



# Experimental And Numerical Investigation of Tensile Properties and Formability of St14 Steel Sheet at Medium Strain Rate via Impact Forming

## ARTICLE INFO

### Article Type

Original Research

### Authors

Amini A<sup>1</sup>  
Alavi Nia A<sup>1\*</sup>

### How to cite this article

Amini A, Alavi Nia A. Experimental And Numerical Investigation of Tensile Properties and Formability of St14 Steel Sheet at Medium Strain Rate via Impact Forming. Modares Mechanical Engineering; \*(\*)\*\*\*\*.\*\*\*\*.

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

### \*Correspondence

Address: P.O.B. 651754161  
Hamedan, Iran  
alavi495@basu.ac.ir

### Article History

Received: February 23, 2023  
Accepted: May 08, 2023  
ePublished: June 16, 2023

## ABSTRACT

Considering the increasing use of high-speed presses, such as high-speed servo presses, in the automotive industry, it seems necessary to investigate the formability of sheet metals in this range of forming speed. Therefore, this study has been conducted to investigate the effect of medium strain rate forming on the formability of the St14 steel sheet. Tensile tests were done at various strain rates, and formability tests were performed to create forming limit curves at the quasi-static and impact forming. Finite element simulation was used to extract the numerical forming limit curves. The material model was entered into the simulation by considering the strain rate effect using the VUARD subroutine. The results of tensile tests showed that some influential strain-hardening indicators reduce with strain rate enhancement. Also, using the material model, the tensile behavior was predicted with good accuracy at each strain rate. In impact forming, fracture and strain concentration was transferred to the dome center, and the dome height in biaxial stretching was reduced by 17.1% compared to quasi-static forming due to the variation of frictional conditions. The forming limit curve of impact forming was shifted to the lower values and right side of the forming limit diagram compared to quasi-static forming. In impact forming, the forming limit in plane-strain condition was reduced by 8.1% compared to quasi-static forming. Also, the simulation results, including fracture position, forming limit curve, and dome height in both forming processes, were in good agreement with the experimental results.

**Keywords** Tensile Properties, Formability, Forming Limit Curve, Medium Strain Rate, Impact Forming, St14 Steel.

## CITATION LINKS

1- Metal forming: mechanics and metallurgy. 2- Plastic instability and fracture in sheets stretched over rigid punches. 3- Application of strain analysis to sheet metal... 4- A simple forming-limit curve technique and results on aluminum alloys. InInt. 5- Hyperplasticity: enhanced formability at high rates. 6- Investigating of the tensile mechanical properties of... 7- Effects of strain rate on austenite stability and... 8- Dynamic tensile behavior of S690... 9- Dynamic tensile behavior of steel strands at different strain rates. 10- Enhanced formability of interstitial... 11- High-velocity metal forming. 12- Experimental investigation of sheet metal formability under. 13- Numerical study of the effect of strain rate on... 14- Investigation of forming limit of brass alloy c260. 15- Forming limit diagram of auto-body steel sheets... 16- Effect of punch speed on... 17- Numerical Evaluation of the Effect of Forming Velocity on... 18-. An investigation into the effect of... 19- Survey the effect of forming speed on fld for Al 6061 sheets. 20- Introduction of High-Speed Linear Servo Press-Line (HLS) Product. 21- Microstructural characterization of blanked surface... 22- Mechanical servo press technology for metal forming. 23- Mechanisms, classifications, and applications of servo presses. 24- Ferritic steels: Optimization of hot-rolled. 25- Grid patterns by laser. 26- Abaqus V. Documentation. 27- A method for determining the coefficient of friction. 28- A review of parameters and processes that... 29- experimental results and constitutive descriptions for metals... 30- A theory of the yielding and plastic flow of... 31- Mechanics of sheet metal forming. 32- Investigation of formability of low carbon steel sheets by forming limit diagrams. 33- Theoretical study of the dynamic tensile test

## بررسی تجربی و عددی خواص کششی و شکل‌پذیری ورق فولادی St14 در شکل‌دهی ضربه‌ای با نرخ کرنش متوسط

احمد امینی<sup>۱</sup>، علی علوی‌نیا\*

<sup>۱</sup> گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان، ایران

### چکیده

با توجه به گسترش روزافزون استفاده از پرس‌های پرس‌سخت مثل سروو پرس‌های سرعت بالا در صنعت خودروسازی، بررسی شکل‌پذیری ورق‌های فلزی در این محدوده سرعت شکل‌دهی ضروری به نظر می‌رسد. بنابراین، این تحقیق با هدف بررسی اثر شکل‌دهی در نرخ کرنش متوسط بر شکل‌پذیری ورق فولادی St14 انجام شده است. آزمایش کشش در نرخ‌های کرنش مختلف انجام شد و آزمایش‌های شکل‌پذیری برای ایجاد منحنی‌های حد شکل‌دهی، در شکل‌دهی شبه‌استاتیکی و شکل‌دهی ضربه‌ای صورت گرفت. جهت استخراج منحنی حد شکل‌دهی عددی، از شبیه‌سازی اجزای محدود استفاده شد. مدل مادی با در نظر گرفتن اثر نرخ کرنش توسط زیربرنامه ویوهارد وارد شبیه‌سازی شد. نتایج آزمایش کشش نشان داد که با افزایش نرخ کرنش، چند شاخص مهم کرنش سختی کاهش می‌یابد. هم‌چنین، رفتار کششی در نرخ‌های کرنش مختلف توسط مدل مادی با دقت خوبی پیش‌بینی شد. در شکل‌دهی ضربه‌ای، به دلیل تغییر شرایط اصطکاکی، شکست و تمرکز کرنش به مرکز گنبد منتقل شد و ارتفاع گنبد در حالت کشش دوماحوره ۱۷/۱٪ نسبت به شکل‌دهی شبه‌استاتیکی کاهش یافت. منحنی حد شکل‌دهی در شکل‌دهی ضربه‌ای در مقایسه با شکل‌دهی شبه‌استاتیکی به طرف پایین و سمت راست نمودار حد شکل‌دهی جابجا شد. در شکل‌دهی ضربه‌ای، حد شکل‌دهی در حالت کرنش صفحه‌ای در مقایسه با شکل‌دهی شبه‌استاتیکی، ۸/۱٪ کاهش یافت. هم‌چنین، نتایج شبیه‌سازی شامل موقعیت شکست، منحنی حد شکل‌دهی و ارتفاع گنبد در هر دو روش شکل‌دهی انطباق خوبی با نتایج تجربی داشت.

**کلیدواژه‌ها:** خواص کششی، شکل‌پذیری، منحنی حد شکل‌دهی، نرخ کرنش متوسط، شکل‌دهی ضربه‌ای، فولاد St14

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۱۸

\*نویسنده مسئول: alavi495@basu.ac.ir

### ۱- مقدمه

ورق‌های فولادی کم کربن فریتی کاربرد زیادی در صنعت خودروسازی به‌ویژه در بدنه خودرو دارند. با توجه به اهمیت شکل‌دهی این نوع ورق‌ها در بدنه خودرو، بررسی شکل‌پذیری آن‌ها ضروری به نظر می‌رسد. انجام موفقیت‌آمیز فرآیندهای شکل‌دهی ورق‌های فلزی نیازمند تعیین شکل‌پذیری آن‌ها می‌باشد. نمودارهای حد شکل‌دهی (FLD) حد کرنش را در شروع گلویی شدن موضعی یا پارگی توصیف می‌کنند و شکل‌پذیری را به صورت تابعی از حالت کرنش (نسبت کرنش اصلی بیشینه به کرنش اصلی کمینه) نشان می‌دهند [1]. کرنش‌های حد شکل‌دهی به صورت تجربی ابتدا توسط کیلر و بکوفن [2] در سمت راست نمودار حد شکل‌دهی به دست آمد. گودوین [3] نیز سمت چپ این نمودار را با

انجام چندین نوع آزمایش تعیین کرد. به این ترتیب، نمودار حد شکل‌دهی کامل شده و حتی آن را نمودار کیلر-گودوین نیز می‌نامند. یکی از روش‌های پرکاربرد تعیین تجربی نمودار حد شکل‌دهی که به عنوان کشش خارج از صفحه نیز شناخته می‌شود، توسط هکر [4] پیشنهاد شد.

اثر نرخ کرنش بر خواص مکانیکی ورق‌های فلزی یکی از موضوعات مهم مورد مطالعه بوده است. بالانتیرام و همکاران [5] نشان دادند که با افزایش سرعت شکل‌دهی شکل‌پذیری افزایش می‌یابد که علت آن اثرات اینرسی ذکر شده است. خلیفه و همکاران [6] مشاهده نمودند که در آزمایش کشش فولادهای کم کربن با افزایش نرخ کرنش، تنش تسلیم افزایش می‌یابد. در تحقیقی دیگر در محدوده نرخ کرنش متوسط، برخی خواص مکانیکی فولاد آلیاژی مانند استحکام کششی نهایی و تغییر شکل یکنواخت بررسی شد [7]. هم‌چنین، در برخی دیگر از فولادهای آلیاژی مشاهده شد که با افزایش نرخ کرنش، تنش تسلیم و استحکام کششی نهایی وابستگی مثبتی به نرخ کرنش دارند [8,9].

