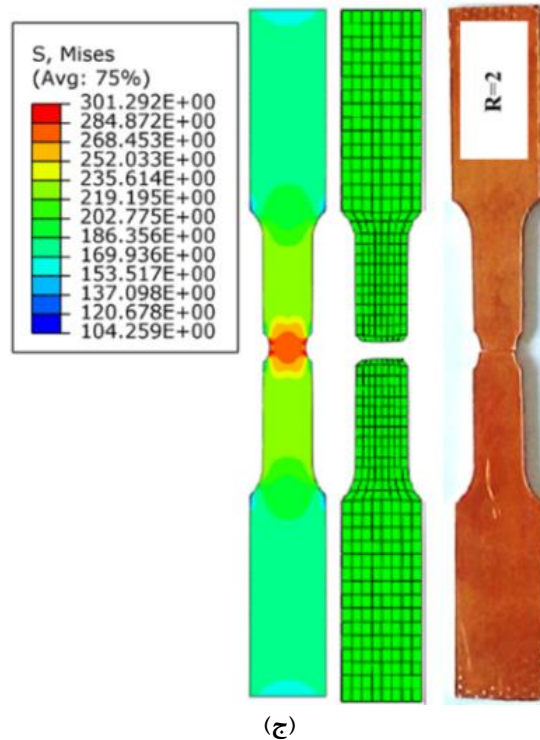
همانطور که در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود، کمترین مقدار خطای جابه‌جایی برای نمونه استاندارد بدست آمده است و مقدار آن برابر ۰/۰۶۲۴ درصد است؛ همچنین، بیشترین مقدار خطا برابر ۲۱/۳۹ درصد برای نمونه شیار دار با شعاع شیار ۲ میلی‌متر بدست آمده است. در مورد خطای زیاد برای نمونه با شعاع شیار ۲ میلی‌متر با قطعیت نمی‌توان نظر داد، ولی منشأ خطا ممکن است، مربوط به شبیه‌سازی عددی و یا فرایند آماده‌سازی نمونه و انجام آزمون باشد. مقدار خطای میانگین جابه‌جایی برای سه نمونه مورد آزمایش برابر ۹/۰۷۲ درصد است.

علاوه بر این، به منظور راستی‌آزمایی نتایج بدست آمده در این مقاله، نمونه ای شیاردار با شعاع شیار ۶ میلی‌متر تهیه شد (شکل ۱۸) و آزمون کشش روی آن انجام شد. در شکل ۱۸ نمونه طراحی و ماشینکاری شده نشان داده شده است.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی به کمک ثابت‌های مدل آسیب بدست آمده از تحقیق حاضر روی این نمونه با نتایج حاصل از آزمایش در شکل ۱۹ مقایسه شده است.

همانطور که مشاهده می‌شود، مطالعه راستی‌آزمایی انجام شده نیز موفقیت تحقیق حاضر را تصدیق می‌نماید. لازم به ذکر است که مقدار خطای جابه‌جایی برای این نمونه محاسبه و برابر ۳/۶۶ درصد بدست آمد.

