

ارزیابی معیار نمودار حد شکل‌دهی در پیش‌بینی شکست ورق‌های نازک فلزی

فرهاد حاجی ابوطالبی^۱ ارسلان سلیمانی^۲
گروه مهندسی مکانیک دانشکده مهندسی مکانیک
دانشگاه اصفهان دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر
(تاریخ دریافت: ۹۲/۱۲/۲۳؛ تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۳/۱۷)

چکیده

یکی از معیارهای ساده برای تخمین میزان شکل‌پذیری ورق‌های فلزی، استفاده از نمودار حد شکل‌دهی (FLD) است. تعیین میزان دقت و محدوده پیش‌بینی مناسب این معیار، از مهم‌ترین چالش‌های محققین و مهندسين می‌باشد. در تحقیق حاضر، ابتدا با استفاده از نمودار حد شکل‌دهی برای فولاد St14، تعدادی از آزمایش‌های عملی مانند کشش نمونه‌های استاندارد، شیاردار و شکافدار، فرآیندهای هیدروفرمینگ لوله و کشش عمیق شبیه‌سازی شده، امکان وقوع ترک و گسیختگی در آنها پیش‌بینی می‌گردد. سپس، به منظور ارزیابی معیار آسیب نمودار حد شکل‌دهی، آزمایش‌های فوق به صورت تجربی نیز انجام شده و نتایج عملی حاصل می‌گردد. در نهایت، با مقایسه نتایج شبیه‌سازی‌های عددی و مشاهدات تجربی، میزان دقت و محدوده مناسب برای پیش‌بینی شکست ورق‌های فلزی توسط نمودار حد شکل‌دهی FLD آشکار می‌شود.

واژه‌های کلیدی: نمودار حد شکل‌دهی (FLD)، آسیب، پیش‌بینی شروع ترک و گسیختگی

Evaluation of Forming Limit Diagram Damage Criterion in Fracture Prediction of Thin Sheet Metals

F. Haji Aboutalebi

Department of Mechanical Engineering
University of Isfahan

A. Soleymani

Department of Mechanical Engineering
Islamic Azad University of Khomeinishahr

(Received: 14 March, 2014; Accepted: 07 June, 2014)

ABSTRACT

One of the simple criteria for estimating the formability of sheet metals is use of forming limit diagram (FLD). Determining the amount of accuracy and the range of proper prediction of this criterion is one of the most important challenges of researchers and engineers. In the present research first, employing the forming limit diagram of St14 steel, number of practical experiments such as tensile test of standard, notched, and opened specimens, tube hydroforming and deep drawing processes are simulated, and possibility of crack initiation and fracture in them are predicted. Then, to evaluate the forming limit diagram damage criterion, the above experiments are also practically performed and the practical results are achieved. Finally, comparing the results of numerical simulations and empirical observations, the amount of accuracy and proper range for fracture prediction of sheet metals by the FLD damage criterion is revealed.

Keywords: Forming Limit Diagram (FLD), Damage, Prediction of Crack Initiation and Fracture

^۱ - استادیار (نویسنده پاسخگو): f.hajiaboutalebi@eng.ui.ac.ir

^۲ - کارشناس ارشد: arsalansoleymani@yahoo.com

۱- مقدمه

فرایندهای شکل‌دهی فلزات به صورت گسترده در تولید محصولات صنعتی مانند وسایل نقلیه، ظروف مواد غذایی، مهمات نظامی و بسیاری دیگر از تولیدات فلزی کاربرد دارند. تحلیل فرآیندهای تولید محصولات فوق، از نظر کاهش ضایعات، هزینه‌ها و بهینه‌سازی، بسیار حائز اهمیت است. از عوامل مؤثر در کاهش و بهینه‌سازی روش‌های تولید، تخمین میزان آسیبی است که قطعات فلزی هنگام تولید با آن مواجه می‌گردند. آسیب، روندی تخریبی در ماده است که قبل از شکست یا پارگی اتفاق افتاده و معمولاً نمی‌توان آنرا دید یا لمس کرد. هنگامی که میزان آسیب وارده به قطعه در یک فرآیند مشخص گردد، به کمک آن می‌توان مقدار بهینه نیروی اعمالی، مواد مصرفی و همچنین شکل مناسب قالب را به دست آورد.

تاکنون تحقیقات مختلفی بر روی معیارهای پیش‌بینی بروز آسیب و شکست نرم ارائه شده که از آن جمله می‌توان به مطالعه بر روی معیار آسیب نمودار حد شکل‌دهی بر پایه کرنش (FLD) و نمودار حد شکل‌دهی بر پایه تنش (FLSD) [۱-۳]، معیار آسیب مارسینیاک^۱-کوچینسکی^۲ (M-K) و حالت‌های اصلاح‌شده آن [۳-۸]، معیار گرسون^۳ [۹-۱۲] و معیار آسیب نرم هوپاترا^۴ [۱۳] اشاره نمود.

برخلاف معیارهای آسیب دیگر، معیار آسیب FLD معیاری ساده و سریع است که برای پیش‌بینی میزان شکل‌پذیری و حد گسیختگی ورق‌های فلزی به کار می‌رود. نمودار حد شکل‌دهی مفهومی مفید است که برای اولین بار در سال ۱۹۶۴ توسط کیلر^۵ و بکوفن^۶ برای تعیین مقدار تغییر شکلی که ماده می‌تواند قبل از رسیدن به ناپایداری و بروز پدیده لاغری داشته باشد، معرفی گردید [۱۴]. در سال ۱۹۶۸، گودوین^۷ با انجام آزمایش‌های تجربی تأثیر عواملی مانند روانکاری، ضخامت و جهت نورد را بر نمودارهای حد شکل‌دهی بررسی کرد [۱۵]. پس از آن در سال ۱۹۷۵ هکر^۸ فرآیند ساده شده‌ای را جهت تعیین تجربی نمودار حد شکل‌دهی ارائه نمود [۱۶]. با توجه به اینکه نمودارهای

حد شکل‌دهی با پایه کرنش ابزاری مهم برای تعیین حد شکل‌پذیری ورق‌های فلزی است، در سال ۱۹۹۳ گراف^۹ و هاسفورد^{۱۰} محاسبات نمودار حد شکل‌دهی را برای تغییر مسیرهای کرنش مورد بررسی و مطالعه قرار دادند [۱۷]. در سال ۲۰۰۱ برون^{۱۱} و مورستین^{۱۲} به صورت تجربی و تحلیلی، نمودار حد شکل‌دهی ورق‌های فلزی ناهمسانگرد را بررسی نمودند [۱۸]. همچنین در سال ۲۰۰۶ نارایاناسامی^{۱۳} و همکارش برای ورق‌های فولادی مختلف، نمودار حد شکست را توسعه دادند [۱۹]. در سال ۲۰۰۸ اوتایسانگسوک^{۱۴} و همکاران معیاری تجربی و عددی برای پیش‌بینی شکل‌پذیری ورق‌های فلزی ارائه کردند [۲۰]. در سال ۲۰۰۹ احمدی و همکاران، به صورت تجربی و تحلیلی، نمودارهای حد شکل‌دهی را مطالعه نموده و تأثیر عواملی چون توان کارسختی n و ضریب ناهمسانگردی r بر روی نمودارهای فوق را بررسی نمودند [۲۱].

