



## پیش‌بینی عددی و تایید تجربی شکست در ورق‌های جوش خورده به هم با استفاده از مکانیک آسیب

محمد رضا نقش<sup>1</sup>، فرهاد حاجی ابوطالبی<sup>2\*</sup> و مهرداد پورسینا<sup>3</sup>

<sup>1</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان

<sup>2</sup> استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان

<sup>3</sup> دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان

تاریخ دریافت: 1392/07/02؛ تاریخ بازنگری: 1392/10/20؛ تاریخ پذیرش: 1393/02/28

### چکیده

ورق‌های جوش خورده به هم، ورق‌هایی هستند که از یک جنس با دو ضخامت متفاوت یا از دو جنس مختلف تشکیل شده و با فرآیند جوشکاری به یکدیگر متصل می‌گردند. با توجه به کاربرد فراوان این ورق‌ها، پیش‌بینی حد شکل‌پذیری آن‌ها بسیار مهم می‌باشد. در این تحقیق ابتدا، آزمایش کشش بر روی نمونه استاندارد فولادی به ضخامت‌های 0/8، 1/2 میلی‌متر و نمونه جوش خورده به هم انجام شده و نمودار نیرو-جابجایی برای نمونه استاندارد تعیین می‌گردد. سپس با انجام آزمایش اریکسن، نمودار حد شکل دهی ورق جوش خورده به هم حاصل می‌شود. با استفاده از نمودار فوق و معیار آسیب نرم، فرآیندهای کشش استاندارد، آزمایش اریکسن و کشش عمیق در کد آباکوس صریح شبیه‌سازی گردیده و رشد آسیب، شروع ترک و شکست در هر یک از فرآیندها پیش‌بینی می‌شود. در پایان، نتایج عددی شبیه‌سازی‌ها با نتایج تجربی مقایسه گردیده و اعتبارسنجی می‌شوند.

**کلمات کلیدی:** ورق‌های جوش خورده به هم؛ مکانیک آسیب؛ آزمایش اریکسن؛ فولاد St12.

## Numerical prediction and experimental validation of fracture in tailor welded blanks using damage mechanics

M.R. Naghsh<sup>1</sup>, F. Haji Aboutalebi<sup>2,\*</sup> and M. Poursina<sup>3</sup>

<sup>1</sup> M. Sc. Student, Mech. Eng., University of Isfahan, Isfahan, Iran

<sup>2</sup> Assist. Prof., Mech. Eng. Dept., University of Isfahan, Isfahan, Iran

<sup>3</sup> Assoc. Prof., Mech. Eng. Dept., University of Isfahan, Isfahan, Iran

### Abstract

Tailor welded blanks are the blanks made of one material with two different thicknesses or two various materials which are joined together by welding process. Due to the wide application of these blanks, prediction of their formability limit is very important. In this investigation, first tensile test is carried out on the steel standard specimen with thicknesses of 0.8 and 1.2 millimeter, and tailor welded blank specimen and force-displacement diagram is determined for the standard specimen. Then, forming limit diagram of the tailor welded blank is achieved from performing the Erichsen's test. Using the above diagram and ductile damage criterion, the standard tensile test, Erichsen's test, and deep drawing processes are simulated in the ABAQUS/Explicit code and damage evolution, crack onset, and fracture in each processes are predicted. Finally, the numerical simulation results are compared and validated with the practical results.

**Keywords:** Tailor welded blanks; Damage mechanics; Erichsen's test; St12 steel.

\* نویسنده مسئول؛ تلفن: 0311 7934110؛ فکس: 0311 7934110

آدرس پست الکترونیک: [f.hajjaboutalebi@eng.ui.ac.ir](mailto:f.hajjaboutalebi@eng.ui.ac.ir)

## 1- مقدمه

نگرانی‌های زیست محیطی و کاهش سریع سوخت‌های فسیلی سازندگان خودروها را بر آن داشته که ضمن اجرای قوانین زیست محیطی به تقاضای روز افزون مشتریان خود مبنی بر ساخت تولیداتی با مصرف سوخت بهینه، پاسخ مثبت دهند. از این رو خودروسازان روز به روز بیشتر به سوی ساخت تولیداتی با مواد سبکتر و کیفیت بالاتر سوق داده می‌شوند تا بتوانند مصرف سوخت و ظاهر محصولات خود را بهبود بخشیده و اتومبیل‌های ارزان‌تری تولید کنند.

یکی از راه‌های دسترسی به این منظور، استفاده از ورق‌های جوش‌خورده به هم<sup>1</sup> در بدنه خودرو می‌باشد. با استفاده مناسب از ورق‌های جوش‌خورده به هم به جای ورق‌های معمولی، قطعه کارکرد قبلی خود را حفظ کرده و با هزینه کمتری تولید می‌شود. ورق‌های جوش‌خورده به هم از ترکیب دو ورق با جنس‌های متفاوت یا دو ورق از یک جنس ولی با ضخامت‌های مختلف تولید شده و با روش‌های پیشرفته جوشکاری (نظیر جوشکاری مقاومتی، لیزر، یا اصطکاک) به یکدیگر متصل می‌گردند.

