

ارزیابی مدل های آسیب نرم ABAQUS در فرآیندهای شکل دهی ورق

فرهاد حاجی ابوطالبی*

استادیار، دانشگاه اصفهان، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک

چکیده

مکانیک آسیب پیوسته، ابزار جدیدی در مهندسی مکانیک است. این ابزار جدید به عنوان متمم تئوری پلاستیسیته و مکانیک شکست شناخته می-شود. نرم افزار تجاری ABAQUS برای مواد نرم، ترد و مرکب دارای مدل های آسیب مختلفی است. در این تحقیق ابتدا، مدل های آسیب نرم موجود در نرم افزار ABAQUS/Explicit معرفی می شوند. سپس با انجام شبیه سازی های عددی، نتایج پیش بینی معیارهای آسیب فوق در تعدادی از مسائل آزمون و هم چنین فرآیندهای شکل دهی ورق مانند هیدروفورمینگ لوله و کشش عمیق هیدرودینامیکی حاصل می گردد. در ادامه، نتایج شبیه سازی های عددی با نتایج عملی مقایسه شده و مدل های مناسب برای پیش بینی رشد آسیب در فرآیندهای شکل دهی ورق مشخص می گردند. مقایسه نتایج آشکار می کند که معیار آسیب نرم هوپوترا مدلی مناسب برای پیش بینی رشد آسیب نرم در فرآیندهای شکل دهی ورق می باشد.

واژه های کلیدی: مدل های آسیب نرم، فرآیندهای شکل دهی ورق، مدل آسیب نرم هوپوترا، نرم افزار ABAQUS

Evaluation of ABAQUS Ductile Damage Models in Sheet Metal Forming Processes

F. Haji Aboutalebi

Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, University of Isfahan

Abstract

Continuum damage mechanics is a new tool in mechanical engineering. This new tool is known as the complementarity for theory of plasticity and fracture mechanics. ABAQUS commercial software owns different damage models for ductile, brittle, and composite materials. In this study, first, ductile damage models exist in the ABAQUS/Explicit software are introduced. Then, performing the numerical simulations, the prediction results of the above damage criteria in a number of benchmark problems, and also sheet metal forming processes such as tube hydroforming and hydrodynamic deep drawing are achieved. In the continue, the numerical simulation results are compared with the experimental results and the proper models for predicting the damage evolution in sheet metal forming processes are specified. Comparison of the results reveals that Hooputra's ductile damage criterion is a suitable model for predicting the ductile damage evolution in sheet metal forming processes.

Keywords: Ductile damage models, Sheet metal forming processes, Hooputra's ductile damage model, ABAQUS software

۱- مقدمه

نرم افزار ABAQUS برای مواد نرم فلزی دارای هفت مدل آسیب می باشد. این مدل ها به ترتیب معیار آسیب نرم، جانسون^۱-کوک^۲، برشی، FLD، FLSD، M-K و MSFLD نام دارند. معیارهای آسیب نرم، جانسون-کوک و برشی برای مسائل حجمی، صفحه ای و پوسته ای قابل استفاده بوده، اما سایر معیارها برای مدل کردن شروع ناپایداری لاغری در ورق های فلزی قابل به کارگیری هستند [۱].

$$D = \int_0^{\epsilon_{eq}^{**}} \frac{d\epsilon_{eq}}{\epsilon_{eq}^{**}(\eta)} = 1 \quad (3)$$

D، متغیر آسیب است که از صفر (ماده بکر) تا یک (شکست کامل) تغییر نموده و در هر قدم حل، تغییرات مثبت آن از رابطه زیر محاسبه می گردد:

$$\Delta D = \frac{\Delta \epsilon_{eq}}{\epsilon_{eq}^{**}(\eta)} \geq 0 \quad (4)$$

۱-۲- معیار آسیب جانسون-کوک

معیار آسیب جانسون-کوک برای پیش بینی شروع آسیب مربوط به حفره ها، رشد و جوانه زنی آنها در فلزات نرم مورد استفاده قرار می گیرد. این مدل کرنش پلاستیک معادل در شروع آسیب را به صورت تابعی از نسبت تنش سه محوره و نرخ کرنش در نظر می گیرد:

$$\epsilon_{eq}^{**}(\eta) = [d_1 + d_2 \exp(-d_3 \eta)] \left[1 + d_4 \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}_{eq}^p}{\dot{\epsilon}_{eq0}^p} \right) \right] \quad (5)$$

$(1 + d_5 \hat{\theta})$
 $d_5 - d_1$ پارامترهای شکست ماده، $\dot{\epsilon}_{eq0}$ نرخ کرنش مرجع و $\hat{\theta}$ دمای بی بعد است که به صورت زیر تعریف می شود:

$$\hat{\theta} = \begin{cases} 0 & \theta < \theta_{trans} \\ (\theta - \theta_{trans}) / (\theta_{melt} - \theta_{trans}); \theta_{trans} \leq \theta \leq \theta_{melt} & \\ 1 & \theta > \theta_{melt} \end{cases} \quad (6)$$

θ ، دمای کاری، θ_{melt} ، دمای ذوب و θ_{trans} ، دمای گذار ماده است. این معیار برای بارگذاری های دینامیکی مناسب بوده و برای حالات شبه استاتیکی توصیه نمی گردد [۳].