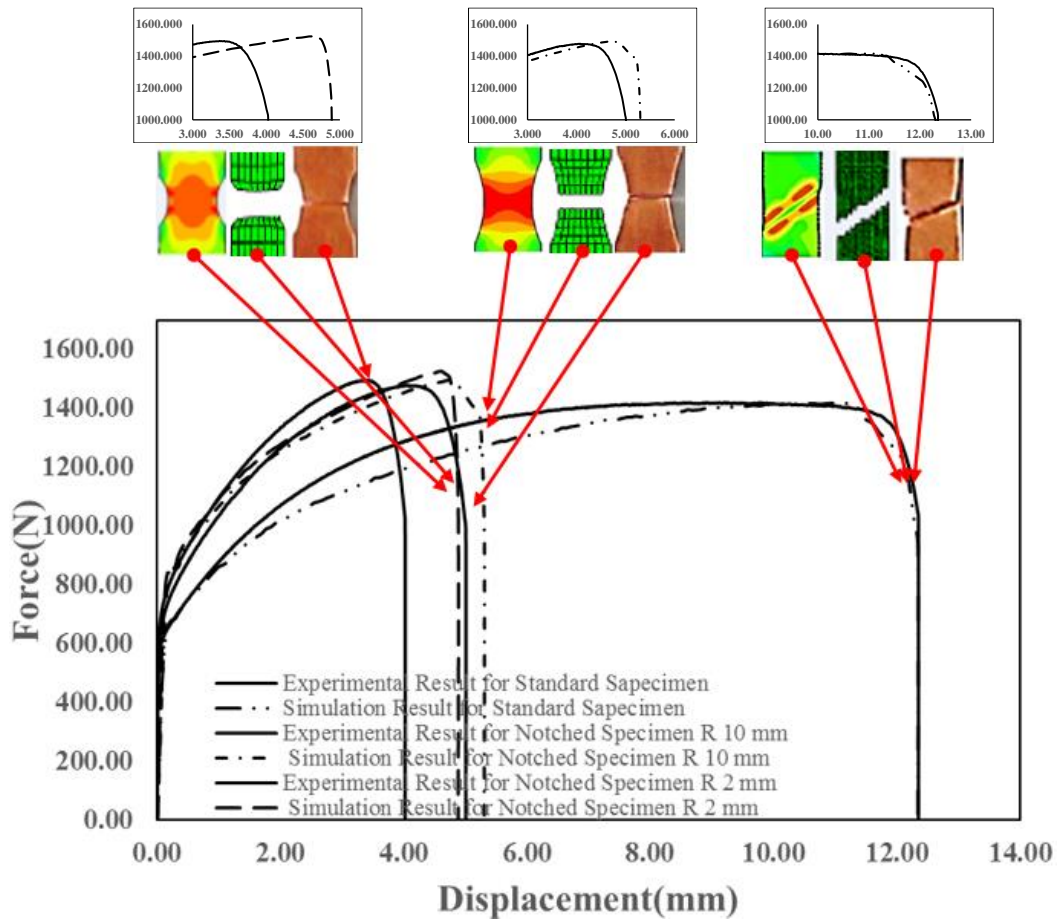
از مدل آسیب جانسون-کوک با ثابت‌های بدست آمده می‌توان جهت شبیه‌سازی فرایندهای تولید این ورق استفاده کرد و مناطقی را پیش بینی کرد که در آن شکست اتفاق می‌افتد. استفاده از این مدل و موفقیت آن برای شبیه‌سازی فرایندهایی نظیر، سوراخکاری و فلانج‌کاری سوراخ که در دمای محیط انجام می‌شود، روی ورق مورد مطالعه در آینده بررسی خواهد شد.



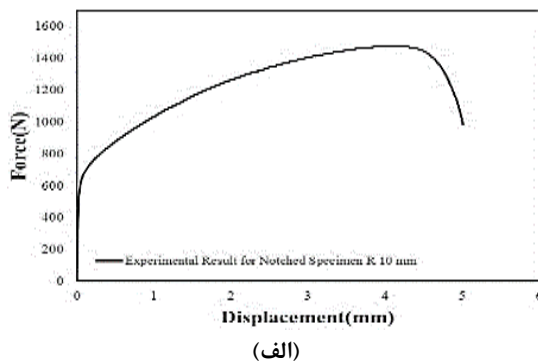
شکل ۱۵- کانتور تنش فون مایز در لحظه شکست و شکل نمونه‌ها پس از شکست الف) نمونه استاندارد، ب) نمونه تجربی شیاردار با شعاع ۱۰ میلی‌متر و ج) نمونه تجربی شیار دار با شعاع ۲ میلی‌متر

همانطور که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود، شبیه‌سازی عددی به خوبی توانسته است، آزمایش کشش انجام شده روی سه نمونه با نسبت‌های تنش سه محوره متفاوت را به خوبی شبیه‌سازی کند. برش ایجاد شده تحت زاویه ۴۵ درجه در نمونه استاندارد بدون شیار به خوبی نشان دهنده شکست نرم در نمونه‌های مسی مورد مطالعه است. البته در شبیه‌سازی عددی نیز این مسأله به خوبی شبیه‌سازی شده است.

