



تعیین رفتار دینامیکی تغییر شکل مومسان فولاد دوفازی DP 590

حسین طالبی قادیکلایی^{۱*}، رامین هاشمی^۲، امیر حسین بامداد^۳، احسان درچه پور^۴

۱- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

۳- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

۴- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: h.talebi.q@kashanu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۱۲ اردیبهشت ۱۴۰۳

پذیرش: ۳۱ تیر ۱۴۰۳

کلیدواژگان:

رفتار مومسان

کرنش

نرخ کرنش

جانسون-کوک

رفتار دینامیکی

استخراج خواص مکانیکی (مومسان-شکست) ورق‌های فلزی در شرایط شبه استاتیکی و دینامیکی یکی از مسائل اساسی در تحلیل برخورد سازه‌ها و تصادفات می‌باشد. بر اساس مراجع و استانداردها، نمونه‌هایی با هندسه‌های مختلف قابلیت به‌کارگیری به منظور استخراج خواص مکانیکی دینامیکی و شبه استاتیکی را دارا می‌باشند. با توجه به وابستگی نتایج رفتار مومسان و کرنش شکست به هندسه نمونه آزمون، ضروری است تا نمونه‌ای در شرایط دینامیکی مورد استفاده قرار گیرد که حداکثر انطباق را با نمونه‌های آزمون کشش تک محوری شبه استاتیکی داشته و در هر دو حالت شبه استاتیکی و دینامیکی قابلیت به‌کارگیری داشته باشد. لذا، در پژوهش حاضر در ابتدا هندسه‌های مختلفی برای تعیین رفتار مومسان طراحی و مورد ارزیابی قرار گرفت. اثر پارامترهای هندسی بر نتایج حاصل از آزمون‌های کشش تک محوری ارزیابی شده و نمونه‌ای مناسب جهت استخراج خواص مکانیکی دینامیکی و شبه استاتیکی ارائه شد. همچنین، بر اساس نتایج آزمون‌های کشش تک محوری شبه استاتیکی و دینامیک بر نمونه منتخب در نرخ کرنش‌های ۰/۰۱ تا ۳۰/۱، میزان حساسیت رفتار مومسان ورق به نرخ کرنش تعیین گردید. همچنین، از طریق کالیبراسیون ضرایب معادله ساختاری جانسون-کوک، رفتار مومسان وابسته به نرخ کرنش در محدوده مورد نظر و نرخ کرنش‌های فراتر از آن تعیین شد.

Determination of dynamic plastic deformation behavior of DP 590 steel

Hossein Talebi-Ghadikolaee^{1*}, Ramin Hashemi², Amir Hossein Bamdad³, Ehsan Dorchepour⁴

1- Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

2- Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran

3- PhD Student, Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran

4- MSc Student, Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran

* Corresponding Author's Email: h.talebi.q@kashanu.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 1 May 2024

Accepted: 21 July 2024

Keywords:

Plastic Behavior

Strain

Strain Rate

Johnson-Cook

Dynamic Behavior

Abstract

Extraction of mechanical properties, including plastic and fracture properties, of sheet metal under quasi-static and dynamic states is one of the fundamental issues in crashworthiness studies. According to standards, samples with various geometries can be employed to extract dynamic and quasi-static mechanical properties. Given the dependence of the yield behavior results and fracture strain on the geometry of the test specimen, it is essential for a specimen used under dynamic conditions to have maximum compatibility with quasi-static uniaxial tension test specimens and to be usable in both conditions. Therefore, in the present study, various geometries were initially designed and evaluated to determine plastic behavior. The effect of geometric parameters on the results of uniaxial tension tests was evaluated, and a suitable specimen for extracting dynamic and quasi-static mechanical properties was presented. Additionally, based on the results of quasi-static and dynamic uniaxial tension tests on the selected specimen at strain rates of 0.01/s to 30/s, the sensitivity of the plastic behavior to strain rate was determined. Furthermore, through the calibration of the coefficients of the Johnson-Cook constitutive model, strain rate-dependent plastic behavior was determined within the desired range and strain rates beyond that.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Talebi-Ghadikolaee H, Hashemi R, Bamdad AH, Dorchepour E. Determination of dynamic plastic deformation behavior of DP 590 steel. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024 Jun 21;11(4):13-25. doi: 10.22034/IJME.2024.455199.1949 [In Persian]

۱- مقدمه

یکی از مسائل اساسی در شناسایی عملکرد صحیح سازه مکانیکی، شناخت صحیح نحوه عملکرد ورق‌های فولادی تحت بارگذاری استاتیکی و دینامیکی می‌باشد که برای اطمینان از طراحی و عملکرد سازه (وسیله نقلیه) ضروری است. در واقع، بدون درک جامع از نحوه واکنش ورق‌های فولادی تحت بارهای دینامیکی، امکان طراحی سازه‌ها و وسایل نقلیه که بتوانند عملکرد مناسبی در برخوردهای سریع از خود نشان دهند و مسافران را به طور مؤثر محافظت کنند، وجود نخواهد داشت [۱، ۲]. آزمون و مشخصه‌یابی دینامیکی برای بهینه‌سازی سازه و اطمینان از اینکه ساختار وسیله نقلیه به شکل مؤثر در طول یک تصادف، انرژی را جذب و تخلیه می‌کند، ضروری است [۳].

طراحی اثربخش برای مقاومت در برابر تصادفات، به دانش دقیق از نحوه تغییرشکل، شکست و جذب انرژی توسط ورق‌های فولادی تحت بارهای دینامیکی وابسته است [۴، ۵]. مدل‌های ساختاری وابسته به نرخ کرنش که از طریق مشخصه‌یابی دینامیکی کالیبره می‌شوند، به مهندسان اجازه می‌دهند تا عملکرد سازه را در سناریوهای ضربه‌ای شبیه‌سازی و بهینه‌سازی کنند [۶]. از سوی دیگر، کاهش وزن وسایل نقلیه برای بهبود کارایی سوخت و کاهش آلاینده‌ها بسیار حیاتی است [۷]. به منظور دستیابی به اهدافی همچون کاهش وزن و حفظ ایمنی سازه، فولادهای استحکام بالا جایگاه ویژه‌ای در صنعت خودروسازی به خود اختصاص داده‌اند. برای بهره‌برداری کامل از این مواد، ضروری است تا نحوه عملکرد آن‌ها نه فقط تحت بارهای استاتیکی بلکه در شرایط دینامیکی نیز مشخصه‌یابی گردد [۸، ۹]. در واقع، درک رفتار مکانیکی ورق‌های فولادی تحت شرایط بارگذاری استاتیک، شبه استاتیک و دینامیکی، اطلاعات اساسی به منظور طراحی بهینه‌سازی سازه (وسایل نقلیه) از لحاظ ضربه‌پذیری را فراهم می‌نماید. در همین راستا، پژوهش‌هایی به منظور مشخصه‌یابی رفتار مومسان و شکست در شرایط بارگذاری مختلف انجام شده است [۱۰، ۱۱].