۱-۳- معیار آسیب برشی

معیار آسیب برشی، مدلی برای پیش بینی شروع آسیب مربوط به پهنای برش محلی است. این مدل، کرنش پلاستیک معادل در شروع آسیب را به صورت تابعی از نسبت تنش برشی و نرخ کرنش در نظر می گیرد. این معیار نیز توسط هویپوترا و همکاران در سال ۲۰۰۴ معرفی شده و کاملاً مشابه معیار آسیب نرم است [۲]. در این معیار نسبت تنش برشی θ_s ، به صورت زیر تعریف می شود:

$$\theta_s = (1 - k_s \eta) \phi \quad (7)$$

$$\phi = \frac{\tau_{max}}{\sigma_{eq}}$$

کرنش پلاستیک در شروع آسیب ϵ_{eq}^{**} ، نیز برابر است با:

۱-۱- معیار آسیب نرم

معیار آسیب نرم، مدلی برای پیش بینی شروع آسیب مربوط به حفره ها، رشد و جوانه زنی آنها در فلزات نرم است. این مدل، کرنش پلاستیک معادل در شروع آسیب را تابعی از نسبت تنش سه محوره و نرخ کرنش در نظر می گیرد. تنش سه محوره η به صورت زیر تعریف می شود:

$$\eta = \frac{\sigma_H}{\sigma_{eq}} \quad (1)$$

در رابطه فوق، σ_H ، تنش هیدرواستاتیک و σ_{eq} ، تنش معادل فون میز^۳ است. هویپوترا^۴ و همکاران در سال ۲۰۰۴ عبارت ساده ای برای معیار آسیب نرم ارائه کردند که نیاز به تعداد محدودی آزمایش دارد [۲]. بر طبق این مدل، کرنش پلاستیک معادل در شروع آسیب ϵ_{eq}^{**} ، برابر است با:

$$\epsilon_{eq}^{**}(\eta) = \frac{\epsilon_T^+ \sinh[k_0(\eta^- - \eta)] + \epsilon_T^- \sinh[k_0(\eta - \eta^+)]}{\sinh[k_0(\eta^- - \eta^+)]} \quad (2)$$

ϵ_T^+ و ϵ_T^- ، کرنش های پلاستیک معادل در شروع آسیب نرم برای حالت های کشش و فشار دو محوری یکسان می باشند. برای مواد همسان گرد، نسبت تنش سه محوره در حالت کشش $\eta^+ = 2/3$ و در حالت فشار $\eta^- = -2/3$ است. در این معیار، سه پارامتر ϵ_T^+ ، ϵ_T^- و k_0 تابع جنس ماده، نرخ کرنش و درجه حرارت می باشند. ϵ_T^+ ، مستقیماً از آزمایش اریکسن^۵ و ϵ_T^- ، k_0 از آزمایش های خمش سه نقطه ای (با نسبت عرض به ضخامت بیشتر از ۴) تحت شرایط کرنش صفحه ای $(\eta = 1/\sqrt{3})$ و کشش نمونه شیاردار $(\eta = 1/3)$ تعیین می گردند. هویپوترا و همکاران پارامترهای فوق را برای آلومینیوم و فولاد، در دو حالت شبه استاتیکی و دینامیکی تعیین نمودند [۱] و معیار آسیب نرم تا ارضاء شرط زیر ادامه می یابد:

¹ Johnson

² Cook

³ von Mises

⁴ Hooputra

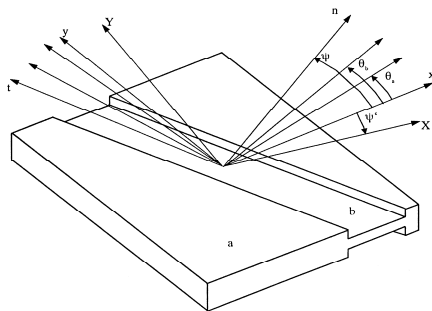
⁵ Erichsen

پایه تنش^۲ (FLSD) تبدیل شده، بنابراین وابستگی به مسیر کرنش کمتر خواهد گردید. با در نظر گرفتن تنش‌ها به جای کرنش‌ها، نمودار حد شکل دهی بر پایه تنش حاصل می‌گردد. منحنی FLSD از آزمایش اتساع ورق به صورت دو محوری حاصل می‌گردد. در این معیار، متغیر آسیب D ، به صورت نسبتی از تنش اصلی حداکثر به تنش حدی روی منحنی FLSD تعریف شده و تا ارضاء شرط زیر ادامه می‌یابد:

$$D = \frac{\sigma_{\max}^A}{\sigma_{\max}^B} = 1 \quad (10)$$

۶-۱- معیار آسیب M-K

معیار آسیب M-K، برای پیش بینی حد شکل دهی ورق در مسیرهای بارگذاری مختلف به کار می‌رود. این معیار توسط مارسینیاک و کوچینسکی پیشنهاد شده است [۶]. در مدل فوق، عیوب ضخامت به شکل شیار معرفی شده و نواقص شبیه سازی می‌گردند. بر طبق این معیار، آسیب زمانی اتفاق می‌افتد که نسبت تغییر شکل در شیار به تغییر شکل در ضخامت از مقدار بحرانی تجاوز نماید. مطابق شکل ۲ نرم افزار به صورت پیش فرض چهار شیار در زوایای فضایی ۰، ۴۵، ۹۰ و ۱۳۵ درجه در نظر می‌گیرد.