برای نمونه استاندارد، از مش با اندازه ۰/۴ میلی‌متر استفاده شد تا نتایج بصری شکست نمونه‌ها بر آزمایش منطبق باشد و برای سایر نمونه‌ها به اندازه مش یک میلی‌متر اکتفا شد که بر مبنای شبیه‌سازی های انجام شده برای بررسی همگرایی مش انتخاب شده است؛ همچنین مقایسه نتایج تجربی و نتایج حاصل از شبیه‌سازی آزمایش‌های کشش مورد مطالعه بصورت نمودارهای بار-جاب‌جایی برای هر سه نمونه (نمونه استاندارد و نمونه‌های شیاردار با شعاع‌های ۱۰ و



شکل ۱۶- نمودار بار-جابجایی نمونه‌های استاندارد و شیار دار با شعاع ۱۰ و ۲ میلی متر

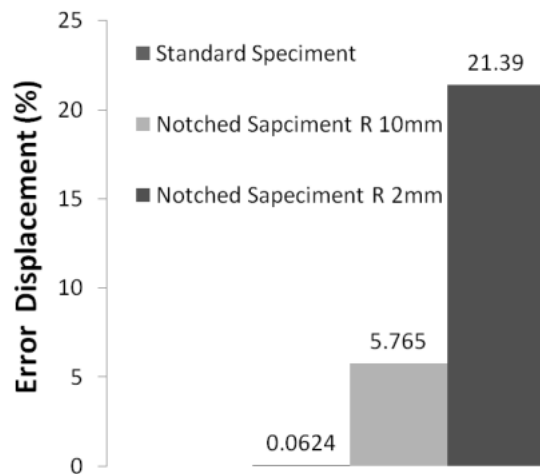


(الف)

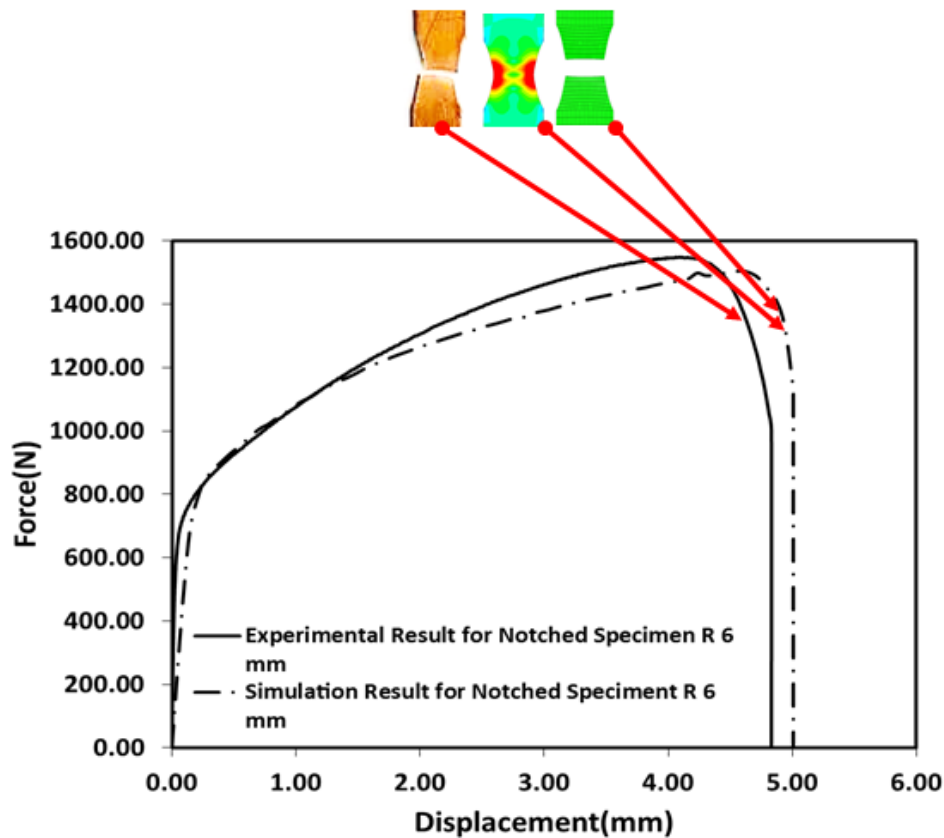


(ب)