در زمینه مشخصه‌یابی خواص مومسان شبه استاتیک بعد از نقطه گلوبی، روزا و همکاران [۱۲] آزمایش‌های کشش اولیه را بر روی یک فولاد D980 انجام دادند و از روش بریجمن برای تعیین مقادیر تنش جریان استفاده کردند. آنان، این منحنی تنش-کرنش را به عنوان مرجع انتخاب نموده و سپس به عنوان داده‌های ورودی برای شبیه‌سازی آزمایش‌های کشش استفاده کردند. دفیاز و همکاران [۱۳] از ترکیب دو مدل وچه و سخت‌شوندگی خطی برای تخمین منحنی تنش-کرنش برای فولاد با استحکام بسیار بالا استفاده کردند. آنان پارامترهای مدل را با کمینه کردن اختلافات بین مشاهدات نیرو-جابجایی تجربی و عددی کالیبره نمودند. علاوه بر تعیین رفتار سخت شدن با استفاده از مدل‌های کارسختی، یک گزینه جایگزین (رابطه خطی چند بخشی بین تنش معادل و کرنش)، مانند رویکرد استفاده شده توسط دونند و همکاران [۱۴]، برای تعیین رفتار سخت شدن TRIP 670 مورد ارزیابی قرار دادند. همچنین، تعیین رفتار شکست در شرایط شبه استاتیک بخش دیگری از بحث مشخصه‌یابی خواص مواد می‌باشد که در همین راستا، میرنیا و همکاران [۱۵] به کمک معیار شکست نرم موهر-کلمب، رفتار شکست آلیاژ آلومینیوم را در فرایند شکل‌دهی تدریجی تعیین نمودند. همچنین، طالبی و همکاران [۱۶] به کمک معیارهای شکست نرم پدیدار شناختی، رفتار شکست ورق فلزی در فرایند خم‌کاری را تعیین نموده و بر مبنای روش‌های یادگیری ماشین و نتایج حاصل از مشخصه‌یابی رفتار ماده، وقوع شکست را در شرایط مختلف فرایند تعیین نمودند. همچنین، زینالی و همکاران [۱۷] مشخصه‌یابی رفتار شکست شبه استاتیک در فرایند شکل‌دهی غلتکی را به کمک معیار شکست لو-هو مورد بررسی قرار دادند.

علاوه بر رفتار مشخصه‌یابی رفتار شبه استاتیک، پژوهش‌هایی در زمینه تعیین رفتار دینامیکی مواد نیز انجام گرفته است. در همین راستا، مجدوبی و همکاران [۱۸] رفتار دینامیکی فولادهای ST47 و ST52 و یک آلیاژ آلومینیوم را به کمک آزمون هاپکینسون (نرخ کرنش بالا) و با استفاده از رویکرد ترکیبی تجربی-عددی تعیین کردند. لیو و همکاران [۱۹] از آزمایش‌های کشش دوماحوره دینامیکی برای مشخص کردن رفتار مکانیکی وابسته به نرخ ورق فولادی DP600 استفاده کردند. آن‌ها از معیار ناهمسانگرد هیل استفاده نموده و پارامترهای دو قانون کارسختی وابسته به نرخ کرنش (وچه و لودویک) را تعیین کردند. تعیین ضرایب را به کمک روش ترکیبی بر پایه مدل‌سازی المان محدود آزمایش کشش دوماحوره و داده‌های تجربی حاصل از تست تجربی انجام دادند. اریس و همکاران [۲۰] از معیار هاسفورد-کلمب برای مشخص کردن رفتار شکست دینامیکی سه فولاد استحکام بالای پیشرفته (DP980، CP980 و CP1180) استفاده کردند. آنان ترکیبی از آزمایش‌های تجربی مانند آزمایش‌های پانچ، کشش نمونه شکاف‌دار، کشش با

سوراخ مرکزی و برش، برای کالیبره کردن رفتار شکست وابسته به نرخ کرنش این مواد استفاده کردند. علاوه بر این، آزمایش‌های تجربی هاپکینسون با نرخ کرنش میانی و بالا انجام شد تا تأثیر نرخ کرنش را بر رفتار مکانیکی مواد ارزیابی کنند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که مدل سه پارامتری هاسفورد-کلمب به طور موثر اثرات مهم حالت تنش و نرخ کرنش را بر کرنش شکست برای تمام مواد آزمایش شده توصیف می‌نماید. سریک و همکاران [۲۱] یک نسخه اصلاح شده از مدل شکست هاسفورد کلمب را که شامل وابستگی به نرخ است، معرفی کردند. آن‌ها یک ضرب‌کننده لگاریتمی برای نرخ‌های کرنش را به مدل اضافه کردند که این امکان را می‌دهد تا شکست با دقت بالاتری در فلزات تحت شرایط نرخ کرنش بالا پیش‌بینی شود.

لازم به ذکر است که با توجه تفاوت هندسه نمونه‌های آزمون کشش در زمینه مشخصه‌یابی شبه استاتیک و دینامیکی، این موضوع می‌تواند موجب ناهمگنی نتایج و عدم مقایسه‌پذیری آن‌ها با یکدیگر گردد. لذا، ضروری است در مواردی که اطلاعات رفتاری ماده در هر دو محدوده شبه استاتیک و دینامیک مورد نیاز است، هندسه آزمون به نحوی طراحی و انتخاب شود که قابلیت به‌کارگیری در دو محدوده را دارا باشد و نتایج قابل استناد در هر دو محدوده دینامیک و شبه استاتیک، ارائه نماید. لذا در پژوهش حاضر تلاش شد در ابتدا اثر پارامترهای هندسی نمونه آزمون بر نتایج آزمون کشش تک محوری ارزیابی گردد؛ در ادامه، با بررسی تفاوت کرنش شکست، نمونه‌های مناسب جهت یکسان‌سازی شرایط آزمون معرفی شده و در گام نهایی، خواص شبه استاتیکی و دینامیکی ورق فولادی DP590 به کمک روش ارائه شده استخراج و ضرایب معادله ساختاری جانسون-کوک و میزان حساسیت به نرخ کرنش در ورق مورد نظر تعیین گردید.

۲- طراحی نمونه آزمون

به منظور انتخاب ابعاد مناسب جهت نمونه‌سازی آزمون کشش شبه استاتیک و دینامیکی، نمونه‌های مختلفی با در نظر گرفتن مقادیر مختلف برای طول ناحیه کشش، عرض دنباله، عرض ناحیه کشش و شعاع انحنا، طراحی شد که در جدول ۱ معرفی شده‌اند. از این رو، نمونه‌های کشش با در نظر گرفتن مقادیر مختلفی برای پارامترهای مذکور طراحی و ساخته شد تا بتوان اثر پارامترهای مذکور بر نتایج حاصل از آزمون را مورد بررسی قرار داد.

جدول ۱ پارامترهای مرتبط با نمونه سازی آزمون کشش

پارامترهای ابعادی	عنوان پارامتر	شکل کلی نمونه کشش
b_g	عرض دنباله	
b_0	عرض ناحیه کشش	
L_c	طول ناحیه کشش	
r	شعاع انحنا	

۱۱ نمونه متفاوت با در نظر گرفتن مقادیر مختلف برای پارامترهای ارائه شده در جدول ۱ طراحی شد که مقادیر مربوط به پارامترهای مذکور برای هر نمونه در جدول ۲ نشان داده شده است.