در دهه اخیر با توجه به کاربرد ویژه ورق‌های جوش‌خورده به هم در صنایع خودروسازی و هواپیماسازی، تحقیقات زیادی در این زمینه انجام شده است. در سال 2000 چویا<sup>2</sup> و همکاران، به بررسی حرکت خط‌جوش ورق‌های جوش‌خورده به هم در فرآیند کشش عمیق پرداختند. ایشان دو نمونه دایره‌ای و مستطیلی شکل از این ورق‌ها را تحت فرآیند کشش عمیق بررسی نموده و نتیجه گرفتند که خط جوش در نمونه دوار کمتر از نمونه مستطیلی شکل جابجا می‌گردد [1] در سال 2001 هئو<sup>3</sup> و همکاران، به تاثیر ورق گیر کنترل نیروی اعمالی در حرکت خط‌جوش ورق‌های جوش‌خورده به هم در فرآیند کشش عمیق پرداخته و نشان دادند که با اعمال نیرو به قسمت‌های مختلف خط جوش و کنترل حرکت آن، فرآیند کشش عمیق بهبود می‌یابد [2]. چان<sup>4</sup> و همکاران در سال 2003 به بررسی اثر ضخامت‌های مختلف در نمودار حد شکل‌دهی ورق‌های جوش‌خورده به هم

پرداخته و نشان دادند که هر چه نسبت ضخامت بیشتر باشد، حد شکل‌دهی کمتر خواهد بود [3].

در سال 2007 پادمانابهان<sup>5</sup> و همکاران، فرآیند کشش عمیق ورق‌های جوش‌خورده به هم (مربک از آلومینیوم و فولاد) را مورد بررسی قرار داده و نتیجه گرفتند که ترکیب این دو فلز باعث افزایش میزان شکل‌پذیری می‌گردد [4].

عباسی و همکاران در سال 2012 میزان چروکیدگی دیواره ظروف تولید شده در فرآیند کشش عمیق ورق‌های جوش‌خورده به هم را به روش عددی و تجربی مورد تحلیل قرار دادند. ایشان نشان دادند که امواج چروکیدگی تنها در ناحیه نازک تر به وجود آمده و چروکیدگی با توسعه سه موج شروع می‌گردد [5].

در سال 2013 فضلی با استفاده از طول مسیر تغییر شکل گره‌های مرزی، شکل اولیه مناسب و بهینه ورق‌های جوش‌خورده به هم را مورد بررسی قرار داده و نتیجه گرفت که بهینه‌سازی شکل ورق باعث حرکت کمتر خط جوش خواهد شد [6].

هدف از انجام این تحقیق، پیش‌بینی حد شکل‌پذیری ورق‌های جوش‌خورده به هم با استفاده از رویکرد مکانیک آسیب و معیارهای آسیب می‌باشد. جنس ورق مورد استفاده، فولاد St12 (تولیدی شرکت فولاد مبارکه اصفهان) بوده که به دلیل شکل‌پذیری و قیمت مناسب، یکی از ورق‌های پرکاربرد در صنایع شکل‌دهی و خودروسازی به شمار می‌آید. در این پژوهش ابتدا، با انجام آزمایش کشش بر روی نمونه استاندارد به ضخامت‌های 0/8، 1/2 میلی‌متر و نمونه جوش‌خورده به هم، نمودار نیرو-جابجایی برای نمونه استاندارد تعیین می‌شود. سپس، با انجام آزمایش اریکسن<sup>6</sup> بر روی نمونه‌های جوش‌خورده به هم، نمودار حد شکل‌دهی نیز حاصل می‌گردد. با استفاده از نمودار فوق و معیار آسیب نرم، فرآیندهای کشش نمونه استاندارد، آزمایش اریکسن و کشش عمیق، در کد آباکوس صریح شبیه‌سازی شده و رشد آسیب، ایجاد ترک و وقوع شکست در آن‌ها پیش‌بینی می‌گردد. در پایان، نتایج پیش‌بینی‌های عددی حاصل از شبیه‌سازی‌ها با نتایج تجربی مقایسه شده و اعتبارسنجی می‌گردند.

<sup>1</sup> Tailor Welded Blanks (TWB)

<sup>2</sup> Choa

<sup>3</sup> Heo

<sup>4</sup> Chan

<sup>5</sup> Padmanabhan

<sup>6</sup> Erichsen

## 2- مکانیک آسیب

در دهه های اخیر تئوری های زیادی با هدف پیش بینی استحکام مواد به وجود آمده است که از بین آنها پلاستیسیته پیوسته و مکانیک شکست معروف تر می باشند. مکانیک آسیب پیوسته ابزار جدیدی در مهندسی مکانیک به شمار می رود. اساس تئوری معمولا به کاجانوف<sup>1</sup> در سال 1958 نسبت داده می شود [7].

آسیب، فرآیند فیزیکی پیشرونده ای است که در نهایت منجر به شکست قطعه می گردد و به انواع نرم، ترد، خزشی و خستگی در سیکل های بارگذاری کم یا زیاد تقسیم می شود. هرگاه آسیب با تغییر شکل پلاستیک قابل توجهی به وجود آمده باشد آسیب، نرم نامیده می شود. این پدیده به واسطه رشد و به هم پیوستن حفره ها در اثر تغییر شکل پلاستیک ایجاد می شود.

در اوایل دهه نود میلادی لمتر<sup>2</sup> و همکاران تلاش بسیاری کردند تا تحقیقات صورت گرفته در رابطه با تضعیف ساختار و زوال خواص فیزیکی ماده را در چارچوب مکانیک آسیب و به صورت معیاری برای پیش بینی شکست ارائه دهند [8]. از این زمان به بعد مکانیک آسیب پیوسته، پایه بسیاری از تحقیقات مربوط به پیش بینی استحکام مواد قرار گرفت. باتاچاریا<sup>3</sup> و همکارش در سال 1998 با تکیه بر مراحل شکل گیری و رشد آسیب در داخل یک کریستال، ایجاد ترک هایی در مقیاس میانی<sup>4</sup> را پیش بینی کردند [9].