شکل ۱۸- نمونه شیار دار با شعاع شیار ۶ میلی متر
الف) نقشه شماتیک و ب) نمونه ماشینکاری شده



شکل ۱۷- درصد خطای جابه‌جایی برای نمونه تست کشش استاندارد و شیار دار با شعاع ۱۰ و ۲ میلی متر برای مش ۱ میلی متر



شکل ۱۹- مقایسه نمودار بار-جاب‌جایی حاصل از شبیه‌سازی عددی با نمودار بار-جاب‌جایی حاصل از آزمایش برای نمونه شیاردار با شعاع ۶ میلی‌متر

۷- نتیجه‌گیری

هدف از تحقیق حاضر، تعیین ثابت‌های مدل آسیب جانسون-کوک برای ورق مس خالص تجاری است. بدین منظور، ابتدا سه نمونه کشش (یک نمونه بدون شیار و دو نمونه شیاردار با شیارهای متفاوت به شعاع‌های ۱۰ و ۲ میلی‌متر) در راستای نورد از ورق جدا و آزمایش کشش روی آن‌ها انجام شد. سپس، نسبت تنش سه محوره برای هر یک از نمونه‌ها از رابطه بریجمن بدست آمد. از وابستگی کرنش شکست در راستای طولی نسبت به تنش سه محوره، استفاده شد و ثابت‌های مدل آسیب جانسون-کوک تعیین گردید. آزمایش‌های کشش انجام شده شبیه‌سازی شد. برای شبیه‌سازی از نمودار تنش-کرنش حقیقی حاصل از انجام آزمایش کشش روی نمونه استاندارد استفاده شد؛ همچنین ثابت‌های بدست آمده برای استفاده از مدل آسیب مورد مطالعه در نرم افزار آباکوس بکار گرفته شد.

نتایج شبیه‌سازی و نتایج تجربی با یکدیگر مقایسه شدند. مشاهده شد که شبیه‌سازی عددی به خوبی قادر است آسیب نرم بوجود آمده در نمونه کشش استاندارد را که بصورت شکست ۴۵ درجه نسبت به جهت کشش ایجاد می‌شود را مدل کند؛ همچنین به منظور ارزیابی موفقیت روش مورد استفاده در تحقیق حاضر جهت تعیین ثابت‌های مدل آسیب جانسون-کوک نمودارهای بار-جاب‌جایی حاصل از شبیه‌سازی و تجربی با یکدیگر مقایسه شدند. از معیار خطای جاب‌جایی برای مقایسه استفاده شد و مقدار آن برای هر یک از نمونه‌ها تعیین گردید. مقدار خطای جاب‌جایی برای نمونه استاندارد برابر ۰/۰۶۳ درصد و برای نمونه‌های شیاردار به شعاع‌های ۱۰ و ۲ میلی‌متر به ترتیب برابر ۵/۷۷ و ۲۱/۳۹ درصد محاسبه شد که نشان دهنده موفقیت تحقیق حاضر جهت تعیین ثابت‌های مدل آسیب جانسون-کوک است؛ همچنین به منظور راستی آزمایی نتایج، نمونه‌های شیاردار با شعاع شیار ۶

عرض نهایی (mm)	w_f	میلی متر تهیه شد و آزمون کشش روی آن انجام شد و مقدار
عرض اولیه (mm)	w_0	خطای جابجایی ۳/۶۶ برای آن بدست آمد. در آینده می توان
مساحت سطح مقطع اولیه	A_0	فرآیندهایی نظیر، سوراخکاری و فلنج کاری سوراخ روی ورق
مساحت سطح مقطع ثانوی	A_f	مورد مطالعه را به کمک ثابت های بدست آمده در این تحقیق
		شبیه سازی و با نتایج تجربی مقایسه کرد.