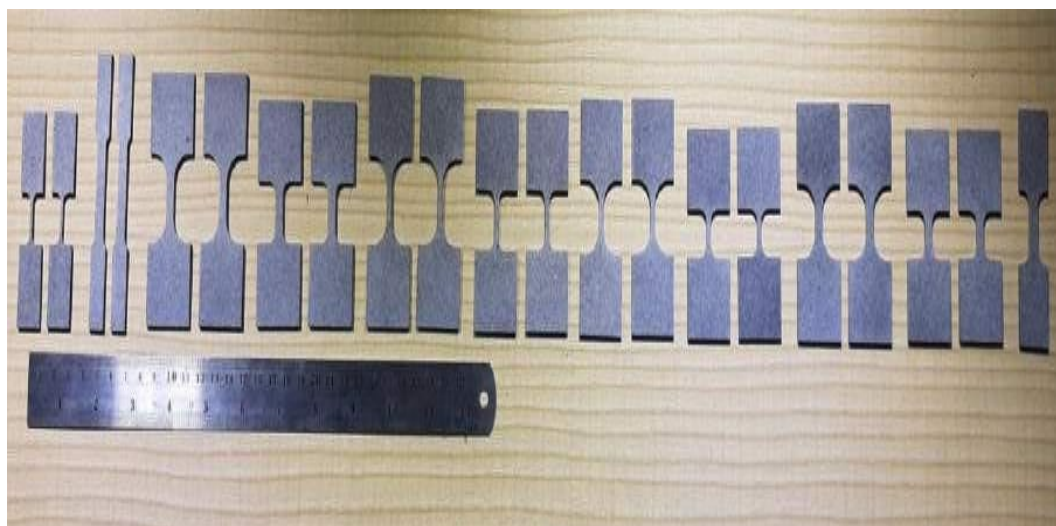
نمونه‌های جدول ۲ به نحوی انتخاب شدند تا اثر پارامترهای مختلف بر تغییرات رفتار مومسان و شکست در نظر گرفته شود. هدف از این بررسی، انتخاب نمونه‌ای برای آزمون‌های رفتار دینامیکی ورق‌های فلزی می‌باشد که نتایج حاصل از آن حداکثر انطباق را با نمونه رایج آزمون کشش (ASTM-E08) دارا باشد.

جدول ۲ ابعاد نمونه‌های آزمون کشش

نام نمونه	طول ناحیه کشش (میلی‌متر)	عرض ناحیه کشش (میلی‌متر)	عرض دنباله (میلی‌متر)	شعاع انحنا (میلی‌متر)
R1 [ASTM-E08]	۲۵	۶	۱۰	۶
R2 [22, 23]	۱۲/۵	۱/۷۵	۱۵/۸۸	۳/۱۸
R3 [24]	۱۵	۶	۲۰	۶
H1	۱۲/۵	۵	۳۰	۱۰
H2	۱۲/۵	۵	۳۰	۵
H3	۱۲/۵	۳	۳۰	۱۰
H4	۱۲/۵	۳	۳۰	۵
H5	۷/۵	۳	۳۰	۱۰
H6	۷/۵	۳	۳۰	۵
H7	۵/۷	۵	۳۰	۱۰
H8	۷/۵	۵	۳۰	۵

۳- نمونه‌سازی و انجام آزمون

در پژوهش حاضر، خواص مکانیکی ورق فلزی از جنس DP 590 با ضخامت ۱/۵ میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفته است. تعیین خواص مکانیکی یکی از بخش‌های مهم و تاثیرگذار در مدل‌سازی فرایند وکالیبراسیون معیارهای ساختاری می‌باشد. بنابراین، خصوصیات مکانیکی ورق باید به کمک آزمون‌های مناسب تعیین گردد. به همین منظور، از نتایج آزمون کشش تک محوری (نمونه‌های جدول ۱) برای تعیین ویژگی‌های مورد نیاز ورق استفاده شده است. نمونه‌های آزمون کشش محوری توسط دستگاه برش سیمی تهیه شدند. تصویر نمونه آزمون کشش تک محوری و ابعاد آن در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱ نمونه‌های آزمون کشش

پس از آماده‌سازی نمونه‌ی آزمون، فرایند کشش تا لحظه جدایش توسط دستگاه کشش انجام گرفت. تغییر طول نمونه تا لحظه شکست، توسط پردازش تصویر در محدوده طول تغییرشکل اندازه‌گیری شد. دستگاه آزمون کشش، نمونه آزمون در شکل ۲ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که مقادیر کرنش از بر اساس مقدار جابجایی لحظه‌ای ناحیه تغییر شکل بر اساس اطلاعات حاصل از پردازش تصویر محاسبه شد.

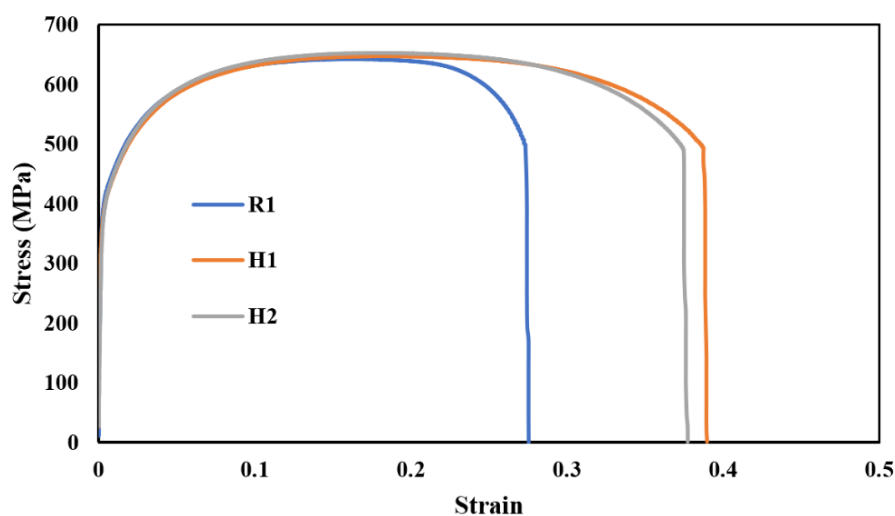


شکل ۲ تجهیزات آزمون کشش تک محوری

۴- نتایج و بحث

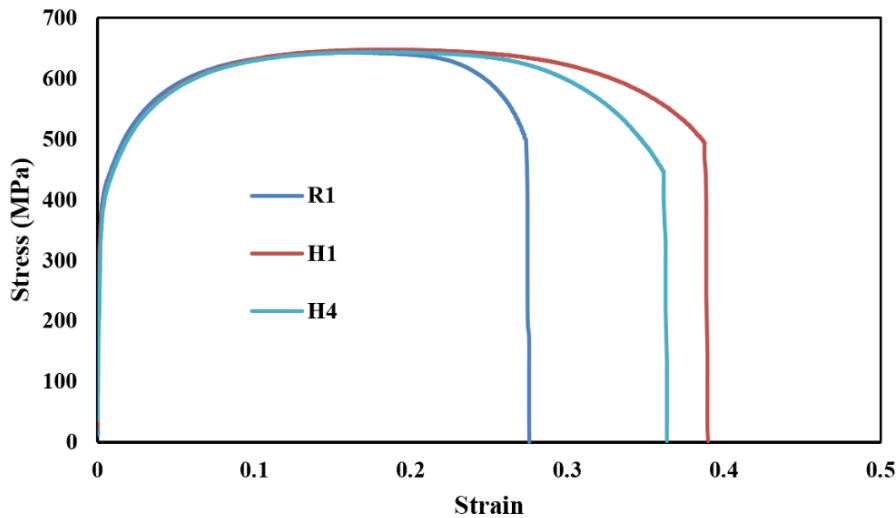
۴-۱- آزمون‌های شبه استاتیکی و اثر هندسه آزمون بر رفتار مومسان