در سال 1999 پرال<sup>5</sup> و همکاران، آسیب در فرآیند کشش کشش نمونه استوانه ای شیاردار [10] و در سال 2000 همبلی<sup>6</sup> و همکارش مناطق آسیب دیده در فرآیند اکستروژن را پیش بینی نمودند [11].

مومن و همکاران در سال 2002 برای یک بارگذاری خستگی پله ای با دو دامنه متفاوت، رشد آسیب و زمان وقوع شکست را پیش بینی کردند. در این تحقیق بحرانی ترین نقطه، المانی با بیشترین مقدار متغیر آسیب در نظر گرفته شده بود [12].

هم چنین در سال 2004 لابرگر<sup>7</sup> و همکاران کنترل آسیب در فرآیند هیدروفورمینگ [13] و در سال های 2007 و 2008 خلیفا<sup>8</sup> و همکاران پیش بینی شکست در فرآیند کشش عمیق ظروف دوار و مستطیلی را مورد مطالعه قرار دادند [14 و 15].

تاکنون مدل های مختلفی برای آسیب نرم ارائه شده است که از آن جمله می توان به معیارهای آسیب نرم هوپوترا<sup>9</sup>، لمتر، نمودار حد شکل دهی<sup>10</sup> و جانسون-کوک<sup>11</sup> اشاره نمود. در این تحقیق، با استفاده از معیارهای آسیب نرم هوپوترا و نمودار حد شکل دهی موجود در کد آباکوس صریح به پیش بینی حد شکل پذیری ورق های جوش خورده به هم از جنس فولاد St12 پرداخته می شود.

## 2-1- معیار آسیب نرم HDD

از جمله مکانیزم هایی که باعث شکست مواد نرم می شود، گلوبی شدن، رشد ریز حفره ها و در نهایت به هم پیوستن آن ها و شکست برشی می باشد. معیار آسیب نرم هوپوترا، مدلی برای پیش بینی شروع آسیب مربوط به حفره ها، رشد و جوانه زنی آنها در فلزات نرم است. در این مدل کرنش پلاستیک معادل در شروع شکست  $\epsilon_f$ ، تابعی نمایی از نسبت تنش سه محوره<sup>12</sup>  $\eta$  در نظر گرفته شده و به صورت زیر بیان می گردد [16]:

$$\epsilon_f(\eta) = ae^{-c\eta} + be^{c\eta} \quad (1)$$

$$\eta = \sigma_m / \sigma_{eq} \quad (2)$$

$$\sigma_m = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / 3 \quad (3)$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_3 - \sigma_2)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (4)$$

a، b و c پارامترهای آسیب ماده،  $\sigma_1$ ،  $\sigma_2$  و  $\sigma_3$  تنش های اصلی و  $\sigma_m$ ،  $\sigma_{eq}$  تنش های میانگین و معادل هستند. متغیر آسیب نیز از عبارت انتگرالی زیر محاسبه می گردد:

$$D = \int_0^{\epsilon_f} \frac{d\epsilon_f}{\epsilon_f(\eta)} \quad (5)$$

<sup>7</sup> Laberger

<sup>8</sup> Khelifa

<sup>9</sup> Hooputra Ductile Damage (HDD)

<sup>10</sup> Forming Limit Diagram (FLD)

<sup>11</sup> Johnson-Cook

<sup>12</sup> Stress Triaxiality

<sup>1</sup> Kachanov

<sup>2</sup> Lemaitre

<sup>3</sup> Bhattacharya

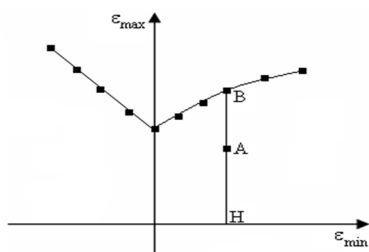
<sup>4</sup> Meso Scale

<sup>5</sup> Prahl

<sup>6</sup> Hambli

گردد. کرنش‌ها معیاری از تغییر شکل هستند، کرنش حداکثر در جهت تغییر شکل بزرگتر و کرنش حداقل در جهت تغییر شکل کوچکتر تعریف می‌شود. این نمودار به صورت شماتیک در شکل 1 نشان داده شده است. در معیار آسیب FLD کرنش‌های محاسبه شده در هر المان با نمودار حد شکل دهی مقایسه شده و متغیر آسیب به صورت نسبتی از کرنش اصلی حداکثر به کرنش حدی متناظر با مقدار کرنش اصلی حداقل محاسبه می‌گردد. اگر به عنوان نمونه نقطه A بیانگر کرنش‌های حداقل و حداکثر یک المان دلخواه باشد، در این صورت مقدار متغیر آسیب در این المان برابر است با:

$$D = \frac{AH}{BH} \quad (8)$$



شکل 1- نمودار حد شکل دهی به صورت شماتیک

نمودار حد شکل دهی برای ورق‌های نازک فلزی به صورت تجربی توسط آزمایش اریکسن تعیین می‌گردد. در این آزمایش، ابتدا توسط یک شابلن، شبکه‌ای از دوایر کوچک به قطر 0/1 اینچ بر روی باریکه‌های فلزی از ورق مورد نظر به طول 120 میلی‌متر و از عرض 12، 24، 36 تا 120 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 نیم کروی به قطر 60 میلی‌متر تا زمان وقوع ترک تغییر شکل داده می‌شود. در اثر شکل دهی 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 خط کش اندازه‌گیری میسر<sup>4</sup>، کرنش‌های حداکثر و حداقل در محل وقوع ترک و اطراف آن تعیین گردیده و نمودار FLD ترسیم می‌شود.