شکل ۲- مدل آسیب M-K

پارامترهای مورد نیاز این معیار زاویه شیار و نسبت ضخامت شیار به ضخامت اولیه هستند. اگر نواحی بدون شیار و شیاردار به ترتیب با علامت‌های a و b نشان داده شوند:

$$f_{eq} = \frac{(\Delta \varepsilon_{eq}^p)_b}{(\Delta \varepsilon_{eq}^p)_a}; f_{nm} = \frac{(\Delta \varepsilon_{nm})_b}{(\Delta \varepsilon_{nm})_a}; \quad (11)$$

$$f_{nt} = \frac{(\Delta \varepsilon_{nt})_b}{(\Delta \varepsilon_{nt})_a}$$

اندیس‌های n و t به ترتیب جهات عمودی و مماسی را نشان داده و متغیر آسیب از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

² Forming Limit Stress Diagram (FLSD)

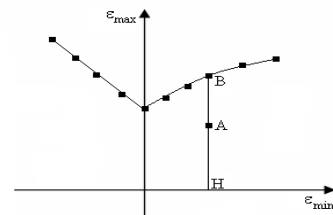
$$\varepsilon_{eq}^{**}(\eta) = \frac{\varepsilon_S^+ \sinh[f(\theta_s - \theta_s^-)] + \varepsilon_S^- \sinh[f(\theta_s^+ - \theta)]}{\sinh[f(\theta_s^+ - \theta_s^-)]} \quad (8)$$

ε_S^+ و ε_S^- ، کرنش‌های پلاستیک معادل در شروع آسیب نرم برای کشش و فشار دو محوری یکسان هستند. در این معیار، چهار پارامتر k_s ، ε_S^+ ، ε_S^- و f وجود دارد که تابع جنس ماده، نرخ کرنش و درجه حرارت می‌باشند. از نمونه‌های کششی دارای شکاف (با مقطع مستطیلی و عمق نصف ضخامت) در جهت ۴۵ درجه نسبت به جهت بارگذاری (با نسبت تنش برشی ۱/۴۶۹) و نمونه‌های کششی با شکاف موازی جهت بارگذاری (با نسبت تنش برشی ۱/۷۳۲) و آزمایش اریکسن (با نسبت تنش برشی ۱/۶) می‌توان ε_S^+ ، ε_S^- و f را به دست آورد. هویپوترا و همکاران پارامترهای فوق را برای آلومینیوم و فولاد، در دو حالت شبه استاتیکی و دینامیکی تعیین نمودند [۱ و ۲].

۴-۱- معیار آسیب FLD

معیار شروع آسیب FLD، مدلی برای پیش بینی آغاز ناپایداری گلوبی در فرآیندهای شکل دهی ورق است که در سال ۱۹۶۴ توسط کیلر و بکوفن برای تخمین مقدار شکل دهی که یک ماده می‌تواند بدون ناپایداری گلوبی تحمل کند، معرفی گردید [۴]. نمودار حد شکل دهی^۱ (FLD) از آزمایش اتساع ورق به صورت دو محوری به دست می‌آید. طرحواره این نمودار در شکل ۱ آورده شده است. در این معیار، متغیر آسیب D ، به صورت نسبتی از کرنش اصلی حداکثر به کرنش حدی روی منحنی FLD تعریف گردیده و تا ارضاء شرط زیر، ادامه می‌یابد:

$$D = \frac{\varepsilon_{\max}^A}{\varepsilon_{\max}^B} = \frac{AH}{BH} = 1 \quad (9)$$



شکل ۱- طرحواره نمودار حد شکل دهی FLD

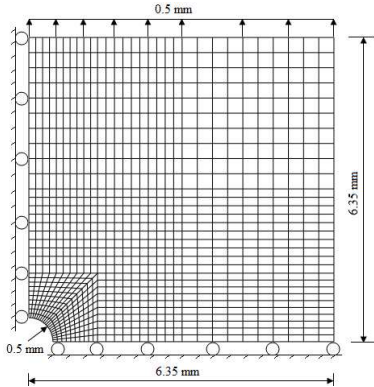
۵-۱- معیار آسیب FLSD

معیار آسیب FLSD، مدلی برای پیش بینی آغاز ناپایداری گلوبی در فرآیندهای شکل دهی ورق است که در سال ۲۰۰۰ توسط استوگتون معرفی گردید [۵]. در این معیار، نمودار حد شکل دهی بر پایه کرنش (FLD) به نمودار حد شکل دهی بر