در ابتدا نتایج حاصل از نمونه R1 و نمونه‌های H1 و H2 مورد مقایسه و بررسی قرار گرفتند تا اثر شعاع انحنا نمونه بر نتایج حاصل از آزمون کشش تک محوری آشکار شود. مطابق با نتایج ارائه شده در شکل ۳، افزایش شعاع انحنا موجب افزایش کرنش شکست در مقایسه با نتایج حاصل از نمونه (R1) می‌گردد. لذا شعاع انحنای ۱۰ میلی‌متر گزینه مناسبی به منظور طراحی نمونه آزمون برای تست‌های دینامیکی نمی‌باشد (نتایج انطباق مناسبی با نمونه استاندارد ASTM E08 نخواهد داشت).



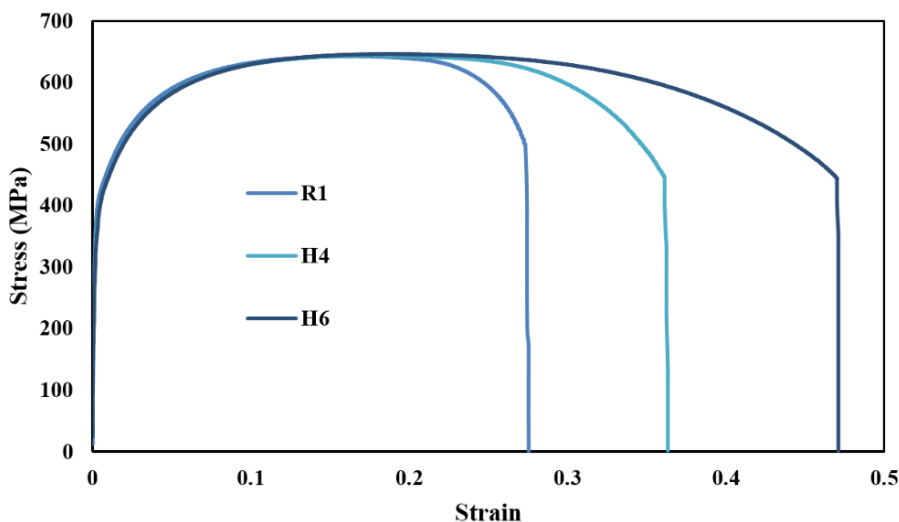
شکل ۳ اثر شعاع انحنا بر نتایج آزمون کشش

یکی دیگر از پارامترهای موثر بر یکنواختی نتایج، عرض ناحیه تغییر شکل می‌باشد. به منظور تعیین اثر این پارامتر، نتایج حاصل از نمونه مرجع (R1) و نمونه‌های H1 و H4 مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج تنش-کرنش مهندسی در این نمونه‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است. مطابق با نتایج، کاهش عرض ناحیه کشش موجب افزایش انطباق رفتار شکست در نتایج تست کشش تک محوری می‌گردد. به بیان دیگر، کرنش شکست از ۰/۳۸۸ در نمونه H1 که ۰/۱۱۴ اختلاف با نمونه R1 دارد به مقدار ۰/۳۶۱ کاهش می‌یابد که بیانگر کاهش اختلاف (از ۰/۱۱۴ به ۰/۰۸۷) با نمونه مرجع شبه استاتیکی می‌باشد.



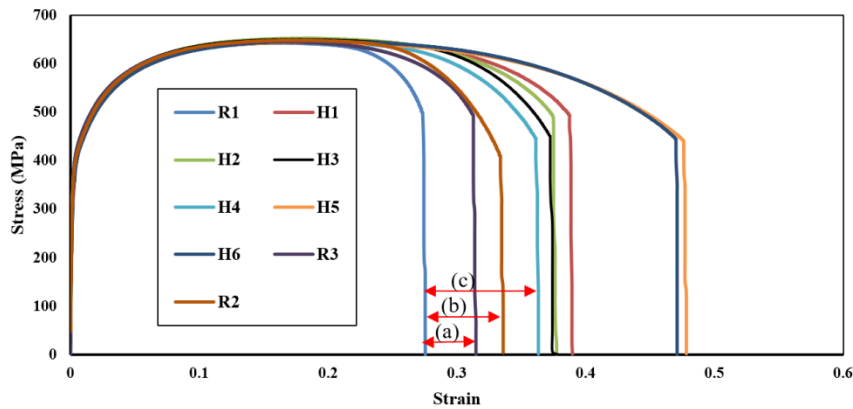
شکل ۴ اثر عرض ناحیه کشش بر نتایج آزمون کشش

اثر طول ناحیه کشش نیز به کمک بررسی نتایج نمونه‌های H4 و H6 مورد بررسی قرار گرفت. مطابق با شکل ۵، کاهش طول ناحیه کشش به ۷/۵ میلی‌متر موجب افزایش قابل توجه کرنش شکست و اختلاف ۷۱ درصدی در مقایسه با نتایج کرنش شکست حاصل از نمونه مرجع شبه‌استاتیکی می‌گردد. لذا کاهش طول ناحیه تغییر شکل، علی‌رغم اینکه شرایط را برای دستیابی به نرخ کرنش‌های بالاتر فراهم می‌کند، اما نتایج دقیقی در زمینه رفتار شکست ارائه نمی‌نماید. لذا، ضروری است تا محدوده‌ای بهینه برای پارامترهای مذکور (متناسب با شرایط آزمون و تجهیزات) انتخاب گردد.



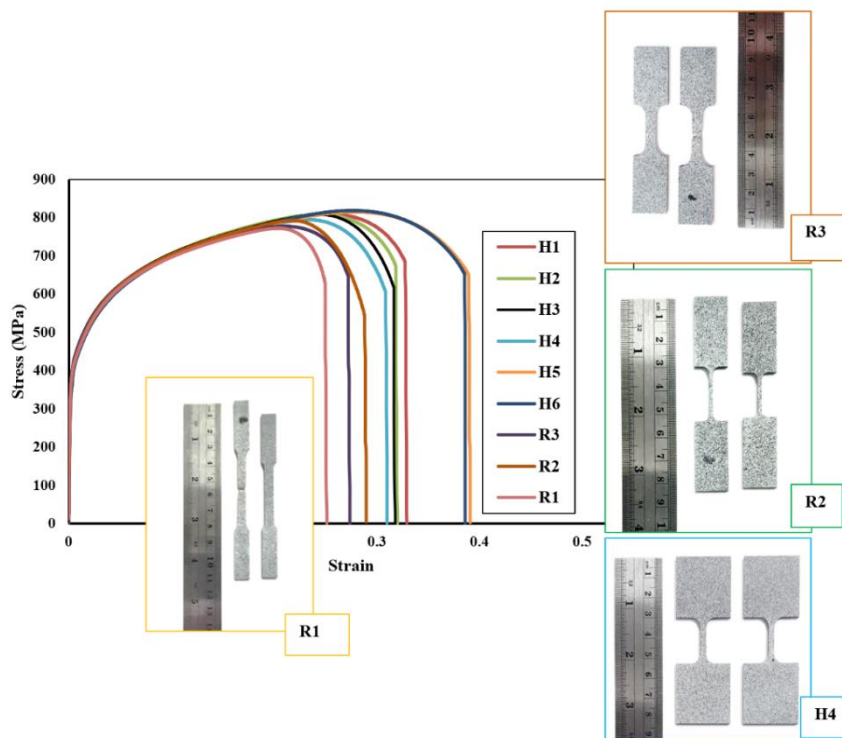
شکل ۵ اثر طول ناحیه کشش بر نتایج آزمون کشش