متغیر آسیب از صفر (ماده ایده آل) تا یک (شکست کامل) تغییر می‌کند. معیار انتگرالی فوق منطبق بر معادله ریاضی کولموگورو<sup>1</sup> بوده و می‌تواند مسیرهای کرنش غیرخطی را نیز نیز به حساب آورد، بنابراین حتی در فرآیندهای پیچیده نیز از دقت مناسبی برخوردار است. هویوترا و همکاران به صورت تجربی پارامترهای آسیب را برای آلیاژ آلومینیوم AW7108 به دست آورده و نشان دادند معیار فوق با دقت مناسب قادر به پیش‌بینی شکست در فرآیندهای تغییر شکل استاتیکی و دینامیکی آلیاژ مذکور می‌باشد [16].

با انجام آزمایش‌های عملی کشش نمونه‌های تخت شکافدار، اندازه‌گیری کرنش پلاستیک شکست و برازش تابع نمایی مطابق رابطه 1، پارامترهای آسیب و معادله 1 برای فولاد St12 به صورت زیر تعیین گردید:

$$\varepsilon_f = 0.583e^{(4.3\eta)} \quad \text{for } \eta = 0 - 0.485 \quad (6)$$

$$\varepsilon_f = 535e^{(-9.7\eta)} \quad \text{for } \eta = 0.485 - 1 \quad (7)$$

جزئیات انجام آزمایش‌های تجربی، روش تعیین پارامترهای فوق و اعتبارسنجی نتایج، توسط نویسندگان این مقاله ارائه شده است [17].

## 2-2- معیار آسیب FLD

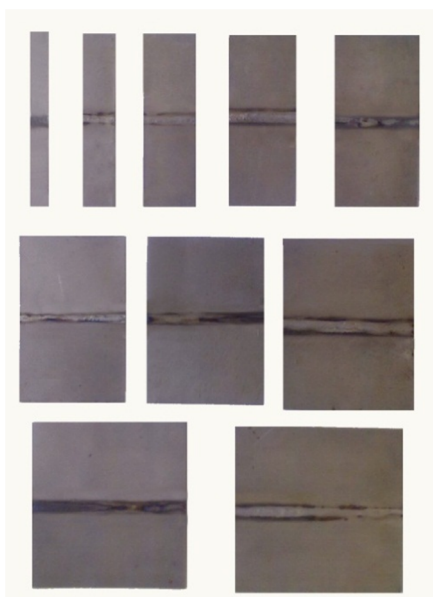
به قابلیت شکل گرفتن ورق بدون وقوع ناپایداری گلویی یا شکست، حد شکل دهی می‌گویند. هر ورق فلزی از هر جنس و ضخامت می‌تواند تا حد مشخصی (یعنی باریک‌شدگی موضعی که منجر به شکست می‌گردد)، تغییر شکل داده شود. یک روش بسیار معروف برای تعیین این حد، نمودار حد شکل دهی است. منحنی حد شکل دهی که اولین بار در سال 1964 توسط کیلر<sup>2</sup> و بکوفن<sup>3</sup> پیشنهاد گردید [18]، نموداری است که رفتار ورق تحت مقادیر مختلف کرنش را توصیف می‌کند. منحنی حد شکل دهی همچنین اطلاعاتی از کرنش‌های حداکثر قابل تحمل توسط ورق، قبل از ناپایداری یا شکست را نشان می‌دهد. نمودار حد شکل دهی، در سیستم مختصات دو بعدی که در آن کرنش‌های حداکثر روی محور عمودی و کرنش‌های حداقل روی محور افقی نشان داده می‌شوند، ترسیم می‌شود.

<sup>1</sup> Kolmogorov

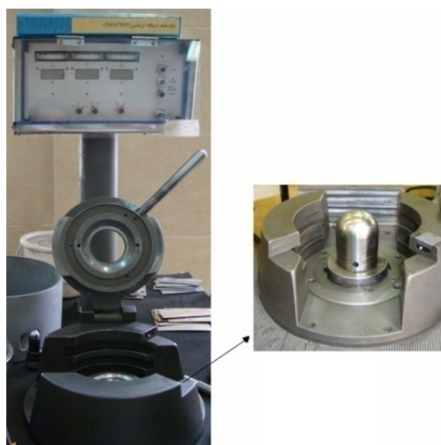
<sup>2</sup> Keeler

<sup>3</sup> Backofen

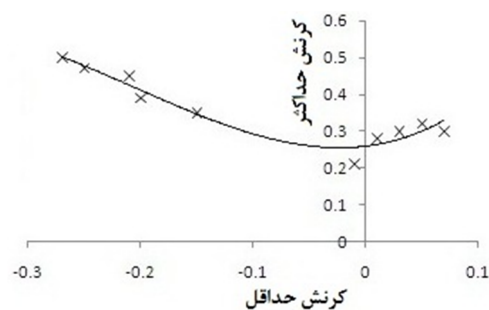
<sup>4</sup> Miller



شکل 2- باریکه‌های لازم جهت انجام آزمایش اریکسن



شکل 3- دستگاه استاندارد آزمایش اریکسن



شکل 4- نمودار حد شکل دهی ورق جوش خورده به هم

### 3-2- آزمایش های تجربی

نمونه کشش ساده مطابق استاندارد DIN1623 [19 و 20] انتخاب گردیده و توسط دستگاه کشش با سرعت 1mm/min تا گسیختگی کامل کشیده شد. ضریب و توان کارسختی ماده، توسط برازش یک منحنی توانی به معادله  $\sigma = K\varepsilon^n$  بر روی داده های تنش-کرنش و مطابق جدول 1 استخراج شد.