¹ Forming Limit Diagram (FLD)

۲-۱- آزمون کشش صفحه سوراخدار

صفحه مربعی فولادی به طول ۱۲٫۷، ضخامت ۱ و سوراخی به قطر ۱ میلیمتر در مرکز تحت جابجایی عمودی ۰٫۵ میلیمتر، انتخاب می‌شود. به خاطر تقارن، یک چهارم مسئله شبیه سازی شده و شرایط تقارن بر روی محورهای تقارن اعمال می‌گردد. شکل ۴ یک چهارم هندسه و مدل اجزاء محدود صفحه را نشان می‌دهد. خواص مکانیکی و آسیب ماده مطابق جداول ۱-۵ [۱] اعمال شده و پس از انجام شبیه سازی ها، نتایج آسیب حاصل می‌گردد.



شکل ۴- یک چهارم هندسه و مدل اجزاء محدود صفحه سوراخدار

جدول ۱- خواص مکانیکی و پارامترهای آسیب نرم، جانسون- کوک و

برشی فولاد [۱]

$\rho (Kg / m^3)$	7800
$E (GPa)$	210
ν	0.3
$\sigma_{y,0} (MPa)$	776
$\sigma_y (MPa)$	$950 \epsilon_{eq}^{0.041}$
\mathcal{E}_T^+	1.2
\mathcal{E}_T^-	2.6
k_0	0.1956
\mathcal{E}_c^+	1.22
\mathcal{E}_c^-	0.86
f	1.56
k_s	0.03
d_1	0.05
d_2	3.44
d_3	-2.12
d_4	0.002
d_5	0.01
$\theta_{melt} (^\circ C)$	1520
$\theta_{rms} (^\circ C)$	27
$\dot{\epsilon}_{eq0}$	1

برای دیدن ترک ها از تکنیک حذف المان استفاده می‌شود. با استفاده از این تکنیک، المان هایی که مقدار آسیب در آن ها به ۰٫۹۹ رسیده حذف می‌گردند.

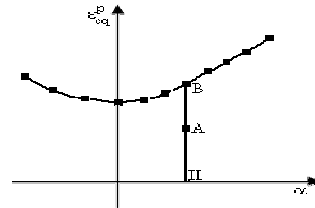
$$D = Max \left(\frac{f_{eq}}{f_{eq}^{cr}}, \frac{f_{mn}}{f_{mn}^{cr}}, \frac{f_{nt}}{f_{nt}^{cr}} \right) \quad (12)$$

۷-۱- معیار آسیب MSFLD

معیار آسیب MSFLD، مدلی برای پیش بینی حد شکل دهی ورق در مسیره های بارگذاری مختلف است که توسط موشنورن و سون پیشنهاد گردید [۷]. مدل از منحنی حد شکل دهی برای در نظر گرفتن بیشترین کرنش های پلاستیک معادل استفاده می‌کند. این روش نیاز به انتقال منحنی حد شکل دهی از فضای اصلی کرنش ها به فضای کرنش پلاستیک معادل دارد. در منحنی جدید، مطابق شکل ۳ کرنش پلاستیک معادل ϵ_{eq}^p ، بر حسب نسبت نرخ کرنش های حداکثر به حداقل یعنی α ، بیان می‌شود:

$$\alpha = \frac{\dot{\epsilon}_{min}}{\dot{\epsilon}_{max}} \quad (13)$$

بر اساس این معیار، پیدایش ناپایداری گلوبی زمانی اتفاق می‌افتد که بخشی از وضعیت تغییر شکل، منحنی حد شکل دهی MSFLD را قطع نماید.



شکل ۳- طرحواره نمودار حد شکل دهی MSFLD

در این معیار، متغیر آسیب D ، بیانگر نسبت کرنش پلاستیک معادل جاری ϵ_{eq}^p به کرنش پلاستیک روی منحنی MSFLD تعریف شده و از روابط زیر محاسبه می‌گردد:

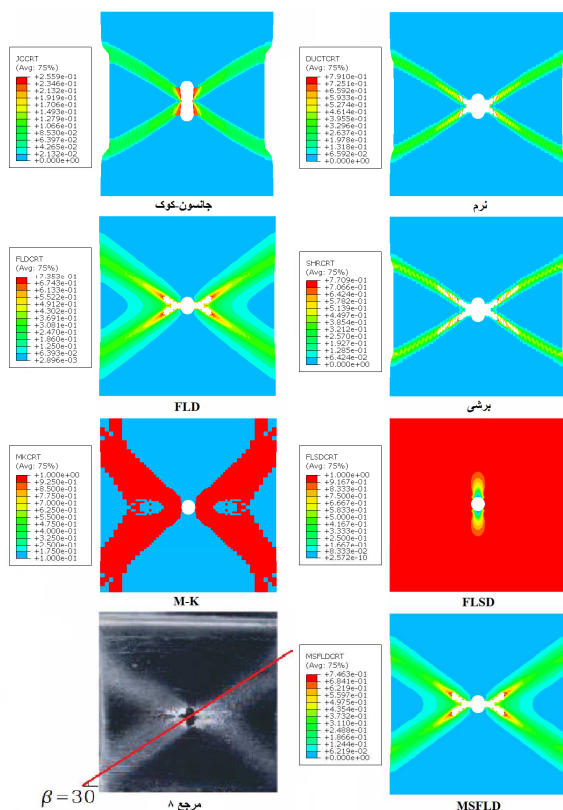
$$\epsilon_{eq}^p = \epsilon_{max}^p \sqrt{\frac{4}{3}(1 + \alpha + \alpha^2)} \quad (14)$$