با توجه به سادگی و کاربرد وسیع منحنی حد شکل‌دهی، تاکنون تحقیقات زیادی بر روی نحوه استخراج، اصلاح و کاربرد آن صورت گرفته ولی تعیین میزان دقت از لحاظ کمی و کیفی و همچنین محدوده مناسب پیش‌بینی شروع ترک، رشد آن و ایجاد شکست با استفاده از معیار آسیب FLD کمتر مورد توجه محققین واقع شده است.

در این تحقیق ابتدا با استفاده از نمودار حد شکل‌دهی برای فولاد St14 تعدادی از آزمایش‌های عملی با شرایط بارگذاری مختلف مانند کشش نمونه‌های استاندارد، شیاردار و شکافدار، فرایندهای هیدروفرمینگ لوله و کشش عمیق شبیه‌سازی شده، امکان وقوع ترک، رشد ترک و ایجاد گسیختگی در آنها پیش‌بینی می‌گردد. سپس، به منظور ارزیابی معیار آسیب نمودار حد شکل‌دهی، آزمایش‌های مذکور به صورت تجربی نیز انجام شده و نتایج عملی حاصل می‌گردد. در آخر، با مقایسه نتایج شبیه‌سازی‌های عددی و مشاهدات تجربی، میزان دقت و محدوده مناسب برای پیش‌بینی شکست ورق‌های فلزی توسط معیار آسیب FLD آشکار می‌شود.

9- Graf
10- Hosford
11- Brunet
12- Morestin
13- Narayanasamy
14- Uthaisangsuk

1- Marciniak
2- Kuczynski
3- Gurson
4- Hooputra
5- Keeler
6- Backofen
7- Goodwin
8- Hecker

تقسیم می‌گردد. در سمت راست فقط کرنش‌های اصلی و فرعی مثبت ترسیم شده ولی در سمت چپ کرنش‌های فرعی منفی نیز وجود دارند. مطابق شکل، منحنی در سمت چپ از وضعیت بارگذاری کشش تک‌محوره^۱ تا حالت کرنش صفحه‌ای^۲ و در سمت راست، از وضعیت بارگذاری کرنش صفحه‌ای تا حالت اتساع دومحوره^۳ را بیان می‌نماید. در هر یک از شرایط فوق، مقدار پارامتر ρ به صورت رابطه زیر می‌باشد:

$$\rho = \begin{cases} -0.5 & \text{کشش تک‌محوره} \\ 0.0 & \text{کرنش صفحه‌ای} \\ 1.0 & \text{کشش دومحوره} \end{cases} \quad (2)$$

نمودار حد شکل‌دهی برای ورق‌های نازک فلزی به صورت تجربی توسط آزمایش اریکسن^۴ تعیین می‌گردد. در این آزمایش، ابتدا توسط یک شابلن، شبکه‌ای از دوایر کوچک به قطر ۰/۱ اینچ بر روی باریکه‌های فلزی از ورق مورد نظر به طول ۱۲۰ میلی‌متر و از عرض ۱۲، ۲۴، ۳۶ تا ۱۲۰ میلی‌متر (ده نمونه) چاپ می‌شود. سپس هر نمونه در دستگاه آزمایش اریکسن قرار گرفته، توسط ورق گیر کاملاً مهار شده و به وسیله یک سنبه نیم‌کروی به شعاع ۳۰ میلی‌متر تا زمان وقوع ترک تغییر شکل داده می‌شود.

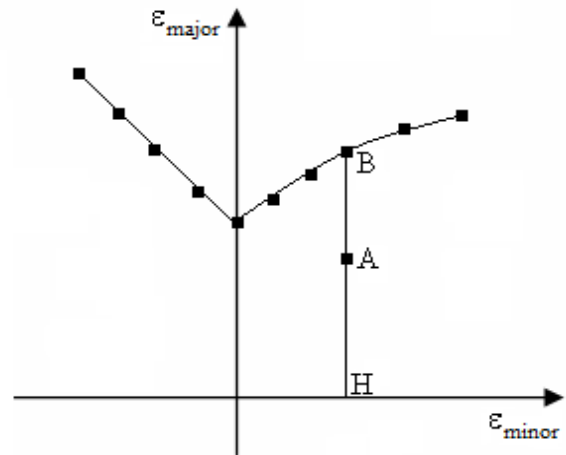
در اثر شکل‌دهی باریکه‌ها، دوایر تغییر شکل داده و به شکل بیضی در می‌آیند. با اندازه‌گیری اقطار بزرگ و کوچک بیضی‌های نزدیک به محل ترک و با استفاده از خط‌کش اندازه‌گیری میلر^۵، کرنش‌های اصلی و فرعی در محل وقوع ترک و اطراف آن تعیین گردیده و نمودار FLD ترسیم می‌شود. برای افزایش دقت نتایج، می‌توان چندین سری از باریکه‌ها را مورد آزمایش قرار داده و مقادیر کرنش‌ها را میانگین‌گیری نمود.

۲-۱- معیار آسیب FLD

همان‌گونه که اشاره گردید، منحنی FLD حد نهایی شکل‌پذیری ورق و رسیدن آن به منطقه شکست را نشان می‌دهد. بنابراین

۲- نمودار حد شکل‌دهی

به قابلیت شکل‌گرفتن ورق بدون وقوع ناپایداری گلوبی یا شکست، حد شکل‌دهی می‌گویند. هر ورق فلزی از هر جنس و ضخامت می‌تواند تا حد مشخصی یعنی باریک‌شدگی موضعی که منجر به شکست می‌گردد، تغییر شکل داده شود. یک روش بسیار معروف برای تعیین این حد، نمودار حد شکل‌دهی است. منحنی حد شکل‌دهی که اولین بار در سال ۱۹۶۴ توسط کیلر و بکوفن پیشنهاد گردید [۱۴]، نموداری است که رفتار ورق تحت مقادیر مختلف کرنش را توصیف می‌کند. منحنی حد شکل‌دهی همچنین اطلاعاتی از کرنش‌های بیشینه قابل تحمل توسط ورق، قبل از ناپایداری یا شکست را نشان می‌دهد. نمودار حد شکل‌دهی، در سیستم مختصات دوبعدی که در آن کرنش‌های اصلی ϵ_{major} روی محور عمودی و کرنش‌های فرعی ϵ_{minor} روی محور افقی نشان داده می‌شوند، ترسیم می‌گردد. کرنش‌ها معیاری از تغییر شکل هستند، کرنش اصلی در جهت تغییر شکل بزرگ‌تر و کرنش فرعی در جهت تغییر شکل کوچک‌تر تعریف می‌شود. این نمودار به صورت شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل (۱): نمودار حد شکل‌دهی به صورت شماتیک.