در سال‌های اخیر روش‌های شکل‌دهی سرعت بالا به صورت گسترده‌ای مورد توجه قرار گرفته‌اند. روش‌های شکل‌دهی سرعت بالا و یا شکل‌دهی نرخ کرنش بالا، شامل پرس‌های ضربه‌ای، شکل‌دهی الکترومغناطیسی، الکتروهیدرولیکی و انفجاری می‌شوند [10]. شکل‌دهی با سرعت بالاتر از ۵۰ متر بر ثانیه شکل‌دهی با سرعت بالا محسوب شده [11] و سرعت‌های کم‌تر، سرعت متوسط (یا نرخ کرنش متوسط) در نظر گرفته می‌شود.

داریانی و همکاران [12] به بررسی شکل‌پذیری ورق‌های فولادی ۱۰۴۵ و آلومینیومی ۶۰۶۱ در سه نرخ کرنش شبه‌استاتیکی، متوسط و بالا پرداختند. آزمایش‌های نرخ کرنش متوسط به کمک دستگاه سقوط وزنه (drop hammer) با سرعت بیشینه ۶ متر بر ثانیه انجام شدند. نتایج نشان داد که در شکل‌دهی ضربه‌ای، کرنش شکست به‌ویژه در سمت راست نمودار حد شکل‌دهی افزایش می‌یابد. سردار و همکاران [13] نیز به بررسی شکل‌پذیری فولاد St13 بر اساس مدل مارسینیاک کوزینسکی و انجام آزمایش کشش عمیق توسط دستگاه سقوط وزنه، بدون استخراج حد شکل‌دهی تجربی، پرداختند و نتایج نشان داد که با افزایش نرخ کرنش حد شکل‌دهی افزایش می‌یابد. در پژوهشی مشابه، ظهور و موسوی به بررسی شکل‌پذیری ورق از جنس برنج ۲۶۰ در شکل‌دهی‌های هیدرودینامیکی و الکتروهیدرولیکی پرداختند [14]. نتایج نشان داد که با افزایش نرخ کرنش حد شکل‌دهی افزایش می‌یابد. کیم و همکاران [15] برای بررسی شکل‌پذیری دو نوع ورق فولادی در سرعت شکل‌دهی بین ۲/۳ تا ۱۰ متر بر ثانیه، یک دستگاه شکل‌دهی با سرعت بالا طراحی کردند. نتایج نشان داد که در سرعت شکل‌دهی بالا، سطح منحنی حد شکل‌دهی (FLC) در حالت کشش دوماحوره کاهش می‌یابد که علت آن ایجاد شکست برشی بیان شده است.

## ۲- آزمایش‌های تجربی

### ۲-۱- خواص ماده

در این پژوهش از ورق فولادی St14 با ضخامت ۱ میلی‌متر استفاده شد. St14 یک فولاد کم کربن با قابلیت کشش عمیق می‌باشد<sup>[24]</sup> که به دلیل شکل‌پذیری بالا کاربرد زیادی در بدنه خودرو دارد. ترکیب شیمیایی این ماده توسط آزمایش کوانتومتری استخراج شد که در جدول ۱ نشان داده شده است.

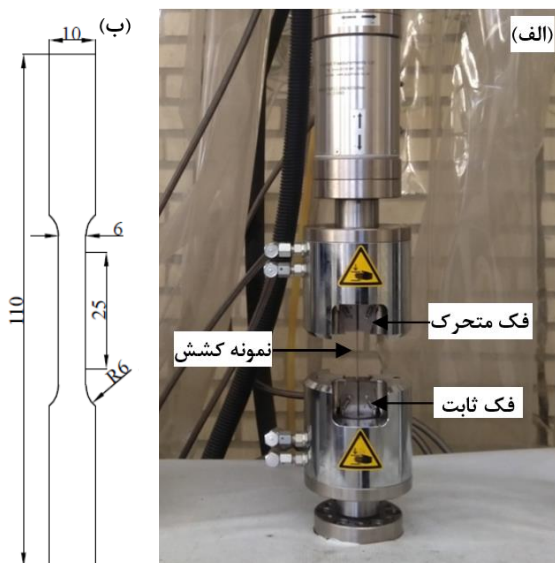
جدول ۱) ترکیب شیمیایی فولاد St14 (درصد وزنی)

Cr	Al	Ni	Si	Mn	C	Fe
۰/۰۱	۰/۰۰۵	۰/۰۲۶	۰/۰۱۳	۰/۲۲۸	۰/۰۴۵	پایه

### ۲-۲- آزمایش‌های کشش

به منظور بررسی خواص کششی این ماده، آزمایش کشش تک-محوره با استفاده از یک دستگاه کشش سروویدرولیک زوئیک (Zwick) ۲۰ کیلو نیوتن در پنج نرخ کرنش ۰/۰۰۱، ۰/۰۱، ۱، ۱۰ و ۱۰۰ بر ثانیه و در دمای اتاق انجام شد (شکل ۱ الف)). نمونه‌های کشش طبق استاندارد ASTM E8M توسط دستگاه وایرکات از ورق‌های پایه بریده شدند. جهت جلوگیری از اثر اندازه بر نتایج، هندسه نمونه-های کشش در همه نرخ‌های کرنش یکسان و مطابق شکل ۱ ب) در نظر گرفته شده و جهت نورد همه نمونه‌ها موازی جهت کشش بود. برای اطمینان از تکرارپذیری نتایج، در هر نرخ کرنش سه نمونه استفاده شد و مقدار میانگین خواص مکانیکی برای تجزیه و تحلیل‌های بعدی در نظر گرفته شد.

ضرایب ناهمسان‌گردی (r-value) در سه جهت صفر، ۴۵ و ۹۰ درجه نسبت به جهت نورد و در نرخ کرنش ۰/۰۰۱ بر ثانیه به دست آمد و میانگین وزنی مقادیر ناهمسان‌گردی (rm) طبق استاندارد ASTM E517 محاسبه شد (جدول ۲).



شکل ۱) الف) آزمایش کشش تک‌محوره توسط دستگاه کشش زوئیک و ب) ابعاد نمونه کشش

در بررسی اثر سرعت سنبه بر شکل‌پذیری فولاد زنگ نزن آستنیتی نشان داده شد که با افزایش سرعت شکل‌دهی از ۳ به ۳۰۰ میلی‌متر بر دقیقه، شکل‌پذیری کاهش می‌یابد<sup>[16]</sup>. در پژوهشی دیگر، منحنی حد شکل‌دهی تجربی فولاد St14 در سه سرعت ۱۰، ۲۰ و ۲۰۰ میلی‌متر بر دقیقه استخراج شد و نتایج نشان داد که با افزایش سرعت، حد شکل‌دهی افزایش می‌یابد<sup>[17]</sup>. در بررسی تجربی شکل-پذیری آلومینیوم ۳۱۰۵ در همین محدوده سرعت، افزایش شکل-پذیری با افزایش سرعت شکل‌دهی گزارش شده است<sup>[18]</sup>. در تحقیقی مشابه و در سرعت شکل‌دهی یکسان، افزایش سطح نمودار حد شکل‌دهی آلومینیوم ۶۰۶۱ گزارش شده است که علت آن اثر اصطکاک و شرایط تماسی ذکر شده است<sup>[19]</sup>.

امروزه استفاده از پرس‌های سرعت بالا مانند سروو پرس‌های خطی (linear servo-press) سرعت بالا در صنایع تولیدی که دارای انعطاف پذیری بالایی در خط تولید هستند<sup>[20]</sup> و پرس‌های با سرعت خیلی زیاد که دارای سرعت تا ۳۰۰۰ ضربه بر دقیقه (SPM) هستند<sup>[21]</sup> رو به گسترش بوده است. خودروسازان نیز از سروو پرس‌ها در فرایندهای شکل‌دهی ورق‌های بدنه خودرو به دلیل داشتن مزایایی مثل افزایش سرعت تولید، دقت ابعادی بالا و کنترل‌پذیری فرایند تولید استفاده روزافزونی داشته‌اند<sup>[22,23]</sup>. با توجه به این‌که فرایندهای شکل‌دهی مختلف در سرعت‌های مختلفی انجام می‌شود، بررسی شکل‌پذیری در محدوده نرخ کرنش متوسط ضروری به نظر می‌رسد. لازم به ذکر است که چون سرعت پرس‌های ضربه‌ای و یا سروو هیدرولیک زیر ۱۰ متر بر ثانیه است، در محدوده سرعت متوسط و یا نرخ کرنش متوسط قرار می‌گیرند که اصطلاح نرخ کرنش متوسط بیش‌تر کاربرد داشته است<sup>[12,14]</sup>.