$$D = \frac{\epsilon_{eq}^p}{(\epsilon_{eq}^p)_{MSFLD}} = \frac{AH}{BH} \quad (15)$$

۲- ارزیابی معیارهای آسیب

برای ارزیابی معیارهای فوق، تعدادی از مسایل آزمون و فرآیندهای شکل دهی شبیه سازی شده و با نتایج عملی مقایسه می‌گردد. مسایل آزمون در فرآیندهای ورق کاری کاربرد زیادی داشته و برای مطالعه کرنش های محلی، رشد آسیب، باز شدن ترک و ارزیابی معیارها استفاده می‌شود.

شکل ۵ نتایج پیش بینی شروع ترک و شکست در کشش صفحه سوراخدار توسط معیارهای آسیب و مقایسه آن با نتایج عملی گری و همکاران برای فولاد SS316L [۸] را نشان می‌دهد. مطابق شکل، ترک از نواحی سمت چپ و راست سوراخ شروع شده، رشد نموده و در جهات مورب انتشار می‌یابد. مقایسه نتایج عددی و عملی نشان می‌دهد که پیش بینی معیار آسیب نرم هویوترا بیشترین تطابق را با نتایج مرجع [۸] داشته و از این آزمون موفق بیرون می‌آید. در این معیار، زاویه رشد ترک نسبت به محور افقی ۳۲ درجه پیش بینی شده که با زاویه اندازه گیری شده توسط مرجع [۸] یعنی زاویه ۳۰ درجه β تطابق مناسبی دارد. علت اختلاف در متفاوت بودن نوع فولاد شبیه سازی شده با فولاد SS316L می‌باشد. همچنین نتایج معیارهای آسیب برشی، FLD و MSFLD نیز رضایت بخش می‌باشد. نتایج معیارهای FLSD و M-K اختلاف فاحشی با نتایج عملی داشته و قابل قبول نیست.



شکل ۵- نتایج پیش بینی ترک و شکست در کشش صفحه سوراخدار توسط معیارهای آسیب و مقایسه با نتایج مرجع [۸]

بیشترین مقدار آسیب پیش بینی شده در معیار جانسون-کووک بسیار کمتر از یک بوده و این معیار هیچ گونه شکستی را پیش-بینی نمی‌کند. این معیار برای شبیه سازی های دینامیکی مناسب بوده و برای مسائل شبه استاتیکی توصیه نمی‌گردد [۳]. همچنین شکل ۶ نمودار نیرو-جابجایی صفحه که با

جدول ۲- پارامترهای آسیب FLD فولاد [۱]

ϵ_{max}	ϵ_{min}
0.2756	-0.1253
0.2371	-0.0863
0.2056	-0.0561
0.1867	-0.0340
0.1674	-0.0152
0.1485	0.0000
0.1578	0.0158
0.1813	0.0368
0.2166	0.0650
0.2567	0.1027
0.2918	0.1459
0.3266	0.1960
0.3531	0.2472
0.3688	0.2950
0.3643	0.3279
0.3531	0.3531

جدول ۳- پارامترهای آسیب FLSD فولاد [۱]

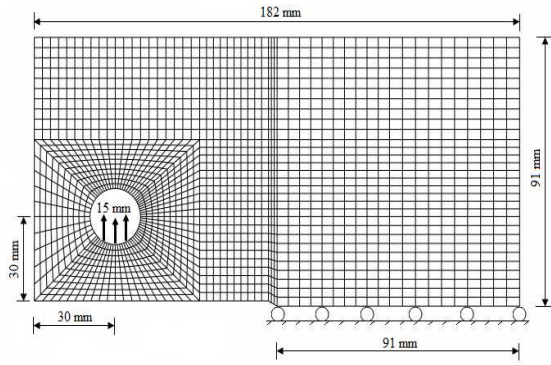
σ_{max} (MPa)	σ_{min} (MPa)
700	300
900	800
1100	1100

جدول ۴- پارامترهای آسیب M-K فولاد [۱]