لازم به ذکر است که تقریباً تمامی نمونه‌های تحت بررسی، نتایج یکسانی در ناحیه مومسان قبل گلوپی ارائه می‌دهند. لذا، در صورتی که هدف آنالیز رفتار قبل از گلوپی باشد، نتایج حاصل از نمونه‌های ارائه شده قابل استناد می‌باشد. نتایج حاصل از تمامی نمونه‌های مورد بررسی در شکل ۶ نشان داده شده است (به جز نمونه H7 و H8 که با توجه به عرض ناحیه کشش و طول آن، اختلاف قابل توجهی با نمونه مرجع داشتند).



شکل ۶ نتایج حاصل از نمونه‌های کشش

مطابق با نتایج، نمونه‌های R3، H4 و R3 از جمله گزینه‌های مناسب برای آماده‌سازی نمونه‌های تست کشش می‌باشند که نتایج نزدیکی در مقایسه با نمونه آزمون کشش شبه استاتیکی ارائه می‌نمایند. لذا، می‌توان از آن‌ها به منظور استخراج رفتار مکانیکی مواد در هر دو آزمون شبه استاتیک و دینامیکی استفاده نمود. لازم به ذکر است که اختلاف کرنش شکست در نمونه‌های R2، R3 و H4 در مقایسه با نمونه استاندارد شبه استاتیکی به ترتیب برابر با ۲۱/۸۱، ۱۲ و ۳۲ درصد می‌باشد. در این میان، نمونه R3 قابل اطمینان‌ترین نمونه به منظور استفاده در دو نوع بارگذاری می‌باشد و با توجه به اینکه شرایط ابعادی استاندارد نمونه‌های تست کشش دینامیکی نیز در آن رعایت شده، علاوه بر ارائه نتایج شبه استاتیک، نتایج آن در نرخ کرنش‌های فوق سریع (که نمونه ASTM-E08 قابل استفاده نمی‌باشد) نیز مورد استناد می‌باشد. تصویر نمونه‌های نهایی و مقایسه نتایج تنش-کرنش حقیقی حاصل از آن‌ها نیز در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷ نتایج تنش-کرنش حقیقی آزمون‌های کشش

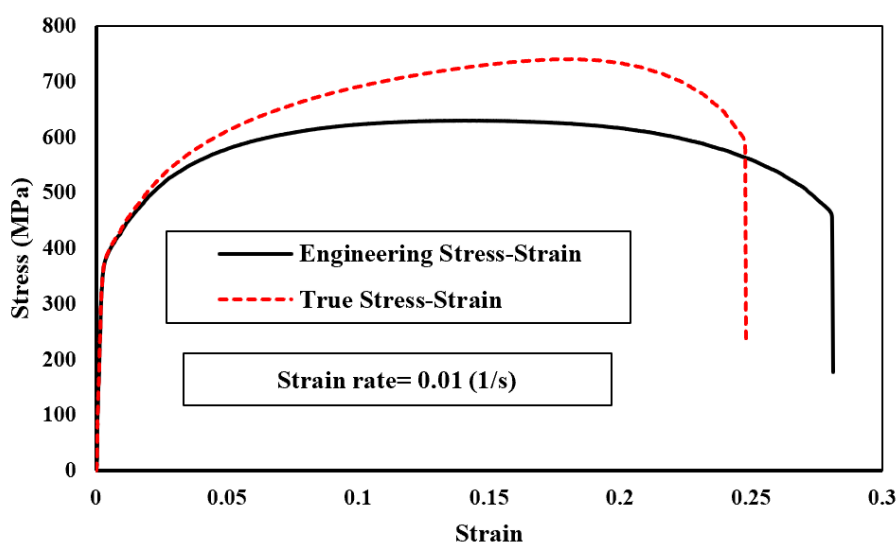
۴-۲- رفتار دینامیکی تغییر شکل

با توجه به نتایج بدست آمده در بخش‌های پیشین، نمونه R3 به عنوان گزینه نهایی برای استخراج خواص مکانیکی ورق فولادی DP 590 مورد استفاده قرار گرفت. لازم به ذکر است که نمونه مذکور به منظور استخراج رفتار مومسان شبه استاتیکی و دینامیکی تحت بررسی قرار گرفت. به منظور دستیابی به رفتار ورق در نرخ کرنش‌های ۰/۰۱، ۰/۱، ۱، ۱۰ و $\frac{1}{s}$ ، آزمون کشش با سرعت فک ۰/۱۵ تا ۴۵۰ میلی‌متر بر ثانیه انجام شد. تصویر نمونه‌ها و دستگاه تست کشش در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸ دستگاه تست کشش تک محوری دینامیکی

نرخ کرنش ۰/۰۱ به عنوان نرخ کرنش مرجع در نظر گرفته شده و در ابتدا آزمون کشش تک محوری در این نرخ کرنش (سرعت بارگذاری ۰/۱۵ میلی‌متر بر ثانیه) انجام شد. نتایج تنش-کرنش حقیقی در نرخ تغییر شکل ۰/۰۱ در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۹ نمودار تنش-کرنش حقیقی در نرخ کرنش $\frac{1}{s}$

به منظور تعیین رفتار مومسان در نرخ کرنش‌های بالا، آزمون کشش تک محوری در نرخ کرنش‌های ۰/۱ تا ۳۰ نیز مورد بررسی قرار گرفت و نتایج تنش-کرنش تا لحظه شکست استخراج گردید. نتایج تنش-کرنش حقیقی در نرخ کرنش‌های مذکور در شکل ۱۰ نشان داده شده است. نتایج حاصل از آزمون‌های کشش مبنای محاسبه معادله ساختاری (جانسون-کوک) به منظور توصیف رفتار وابسته به نرخ آلیاژ مذکور قرار گرفت.

معادله ساختاری جانسون-کوک از سه بخش به منظور در نظر گرفتن اثر کرنش سختی، نرخ کرنش و دما بر تنش جریان تشکیل می‌گردد. در شرایطی که اثر دما ناچیز است، ضرایب مربوط به آن قابل حذف شدن می‌باشند [۲۵]. شکل ساده شده معادله ساختاری مذکور در معادله ۱ نشان داده شده است.