با توجه به کاربرد زیاد ورق‌های فولادی St14 در ساخت بدنه خودرو و گسترش استفاده از پرس‌های سرعت بالا در صنعت، بررسی شکل‌دهی این جنس در محدوده نرخ کرنش متوسط ضروری به نظر می‌رسد. با وجود بررسی شکل‌پذیری این فولاد در سرعت زیر ۰/۰۱ متر بر ثانیه<sup>[17]</sup>، تاکنون تحقیقی جهت بررسی اثر نرخ کرنش متوسط شکل‌دهی توسط شکل‌دهی ضربه‌ای بر شکل‌پذیری و حد شکل‌دهی این ماده به صورت تجربی انجام نشده است. بنابراین، در این پژوهش اثر نرخ کرنش متوسط شکل‌دهی بر شکل‌پذیری فولاد St14 بررسی شد. بدین منظور از آزمایش کشش در نرخ‌های کرنش مختلف جهت پیش‌بینی رفتار کششی ماده استفاده شد و منحنی حد شکل‌دهی به صورت تجربی در شکل‌دهی‌های شبه‌استاتیکی و ضربه‌ای به دست آمد و نتایج آن با هم مقایسه شد. علاوه بر آن، شبیه‌سازی عددی فرایند شکل‌دهی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس انجام و خروجی‌های آن شامل موقعیت شکست، ارتفاع گنبد و منحنی حد شکل‌دهی با نتایج تجربی مقایسه شد.

جدول ۲) ضرایب ناهمسان‌گردی ورق St14

جنس	r0	r45	r90	rm
St14	۱/۵	۱/۳۵	۱/۹۳	۱/۵۳

### ۲-۳- آزمایش‌های شکل‌پذیری

برای بررسی تجربی شکل‌پذیری ورق‌ها، از قالب شکل‌دهی با سنبه سرکروی برای ایجاد نمودار حد شکل‌دهی در بارگذاری شبه-استاتیک و ضربه‌ای استفاده شد. بدین منظور، یک سنبه سرکروی به قطر ۱۰/۶ میلی‌متر و قالب و نگهدارنده همراه با مهره کششی (draw bead) به قطر ۱۳۲/۶ میلی‌متر بر اساس استاندارد ASTM E2218 طراحی و ساخته شد.

برای به‌دست آوردن منحنی حد شکل‌دهی و دستیابی به مسیرهای کرنش مختلف، ورق‌ها به‌صورت نوارهای مستطیلی با طول ۲۰۰ میلی‌متر در امتداد جهت نورد و ۸ عرض مختلف از ۲۵ تا ۲۰۰ میلی‌متر (هر یک با اختلاف ۲۵ میلی‌متر نسبت به قبلی) بریده شدند. شبکه دایره‌ای دقیق با قطر ۲/۵ میلی‌متر توسط دستگاه لیزر فیبر ۱۰ وات روی سطح نمونه‌ها حک شد. حک لیزری در ورق‌های نورد سرد شده در مقایسه با روش‌های مرسوم مثل حک الکتروشیمیایی، دقیق‌تر و سریع‌تر است [25]. سطح تماس بین سنبه و نمونه‌ها با روغن معدنی به‌علاوه یک ورق پلی‌اتیلن دایره-ای روان‌کاری شد. نیروی نگهدارنده ۹ تا ۱۲ تن بر روی نمونه‌های با عرض مختلف اعمال شد. برای هر نمونه آزمایش‌ها سه بار تکرار شدند. برای بررسی تأثیر نرخ کرنش بر شکل‌پذیری، آزمایش‌ها در دو سرعت شکل‌دهی شامل شرایط شبه‌استاتیکی و شکل‌دهی ضربه‌ای انجام شدند. قالب، آماده‌سازی نمونه و تنظیمات اولیه در هر دو روش آزمایش یکسان در نظر گرفته شد.

جهت به‌دست آوردن منحنی حد شکل‌دهی شبه‌استاتیک، آزمایش‌های شکل‌دهی شبه‌استاتیکی با استفاده از دستگاه سنتام ۱۵۰ کیلو نیوتن با سرعت حرکت سنبه ۲۵/۴ میلی‌متر بر دقیقه انجام شدند. آزمایش‌ها با افت ناگهانی نیروی عملی متوقف شدند. اجزای قالب و نحوه انجام آزمایش شکل‌دهی شبه‌استاتیکی در شکل ۲ نشان داده شده‌اند.

برای به‌دست آوردن منحنی حد شکل‌دهی در نرخ کرنش متوسط، با نصب سنبه سرکروی و قالب روی دستگاه آزمایش سقوط وزنه، آزمایش‌های شکل‌دهی انجام شدند. این آزمایش با سرعت سنبه ۷/۹ متر بر ثانیه در ارتفاع سقوط ۳/۲ متر و محدوده انرژی ۱/۱ تا ۱/۸ کیلوژول انجام شد. برای اطمینان از شکل‌دهی کامل نمونه-های مختلف تا زمان شکست، با تغییر وزنه‌های متصل به سنبه، انرژی مورد نظر انتخاب شد. در شکل ۳ تصویر چیدمان آزمایش شکل‌دهی با دستگاه سقوط وزنه نمایش داده شده است.



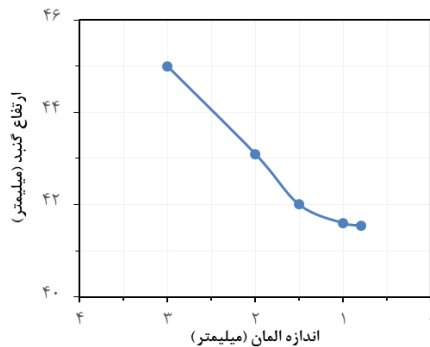
شکل ۲) الف) اجزای قالب شامل سنبه، قالب و ورق‌گیر و ب) قالب نصب شده روی دستگاه سنتام جهت انجام آزمایش شکل‌دهی شبه-استاتیکی



شکل ۳) چیدمان آزمایش شکل‌دهی توسط دستگاه سقوط وزنه

جهت توقف آزمایش در عمق نفوذ مورد نظر در نمونه‌های مختلف، استپ‌هایی از جنس فولاد کارپذیر و پلی‌تترا فلورو اتیلن (PTFE) با ضخامت‌های مختلف برای قرار دادن در زیر نمونه‌ها آماده شدند. با توجه به دشواری توقف آزمایش در لحظه وقوع شکست، ابتدا به‌کمک شبیه‌سازی‌های اولیه انرژی مورد نیاز جهت تغییر شکل کامل نمونه‌ها تخمین زده شد و عمق نفوذ سنبه برابر با شکل‌دهی شبه‌استاتیک در نظر گرفته شد. پس از انجام آزمایش‌های اولیه و مشاهده نمونه‌های تغییر شکل یافته، با تکرار آزمایش و تغییر ضخامت استپ‌ها، لحظه توقف آزمایش در مناسب‌ترین عمق نفوذ به‌دست آمد. پس از تغییر شکل، دایره‌ها در سه ناحیه ایمن، گلوبی و شکست به بیضی تبدیل شدند. قطر بزرگ و کوچک بیضی‌ها با استفاده از فیلم شفاف مایلر (Mylar) اندازه‌گیری شد و سپس،





شکل ۵) اثر اندازه المان بر ارتفاع گنبد ایجاد شده در شبیه‌سازی

تماس بین ورق و اجزای قالب از نوع سطح به سطح و با مدل اصطکاکی کولمب تعریف شد. در حالت شبه‌استاتیکی، ضریب اصطکاک بر اساس روش قش<sup>[27]</sup> بین ورق و قالب و همچنین، ورق و ورق‌گیر به دلیل عدم روان‌کاری ۰/۲۳ و بین ورق و سنبه به دلیل استفاده از روان‌کار ۰/۱۴ در نظر گرفته شد. در شکل‌دهی ضربه‌ای به دلیل افزایش سرعت حرکت سنبه روی ورق ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد که در شرایط ایده‌آل ضریب اصطکاک از رابطه (۱) تبعیت می‌کند<sup>[28]</sup>:

$$\mu = \mu_0 \left(1 - V/V_0\right) \quad (1)$$

در این رابطه  $\mu$  ضریب اصطکاک،  $V$  سرعت فرایند شکل‌دهی و  $\mu_0$  و  $V_0$  مقادیر ثابت هستند. این رابطه نشان می‌دهد که با افزایش سرعت تغییر شکل، ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد. همچنین، در شبیه‌سازی‌های اولیه شکل‌دهی ضربه‌ای، نتایج شامل موقعیت شکست و توزیع کرنش در ضرایب اصطکاک زیر ۰/۰۵ انطباق بیشتری با نتایج تجربی داشتند. نهایتاً، ضریب اصطکاک ۰/۰۲ به دلیل انطباق بیشتر بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی شامل محل تمرکز کرنش و شکست، انتخاب شد.