جدول 1- خواص مکانیکی فولاد St12

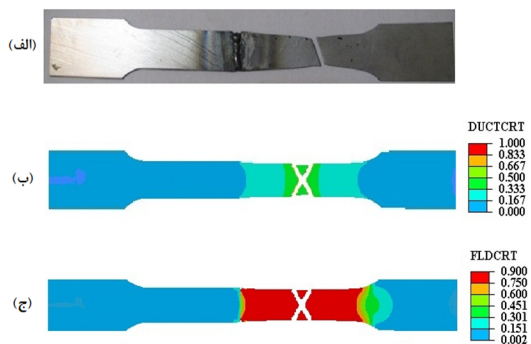
ضریب یانگ (GPa)	تنش تسلیم (MPa)	تنش نهایی (MPa)	ضریب کار سختی (MPa)	توان کار سختی
185	195	380	644	0/1916

برای تعیین نمودار حد شکل دهی ورق TWB، مطابق شکل 2، ابتدا باریکه هایی با ضخامت های 1/2 و 0/8 میلیمتر (جوش داده شده به هم)، به طول 120 میلیمتر و از عرض 12، 24، 36 تا 120 میلیمتر تهیه شد. به دلیل سهولت انجام کار و تمیز بودن، برای اتصال باریکه ها به یکدیگر از جوشکاری درزی مقاومتی<sup>1</sup> استفاده گردید. این نوع جوشکاری برای فولادهای کم کربن بسیار مناسب و مقرون به صرفه است. از مزایای این نوع جوشکاری در مقایسه با جوشکاری های دیگر (مانند لیزر و اصطکاکی)، سرعت بالای جوشکاری، بخارات کم، مقرون به صرفه بودن، واپیچش کم و عدم نیاز به مواد پرکننده می باشد. جریان الکتریکی AC (تا 100000 آمپر) توسط الکترودهای مسی که به سیم پیچ ثانویه دستگاه جوشکاری درزی مقاومتی متصل هستند تامین می گردد. ابتدا یک جریان کم به قطعات اعمال شده و پس از مدت زمان معینی، جریان به آرامی زیاد می گردد. پس از ثابت ماندن جریان، مجدداً جریان به آرامی کم می شود.

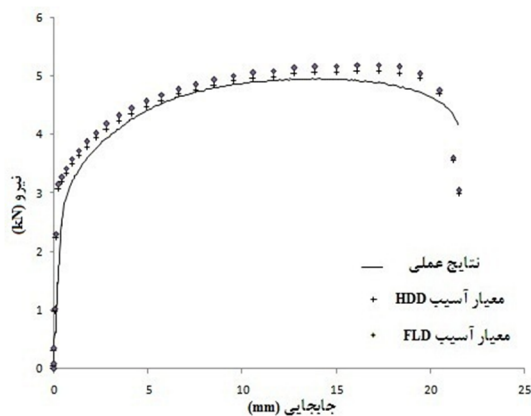
هر یک از باریکه های آماده شده در TWB دستگاه استاندارد اریکسن قرار داده شده و تا بروز اولین ترک، تغییر شکل داده شد. با اندازه گیری کرنش های حداکثر و حداقل اطراف ناحیه ترک، نمودار حد شکل دهی ورق TWB حاصل گردید. شکل های 3 و 4 به ترتیب دستگاه آزمایش اریکسن و نمودار حد شکل دهی ورق را نشان می دهند.

<sup>1</sup> Resistance Seam Welding (RSW)

همچنین شکل 6 نمودار نیرو- جابجایی حاصل از شبیه سازی های عددی و مقایسه آن با حالت عملی را نشان می دهد. همان گونه که شکل نیز نشان می دهد، حداکثر مقدار خطای به وجود آمده در نواحی انتهایی شبیه سازی ها حدود 8 درصد است که با توجه به تغییر شکل شدید ناحیه شکست و کرنش های پلاستیک زیاد، قابل قبول می باشد. مقایسه نتایج عددی و تجربی آشکار می کند که هر دو معیار آسیب HDD و FLD به خوبی توانسته اند افت خواص مکانیکی (ناشی از نرم شدگی و رشد آسیب در ماده) و در نتیجه کاهش نیرو در مراحل انتهایی را مطابق با نتایج تجربی پیش بینی نمایند.



شکل 5- نتایج آزمایش کشش ساده: (الف) تجربی، (ب) معیار آسیب HDD و (ج) معیار آسیب FLD



شکل 6- مقایسه نمودار نیرو- جابجایی تجربی و عددی در آزمایش کشش ساده

### 3- شبیه سازی های اجزاء محدود

به منظور ارزیابی و اعتبارسنجی منحنی FLD به دست آمده برای ورق TWB، تعدادی از آزمایش های عملی مانند فرآیندهای کشش نمونه استاندارد، آزمایش اریکسن و کشش عمیق با استفاده از دو معیار آسیب HDD و FLD موجود در نرم افزار ABAQUS/Explicit شبیه سازی شده و رشد آسیب، ایجاد ترک و بروز شکست در آن ها پیش بینی می گردد. سپس، نتایج عددی با نتایج تجربی حاصل از آزمایش های عملی مقایسه شده و اعتبارسنجی می گردند. لازم به ذکر است که در کلیه شبیه سازی ها از قسمت بندی<sup>1</sup> به جای جوش استفاده شده و فرض می گردد که پارگی در محل خط جوش رخ ندهد. نتایج تجربی نیز فرض فوق را تایید می کند. هم چنین شبیه سازی ها تا آن جا ادامه داده می شود که مقدار متغیر آسیب به عدد یک (شکست کامل) برسد. المان هایی که متغیر آسیب در آن ها به عدد یک برسد المان های بحرانی بوده و دیگر قادر به تحمل تنش نخواهند بود. با تکنیک حذف المان های بحرانی، ایجاد ترک، رشد آن و شروع گسیختگی قابل ملاحظه خواهد بود.