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)(1 + C \ln \varepsilon^*) \quad (1)$$

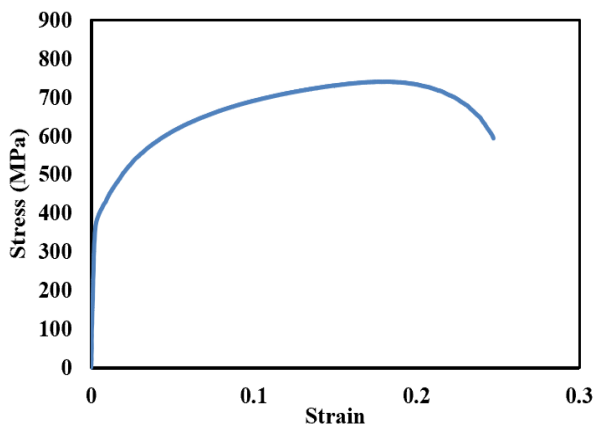
ε^* در معادله ۱ معادل با نسبت نرخ کرنش به نرخ کرنش مرجع $\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)$ می‌باشد. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، نرخ کرنش مرجع در پژوهش حاضر، برابر با ۰/۰۱ در نظر گرفته شد. پارامترهای A ، B و n از طریق نتایج آزمون شبه استاتیک در نرخ کرنش مرجع قابل دستیابی است. در این شرایط معادله فوق به شکل ساده شده (معادله ۲) زیر می‌باشد:

$$\sigma = A + B\varepsilon^n \quad (2)$$

پارامتر A در معادله ۲ تسلیم اولیه ماده حین تغییر شکل می‌باشد. مطابق با نتایج بدست آمده مقدار مذکور برابر با ۳۹۵/۱۹ می‌باشد. فرم لگاریتمی معادله ۲ در معادله ۳ بیان شده است.

$$\ln(\sigma - A) = \ln B + n \ln \varepsilon \quad (3)$$

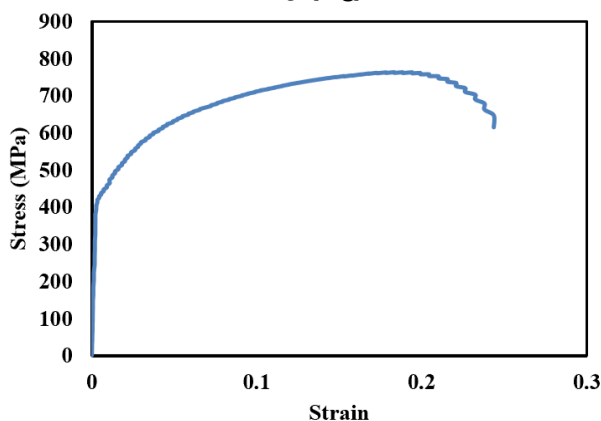
لذا، با اعمال رگرسیون خطی در نمودار $\ln(\sigma - A)$ بر حسب $\ln \varepsilon$ ، ضرایب n و B تعیین می‌گردد که به ترتیب معادل با شیب و عرض از مبدا نمودار می‌باشند.



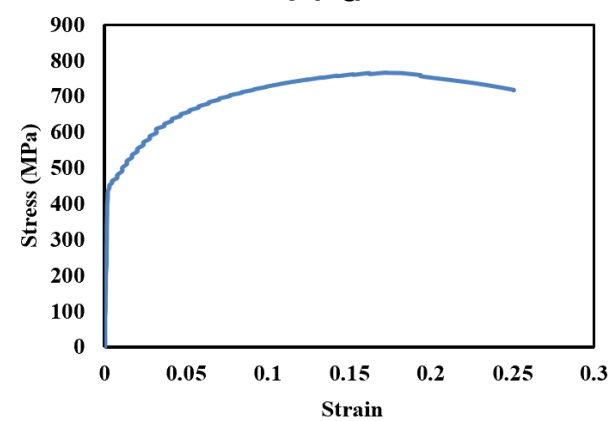
نرخ کرنش = ۰/۱



نرخ کرنش = ۱



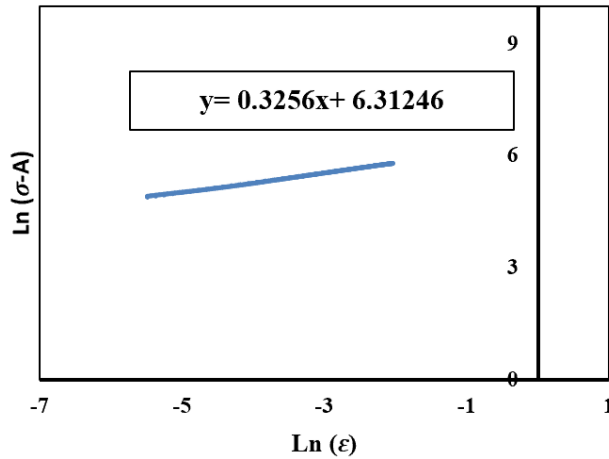
نرخ کرنش = ۱۰



نرخ کرنش = ۳۰

شکل ۱۰ نمودار تنش-کرنش حقیقی وابسته به نرخ کرنش

نمودار $\ln(\sigma - A)$ بر حسب $\ln \varepsilon$ در شکل ۱۱ نشان داده شده است. مطابق با نتایج شیب نمودار برابر با 0.3256 می باشد که این مقدار معادل با پارامتر n در معادله ساختاری مورد نظر می باشد. همچنین، عرض از مبدا برابر با 6.31246 می باشد که به توجه به معادله ۳، ضریب B برابر با $551/4$ می گردد.



شکل ۱۱ نمودار $\ln(\sigma - A)$ بر حسب $\ln \varepsilon$

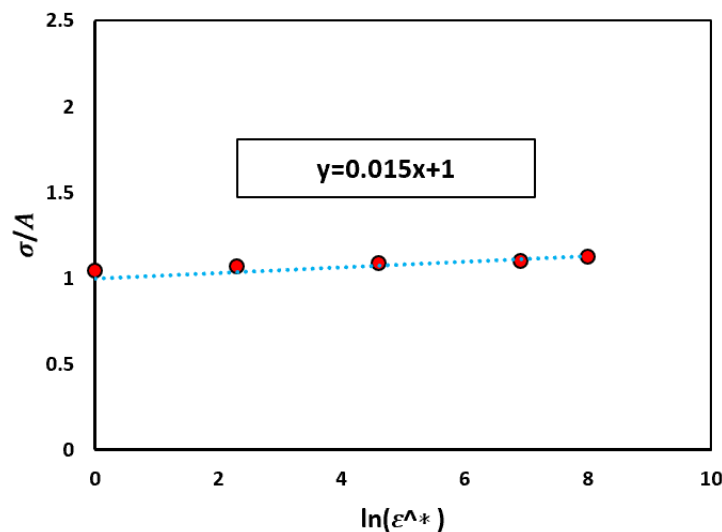
ضریب حساسیت به نرخ نیز از طریق معادله ۴ قابل محاسبه است.

$$\frac{\sigma}{A + B\varepsilon^n} = 1 + C \ln \varepsilon^* \quad (4)$$

در شرایطی که کرنش معادل پلاستیک برابر با صفر باشد، رابطه بین تنش تسلیم و نرخ کرنش به صورت معادله ۵ قابل توصیف می باشد.

$$\frac{\sigma}{A} = 1 + C \ln \varepsilon^* \quad (5)$$

با توجه به نتایج بدست آمده در پژوهش حاضر (آزمون های انجام شده در نرخ مرجع و نرخ کرنش های 0.1 تا 30)، میزان حساسیت رفتار مومسان به نرخ کرنش معادل با 0.015 می باشد (شکل ۱۲).