جهت نزدیک شدن مدل‌سازی شکل‌دهی ضربه‌ای به شرایط آزمایش و در نظر گرفتن اثرات اینرسی، یک نقطه جرمی (mass point) به‌میزان مجموع جرم سنبه و وزنه متصل به آن به نقطه مرجع سنبه اختصاص داده شد و شتاب جاذبه نیز تعریف شد. در شبیه‌سازی شکل‌دهی شبه‌استاتیکی، نقطه جرمی و شتاب جاذبه در نظر گرفته نشدند تا در صورت افزایش سرعت شبیه‌سازی، از اثرات اینرسی بر نتایج جلوگیری شود. در شکل‌دهی ضربه‌ای سرعت اولیه برخورد سنبه به ورق برابر با ۷/۹ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. در تحقیقات قبلی سرعت پایانی سنبه در انتهای عمق نفوذ برابر با صفر<sup>[12]</sup> و یا برابر با سرعت اولیه<sup>[15]</sup> در نظر گرفته شده است. در شکل‌دهی با دستگاه سقوط وزنه، به دلیل جذب انرژی اولیه توسط نمونه‌ها، سرعت سنبه و نرخ کرنش حین تغییر شکل کاهش می‌یابد. با توجه به این‌که در شبیه‌سازی شکل‌دهی ضربه‌ای خواص ماده وابسته به نرخ کرنش تعریف شده است و اینرسی نیز بر نتایج تاثیرگذار است، اختلاف در سرعت تغییر شکل نسبت به شرایط آزمایش، ممکن است باعث ایجاد خطا در نتایج

کرنش‌های حقیقی بیشینه و کمینه محاسبه شد. منحنی حد شکل‌دهی با جدا کردن کرنش‌های بیشینه و کمینه ناحیه ایمن از ناحیه گلوبی و شکست به دست آمد.

### ۳- شبیه‌سازی اجزای محدود

#### ۳-۱- مدل‌سازی فرایند شکل‌دهی

در این تحقیق، جهت شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی از حل‌گر صریح نرم‌افزار آباکوس 6.14 استفاده شد. این روش حل برای بارگذاری‌های استاتیکی و شبه‌استاتیکی غیر خطی مثل مدل‌های تماسی و بارگذاری‌های دینامیکی مثل ضربه و سقوط ترجیح داده می‌شود. همچنین، با استفاده از این حل‌گر، مدل آسیب راحت‌تر شبیه‌سازی می‌شود<sup>[26]</sup>. اجزای قالب شامل سنبه، قالب و ورق‌گیر ضخامت و سختی بالایی دارند و تغییر شکل آن‌ها حین شکل‌دهی ناچیز است، لذا، اجزای قالب به صورت صلب مدل شدند ولی ورق به صورت تغییر شکل‌پذیر در نظر گرفته شد. قالب به دلیل داشتن هندسه پیچیده و در نظر گرفتن شیار مربوط به مهره کششی، به صورت صلب گسسته با المان R3D4 مدل‌سازی شد. از المان پوسته‌ای S4R و پنج نقطه انتگرال‌گیری در جهت ضخامت برای مش‌بندی ورق استفاده شد. این نوع المان برای تحلیل کرنش‌های بزرگ، مثل فرایند شکل‌دهی، مناسب است و با استفاده از این المان، امکان مشاهده تغییرات ضخامت حین شکل‌دهی وجود دارد<sup>[26]</sup>. ضخامت ورق ۱ میلی‌متر در نظر گرفته شد و جهت مشاهده بهتر نتایج به‌ویژه محل ایجاد شکست، مدل‌سازی به صورت کامل انجام شد. در شکل ۴ اجزای قالب شکل‌دهی مدل شده در شبیه‌سازی نمایش داده شده است.



شکل ۴) اجزای قالب شکل‌دهی در شبیه‌سازی

در شکل ۵ مشاهده می‌شود که ارتفاع گنبد نمونه با عرض ۲۰۰ میلی‌متر در اندازه المان ۱ میلی‌متر هم‌گرا شده است. بنابراین، این اندازه المان برای مدل‌سازی انتخاب شد.

شبیه‌سازی در دو مرحله انجام شد، در مرحله اول ورق‌گیر تا تماس شدن کامل روی ورق به سمت پایین حرکت داده شد و در مرحله دوم نیروی ورق‌گیر اعمال شد تا از سر خوردن ورق به داخل حفره قالب جلوگیری شود. همچنین، در مرحله دوم سنبه با سرعت اعمال شده در آزمایش‌های تجربی به سمت پایین حرکت کرد تا ورق تا لحظه شکست شکل داده شود.

در این رابطه  $F, G, H, L, M$  و  $N$  ثابت‌های توصیف کننده ناهمسان‌گردی در معیار تسلیم هیل می‌باشند. این ثابت‌ها توسط ۶ ضریب  $R_{11}, R_{12}, R_{13}, R_{22}, R_{33}$  و  $R_{23}$  در نرم‌افزار آباکوس تعریف می‌شوند<sup>[26]</sup>:

$$\begin{aligned} F &= 1/2 \left( 1/R_{22} + 1/R_{33} - 1/R_{11}^2 \right), \\ G &= 1/2 \left( 1/R_{33} + 1/R_{11}^2 - 1/R_{22}^2 \right), \\ H &= 1/2 \left( 1/R_{11}^2 + 1/R_{22}^2 - 1/R_{33}^2 \right), \\ L &= 3/2R_{23}^2, M = 3/2R_{31}^2, N = 3/2R_{12}^2 \end{aligned} \quad (۴)$$

در این رابطه  $R_{ij}$  ها از ضرایب ناهمسان‌گردی  $r_{45}, r_{90}$  و  $r_{0}$  به‌دست آمده از آزمایش کشش (جدول ۲) محاسبه می‌شوند:

$$\begin{aligned} R_{12} &= \sqrt{3r_{90}(r_0 + 1) / (2r_{45} + 1)(r_0 + r_{90})}, \\ R_{22} &= \sqrt{r_{90}(r_0 + 1) / r_0(r_{90} + 1)}, \\ R_{33} &= \sqrt{r_{90}(r_0 + 1) / (r_0 + r_{90})}, \\ R_{11} &= R_{13} = R_{23} = 1 \end{aligned} \quad (۵)$$

با توجه به ناچیز بودن اثر نرخ کرنش بر ناهمسان‌گردی فولاد کم کربن<sup>[15]</sup>، در این شبیه‌سازی از اثر نرخ کرنش بر ضرایب ناهمسان‌گردی صرف‌نظر شد.

در این مطالعه از معیار آسیب FLD جهت تعیین لحظه آغاز شکست یا گلویی شدن موضعی استفاده شد. کرنش‌های حد شکل‌دهی تجربی به‌دست آمده از آزمایش‌های شکل‌دهی شبه-استاتیکی و ضربه‌ای وارد نرم‌افزار شد. هم‌چنین، از روش حذف المان جهت مشاهده شکل و موقعیت شکست استفاده شد. در این حالت پارامتر آسیب  $D$  (رابطه (۶)) برابر با ۱ می‌شود:

$$D = \frac{\epsilon_1^A}{\epsilon_1^B} \quad (۶)$$

در این رابطه  $\epsilon_1^A$  کرنش اصلی بیشینه خروجی نرم‌افزار و  $\epsilon_1^B$  کرنش اصلی بیشینه ورودی به نرم‌افزار در تعریف معیار آسیب FLD می‌باشند. در این روش، المان‌هایی که پارامتر  $D$  آن‌ها برابر ۱ شود حذف می‌شوند. جهت استخراج منحنی حد شکل‌دهی از شبیه-سازی، المانی که ابتدا به‌مقدار  $D=1$  رسید به‌عنوان المان گلویی شده در نظر گرفته شده و در این لحظه، کرنش‌های بیشینه و کمینه آن ثبت شدند. این کار برای تمامی نمونه‌ها با عرض‌های مختلف تکرار شده تا منحنی حد شکل‌دهی کامل شود.

#### ۴- نتایج و بحث

##### ۴-۱- بررسی رفتار کششی

منحنی‌های تنش-کرنش حقیقی تجربی ورق St14 تا لحظه گلویی شدن در نرخ‌های کرنش مختلف در شکل ۶ نشان داده شده‌است. مشاهده می‌شود که سطح همه منحنی‌ها با افزایش نرخ کرنش افزایش یافته‌است و نشان دهنده این است که تنش سیلان این ماده حساسیت مثبتی به نرخ کرنش دارد. هم‌چنین، خواص کششی به‌دست آمده از آزمایش کشش فلز پایه در نرخ‌های کرنش مختلف در جدول ۳ نشان داده شده‌است.

شود. بنابراین، در این تحقیق برای نزدیک‌تر شدن به شرایط آزمایش و محاسبه دقیق‌تر سرعت پایداری، انرژی جذب شده توسط همه نمونه‌های شکل‌دهی شده تا عمق نفوذ به‌دست آمده از آزمایش-های تجربی از طریق شبیه‌سازی‌های اولیه به‌دست آمد و با کسر این انرژی از انرژی لحظه برخورد، سرعت پایداری محاسبه شد. تغییرات سرعت اولیه تا سرعت پایداری نیز به‌صورت خطی در نظر گرفته شد.