در منحنی فوق، نسبت کرنش‌های فرعی و اصلی به صورت زیر تعریف می‌گردد:

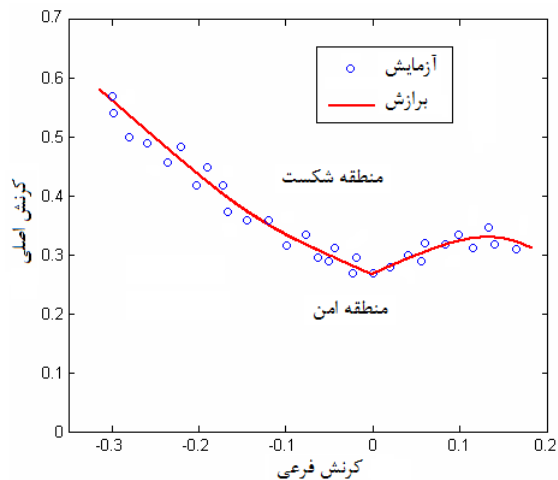
$$\rho = \frac{\epsilon_{minor}}{\epsilon_{major}} \quad (1)$$

همان‌گونه که شکل ۱ نشان می‌دهد، منحنی FLD یک منحنی سهمی شکل نامنظم است که نقطه کمینه آن در نزدیکی محور کرنش اصلی اتفاق افتاده و به دو قسمت چپ و راست

1- Uniaxial Tension
2- Plane Strain
3- Biaxial Stretching
4- Erichsen
5- Miller



شکل (۲): نمونه‌های کشیده شده از جنس فولاد St14 با ضخامت ۰/۸ میلی‌متر.



شکل (۳): نمودار حد شکل‌دهی برای فولاد St14 با ضخامت ۰/۸ میلی‌متر.

۳- شبیه‌سازی‌های عددی

به‌منظور ارزیابی معیار آسیب نمودار حد شکل‌دهی، آزمایش‌های کشش نمونه استاندارد، نمونه شیاردار، نمونه شکافدار، فرایند هیدروفورمینگ لوله و همچنین فرایند کشش عمیق با استفاده از معیار آسیب FLD موجود در نرم‌افزار ABAQUS-Explicit شبیه‌سازی می‌گردد. شبیه‌سازی‌ها تا آنجا ادامه داده می‌شود که مقدار متغیر آسیب به عدد یک (شکست کامل) برسد. المان‌هایی که متغیر آسیب در آنها به عدد یک برسد، المان‌های بحرانی بوده و دیگر قادر به تحمل تنش نخواهند بود. با فن حذف المان‌های بحرانی، ایجاد ترک، رشد آن و شروع گسیختگی قابل ملاحظه خواهد بود. نتایج پیش‌بینی عددی وقوع ترک و گسیختگی با نتایج تجربی حاصل از آزمایش‌های عملی مقایسه می‌شود. مقایسه

هرچه کرنش‌های نقاط مختلف ورق از این مرز خطر دورتر باشند، کمتر در معرض گسیختگی خواهند بود. بنابراین با استفاده از این مفهوم بسیار ساده می‌توان معیار آسیب FLD را تعریف نمود. مطابق شکل ۱ در این معیار، متغیر آسیب D برای هر المان، به‌صورت نسبت کرنش اصلی بیشینه به کرنش حدی متناظر با مقدار کرنش اصلی کمینه تعریف شده و از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$D = \frac{\varepsilon_{major}^A}{\varepsilon_{major}^B} = \frac{AH}{BH} \quad (۳)$$

بنابراین متغیر آسیب از مقدار صفر (ماده ایده‌آل) تا یک (شکست کامل) تغییر می‌کند. معیار شروع آسیب FLD، مدلی برای پیش‌بینی آغاز ناپایداری گلویی در فرایندهای شکل‌دهی ورق است. با توجه به نحوه استخراج منحنی FLD، آسیب‌های وابسته به شکل‌دهی خمشی با این معیار نمی‌توانند ارزیابی شوند.

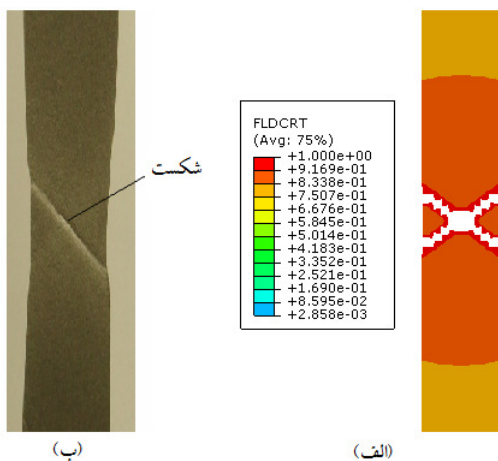
۲-۲- استخراج خواص مکانیکی

در این تحقیق، ورق فولادی St14 به ضخامت ۰/۸ میلی‌متر انتخاب گردید. فولاد St14 فولادی کم کربن با قابلیت شکل‌دهی بالا است که در صنایع خودروسازی، نظامی و غذایی کاربرد گسترده‌ای دارد و از جمله ورق‌های تولید شده در کشور می‌باشد. با انجام آزمایش کشش استاندارد، خواص مکانیکی ورق مطابق جدول ۱ تعیین گردید. همچنین با انجام آزمایش اریکسن، نمودار حد شکل‌دهی ورق فوق حاصل شد.

شکل ۲ نمونه‌های کشیده شده در دستگاه اریکسن و همچنین شکل ۳ نمودار حد شکل‌دهی استخراج شده را نشان می‌دهد. جزئیات انجام آزمایش‌های تجربی و روش تعیین نمودار FLD توسط نویسنده اول این مقاله منتشر گردیده است [۲۲].

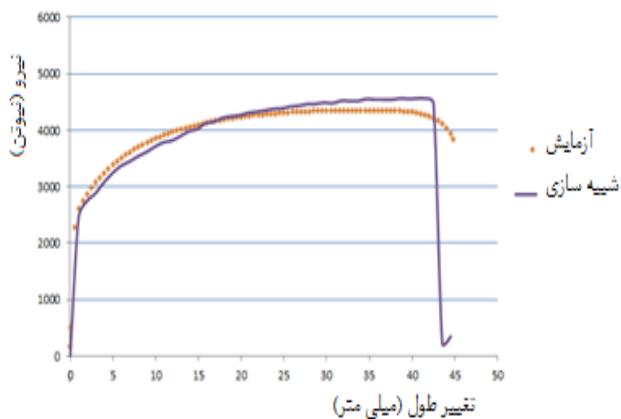
جدول (۱): خواص مکانیکی فولاد St14.

ضریب یانگ E (GPa)	تنش تسلیم اولیه σ_{y0} (MPa)	تنش نهایی σ_u (MPa)	کارسختی R (MPa)
۱۸۰	۱۵۹	۲۸۳	$۶۳۰ \cdot (\varepsilon_{eq}^P)^{۰.۳۶}$



شکل (۶): نتایج شروع شکست در آزمایش کشش نمونه استاندارد، الف) عددی و ب) تجربی.

همچنین شکل ۷، مقایسه نمودار نیرو- جابه‌جایی عددی و تجربی را نشان می‌دهد. مطابق شکل، نمودار به‌دست آمده از شبیه‌سازی عددی، با نمودار تجربی تطابق مناسبی داشته و مقدار خطای به‌وجود آمده در نواحی انتهایی شبیه‌سازی در حدود ۷ درصد می‌باشد. علت این امر می‌تواند ناشی از گلوبی شدن نمونه و خارج شدن تنش از حالت صفحه‌ای باشد. با توجه به تغییر شکل شدید ناحیه میانی نمونه، سه‌بعدی شدن وضعیت تنش و کرنش‌های پلاستیک زیاد، دوری از این اختلاف، به نظر غیرممکن است. لازم به‌ذکر است که معیار آسیب حد شکل دهی به‌خوبی توانسته است از لحاظ کمی افت خواص در ماده و در نتیجه کاهش نیرو در مراحل انتهایی را مطابق با نتایج تجربی پیش‌بینی نماید.