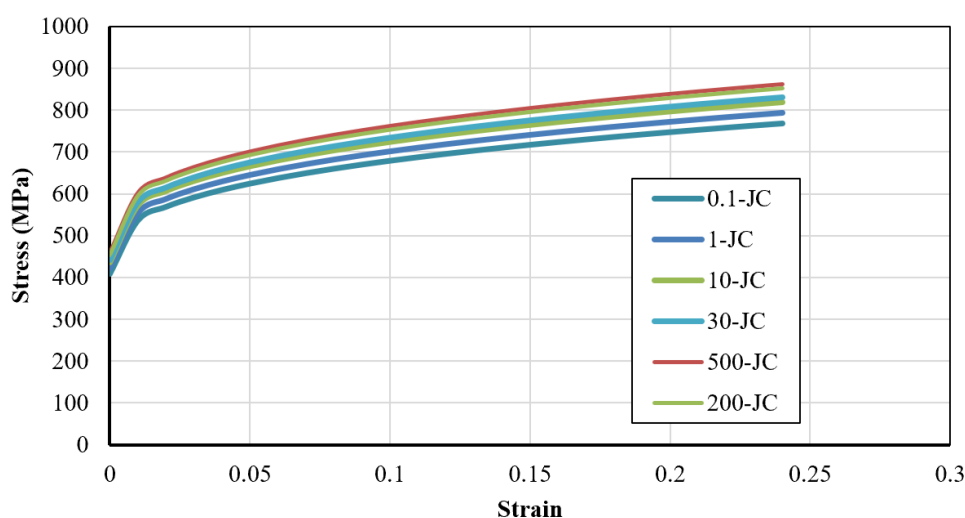
شکل ۱۲ تعیین میزان حساسیت رفتار مومسان به نرخ تغییر شکل

با توجه به نتایج بدست آمده، ضرایب معادله جانسون-کوک در جدول ۳ خلاصه شده است.

جدول ۳ ضرایب معادله ساختاری جانسون-کوک

پارامتر/واحد	A (MPa)	B (MPa)	n	C
مقدار	۳۹۵/۱۹	۵۵۱/۴	۰/۳۲۵۶	۰/۰۱۵

در نهایت، با توجه به روش ارائه شده در پژوهش حاضر، نتایج حاصل از رفتار مومسان وابسته به نرخ کرنش (دینامیکی) بر اساس معادله ساختاری کالیبره شده در پژوهش حاضر در نرخ کرنش‌های ۰/۱ تا ۵۰۰ تعیین شده و در شکل ۱۳ نشان داده شده است.



شکل ۱۳ رفتار مومسان وابسته به نرخ کرنش بر اساس معادله ساختاری جانسون-کوک

۵- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر رفتار مشخصه‌یابی رفتار مومسان ورق DP590 در محدوده تغییرشکل شبه استاتیک و دینامیکی بررسی شد. با توجه به اثرگذاری هندسه آزمون در نتایج تعیین رفتار ورق‌های فلزی، هندسه‌های مختلفی برای تعیین رفتار مومسان طراحی و مورد ارزیابی قرار گرفت. اثر پارامترهای هندسی بر نتایج حاصل از آزمون‌های کشش تک محوری ارزیابی شده و نمونه‌ای مناسب جهت استخراج خواص مکانیکی دینامیکی و شبه استاتیکی ارائه شد. همچنین، با انجام آزمون‌های تجربی در محدوده نرخ کرنش ۰/۱ تا ۳۰ معادله ساختاری مناسب جهت توصیف رفتار ورق مورد نظر ارائه گردید. مهم‌ترین نتایج حاصل از پژوهش به شرح زیر است:

- افزایش شعاع انحنای نمونه آزمون موجب افزایش کرنش شکست در مقایسه با نتایج حاصل از آزمون کشش با استفاده از نمونه رایج تست کشش تک محوری می‌گردد.
- کاهش عرض ناحیه کشش موجب افزایش انطباق رفتار شکست در نتایج تست کشش تک محوری می‌گردد. به بیان دیگر، کرنش شکست از ۰/۳۸۸ در نمونه H1 که ۰/۱۱۴ اختلاف با نمونه R1 دارد به مقدار ۰/۳۶۱ کاهش می‌یابد که بیانگر کاهش اختلاف (از ۰/۱۱۴ به ۰/۰۸۷) با نمونه مرجع شبه استاتیکی می‌باشد.
- کاهش طول ناحیه کشش به ۷/۵ میلی‌متر موجب افزایش قابل توجه کرنش شکست و اختلاف ۷۱ درصدی در مقایسه با نتایج کرنش شکست حاصل از نمونه مرجع شبه استاتیکی می‌گردد. لذا کاهش طول ناحیه تغییر شکل، علی‌رغم اینکه شرایط را برای دستیابی به نرخ کرنش‌های بالاتر فراهم می‌کند، اما نتایج دقیقی در زمینه رفتار شکست ارائه نمی‌نماید.
- یکی از گزینه‌های مناسب برای انجام تست مشخصه‌یابی خواص مواد که قابلیت به‌کارگیری در هر دو تست شبه استاتیک و دینامیکی را داشته باشد، نمونه‌ای با طول گیج ۱۵، شعاع گوشه و عرض ناحیه تغییرشکل ۶ میلی‌متری می‌باشد. اختلاف کرنش شکست در نمونه مذکور در مقایسه با نمونه استاندارد شبه استاتیکی برابر با ۱۲ درصد می‌باشد.

- مطابق با نتایج، معیار جانسون-کوک با در نظر گرفتن حساسیت به نرخ 0.15 قابلیت تخمین رفتار مومسان وابسته نرخ آلیاژ مذکور در محدوده مورد نظر را دارا می‌باشد. همچنین، رفتار آلیاژ مورد نظر در نرخ کرنش‌های بالاتر نیز با کالیبراسیون کامل معیار به کمک نتایج آزمون کشش با نمونه R3 در نرخ کرنش 0.1 تا 30 قابل تعیین می‌باشد.

تشکر و قدردانی

از حمایت‌های مالی شرکت توسعه نورد علم و صنعت جهت انجام پروژه حاضر، تشکر می‌گردد.