##### ۳-۲- تعریف خواص ماده و مدل آسیب

برای تعریف خواص ماده پس از انجام آزمایش‌های کشش در ۵ نرخ کرنش، از مدل مادی فیلدز-بکوفن<sup>[29]</sup> (F-B) و یا همان رابطه توانی با در نظر گرفتن اثر نرخ کرنش استفاده شد. این رابطه به‌صورت گسترده‌ای برای توصیف رابطه تنش-کرنش استفاده می‌شود و می‌تواند اثرات کرنش سختی و نرخ کرنش سختی را به‌خوبی بیان کند. هم‌چنین، به‌دلیل راحت بودن انجام عملیات جبری روی این رابطه، استفاده از آن در زیربرنامه ویوهارد (VUHARD subroutine) امکان‌پذیر است. این رابطه به‌صورت ذیل تعریف می‌شود:

$$\sigma = k \epsilon^n \epsilon^m \quad (۲)$$

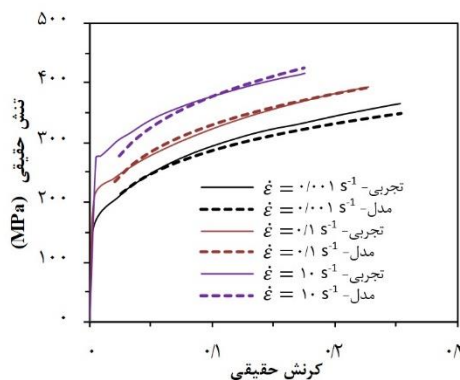
که در این رابطه  $\sigma$  تنش،  $K$  ضریب استحکام،  $\epsilon$  کرنش،  $n$  توان کرنش سختی،  $\epsilon$  نرخ کرنش، و  $m$  توان حساسیت به نرخ کرنش می‌باشند. این ضرایب از آزمایش کشش در نرخ‌های کرنش مختلف استخراج شده که در قسمت بعدی توضیح داده می‌شود. در شبیه-سازی‌های شبه‌استاتیکی از اثر نرخ کرنش صرف‌نظر شد. با توجه به سرعت آزمایش شکل‌دهی شبه‌استاتیکی و ابعاد نمونه‌ها، نرخ کرنش ایجاد شده حین شکل‌دهی شبه‌استاتیکی از مرتبه نرخ کرنش آزمایش کشش شبه‌استاتیکی (۰/۰۰۱ بر ثانیه) می‌باشد. بنابراین، افزایش تنش سیلان در شکل‌دهی شبه‌استاتیکی ناچیز خواهد بود و می‌توان از اثر نرخ کرنش بر خواص کششی چشم‌پوشی نمود<sup>[1]</sup>. جهت تعریف مدل ماده به‌صورت رابطه توانی در نرم‌افزار آباکوس، از زیربرنامه ویوهارد استفاده شد. این زیربرنامه برای تعریف اندازه سطح تسلیم و متغیرهای سخت‌شوندگی برای پلاستیسیته همسان‌گرد یا مدل‌های سخت‌شوندگی ترکیبی کاربرد دارد<sup>[26]</sup>. بدین منظور، با استفاده از زبان برنامه نویسی فرترن این رابطه و مشتقات آن طبق قالب ویوهارد نوشته شده و به نرم‌افزار آباکوس وارد شد.

معیارهای تسلیم زیادی برای توصیف ناهمسان‌گردی پلاستیکی فلزات پیشنهاد شده‌اند، که از میان آن‌ها معیار تسلیم هیل درجه ۱۹۴۸<sup>[30]</sup> برای ورق‌های فولادی سازگاری مناسبی داشته‌است. بنابراین، جهت تعریف خواص ناهمسان‌گردی ماده از این معیار تسلیم استفاده شد (رابطه (۳)):

$$f(\sigma) = \sqrt{F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2L\sigma_{23}^2 + 2M\sigma_{31}^2 + 2N\sigma_{12}^2} \quad (۳)$$

در شکل (۷ الف) مقادیر تنش و کرنش در پنج نرخ کرنش مختلف روی محورهای لگاریتمی رسم شده‌است و با میان‌یابی خطی، شیب هر کدام از منحنی‌های تنش-کرنش مقدار  $n$  در هر نرخ کرنش را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در نرخ کرنش بالاتر از  $0.1$  بر ثانیه، شیب خطوط یا همان مقدار  $n$  از  $0.248$  در نرخ کرنش  $0.1$  بر ثانیه به  $0.162$  در نرخ کرنش  $10$  بر ثانیه کاهش یافته است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که در این نوع فولاد مقدار  $n$ ، که یکی دیگر از شاخص‌های کرنش سختی است، با افزایش نرخ کرنش کاهش می‌یابد. با کاهش مقدار  $n$  در صورت افزایش نرخ کرنش، تغییر شکل یکنواخت و میزان شکل‌پذیری در حالت کرنش صفحه‌ای کاهش می‌یابد<sup>[1]</sup>. می‌توان گفت که با افزایش نرخ کرنش در فولاد St14، شکل‌پذیری کاهش می‌یابد. در شکل (۷ ب) فرایند قبلی تکرار شده‌است ولی با این تفاوت که مقادیر تنش و نرخ کرنش در پنج کرنش مختلف روی محورهای لگاریتمی ترسیم شده‌است. شیب هر کدام از منحنی‌های تنش-کرنش نشان دهنده مقدار  $m$  در هر کرنش است. در این نمودار نیز مقدار  $m$  با افزایش کرنش کاهش یافته است و نشان می‌دهد که در این فولاد با تغییر شکل بیش‌تر، مقدار  $m$  کاهش می‌یابد. در فلزات مکعبی وجوه پر (fcc) مانند مس که دارای  $m$  ثابت هستند، منحنی تنش-کرنش حقیقی در نرخ کرنش بالاتر با شیب بیش‌تری نسبت به همین منحنی در نرخ کرنش پایین‌تر افزایش می‌یابد<sup>[1]</sup>. ولی همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، با افزایش نرخ کرنش، منحنی‌های تنش-کرنش فولاد St14 تقریباً موازی هستند که نشان می‌دهد مقدار  $m$  با افزایش کرنش کاهش می‌یابد. همان‌طور که اشاره شد، این موضوع در فلزات مکعبی مرکزپر مانند فولاد کم کربن رخ می‌دهد. بنابراین، در نظر گرفتن میانگین مقادیر  $m$  در چند کرنش ثابت، باعث پیش‌بینی دقیق‌تر رفتار کششی ماده خواهد شد. مقادیر میانگین  $n$  و  $m$  در کرنش‌ها و نرخ کرنش‌های مختلف به ترتیب  $0.209$  و  $0.029$  محاسبه شد. با قرار دادن مقادیر  $n$  و  $m$  در رابطه توانی (رابطه (۲))، میانگین مقدار  $k$  برابر با  $57.0/3$  مگا پاسکال شد و مقادیر میانگین  $m$ ،  $n$  و  $k$  در شبیه‌سازی نرخ کرنش متوسط در نظر گرفته شد. هم‌چنین، در حالت شبه‌استاتیک (نرخ کرنش  $0.001$  بر ثانیه) بدون در نظر گرفتن  $m$ ، مقدار  $n$ ، طبق شکل (۷ الف)، برابر با  $0.235$  و مقدار  $k$  برابر با  $534/6$  به دست آمد.

جهت بررسی دقت مدل مادی با مقادیر میانگین  $n$ ،  $m$  و  $k$ ، منحنی‌های تنش-کرنش مدل شده با منحنی‌های تجربی در سه نرخ کرنش  $0.001$ ،  $0.1$  و  $10$  بر ثانیه در شکل ۶ مقایسه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، منحنی‌های مدل شده تطابق خوبی با منحنی‌های تجربی دارد. بنابراین، از این مدل می‌توان جهت پیش‌بینی منحنی تنش-کرنش فولاد St14 در نرخ‌های کرنش مختلف استفاده نمود.



شکل ۶) منحنی‌های تنش-کرنش حقیقی تجربی و مدل شده ورق St14 در نرخ‌های کرنش مختلف

جدول ۳) خواص کششی فلز پایه در نرخ‌های کرنش مختلف

نرخ کرنش (1/s)	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام کششی نهایی (MPa)	افزایش طول یکنواخت (%)	افزایش طول کل (%)
0.001	157	284	28/8	46/5
0.01	177	299	28/4	45
0.1	209	313	25/4	42/2
1	242	331	23/1	45/4
10	280	348	19/1	44/5

در این جدول مشاهده می‌شود که افزایش طول یکنواخت با افزایش نرخ کرنش کاهش یافته است. افزایش طول یکنواخت یکی از شاخص‌های کرنش سختی است و هر چه بیش‌تر باشد باعث توزیع کرنش یکنواخت‌تر و مقاومت بیش‌تر در برابر شروع پارگی می‌شود<sup>[31]</sup>.