### 3-1- آزمایش کشش ساده

آزمایش کشش ساده مطابق شرایط تجربی شبیه سازی گردید. با توجه به تقارن، فقط نیمی از نمونه شبیه سازی شد و شرایط تقارن بر روی صفحه تقارن اعمال گردید. به دلیل ضخامت کم نمونه، برای المان بندی از المان های تنش صفحه ای و از نوع چهار گره ای با نقاط انتگرال گیری کاهش یافته و همچنین کنترل ساعت شنی (CPS4R) به طول 1 میلیمتر استفاده شد. با انجام شبیه سازی ها، کانتورهای متغیر آسیب حاصل شده و میزان آسیب المان های ماده در طول انجام فرآیند مشخص گردید. با تکنیک حذف المان های بحرانی، نواحی ترک و شکست تعیین می شوند. شکل 5 نتایج پیش بینی شکست توسط معیارهای آسیب HDD، FLD و مقایسه آن با نتایج تجربی را نشان می دهد. مطابق شکل، محل شکست پیش بینی شده در شبیه سازی ها با دقت مناسبی به محل واقعی نزدیک است.

<sup>1</sup> Partition

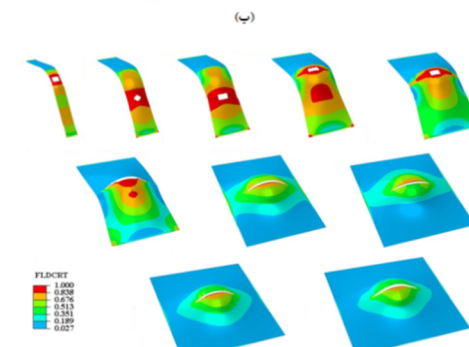
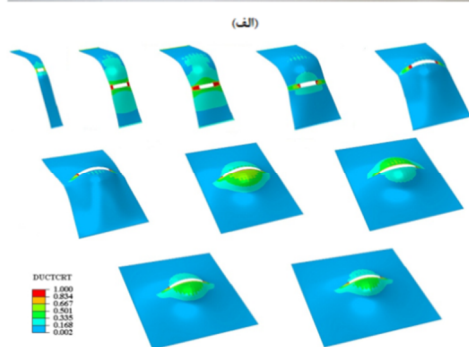
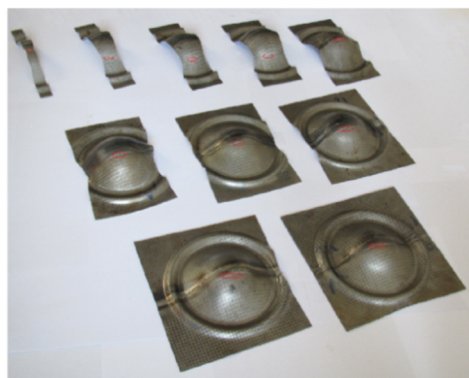
### 3-2- آزمایش اریکسن

مطابق شرایط تجربی، آزمایش اریکسن شبیه سازی گردید. به خاطر تقارن، فقط نیمی از نمونه ها شبیه سازی شد و شرایط تقارن بر روی صفحات تقارن اعمال گردید. به دلیل ضخامت کم نمونه، برای المان بندی از المان های پوسته ای چهار گره ای با نقاط انتگرال گیری کاهش یافته و همچنین کنترل ساعت شنی (S4R) به طول 1 میلیمتر استفاده شد. هم چنین برای المان بندی اجزاء دیگر مانند سنبه، ورق گیر و قالب از المان صلب مجزا به طول 2 میلیمتر استفاده گردید. ضریب اصطکاک بین ورق و اجزاء صلب 0/3 اعمال شد. ورق گیر با نیروی زیاد ورق را بر روی قالب ثابت نگه داشته و سنبه با جابجایی به سمت بالا ورق را شکل می دهد.

شکل 7 نتایج شبیه سازی حاصل از معیارهای آسیب HDD، FLD و مقایسه آن ها با نتایج تجربی را نشان می دهد. مطابق شکل، معیارهای آسیب با دقت مناسب توانسته اند محل ایجاد ترک و شکست نمونه ها را در آزمایش اریکسن مطابق با آزمایش های عملی پیش بینی نمایند. هم چنین جدول 2، میزان ارتفاع برآمدگی نمونه ها حاصل از معیارهای آسیب، مقایسه با نتایج عملی و مقدار درصد خطا در هر نمونه را بیان می کند. حداکثر مقدار خطای محاسبه شده برای معیارهای آسیب HDD و FLD در حدود 13 درصد است که برای شبیه سازی های عددی قابل قبول می باشد.