References

- [1] Fang X, Li D. Lightweight concept design of an economical multi-material vehicle door with fiber-reinforced thermoplastics. *International Journal of Automotive Technology*. 2023 Jun;24(3):719-37. doi: [10.1007/s12239-023-0060-3](https://doi.org/10.1007/s12239-023-0060-3)
- [2] Meilinger Á, Prém L, Abd Al Al SA, Gáspár M. Comparison of RSW technologies on DP steels with modified instrumented Charpy impact test. *Welding in the World*. 2023 Aug;67(8):1911-22. doi: [10.1007/s40194-023-01526-2](https://doi.org/10.1007/s40194-023-01526-2)
- [3] Lukoševičius V, Juodvalkis D, Keršys A, Makaras R. Investigation of Functionality of Vehicle Crumple Zones Recovered after a Traffic Accident. *Applied Sciences*. 2023 Jan 28;13(3):1686. doi: [10.3390/app13031686](https://doi.org/10.3390/app13031686)
- [4] Guan W, Yu Y, Gao G. Crashworthiness performance and multiobjective optimization of a combined splitting circular tube energy absorber under eccentric impact for subway vehicles. *International Journal of Impact Engineering*. 2021 Dec 1;158:104006. doi: [10.1016/j.ijimpeng.2021.104006](https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2021.104006)
- [5] Yang K, Sun Y, Yao Y, Zhu W. A universal strategy for flexible, efficient and programmable crashworthiness under quasi-static and dynamic loadings based on plastic deformation of metals. *Materials & Design*. 2022 Oct 1;222:111027. doi: [10.1016/j.matdes.2022.111027](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.111027)
- [6] Nanda T, Singh V, Singh G, Singh M, Kumar BR. Processing routes, resulting microstructures, and strain rate dependent deformation behaviour of advanced high strength steels for automotive applications. *Archives of civil and mechanical engineering*. 2021 Mar;21:1-24. doi: [10.1007/s43452-020-00149-4](https://doi.org/10.1007/s43452-020-00149-4)
- [7] Refiadi G, Aisyah IS, Siregar JP. Trends in lightweight automotive materials for improving fuel efficiency and reducing carbon emissions. *Automotive Experiences*. 2019 Oct 26;2(3):78-90. doi: [10.31603/ae.v2i3.2984](https://doi.org/10.31603/ae.v2i3.2984)
- [8] Munno T. Advanced high strength steels. *Steel Times International*. 2019 Jul 1;43(5):30-2.
- [9] Demeri MY. Advanced high-strength steels: science, technology, and applications. *ASM international*; 2013 Aug 1.
- [10] Sonboli A, Nematzadeh F, Mojangi A, Nouri A. Construction of constitutive equations, modified dynamic materials model and strain-rate sensitivity coefficient map for investigation of hot and warm working instability of 2205 duplex stainless steel. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2022 Mar 16;8(12):1-0. [In Persian]
- [11] Rezaei Ashtiani H, Mohammadi M. Prediction of hot deformation behavior of 304 stainless steel using Johnson-Cook equation. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2022 Mar 16;8(12):34-43. [In Persian]
- [12] La Rosa G, Risitano A, Mirone G. Postnecking elastoplastic characterization: Degree of approximation in the Bridgman method and properties of the flow-stress/true-stress ratio. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2003 Mar;34:615-24. doi: [10.1007/s11661-003-0096-y](https://doi.org/10.1007/s11661-003-0096-y)
- [13] Defaisse C, Mazière M, Marcin L, Besson J. Ductile fracture of an ultra-high strength steel under low to moderate stress triaxiality. *Engineering Fracture Mechanics*. 2018 May 1;194:301-18. doi: [10.1016/j.engfracmech.2017.12.035](https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.12.035)
- [14] Dunand M, Mohr D. On the predictive capabilities of the shear modified Gurson and the modified Mohr-Coulomb fracture models over a wide range of stress triaxialities and Lode angles. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2011 Jul 1;59(7):1374-94. doi: [10.1016/j.jmps.2011.04.006](https://doi.org/10.1016/j.jmps.2011.04.006)
- [15] Mirnia MJ, Shamsari M. Numerical prediction of failure in single point incremental forming using a phenomenological ductile fracture criterion. *Journal of Materials Processing Technology*. 2017 Jun 1;244:17-43. doi: [10.1016/j.jmatprotec.2017.01.029](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.01.029)
- [16] Talebi-Ghadikolaee H, Naeini HM, Ghadikolaee ET, Mirnia MJ. Predictive modeling of damage evolution and ductile fracture in bending process. *Materials Today Communications*. 2022 Jun 1;31:103543. doi: [10.1016/j.mtcomm.2022.103543](https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.103543)
- [17] Zeinali MS, Naeini HM, Talebi-Ghadikolaee H, Panahizadeh V. Numerical and experimental investigation of fracture in roll forming process using Lou-Huh fracture criterion. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2022 Dec;47(12):15591-602. doi: [10.1007/s13369-022-06662-3](https://doi.org/10.1007/s13369-022-06662-3)

- [18] Majzooobi GH, Freshteh-Saniee F, Khosroshahi SF, Mohammadloo HB. Determination of materials parameters under dynamic loading. Part I: Experiments and simulations. *Computational materials science*. 2010 Aug 1;49(2):192-200. doi: [10.1016/j.commatsci.2010.03.054](https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2010.03.054)
- [19] Liu W, Guines D, Léotoing L, Ragneau E. Strain rate dependent hardening of DP600 sheet metal for large strains under in-plane biaxial loadings. In *AIP Conference Proceedings 2016 Oct 19 (Vol. 1769, No. 1)*. AIP Publishing. doi: [10.1063/1.4963440](https://doi.org/10.1063/1.4963440)
- [20] Erice B, Roth CC, Mohr D. Stress-state and strain-rate dependent ductile fracture of dual and complex phase steel. *Mechanics of Materials*. 2018 Jan 1;116:11-32. doi: [10.1016/j.mechmat.2017.07.020](https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2017.07.020)
- [21] Cerik BC, Choung J. Rate-dependent combined necking and fracture model for predicting ductile fracture with shell elements at high strain rates. *International Journal of Impact Engineering*. 2020 Dec 1;146:103697. doi: [10.1016/j.ijimpeng.2020.103697](https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2020.103697)
- [22] Smerd R, Winkler S, Salisbury C, Worswick M, Lloyd D, Finn M. High strain rate tensile testing of automotive aluminum alloy sheet. *International Journal of Impact Engineering*. 2005 Dec 1;32(1-4):541-60. doi: [10.1016/j.ijimpeng.2005.04.013](https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2005.04.013)
- [23] Zhumagulov A, Abedini A, Rahmaann T, Imbert J, Butcher C, Worswick M, Malcolm S, Dykeman J, Ezzat H. High rate characterization of three DP980 steels. In *EPJ Web of Conferences 2018 (Vol. 183, p. 02060)*. EDP Sciences. doi: [10.1051/epjconf/201818302060](https://doi.org/10.1051/epjconf/201818302060)
- [24] Huh H, Lim JH, Park SH. High speed tensile test of steel sheets for the stress-strain curve at the intermediate strain rate. *International Journal of Automotive Technology*. 2009 Apr;10:195-204. doi: [10.1007/s12239-009-0023-3](https://doi.org/10.1007/s12239-009-0023-3)
- [25] Qian LY, Fang G, Zeng P, Wang Q. Experimental and numerical investigations into the ductile fracture during the forming of flat-rolled 5083-O aluminum alloy sheet. *Journal of Materials Processing Technology*. 2015 Jun 1;220:264-75. doi: [10.1016/j.jmatprotec.2015.01.031](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.01.031)