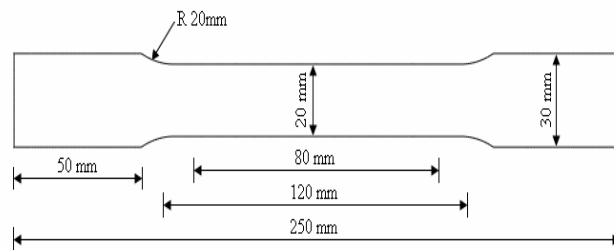


شکل (۷): نمودارهای نیرو- جابه‌جایی عددی و تجربی آزمایش کشش نمونه استاندارد.

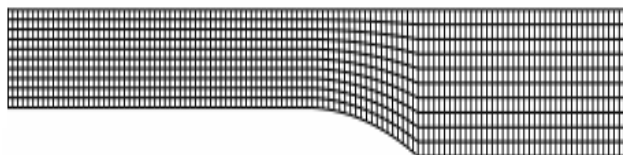
نتایج عددی و تجربی، میزان دقت از لحاظ کمی و کیفی و همچنین محدوده مناسب برای پیش‌بینی شکست ورق‌های فلزی توسط معیار آسیب FLD را آشکار می‌سازد.

۳-۱- آزمایش کشش نمونه استاندارد

هندسه نمونه آزمایش کشش مطابق استاندارد DIN1623 و شکل ۴ انتخاب می‌شود. به‌خاطر تقارن، یک چهارم هندسه مدل‌سازی گردیده و شرایط تقارن بر روی صفحات تقارن اعمال می‌شود. همچنین، به‌دلیل ضخامت کم نمونه از المان‌های تنش صفحه‌ای برای المان‌بندی استفاده می‌گردد. شکل ۵، مدل اجزاء محدود یک چهارم نمونه را نشان می‌دهد.



شکل (۴): ابعاد نمونه استفاده شده برای آزمایش کشش نمونه استاندارد.

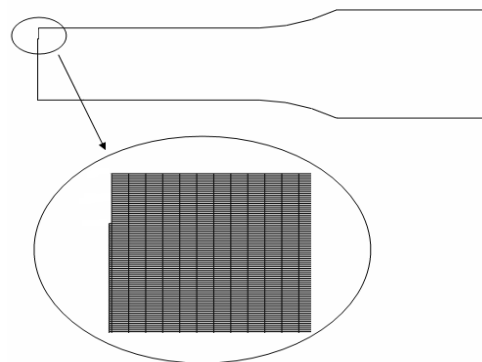


شکل (۵): مدل اجزاء محدود یک‌چهارم نمونه کشش استاندارد.

شبیه‌سازی‌ها را تا آنجا ادامه داده که مقدار متغیر آسیب در المان‌ها به عدد یک (شکست کامل) برسد. با استفاده از فن حذف المان در المان‌های بحرانی می‌توان شروع ترک و بروز شکست را ملاحظه نمود. شکل ۶، نتایج عددی شروع شکست و مقایسه آن با نتایج تجربی را نشان می‌دهد. مطابق شکل، ترک از مرکز نمونه شروع شده، در جهت مورب گسترش یافته و قطعه دچار شکست نرم می‌گردد. نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی‌های عددی نیز شروع ترک از مرکز نمونه و گسترش آن در جهات مورب را پیش‌بینی نموده و با دقت مناسبی بر نتایج عملی منطبق می‌باشد. بنابراین معیار آسیب FLD به‌خوبی توانسته است از لحاظ کیفی وقوع شکست در این آزمایش را پیش‌بینی نماید.

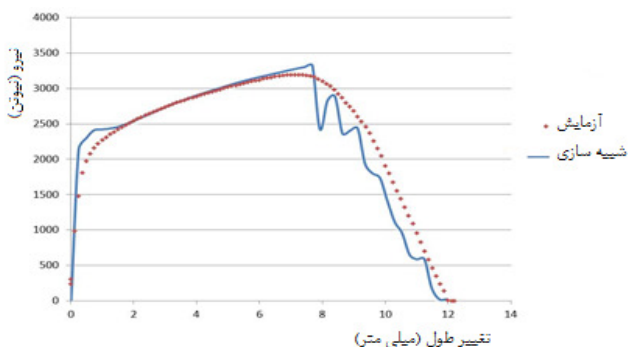
۳-۲- آزمایش کشش نمونه شیاردار

نمونه استاندارد کشش انتخاب شده، شیاری به عرض 0.4 و طول 3 میلی‌متر در وسط لبه کناری آن ایجاد می‌گردد. شکل ۸، مدل اجزاء محدود نصف نمونه شیاردار را نشان می‌دهد. به‌خاطر تقارن، نصف هندسه مدل‌سازی شده و شرایط تقارن اعمال می‌گردد. همچنین، به‌دلیل ضخامت کم نمونه، برای المان‌بندی، المان‌های تنش صفحه‌ای انتخاب می‌شوند. به‌دلیل تمرکز تنش نیز در اطراف شیار از المان‌های زیادتری در مقایسه با سایر نواحی استفاده می‌گردد.



شکل (۸): مدل اجزاء محدود نصف نمونه شیاردار.

همچنین شکل ۱۰، مقایسه نمودارهای نیرو-جابجایی عددی و تجربی در آزمایش کشش نمونه شیاردار را نشان می‌دهد. مطابق شکل، نمودار عددی حاصل از پیش‌بینی معیار آسیب FLD با دقت مناسبی توانسته نمودار تجربی را دنبال کند و این دو نمودار دارای تطابق خوبی می‌باشند. در نتیجه معیار فوق پیش‌بینی مناسبی از این آزمون ارائه نموده، به‌درستی افت خواص ماده و کاهش نیرو را پیش‌بینی می‌کند. در این آزمایش حداکثر خطای نیرو در ناحیه پلاستیک در حدود 6 درصد است که قابل قبول می‌باشد.

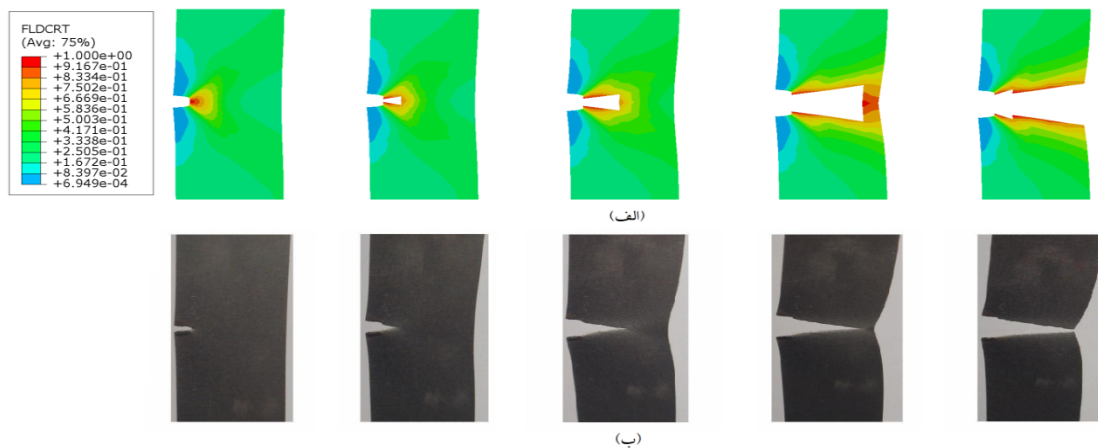


شکل (۱۰): نمودارهای نیرو-جابجایی تجربی و عددی آزمایش کشش نمونه شیاردار.