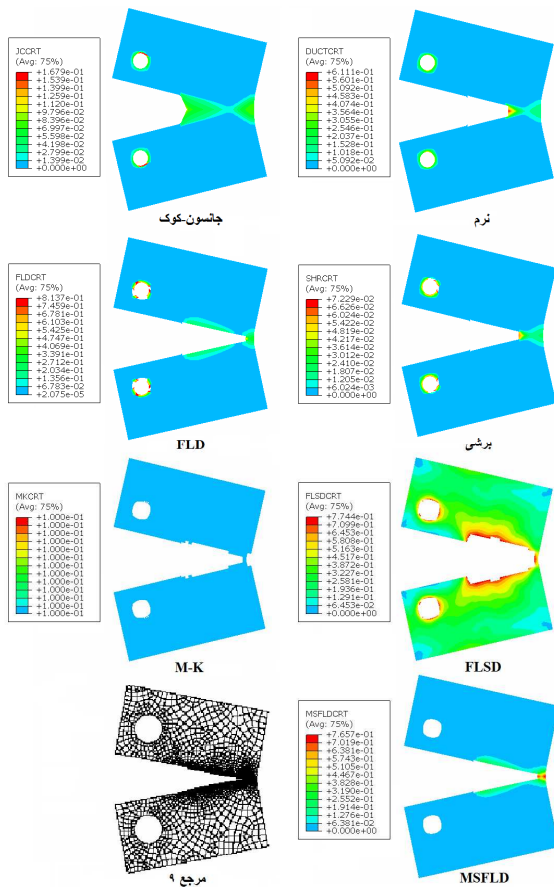
نسبت ضخامت	زاویه
0.99	0
0.98	45
0.97	90
0.98	135

جدول ۵- پارامترهای آسیب MSFLD فولاد [۱]

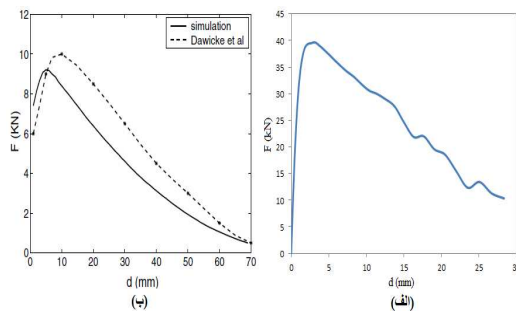
ϵ_{eq}^p	α
0.2759	-0.4546
0.2400	-0.3639
0.2125	-0.2728
0.1988	-0.1821
0.1851	-0.0908
0.1714	0.0000
0.1919	0.1001
0.2331	0.2002
0.2948	0.3000
0.3702	0.4000
0.4457	0.5000
0.5280	0.6001
0.6034	0.7000
0.6651	0.7998
0.6925	0.9000
0.7062	1.0000



شکل ۷- نصف هندسه و مدل اجزاء محدود کشش فشرده

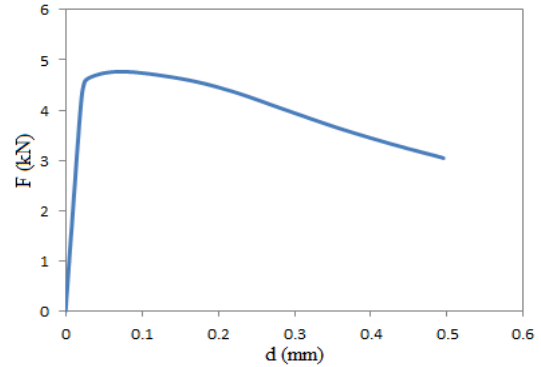


شکل ۸- نتایج پیش بینی ترک و شکست در کشش فشرده توسط معیارهای آسیب و مقایسه با نتایج مرجع [۹]



شکل ۹- نمودار نیرو-جابجایی در کشش فشرده: الف) معیار آسیب نرم و ب) مرجع [۹]

استفاده از معیار آسیب نرم هویوترا به دست آمده را نشان می دهد. مطابق شکل، نیرو از صفر تا مقدار بیشینه ۴٫۷۲ کیلو نیوتن افزایش یافته، پس از ایجاد ترک های اولیه و رشد ترک افت پیدا می کند.



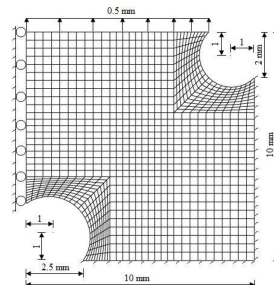
شکل ۶- نمودار نیرو-جابجایی در کشش صفحه سوراخدار