جدول 2- مقایسه میزان ارتفاع برآمدگی نمونه های آزمایش اریکسن حاصل از معیارهای آسیب با نتایج عملی

شماره نمونه	ارتفاع (HDD)	ارتفاع (FLD)	ارتفاع عملی	%خطای HDD	%خطای FLD
1	3/37	3/13	3/00	12/3	4/3
2	3/50	3/32	3/10	12/9	7/0
3	3/41	3/29	3/05	11/8	7/8
4	3/37	3/28	3/00	12/3	9/3
5	2/90	2/74	2/60	11/5	5/3
6	2/67	2/60	2/35	13/6	10/6
7	2/15	2/00	1/95	10/2	2/5
8	2/15	1/94	1/90	13/1	2/1
9	2/15	1/94	1/90	13/1	2/1
10	2/15	1/94	1/90	13/1	2/1



شکل 7- نتایج آزمایش اریکسن: الف) تجربی، ب) معیار آسیب HDD و ج) معیار آسیب FLD

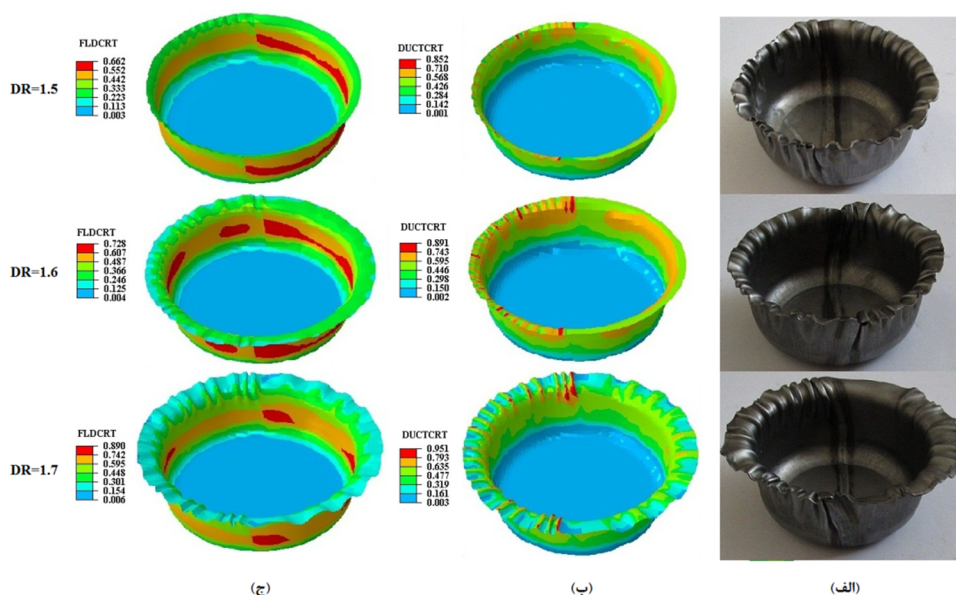
### 3-3- آزمایش کشش عمیق

به منظور ارزیابی بیشتر معیارهای آسیب HDD و FLD، آزمایش کشش عمیق با 5 نسبت کشش<sup>1</sup> متفاوت 1/5، 1/6، 1/7، 1/9 و 2 بر روی ورق TWB انجام شد. هم چنین آزمایش فوق در نرم افزار نیز شبیه سازی گردید. با توجه به متقارن بودن مساله، جهت سهولت نیمی از مساله شبیه

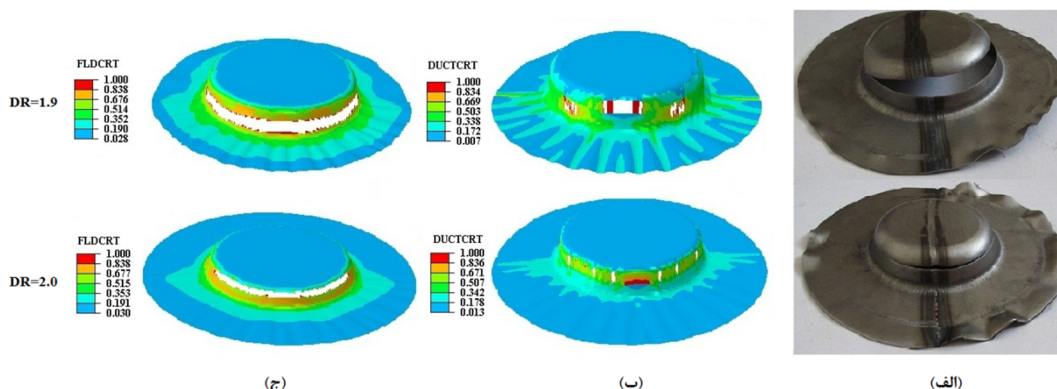
<sup>1</sup> Drawing Ratio (DR)

مطابق شکل، در نسبت کشش های 1/5، 1/6 و 1/7 هیچ گونه شکستی اتفاق نیفتاده و ظرف کاملا سالمی تولید می گردد. اما در نسبت کشش 1/9 و 2، شکست پیش بینی شده، محصول تولیدی معیوب بوده و حد نسبت کشش فرآیند 1/9 می باشد. آزمایش های تجربی انجام شده، کاملا صحت نتایج عددی را تایید نموده و نشان می دهد که پیش بینی معیارهای آسیب از دقت مناسبی برخوردار می باشند. لذا این معیارها قادر به تعیین حد شکل دهی ورق ها می باشند.

سازی شد و شرایط تقارن بر روی صفحات تقارن ورق اعمال گردید. به دلیل ضخامت کم نمونه، برای المان بندی از المان های پوسته ای چهار گره ای با نقاط انتگرال گیری کاهش یافته و همچنین کنترل ساعت شنی (S4R) به طول 1 میلیمتر استفاده شد. شبیه سازی به صورت سه بعدی با ضریب اصطکاک 0/3 بین ورق و اجزاء قالب انجام گرفت. شکل های 8 و 9، نتایج شبیه سازی حاصل از معیارهای آسیب و مقایسه آن با نتایج تجربی را نشان می دهد.