۳-۳- آزمایش کشش نمونه شکافدار

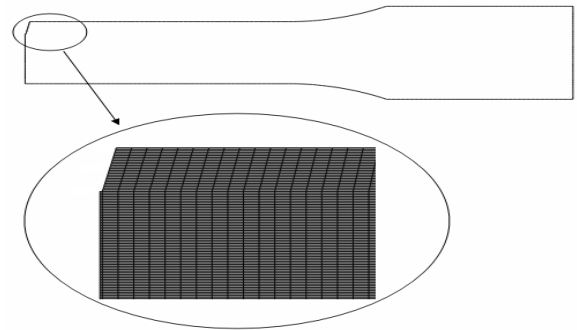
نمونه استاندارد کشش انتخاب شده و شکافی به ابعاد 2 و 4 میلی‌متر در وسط لبه کناری آن ایجاد می‌گردد. شکل ۱۱، مدل اجزاء محدود نصف نمونه شکافدار را نشان می‌دهد. به‌خاطر تقارن، نصف هندسه مدل‌سازی گردیده و برای شبکه‌بندی، اجزاء تنش صفحه‌ای انتخاب می‌شوند. به‌دلیل تمرکز تنش نیز، در اطراف شکاف از اجزاء زیادتری استفاده می‌گردد.

شکل ۹، مقایسه نتایج عددی و تجربی مراحل رشد ترک و شروع شکست در آزمایش کشش نمونه شیاردار را نشان می‌دهد. همان‌گونه که شکل نشان می‌دهد، نمودار آسیب حد شکل‌دهی توانسته جهت طولی رشد ترک را منطبق بر نتایج عملی پیش‌بینی نماید ولی از لحاظ زاویه به‌وجود آمده در لبه‌های نمونه گسیخته شده، تطابق مناسبی بین نتایج پیش‌بینی‌های عددی و مشاهدات تجربی وجود ندارد.

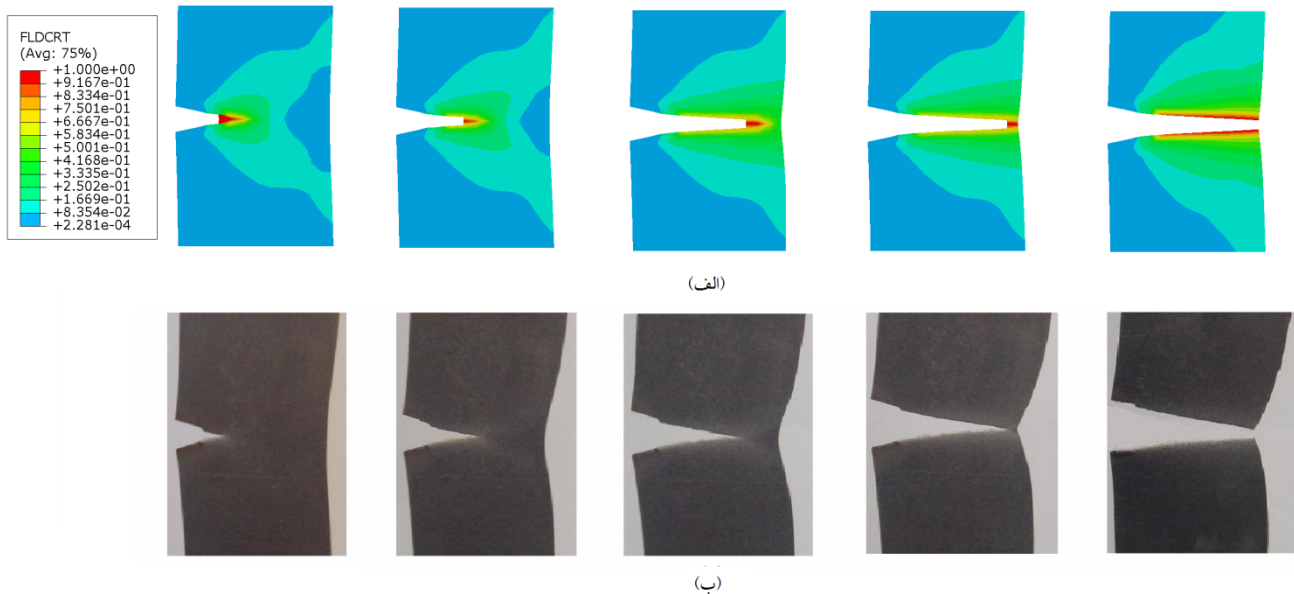


شکل (۹): مقایسه نتایج رشد ترک و شروع شکست در آزمایش کشش نمونه شیاردار، (الف) عددی و (ب) تجربی.

شکل ۱۲، مقایسه نتایج عددی و تجربی رشد ترک و شروع شکست در آزمایش کشش نمونه شیاردار را نشان می‌دهد. همان‌گونه که شکل بیان می‌کند، نمودار آسیب حد شکل‌دهی توانسته جهت طولی رشد ترک را منطبق بر نتایج عملی پیش‌بینی نموده و از لحاظ زاویه به‌وجود آمده در لبه‌های نمونه گسیخته شده نیز، تطابق مناسبی بین نتایج عددی و مشاهدات تجربی وجود دارد.



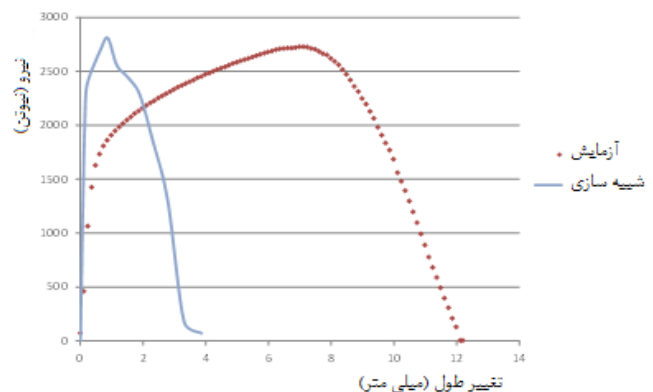
شکل (۱۱): مدل اجزاء محدود نصف نمونه شکافدار.



شکل (۱۲): مقایسه نتایج رشد ترک و شروع شکست در آزمایش کشش نمونه شکافدار، (الف) عددی و (ب) تجربی.