برای پیش‌بینی رفتار کششی ماده با استفاده از رابطه توانی باید ضرایب آن را تعیین نمود. با گرفتن لگاریتم از رابطه (۲) رابطه (۷) حاصل می‌شود:

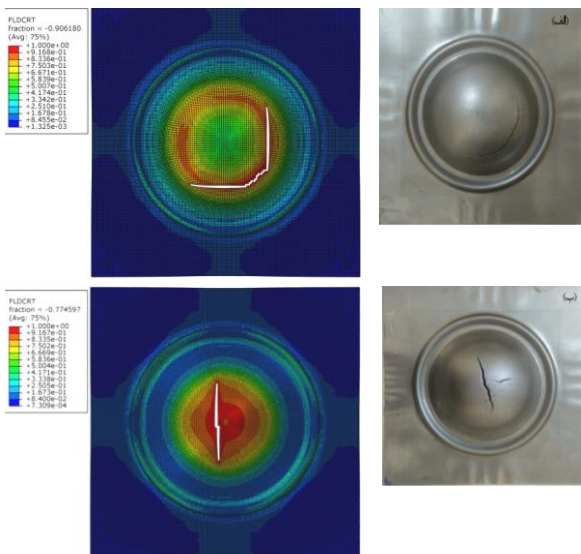
$$\text{Log}(\sigma) = n\text{Log}(\dot{\epsilon}) + m\text{Log}(\epsilon) + \text{Log}(k) \quad (7)$$

با ترسیم منحنی‌های تنش-کرنش و تنش-نرخ کرنش روی محورهای لگاریتمی، مقدار  $n$  شیب منحنی تنش-کرنش و مقدار  $m$  شیب منحنی تنش-نرخ کرنش خواهد شد. معمولاً مقادیر  $n$  و  $k$  در حالت شبه‌استاتیکی تعیین شده و مقدار  $m$  از یک یا چند مقدار کرنش ثابت محاسبه شده و نهایتاً، مقدار میانگین آن در نظر گرفته می‌شود. استفاده از رابطه توانی در فلزات مکعبی مرکزپر (bcc) مانند فولاد در کرنش‌ها یا نرخ کرنش‌های زیاد باعث ایجاد خطا در پیش‌بینی تنش می‌شود<sup>[1]</sup>. در این پژوهش برای غلبه بر این مشکل و دقیق‌تر شدن پیش‌بینی مدل مادی، مقدار میانگین همه مقادیر  $n$ ،  $m$  و  $k$  در کرنش‌ها و نرخ کرنش‌های مختلف محاسبه شده و در رابطه توانی به کار برده شده‌است. به همین منظور، در ۵ مقدار کرنش مهندسی ( $e$ )  $0.001$ ،  $0.01$ ،  $0.1$ ،  $1$  و  $10$  بر ثانیه، هم‌چنین پنج نرخ کرنش  $0.001$ ،  $0.01$ ،  $0.1$ ،  $1$  و  $10$  بر ثانیه مقدار  $n$ ،  $m$  و  $k$  محاسبه شده و میانگین آن‌ها در رابطه توانی در نظر گرفته شده‌است.



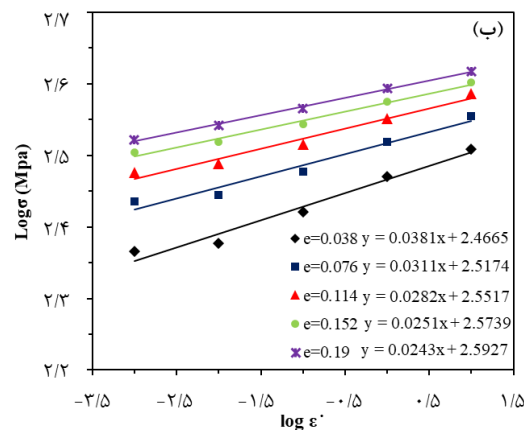
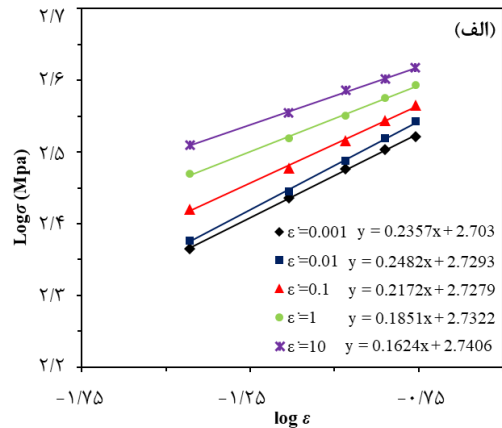
شکل ۸) نمونه‌های شکل داده شده در شکل‌دهی شبه‌استاتیک (چپ) و شکل‌دهی ضربه‌ای (راست)

همان‌طور که مشاهده می‌شود، در شبیه‌سازی هر دو روش شکل‌دهی، محل و شکل شکست به‌درستی پیش‌بینی شده‌اند. شکست نمونه شبه‌استاتیک با فاصله از مرکز گنبد و به‌صورت محیطی است ولی، شکست نمونه شکل داده شده در شکل‌دهی ضربه‌ای در نزدیکی مرکز گنبد رخ داده است.



شکل ۹) مقایسه موقعیت شکست در نمونه با عرض ۲۰۰ میلی‌متر در (الف) شکل‌دهی شبه‌استاتیک تجربی (راست) و شبیه‌سازی آن (چپ) و (ب) شکل‌دهی ضربه‌ای تجربی (راست) و شبیه‌سازی آن (چپ)

شکل ۱۰ توزیع کرنش پلاستیک معادل در نمونه با عرض ۵۰ میلی‌متر در لحظه وقوع گلوبی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشینه کرنش پلاستیک معادل در هر دو روش شکل‌دهی در محل شکست بوده و به‌درستی پیش‌بینی شده‌است. با توجه به انطباق نتایج تجربی و شبیه‌سازی شامل شکل و موقعیت شکست، می‌توان گفت که ضرایب اصطکاک شبیه‌سازی در هر دو سرعت شکل‌دهی به‌درستی تعیین شده‌اند.



شکل ۷) تغییرات مقادیر  $m$  و  $n$  بر حسب کرنش و نرخ کرنش (الف) تغییرات مقدار  $n$  و (ب) تغییرات مقدار  $m$

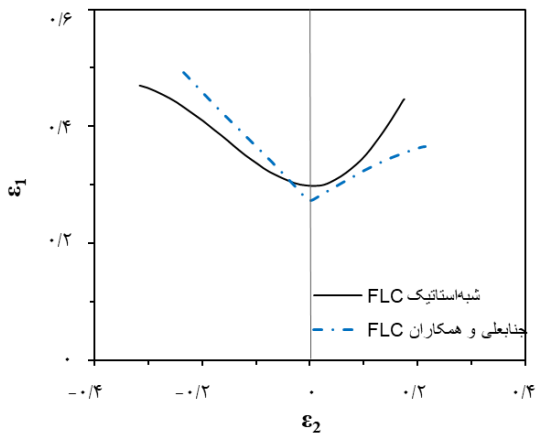
#### ۲-۴- بررسی شکل‌پذیری

شکل ۸ برخی از نمونه‌های تغییر شکل یافته در شکل‌دهی شبه‌استاتیک و شکل‌دهی ضربه‌ای را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که شکست نمونه‌های شبه‌استاتیک با فاصله از مرکز گنبد رخ داده است. با وجود روان‌کاری مناسب بین سنبه و ورق، اصطکاک هنوز وجود دارد و باعث متمرکز شدن کرنش محیطی ورق توسط سطح سنبه و ایجاد شکست در نزدیکی مرکز تماس سنبه با ورق می‌شود [۱]. بر خلاف نمونه‌های شبه‌استاتیک، شکست نمونه‌های شکل داده شده توسط آزمایش سقوط وزنه در نزدیکی مرکز گنبد ایجاد شده‌است. همان‌طور که در قسمت قبل و رابطه (۱) اشاره شد، در عملیات شکل‌دهی عملی با روان‌کار، افزایش سرعت باعث کاهش اصطکاک می‌شود. با کاهش اصطکاک، کرنش در نزدیکی دماغه سنبه متمرکز می‌شود و ارتفاع گنبد کاهش می‌یابد و باعث می‌شود که شکست در نزدیکی قطب گنبد اتفاق بیفتد [۳۱].

جهت بررسی صحت شبیه‌سازی، موقعیت و شکل شکست در شبیه‌سازی و آزمایش‌های تجربی شکل‌دهی شبه‌استاتیک و ضربه‌ای مقایسه شد. با به کارگیری پارامتر آسیب FLD، محل شکست شبیه‌سازی با آزمایش تجربی در شکل ۹ برای نمونه با عرض ۲۰۰ میلی‌متر مقایسه شده‌است.