۸- فهرست علائم

		کرنش معادل شکست (-)	ε_f
		پارامتر شکست (-)	D_1
		پارامتر شکست (-)	D_2
		پارامتر شکست (-)	D_3
		پارامتر شکست (-)	D_4
		پارامتر شکست (-)	D_5
		تنش سه محوره (-)	η
		نرخ کرنش پلاستیک بدون بعد (-)	$\dot{\varepsilon}^*$
		بیانگر دمای نسبی نرمال شده (-)	T^*
		تنش هیدرواستاتیک (Mpa)	σ_h
		تنش معادل ون میزز (Mpa)	σ_{eq}
		تنش اصلی در دستگاه مختصات دکارتی (Mpa)	σ_1
		تنش اصلی در دستگاه مختصات دکارتی (Mpa)	σ_2
		تنش اصلی در دستگاه مختصات دکارتی (Mpa)	σ_3
		نرخ کرنش مرجع (s^{-1})	$\dot{\varepsilon}_r$
		دمای ذوب (C°)	T_m
		دمای آزمایش (C°)	T
		دمای مرجع (C°)	T_r
		ضخامت نهایی (mm)	t_f
		ضخامت اولیه (mm)	t_0
		کرنش ضخامت	ε_t

۹- مراجع

- [1] Verlinden B, Driver J, Samajdar I, Doherty RD, (2007) Thermo-mechanical processing of metallic materials. Elsevier.
- [2] William S (1993) Structure Properties and Applications of Engineering Alloys. (Translated by Ekrami AA and SeyedReihani SM). Sharif University of Technology Scientific Publishing Institute. (In Persian)
- [3] Chen G, Ren C, Lu L, Ke Z, Qin X, Ge X (2018) Determination of ductile damage behaviors of high strain rate compression deformation for Ti-6Al-4V alloy using experimental-numerical combined approach. Eng Fract Mech 200: 499-520.
- [4] Sajjadi SA (2015) Mechanical behavior of materials. 2nd edn. Ferdowsi University of Mashhad Publications. (In Persian)
- [5] Hooputra H, Gese H, Dell H, Werner H (2004) A comprehensive failure model for crashworthiness simulation of aluminium extrusions. Int J Crashworthiness 9(5): 449-464.
- [6] Cockcroft MG, Latham DJ (1968) Ductility and the workability of metals. J Inst Metals 96(1): 33-39.
- [7] Gurson AL (1977) Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth: Part I-Yield criteria and flow rules for porous ductile media. J Eng Mater Technol 99(1): 2-15.
- [8] Chu CC, Needleman A (1980) Void nucleation effects in biaxially stretched sheets.
- [9] Tvergaard V, Needleman A (1984) Analysis of the cup-cone fracture in a round tensile bar. Acta Metall Mater 32(1):157-169.
- [10] Johnson GR, Cook WH (1985) Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures. Eng Fract Mech 21(1): 31-48.
- [11] Helwany S (2007) Applied soil mechanics with ABAQUS applications. John Wiley & Sons.
- [12] Wang K (2016) Calibration of the Johnson-Cook failure parameters as the chip separation criterion in the modelling of the orthogonal metal cutting process. (Doctoral dissertation)

- [16] Vahdati M, Rasooli MA, Gerdooei M (2020) Theoretical and numerical analysis of hot deep drawing of hemispherical thick head. *Journal of Solid and Fluid Mechanics* 10(2): 59-78. (In Persian)
- [17] ASTM E8 (2003) Test methods for tension testing of metallic materials. Annual Book of ASTM Standards.
- [18] Bridgman PW (2013) Studies in large plastic flow and fracture. Harvard University Press.
- [19] Iqbal MA, Senthil K, Sharma P, Gupta NK (2016) An investigation of the constitutive behavior of ArmoX 500T steel and armor piercing incendiary projectile material. *Int J Impact Eng* 96:146-164.
- [13] Banerjee A, Dhar S, Acharyya S, Datta D, Nayak N (2015) Determination of Johnson cook material and failure model constants and numerical modelling of Charpy impact test of armour steel. *Mater Sci Eng A* 640: 200-209.
- [14] Salimpour E, Mirzaei M. (2018) Experimental determination and numerical implementation of ductile damage parameters of Al 2024-O. *Moades Mechanical Engineering* 18(2): 45-52. (In Persian)
- [15] Talebi-Ghadikolaee H, Moslemi Naeini H, Mirnia MJ, Mirzai MA, Gorji H, Alexandro S (2020) Study of the effect of calibration procedure on the accuracy of the phenomenological ductile fracture criteria in sheet metal forming. *Journal of Solid and Fluid Mechanics* 10(1): 1-16. (In Persian)