چنان‌که از شکل مشخص است، نمودار حاصل از شبیه‌سازی عددی با نمودار تجربی تفاوت کلی داشته و معیار آسیب حد شکل‌دهی بر خلاف دیگر آزمایش‌ها نتوانسته است که رفتار ماده را به‌خوبی پیش‌بینی نماید. حداکثر مقدار نیروی کشش در آزمون تجربی ۲۷۲۸ نیوتن و در پیش‌بینی‌های عددی برابر با ۲۸۱۰ نیوتن می‌باشد که خطایی در حدود ۳ درصد را نشان می‌دهد، ولی با این وجود، این معیار نتوانسته نمودار تجربی را دنبال نموده و زودتر از حالت واقعی شکست قطعه را پیش‌بینی کند. علت مسئله فوق این است که برخلاف آزمایش‌های قبلی، در این آزمایش به‌علت شکل هندسی نمونه شکافدار، قطعه تحت خمش زیاد و قابل توجه‌ای قرار گرفته، مؤلفه‌های تنش σ_x ، σ_y و τ_{xy} شدیداً از مقدار منفی تا مثبت تغییر کرده و تنش‌ها همواره به‌صورت مثبت و کششی نمی‌باشند.

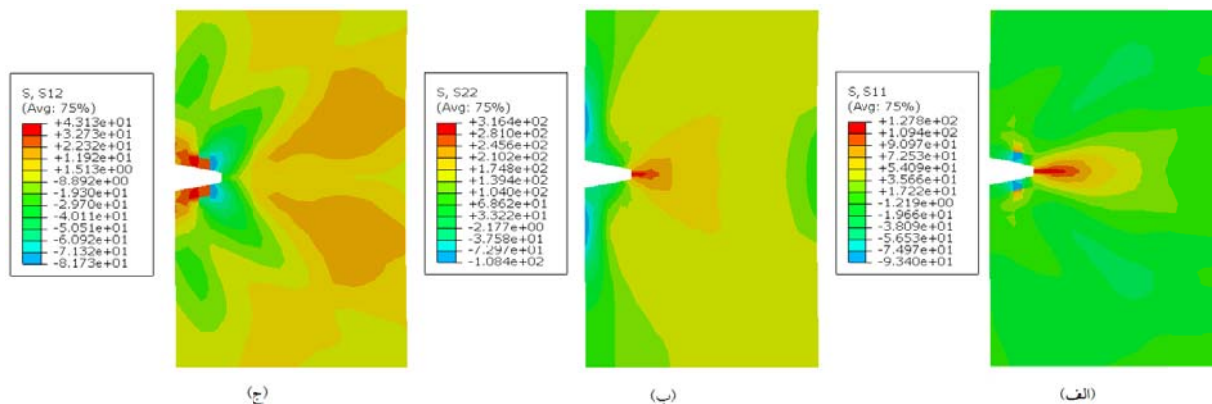
همچنین شکل ۱۳، مقایسه نمودار نیرو-جابجایی عددی و تجربی را نشان می‌دهد.



شکل (۱۳): نمودارهای نیرو-جابجایی تجربی و عددی آزمایش کشش نمونه شکافدار.

حاصل با نتایج تجربی متفاوت خواهد بود. در چنین مواردی تنها ممکن است که معیار آسیب FLD بتواند تخمینی از میزان نیروی حداکثر تحمل شده توسط قطعه را ارائه دهد.

کانتورهای تنش مذکور در شکل ۱۴ نمایش داده شده‌اند. بنابراین معیار آسیب FLD که از حالت‌های کششی به‌دست آمده نمی‌تواند به دقت رفتار ماده و افت نیرو را در آزمون‌هایی با تنش‌های کششی- فشاری ناشی از خمش پیش‌بینی کند و نتایج

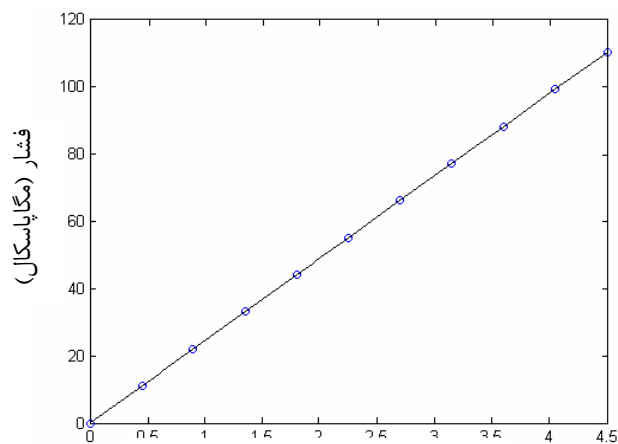


شکل (۱۴): کانتورهای تنش، (الف) σ_x ، (ب) σ_y و (ج) τ_{xy} .

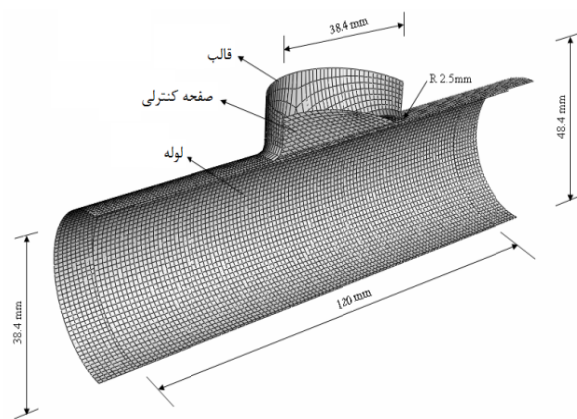
برای پیش‌بینی نتایج ترک و شکست در فرایند، شرایط به‌گونه‌ای انتخاب می‌شود که شکست اتفاق بیفتد. بنابراین شبیه‌سازی با در نظر گرفتن مسیر بارگذاری افزایشی مطابق شکل ۱۶ و بدون استفاده از صفحه کنترلی، انجام می‌گیرد. همچنین فرآیند به‌صورت یک‌طرفه در نظر گرفته شده، سمت چپ لوله کاملاً ثابت گردیده و تغذیه محوری تنها از سمت راست لوله اعمال می‌شود. حداکثر مقدار این تغذیه محوری ۴/۵ میلی‌متر است.

۴-۳- فرایند هیدروفرمینگ لوله T شکل

فرایند هیدروفرمینگ لوله T شکل، شامل اعمال همزمان نیروی محوری به لوله و فشار سیال درون لوله و شکل دادن آن در داخل یک قالب به‌منظور تولید قطعات T شکل می‌باشد. شکل ۱۵، نصف هندسه و مدل اجزاء محدود فرایند هیدروفرمینگ لوله T شکل را نشان می‌دهد.



شکل (۱۶): مسیر بارگذاری. (میلی‌متر)



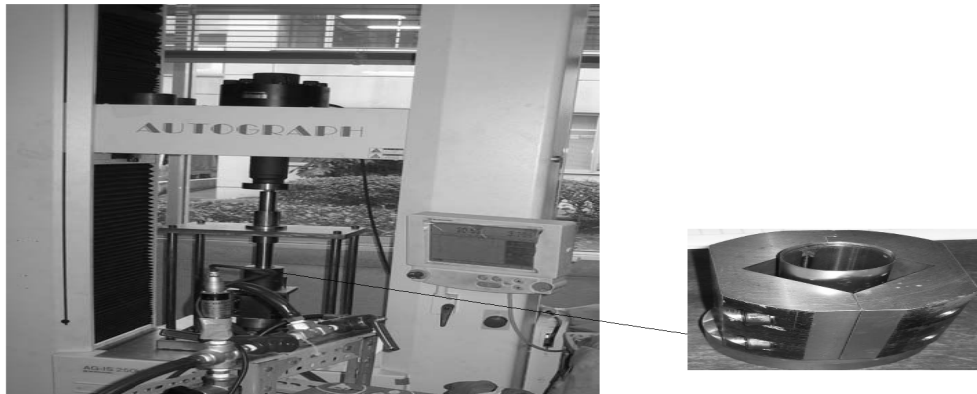
شکل (۱۵): نصف هندسه و مدل اجزاء محدود فرایند هیدروفرمینگ لوله T شکل.