۲-۲- آزمون کشش فشرده

برای ارزیابی بیشتر مدل های آسیب، آزمون کشش فشرده انتخاب می گردد. نصف هندسه و مدل اجزاء محدود مسأله در شکل ۷ آورده شده است. صفحه دارای ضخامت ۲٫۳، سوراخ هایی به قطر ۱۹ و در ناحیه وسط دارای شیار اولیه ای به ابعاد ۳×۳ میلیمتر است. جابجایی عمودی توسط پین هایی که داخل سوراخ های صفحه قرار می گیرند اعمال می شود. به دلیل تقارن، نصف مسأله شبیه سازی می گردد. نتایج پیش بینی شروع ترک و شکست در کشش فشرده توسط معیارهای آسیب و مقایسه آن با نتایج عددی مادیویلا و همکاران برای آلومینیوم 2024T3 [۹] در شکل (۸) ارائه شده است. مطابق شکل، ترک از قسمت نوک شیار شروع شده، رشد نموده و در جهت افقی انتشار می یابد. پیش بینی معیار آسیب نرم بیشترین تطابق را با نتایج مرجع [۹] داشته و از این آزمون نیز موفق بیرون می آید. نتایج معیارهای آسیب برشی، FLD و MSFLD در ناحیه میانی مناسب بوده ولی این معیارها در نواحی اطراف سوراخ نیز شکست هایی را پیش بینی نموده اند که با نتایج مرجع [۹] مغایرت دارد. نتایج معیارهای FLSD و M-K اختلاف فاحشی با نتایج مورد انتظار داشته و معیار جانسون-کوک نیز هیچ گونه شکستی را پیش بینی نمی کند. همچنین شکل ۹ نمودار نیرو-جابجایی صفحه حاصل از معیار آسیب نرم هویوترا و مقایسه آن با نتایج مرجع [۹] برای آلومینیوم 2024T3 را نشان می دهد. مطابق شکل (الف)، نیرو از صفر تا مقدار ماکزیمم ۳۹٫۰۸ کیلو نیوتن افزایش یافته، پس از ایجاد ترک های اولیه و رشد ترک افت پیدا می کند. روند تغییرات نمودار نیرو-جابجایی کاملاً با نتایج عددی-عملی مرجع [۹] تطابق و همخوانی دارد ولی به دلیل یکسان نبودن جنس ها، اعداد متفاوت می باشند.

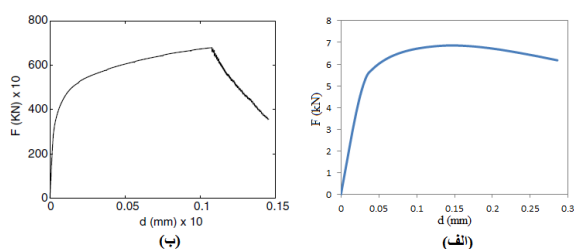
۲-۳- آزمون کشش صفحه دو سوراخه

شکل ۱۰ هندسه و مدل اجزاء محدود آزمون کشش صفحه دو سوراخه را نشان می‌دهد. صفحه دارای ضخامت ۱ میلی‌متر بوده و در دو گوشه بالا و پایین دارای سوراخ‌های ناقص بینی شروع ترک و شکست کشش صفحه دو سوراخه توسط معیارهای آسیب و مقایسه آن با نتایج عددی مدیاویلا و همکاران برای نوعی فولاد [۹] را نشان می‌دهد. مطابق شکل، ترک از سمت چپ سوراخ بالایی شروع شده، در جهت مورب و رو به پایین انتشار می‌یابد. نتایج پیش‌بینی معیارهای آسیب نرم و FLD بیشترین تطابق را با نتایج مرجع [۹] داشته و از این آزمون موفق بیرون می‌آیند.



شکل ۱۰- هندسه و مدل اجزاء محدود کشش صفحه دو سوراخه

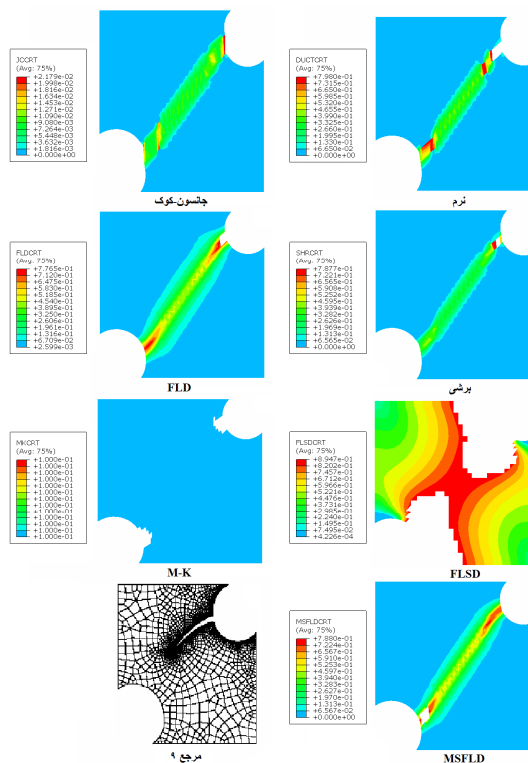
همچنین نتایج معیار آسیب برشی اندکی تفاوت را نشان می‌دهد. همانند آزمون‌های قبلی، نتایج معیارهای FLSD، M-K و MSFLD اختلاف فاحشی با نتایج مورد انتظار دارد. معیار جانسون-کوک نیز هیچ گونه شکستی را پیش‌بینی نمی‌کند. همچنین شکل ۱۲ نمودار نیرو-جابجایی صفحه حاصل از معیار آسیب نرم هویوترا و مقایسه آن با نتایج با نتایج مرجع [۹] برای نوعی فولاد را نشان می‌دهد. مطابق شکل (الف)، نیرو از صفر تا مقدار بیشینه ۶۸۶ کیلو نیوتن افزایش یافته و پس از ایجاد ترک‌های اولیه افت پیدا می‌کند. روند تغییرات نمودار نیرو-جابجایی با نتایج مرجع [۹] تطابق مناسبی دارد ولی به دلیل یکسان نبودن جنس‌ها، اعداد متفاوت می‌باشند.