شکل 8- نتایج آزمایش کشش عمیق با نسبت های کشش 1/5، 1/6 و 1/7: الف) تجربی، ب) معیار آسیب HDD و ج) معیار آسیب FLD



شکل 9- نتایج آزمایش کشش عمیق با نسبت های کشش 1/9 و 2: الف) تجربی، ب) معیار آسیب HDD و ج) معیار آسیب FLD



- [7] Kachanov L (1958) Time of the rupture process under creep conditions. *IzvAkadNauk SSR* 8: 26–31.
- [8] Lemaitre J (1992) A course on damage mechanics, First Edition, Springer-Verlag.
- [9] Bhattacharya B, Ellingwood B (1998) Continuum damage mechanics analysis of fatigue crack initiation. *Int J Fatigue* 20: 631–639.
- [10] Prah U, Aboutayeb M, Weichert D, Achenbach U, Wang X (1999) Damage evolution in experiments and simulation in a construction steel. *Comp Mat Sci* 16: 206–212.
- [11] Hambli R, Badie-Levet D (2000) Damage and fracture simulation during the extrusion processes. *Comp Meth Appl Mech Eng* 186: 109–120.
- [12] Momen R, Zhang X, Cui D (2002) Fatigue life prediction of 3-D problems by damage mechanics with two-block loading. *Int J Fatig* 24: 29–37.
- [13] Labergere C, Lejeune A, Gelin JC (2004) Control of damage in flanges hydroforming. *Europ Cong Comp Meth Appl Sci Eng* 12: 24–28.
- [14] Khelifa M, Oudjene M, Khennane A (2007) Fracture in sheet metal forming: effect of ductile damage evolution. *Comp Struc* 85: 205–212.
- [15] Khelifa M, Oudjene M (2008) Numerical damage prediction in deep-drawing of sheet metals. *J Mat Proc Tech* 200: 71–76.
- [16] Hooputra H, Gese H, Dell H, Werner H (2004) A Comprehensive Failure Model for Crashworthiness Simulation of Aluminum Extrusions. *Int J Crash* 9: 449–463.
- [17] Poursina M, Haji Aboutalebi F, Nejatbakhsh H, Khataei M (2013) A Proposed Ductile Damage Model for DIN1623 St12 Steel, Numerical Simulations and Experimental Validations. *J Acta Mech Sol Sin*, Under Review.
- [18] Keeler S. P., Backofen W. A. (1964) Plastic Instability and Fracture in Sheets Stretched over Rigid Punches. *ASM Trans. Quart.* 56: 25–48.
- [19] DIN 1623 (1986) Steel flat products cold reduced sheet and strip—technical delivery conditions—general purpose structural steels, Springer, Berlin.
- [20] DIN 1623 (2007) Cold reduced sheet and strip—technical delivery conditions—general structural steels draft standard. Springer, Berlin.

#### 4- نتیجه گیری

در این تحقیق ابتدا، با انجام آزمایش کشش بر روی نمونه استاندارد فولادی به ضخامت های 0/8، 1/2 میلی‌متر و نمونه جوش خورده به هم، نمودار نیرو-جابجایی برای نمونه استاندارد تعیین شد. سپس، با انجام آزمایش اریکسن بر روی نمونه‌های جوش خورده به هم، نمودار حد شکل‌دهی نیز حاصل گردید. با استفاده از نمودار فوق و معیار آسیب نرم، فرآیندهای کشش استاندارد، آزمایش اریکسن و کشش عمیق، در کد آباکوس صریح شبیه سازی شده و رشد آسیب، ایجاد ترک و شکست در آن‌ها پیش بینی گردید. در پایان، نتایج پیش بینی های عددی حاصل از شبیه سازی‌ها با نتایج تجربی مقایسه شده و اعتبارسنجی گردید. مقایسه نتایج آشکار نمود که معیارهای فوق از دقت مناسبی برخوردار می باشند. بنابراین نتیجه گیری می شود که معیارهای آسیب HDD و FLD توانایی پیش بینی رشد آسیب، وقوع ترک و شکست در ورق های TWB را دارند.

#### مراجع

- [1] Choia Y, Heob Y, Kim HY, Seo D (2000) Investigations of weld-line movements for the deep drawing process of tailor welded blanks. *J Mat Proc Tech* 108: 1–7.
- [2] Heo YM, Wang SH, Kim HY, Seo D (2001) The effect of the drawbead dimensions on the weld-line movements in the deep drawing of tailor-welded blanks. *J Mat Proc Tech* 113: 686–691.
- [3] Chan SM, Chan LC, Lee TC (2003) Tailor-welded blanks of different thickness ratios effects on forming limit diagrams. *J Mat Proc Tech* 132: 95–101.
- [4] Padmanabhan R, Baptista AJ, Oliveira MC, Menezes LF (2007) Effect of anisotropy on deep drawing of mild steel and dual-phase steel tailor-welded blanks. *J Mat Proc Tech* 184: 288–293.
- [5] Abbasi M, Ketabchi M, Labudde T, PrahIU, Bleck W (2012) New attempt to wrinkling behavior analysis of tailor welded blanks during the deep drawing process. *Mat Des* 40:407–414.
- [6] Fazli A (2013) Optimum tailor welded blank design using deformation path length of boundary nodes. *Int J Auto Eng* 3:435–445.