پس از انجام شبیه‌سازی‌های عددی، به‌منظور ارزیابی نتایج پیش‌بینی شده، آزمایش تجربی مطابق با شرایط شبیه‌سازی انجام می‌گیرد. شکل ۱۷ تصویر مجموعه قالب، ابزار و تجهیزات تولید

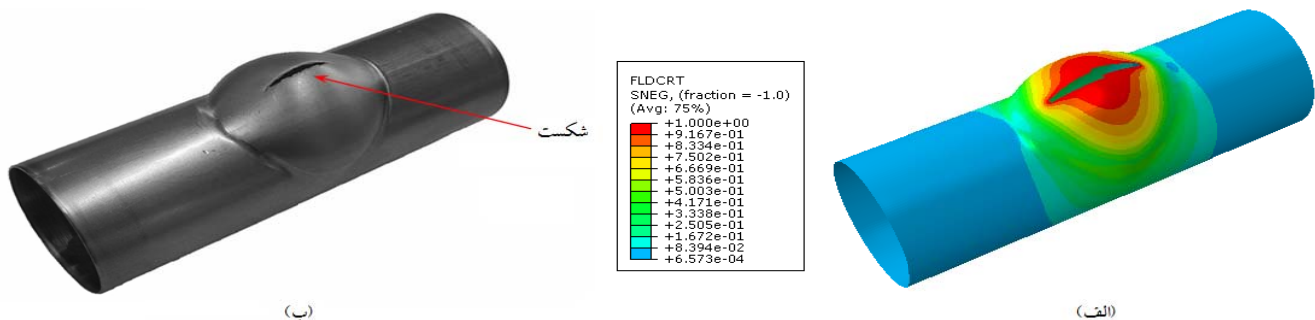
به‌خاطر تقارن، نصف هندسه مدل‌سازی می‌گردد. وجود صفحه کنترلی و مسیر بارگذاری (نمودار فشار سیال بر حسب تغذیه محوری) از مهم‌ترین پارامترهای فرایند می‌باشد.

کنترلی، حتی با تغذیه محوری نسبتاً کوچک ۴/۵ میلی متری نیز ترک به وجود می آید. ترک از مرکز لوله در ناحیه خروجی شروع شده، با افزایش بارگذاری رشد نموده و در جهت محور لوله انتشار می یابد. نتایج پیش بینی معیار آسیب FLD تطابق مناسبی با نتایج عملی داشته و از این آزمون موفق بیرون می آید.

فشار هیدرولیکی مورد استفاده در آزمایش فرایند هیدروفورمینگ لوله T شکل را نشان می دهد. همچنین شکل ۱۸، نتایج پیش بینی شروع ترک و شکست در فرایند هیدروفورمینگ لوله بدون استفاده از صفحه کنترلی، توسط معیار آسیب FLD و نتایج تجربی را نشان می دهد. مطابق شکل، بدون استفاده از صفحه



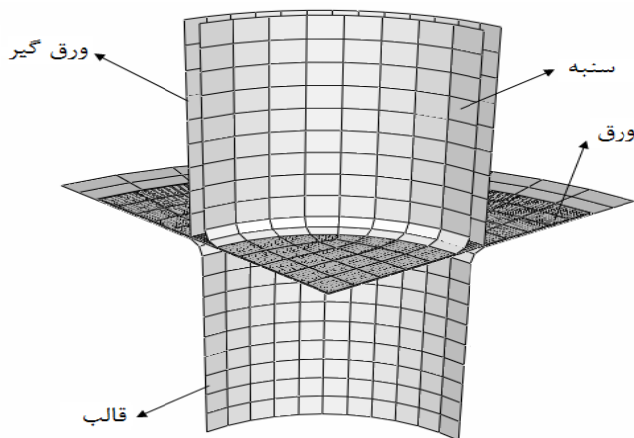
شکل (۱۷): مجموعه قالب، ابزار و تجهیزات تولید فشار هیدرولیکی دستگاه آزمایش فرایند هیدرو فرمینگ لوله T شکل.



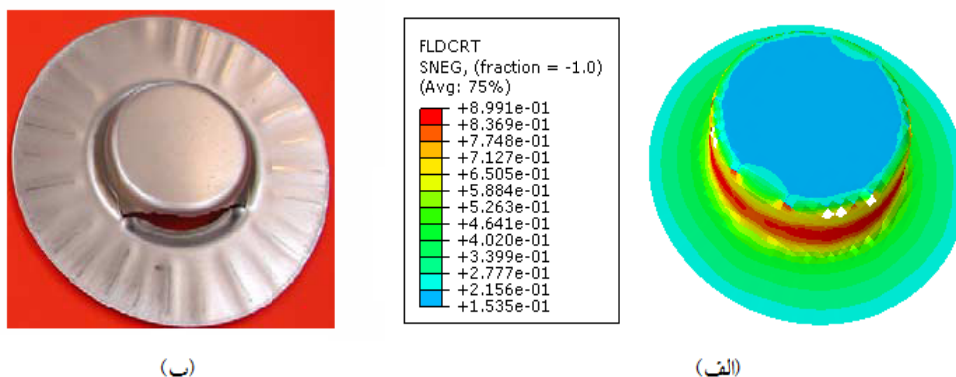
شکل (۱۸): نتایج شروع شکست در فرایند هیدرو فرمینگ لوله، الف) عددی و ب) تجربی.

۳-۵- فرایند کشش عمیق

یکی دیگر از فرایندهای مهم در شکل دهی ورق، فرایند کشش عمیق می باشد. شکل ۱۹ یک چهارم مدل اجزاء محدود فرایند را نشان می دهد. به دلیل تقارن، یک چهارم هندسه مدل سازی می شود. با توجه به شعاع های ورق و سنبه که به ترتیب ۱۰۰ و ۵۰ میلی متر می باشند، نسبت کشش برابر با ۲ انتخاب می گردد. همچنین شعاع دهانه قالب و ورق گیر به ترتیب برابر با ۵۱/۲۵ و ۵۶/۲۵ میلی متر در نظر گرفته می شود. نتایج پیش بینی شروع ترک و شکست در فرایند کشش عمیق با استفاده از معیار آسیب FLD و همچنین مرجع [۴] در شکل ۲۰ آورده شده است.



شکل (۱۹): یک چهارم مدل اجزاء محدود فرایند کشش عمیق.



شکل (۲۰): نتایج شروع شکست در فرایند کشش عمیق، الف) عددی و ب) مرجع [۴].

دقت مناسب زمان و مکان ایجاد ترک و رشد آن را نشان دهد و تنها ممکن است بتواند حداکثر نیروی قابل تحمل توسط ورق را تخمین بزند. علت مسئله فوق این است که در چنین شرایطی، مسیرهای کرنش غیرخطی بوده و با مسیرهای کرنش ساده که نمودار FLD از آن استخراج می‌گردد، همخوانی ندارد.