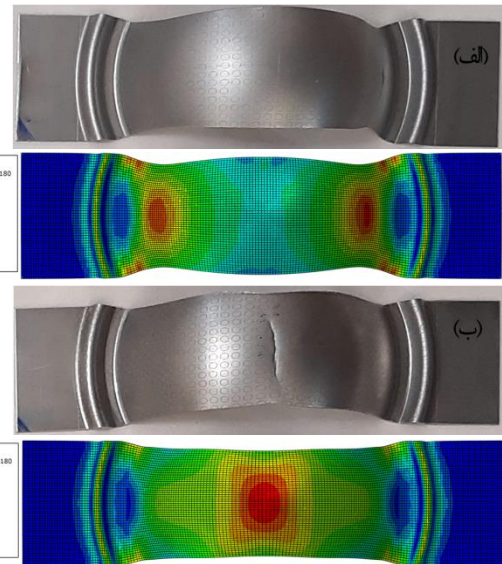


منحنی‌های حد شکل‌دهی شبه‌استاتیک تجربی این تحقیق با پژوهش جنابعلی جهرمی و همکاران [32] در شکل ۱۲ مقایسه شده‌اند. آن‌ها حد شکل‌دهی ورق St14 با ضخامت ۰/۹ میلی‌متر را با استفاده از روان‌کار روغن معدنی به دست آورده‌اند و در این شکل، کرنش‌های مهندسی به کرنش‌های حقیقی تبدیل شده‌است. مشاهده می‌شود که نتایج انطباق نسبتاً مناسبی دارند. از دلایل اختلاف نتایج می‌توان به ضخامت کمتر ورق و روان‌کار متفاوت اشاره کرد. هم‌چنین، تفاوت در نحوه تعیین گلوئی شدن در آزمایشگاه‌های مختلف، می‌تواند باعث ایجاد اختلاف بین نتایج پژوهش‌های مختلف شود. [1]



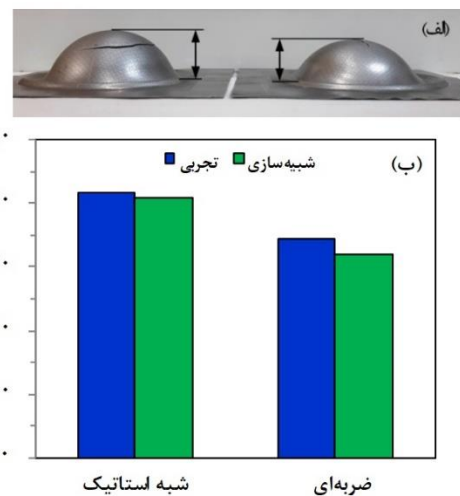
شکل ۱۲) مقایسه منحنی‌های حد شکل‌دهی این پژوهش با پژوهش جنابعلی جهرمی و همکاران

منحنی‌های حد شکل‌دهی تجربی و عددی در دو سرعت شکل‌دهی در شکل ۱۳ نشان داده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، منحنی‌های حد شکل‌دهی به دست آمده از شبیه‌سازی انطباق مناسبی با نتایج تجربی در هر دو روش شکل‌دهی دارد و اختلاف بین نتایج کم‌تر از ۵٪ است. هم‌چنین، مشاهده می‌شود که سطح منحنی حد شکل‌دهی ضربه‌ای پایین‌تر از شکل‌دهی شبه‌استاتیکی می‌باشد. منحنی حد شکل‌دهی در شکل‌دهی ضربه‌ای به سمت پایین و مقادیر مثبت‌تر کرنش کمینه ( $\epsilon_2$ ) در مقایسه با شکل‌دهی شبه‌استاتیک تغییر کرده است. حد شکل‌دهی در حالت کرنش صفحه‌ای ( $\epsilon_2=0$ ) در شکل‌دهی ضربه‌ای در مقایسه با شکل‌دهی شبه‌استاتیک، ۸/۱٪ کاهش یافته است. این تغییرات در حد شکل‌دهی به این معنی است که شکل‌پذیری در شکل‌دهی ضربه‌ای کاهش یافته است و حالت کرنش دوماحوره‌تر شده است. جابجایی منحنی حد شکل‌دهی به سمت راست، به دلیل کاهش اصطکاک از طریق افزایش سرعت شکل‌دهی است که منجر به کشش دوماحوری بیش‌تر قبل از وقوع شکست و جابجایی محل شکست به سمت مرکز گنبد شده است.

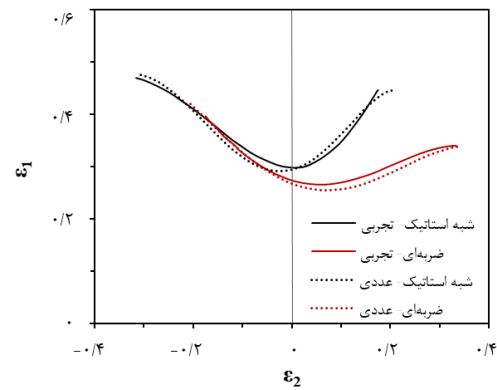


شکل ۱۰) توزیع کرنش پلاستیک معادل در نمونه با عرض ۵۰ میلی‌متر در (الف) شکل‌دهی شبه‌استاتیک و (ب) شکل‌دهی ضربه‌ای

در شکل ۱۱ ارتفاع گنبد تجربی و شبیه‌سازی در حالت کشش دوماحوره متوازن نمونه با عرض ۲۰۰ میلی‌متر مقایسه شده است. ارتفاع گنبد یکی از شاخص‌های شکل‌پذیری است و هر چه بیش‌تر باشد نشان دهنده شکل‌پذیری بالاتر است. مشاهده می‌شود که ارتفاع گنبد تجربی در شکل‌دهی ضربه‌ای با نرخ کرنش متوسط ۱۷/۱٪ کم‌تر از حالت شبه‌استاتیک است که نشان دهنده کاهش شکل‌پذیری در شکل‌دهی ضربه‌ای است. هم‌چنین، اختلاف نتایج شبیه‌سازی با آزمایش تجربی در حالت شبه‌استاتیک حدود ۲٪ و در نرخ کرنش متوسط حدود ۷٪ است که نشان دهنده انطباق مناسب نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی است. یکی از دلایل اختلاف نتایج، امکان پذیر نبودن توقف آزمایش‌های تجربی در لحظه وقوع گلوئی، به‌ویژه در آزمایش سقوط وزنه است.



شکل ۱۱) ارتفاع گنبد نمونه با عرض ۲۰۰ میلی‌متر در (الف) شکل‌دهی شبه‌استاتیک (چپ) و شکل‌دهی ضربه‌ای (راست) و (ب) مقایسه ارتفاع گنبد آزمایش تجربی با شبیه‌سازی



شکل ۱۳) منحنی‌های حد شکل‌دهی در شکل‌دهی شبه‌استاتیک و ضربه‌ای به‌دست آمده از آزمون‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی

توسعه گلوبی موضعی پس از شروع آن<sup>[5]</sup> و ایجاد کرنش پسا یکنواخت اضافی در سرعت‌های شکل‌دهی بالاتر از ۱۵ متر بر ثانیه<sup>[33]</sup>، شکل‌پذیری را افزایش می‌دهد. اما سرعت شکل‌دهی در این مطالعه ۷/۹ متر بر ثانیه بود، بنابراین اثرات اینرسی جهت افزایش شکل‌پذیری ناچیز است. به‌علاوه، اثرات اینرسی می‌تواند باعث افزایش تنش‌های داخلی اضافی ماده شده و حتی ممکن است شکل‌پذیری را کاهش دهد<sup>[28]</sup>. بنابراین، در محدوده سرعت شکل‌دهی این مطالعه می‌توان گفت که اثرات اینرسی نه تنها باعث افزایش شکل‌پذیری نمی‌شود، حتی ممکن است باعث کاهش آن شود.

### ۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، خواص کششی و شکل‌پذیری ورق فولادی St14 در حالت شبه‌استاتیک و ضربه‌ای با نرخ کرنش متوسط با انجام آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی بررسی شد. پس از انجام آزمایش‌های کشش در نرخ‌های کرنش مختلف، آزمایش‌های تجربی شکل‌پذیری و شبیه‌سازی آن در شرایط شبه‌استاتیکی و شکل‌دهی ضربه‌ای توسط دستگاه سقوط وزنه انجام شدند و نتایج ذیل به‌دست آمد:

- با استفاده از رابطه توانی با مقادیر میانگین  $m$ ،  $n$  و  $k$ ، رفتار کششی فولاد St14 در نرخ‌های کرنش مختلف پیش‌بینی شد که با نتایج آزمایش کشش مطابقت داشت.
- شاخص‌های کرنش سختی شامل افزایش طول یکنواخت و مقدار  $n$  با افزایش نرخ کرنش کاهش یافتند، ولی سطح منحنی‌های تنش-کرنش با افزایش نرخ کرنش بالاتر رفت.
- در شکل‌دهی شبه‌استاتیکی محل شکست دور از مرکز گنبد بود، اما در شکل‌دهی ضربه‌ای، شکست در نزدیک مرکز گنبد ایجاد شد. هم‌چنین، محل شکست و تمرکز کرنش پلاستیک در شبیه‌سازی به‌درستی و مطابق با آزمایش‌های تجربی پیش‌بینی شد. به‌علاوه، منحنی‌های حد شکل‌دهی به‌دست آمده از شبیه‌سازی انطباق مناسبی با منحنی‌های تجربی داشت.
- ارتفاع گنبد که یکی از شاخص‌های شکل‌پذیری است در حالت کشش دومحوره در شکل‌دهی ضربه‌ای ۱۷/۱٪ کم‌تر از شکل‌دهی شبه‌استاتیکی بود. منحنی حد شکل‌دهی در شکل‌دهی ضربه‌ای در مقایسه با شکل‌دهی شبه‌استاتیکی، به‌سمت پایین و به مقادیر مثبت‌تر کرنش کمینه جابجا شد. هم‌چنین، حد شکل‌دهی در حالت کرنش صفحه‌ای در شکل-دهی ضربه‌ای، ۸/۱٪ کم‌تر از شکل‌دهی شبه‌استاتیکی بود. این موارد نشان دهنده کاهش شکل‌پذیری این فولاد در شکل‌دهی ضربه‌ای در محدوده نرخ کرنش متوسط است.