مطابق شکل ۲۰، با نسبت کشش ۲ در همان ابتدای فرایند و در نوک شعاع سنبه، ترک به وجود آمده و با افزایش بارگذاری، رشد نموده و در جهت محیطی انتشار می‌یابد. گرچه نتایج پیش‌بینی معیار آسیب FLD اندکی متفاوت از نتایج آزمایش عملی است ولی معیار فوق توانسته است تا حدود زیادی محل شروع ترک و گسیختگی را پیش‌بینی نماید.

۵- مراجع

1. Samuel, M. "Numerical and Experimental Investigations of Forming Limit Diagrams in Metals Sheets", Journal of Materials Proc. 106, No. 1-3, pp. 261-266, 2000.
2. Haddad, A., Vacher, P., and Arrieux, R. "Numerical Determination of ForminTech., Vol. 153-154, No. 1-3, pp. 424-431, 2004.
3. Zimniak, Z. "Implementation of the Forming Limit Stress Diagram in FEM Simulations", Journal of Materials Processing Technology, Vol. g Limit Diagrams of Orthotropic Sheets Using '3G' Theory of Plasticity", J. Materials Proc. Techn., Vol. 92-93, No. 2, pp. 419-423, 1999.
4. Lang, L., Danckert, J., and Nielsen K.B. "Investigation into Hydrodynamic Deep Drawing Assisted by Radial Pressure Part I. Experimental Observations of the Forming Process of Aluminum Alloy", Journal of Materials Proc. Tech., Vol. 148, No. 1, pp. 119-131, 2004.
5. Lang, L., Danckert, J., and Nielsen K.B. "Investigation into Hydrodynamic Deep Drawing Assisted by Radial Pressure Part II. Numerical Analysis of the Drawing Mechanism and the Process Parameters", J. Materials Proc. Tech. Vol. 166, No. 1, pp. 150-161, 2005.
6. Evangelista, S.H., Lirani, J., and Al-Qureshi, H.A. "Implementing a Modified Marciniak-Kuczynski Model Using the Finite Element Method for the

۴- نتیجه‌گیری

معیار آسیب نمودار حد شکل‌دهی، یک معیار ساده برای تخمین میزان شکل‌پذیری ورق‌های فلزی است ولی تعیین میزان دقت و محدوده پیش‌بینی مناسب این معیار، یکی از مهم‌ترین چالش‌های محققین و مهندسیین می‌باشد. در این تحقیق به منظور ارزیابی معیار آسیب فوق، با استفاده از نمودار حد شکل‌دهی فولاد St14 تعدادی از آزمایش‌های تجربی مانند کشش نمونه‌های استاندارد، شیاردار و شکافدار، فرایندهای هیدروفورمینگ لوله و کشش عمیق شبیه‌سازی شده، امکان وقوع ترک و گسیختگی در آنها پیش‌بینی گردید. آزمایش‌های فوق به صورت تجربی نیز انجام شده و نتایج عملی حاصل با نتایج شبیه‌سازی‌های عددی مقایسه گردید. مقایسه نتایج عددی و تجربی آشکار کرد که معیار FLD در فرایندهای شکل‌دهی ساده و کششی (از کشش تک‌محوره تا کرنش صفحه‌ای و اتساع دو محوره) با مسیرهای کرنش خطی می‌تواند به خوبی زمان و مکان ایجاد ترک و رشد آن را پیش‌بینی نماید. اما در شکل‌دهی‌های پیچیده با مسیرهای کرنش متفاوت که ورق تحت خمش و تنش‌های کششی- فشاری قرار می‌گیرد معیار فوق نمی‌تواند با

15. Goodwin, G.M. "Application of Strain Analysis to Sheet Metal Forming Problems in the Press Shop", *Metallitaliana*, Vol. 60, No. 1, pp. 764-774, 1968.
16. Hecker, S.S. "Simple Technique for Determining Forming Limit Curves", *Sheet Metal Industries*, Vol. 53, No. 1, pp. 671-675, 1975.
17. Graf, A.F. and Hosford, W.F. "Calculation of Forming Limit Diagram for Changing Strain Paths", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 24, No.1, pp. 2497-2501, 1993.
18. Brunet, M. and Morestin, F. "Experimental and Analytical Necking Studies of Anisotropic Sheet Metals", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 112, No. 2, pp. 214-226, 2001.
19. Narayanasamy, R. and Narayanan, C.S. "Some Aspects on Fracture Limit Diagram Developed for Different Steel Sheets", *Materials Science Engineering A*, Vol. 417, No. 5, pp. 197-224, 2006.
20. Uthaisangsuk, V., Prah, U., Munstermann, S., and Bleck, W. "Experimental and Numerical Failure Criterion for Formability Prediction in Sheet Metal Forming", *Computational Materials Science*, Vol. 43, No. 1, pp. 43-50, 2008.
21. Ahmadi, S., Eivani, A.R., and Akbarzadeh, A. "Experimental and Analytical Studies on the Prediction of Forming Limit Diagrams", *Computational Materials Science*, Vol. 44, No. 4, pp. 1252-1257, 2009.
22. Haji Aboutalebi, F. "Numerical and Experimental Determination of Forming Limit Diagram for DIN 1623St14 Steel", *Steel Research International*, Vol. 81, No. 9, pp. 667-669, 2010.
7. Vacher, P., Arrieux, R., and Tabourot, L. "Analysis of a Criterion of Deep Drawing Operation Capability for Thin Orthotropic Sheets", *J. Materials Proc. Tech.*, Vol. 78, No. 1-3, pp. 190-197, 1998.
8. Nguyen, N.T., Arrieux, R., Vacher, P., and Tabourot, L. "Plastic Instability for Off-axes Loading in Deep-drawing Operations", *J. Materials Proc. Tech.*, Vol. 77, No. 1-3, pp. 175-179, 1998.
9. Hu, J., Ishikawa, T., and Jonas, J.J. "Finite Element Analysis of Damage Evolution and the Prediction of the Limiting Draw Ratio in Textured Aluminum Sheets", *J. Materials Proc. Tech.*, Vol. 103, No.3, pp. 374-382, 2000.
10. Yu, Z., Lin, Z., and Zhao, Y. "Evaluation of Fracture Limit in Automotive Aluminum Alloy Sheet Forming", *Materials and Design*, Vol. 28, No.2, pp. 203-207, 2007.
11. Takuda, H., Yoshii, T., and Hatta, N. "Finite Element Analysis of the Formability of a Magnesium-Based Alloy AZ31 Sheet", *J. Materials Proc. Tech.*, Vol. 89-90, No. 1-3, pp. 135-140, 1999.
12. Mashayekhi, M. "Damage Models and Identification Procedures for A533B Steel", *Aero. Mech. J.*, Vol. 5, No. 2, pp. 65-75, 2009. (In Persian).
13. Hooputra, H., Gese, H., Dell, H., and Werner, H. "A Comprehensive Failure Model for Crashworthiness Simulation of Aluminum Extrusions", *Int. J. Crashworthiness*, Vol. 9, No. 5, pp. 449-463, 2004.
14. Keeler, S.P. and Backofen, W.A. "Plastic Instability and Fracture in Sheets Stretched over Rigid Punches", *ASM Transactions Quarterly*, Vol. 56, No. 1, pp. 25-48, 1964.