کاهش شکل‌پذیری در شکل‌دهی ضربه‌ای با نرخ کرنش متوسط را می‌توان به تغییر خواص مکانیکی و شرایط اصطکاک ناشی از افزایش سرعت شکل‌دهی نسبت داد. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، با افزایش نرخ کرنش، افزایش طول یکنواخت و مقدار  $n$  که شاخص‌های کرنش سختی هستند، کاهش می‌یابند و منجر به کاهش شکل‌پذیری می‌شوند. هم‌چنین، افزایش سرعت شکل‌دهی باعث کاهش اصطکاک و تأثیر بر توزیع کرنش می‌شود که باعث تمرکز کرنش در نزدیکی قطب گنبد، شکست زودرس در این ناحیه و کاهش ارتفاع گنبد می‌شود و در نتیجه شکل‌پذیری کم‌تر می‌شود. مطالعات تجربی کمی در مورد بررسی شکل‌پذیری ورق‌های فلزی در محدوده نرخ کرنش متوسط انجام شده است. با این وجود، نتایج این تحقیق با دو پژوهش قبلی مقایسه شده است. داریانی و همکاران<sup>[12]</sup> نشان دادند که در شکل‌دهی فولاد ۱۰۴۵ و آلومینیوم ۶۰۶۱ با دستگاه سقوط وزنه، موقعیت شکست به مرکز گنبد جابجا می‌شود و علت آن را کاهش ضریب اصطکاک دینامیکی بیان کردند که مشابه نتایج این پژوهش است. با این حال، آن‌ها افزایش حد شکل‌دهی به‌ویژه در حالت کشش دو محوره را گزارش دادند و علت آن را افزایش فشارهیدرواستاتیکی بیان کردند. با توجه به این‌که در پژوهش آن‌ها خواص کششی در نرخ‌های کرنش مختلف استخراج نشده است، اثر نرخ کرنش بر خواص نامشخص است. اما در این پژوهش خواص کششی در نرخ‌های کرنش مختلف استخراج شده و اثر آن بر کاهش شکل‌پذیری نشان داده شده است. در همین محدوده سرعت شکل‌دهی، کیم و همکاران<sup>[15]</sup> کاهش حد شکل‌دهی کلی فولاد دوفازی و کاهش حد شکل‌دهی در محدوده کشش دومحوره فولاد کم کربن را گزارش دادند که نتایج آن‌ها تا حد زیادی مشابه این پژوهش است. هم‌چنین، آن‌ها خواص کششی وابسته به نرخ کرنش را استخراج کردند و کاهش مقدار  $n$  و افزایش طول یکنواخت را با افزایش نرخ کرنش مشاهده کردند که مشابه این پژوهش است.

در روش‌های شکل‌دهی سرعت بالا مانند شکل‌دهی‌های الکترومغناطیسی و الکتروهیدرولیکی، اثرات اینرسی با کند کردن

electrohydraulic forming process. *Modares Mechanical Engineering*. 2018;17(11):144-50.

15- Kim SB, Huh H, Bok HH, Moon MB. Forming limit diagram of auto-body steel sheets for high-speed sheet metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*. 2011;211(5):851-62.

16- Fathi H, Emadoddin E, Mohammadian Semnani HR, Mohammad Sadeghi B. Effect of punch speed on the formability behavior of austenitic stainless steel type 304L. *Metals and Materials International*. 2016;22:397-406.

17- Moslemi M, Hosseinpour J, Azodi H, Gorji A. Numerical Evaluation of the Effect of Forming Velocity on Forming Limit Diagram (FLD) of St14 Steel using Bifurcation Theory and Comparison with Experimental Results. *Journal of Metallurgical and Materials Engineering*. 2013;24(1):20-38.

18- Safari M, Hosseinpour SJ, Azodi HD. An investigation into the effect of strain rate on forming limit diagram using ductile fracture criteria. *Meccanica*. 2012;47(6):1391-9.

19- Hashemi R. Survey the effect of forming speed on fld for Al 6061 sheets. *Modares Mechanical Engineering*. 2018;17(10):333-40.

20- Asada K. Introduction of High-Speed Linear Servo Press-Line (HLS) Product. *Komatsu Technical Report*. 2008;51(161):44-8.

21- Hu DC, Chen MH, Lei WA, Wang HJ. Microstructural characterization of blanked surface of C5191 phosphor bronze sheet under ultra-high-speed blanking. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2021;31(3):692-702.

22- Osakada K, Mori K, Altan T, Groche P. Mechanical servo press technology for metal forming. *CIRP annals*. 2011;60(2):651-72.

23- Halicioglu R, Dulger LC, Bozdana AT. Mechanisms, classifications, and applications of servo presses: A review with comparisons. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2016;230(7):1177-94.

24- Asensio J, Romano G, Martinez VJ, Verdeja JI, Pero-Sanz JA. Ferritic steels: Optimization of hot-rolled textures through cold rolling and annealing. *Materials Characterization*. 2001;47(2):119-27.

25- Mäntyjärvi K, Tulonen J, Saarnivuo T, Porter J, Karjalainen JA. Grid patterns by laser for forming strain analysis. *International Journal of Material Forming*. 2008;1:249-52.

26- Abaqus V. Documentation. Dassault Systemes Simulia Corporation. 2014. 6.14. 651: 6.2. Belytschko T. & Black T. Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing. *International journal for numerical methods in engineering*. 1999;45(5):601-20.

27- Ghosh AK. A method for determining the coefficient of friction in punch stretching of sheet metals. *International Journal of Mechanical Sciences*. 1977;19(8):457-70.

28- Emmens WC. Formability: A review of parameters and processes that control, limit or enhance the formability of sheet metal.

29- Lin YC, Chen XM. A critical review of experimental results and constitutive descriptions for metals and

**تأییدیه اخلاقی:** محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیر ایرانی منتشر نشده است.

**تعارض منافع:** این مقاله هیچگونه تعارض منافع با سازمان یا اشخاص حقیقی و حقوقی ندارد.

**منابع مالی:** هزینه‌های این پژوهش از بودجه شخصی و پژوهانه دانشگاه تامین شده است.

## منابع

1- Hosford WF, Caddell RM. *Metal forming: mechanics and metallurgy*. Cambridge university press; 2011.

2- Keeler SP. *Plastic instability and fracture in sheets stretched over rigid punches* (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology).

3- Goodwin GM. Application of strain analysis to sheet metal forming problems in the press shop. *Sae Transactions*. 1968:380-7.

4- Hecker SS. A simple forming-limit curve technique and results on aluminum alloys. In *Int. Deep Drawing Res. Group, 7 th Biennial Congress, Amsterdam*. 1972, 35 1972.

5- Balanethiram VS, Hu X, Altynova M, Daehn GS. Hyperplasticity: enhanced formability at high rates. *Journal of Materials Processing Technology*. 1994;45(1-4):595-600.

6- Khalifeh AR, Banaraki AD, Manesh HD, Banaraki MD. Investigating of the tensile mechanical properties of structural steels at high strain rates. *Materials Science and Engineering: A*. 2018;712:232-9.

7- Yang YG, Mu WZ, Li XQ, Jiang HT, Wang M, Mi ZL, Mao XP. Effects of strain rate on austenite stability and mechanical properties in a 5Mn steel. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2021:1-1.

8- Yang X, Yang H, Lai Z, Zhang S. Dynamic tensile behavior of S690 high-strength structural steel at intermediate strain rates. *Journal of Constructional Steel Research*. 2020;168:105961.

9- Xing X, Lin L, Qin H. Dynamic tensile behavior of steel strands at different strain rates. In *Structures 2021 1* (Vol. 33, pp. 378-389). Elsevier.

10- Balanethiram VS, Daehn GS. Enhanced formability of interstitial free iron at high strain rates. *Scripta metallurgica et materialia*. 1992;27(12):1783-8.

11- Daehn GS. High-velocity metal forming. *Metalworking: Sheet Forming* (ASM Handbook Volume 14 B). 2006;14:405-18.

12- Dariani BM, Liaghat GH, Gerdooei M. Experimental investigation of sheet metal formability under various strain rates. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2009 1;223(6):703-12.

13- Saradar M, Basti A, Zaeimi M. Numerical study of the effect of strain rate on damage prediction by dynamic forming limit diagram in high velocity sheet metal forming. *Modares Mechanical Engineering*. 2015;14(16):212-22.

14- Zohoor M, Mousavi SM. Investigation of forming limit of brass alloy c260 at high strain rate by using

- alloys in hot working. *Materials & Design*. 2011 1;32(4):1733-59.
- 30- Hill R. A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*. 1948;193(1033):281-97.
- 31- Hu J, Marciniak Z, Duncan J, editors. *Mechanics of sheet metal forming*. Elsevier; 2002.
- 32- JENABALI JS, Nazarboland A, Mansouri E, ABASI S. Investigation of formability of low carbon steel sheets by forming limit diagrams.
- 33- Regazzoni G, Johnson JN, Follansbee PS. Theoretical study of the dynamic tensile test.