شکل ۱۲- نمودار نیرو-جابجایی در کشش صفحه دو سوراخه: الف) معیار آسیب نرم و ب) مرجع [۹]

۲-۴- فرآیند هیدروفورمینگ لوله

فرآیند هیدروفورمینگ لوله شامل اعمال همزمان بار محوری از یک یا دو طرف به لوله و افزایش فشار داخل لوله توسط سیالی مانند آب می‌باشد. شکل (۱۳) نصف هندسه و مدل اجزاء محدود فرآیند هیدروفورمینگ لوله T شکل را نشان می‌دهد. وجود صفحه کنترلی در تولید محصولی سالم ضروری است. در شبیه‌سازی‌ها، ضخامت لوله ۱ میلی‌متر و ضریب اصطکاک برابر ۰/۰۵ اعمال می‌گردد. برای پیش‌بینی نتایج ترک و شکست، شبیه‌سازی‌ها با انتخاب مسیر بارگذاری خطی مطابق شکل (۱۴) و بدون صفحه کنترلی انجام می‌گیرد. سمت چپ لوله ثابت شده و تغذیه ۴/۵ میلی‌متری از سمت راست اعمال می‌گردد. شکل ۱۵، نتایج پیش‌بینی شروع ترک و شکست در فرآیند هیدروفورمینگ لوله توسط معیارهای آسیب و مقایسه آن با نتایج عملی لوح موسوی و همکاران برای نوعی فولاد کم‌کربن [۱۰] را نشان می‌دهد. مطابق نتایج عملی، ترک از مرکز لوله شروع شده و در جهت محور آن انتشار می‌یابد.

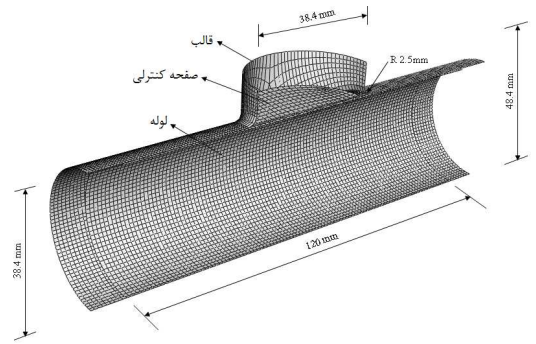


شکل ۱۱- نتایج پیش‌بینی ترک و شکست در کشش صفحه دو سوراخه توسط معیارهای آسیب و مقایسه با نتایج مرجع [۹]

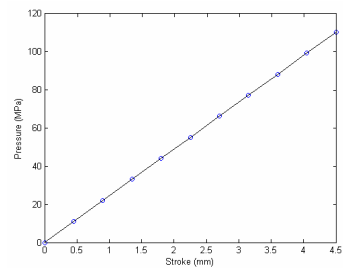
داشته و مناسب نیستند. معیار جانسون-کوک نیز هیچ شکستی را پیش بینی نمی کند.

۲-۵- کشش عمیق هیدرونیامیکی با فشار شعاعی

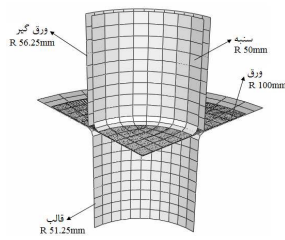
شکل ۱۶، یک چهارم هندسه و مدل اجزاء محدود فرآیند کشش عمیق هیدرونیامیکی با فشار شعاعی را نشان می دهد. ضخامت ورق ۰٫۸۲ میلی متر، ضریب اصطکاک برابر ۰٫۰۵ و فشار ۳۰ MPa اعمال می شود. نتایج پیش بینی شروع ترک و شکست در فرآیند مذکور توسط معیارهای آسیب و مقایسه آن با نتایج عملی لنگ و همکاران برای آلومینیوم 6016T4 [۱۱] در شکل (۱۷) آورده شده است. مطابق شکل، ترک ابتدا در نوک شعاع سنبه ایجاد شده و با افزایش بارگذاری، رشد و در جهت محیطی انتشار می یابد. نتایج پیش بینی معیارهای آسیب نرم و برشی تطابق خوبی با نتایج عملی داشته و از این آزمون موفق بیرون می آیند. معیارهای آسیب FLD و MSFLD تفاوت کمی نشان می دهند. نتایج معیارهای FLSD و M-K نامناسب بوده و معیار جانسون-کوک نیز هیچ شکستی را پیش بینی نمی کند.



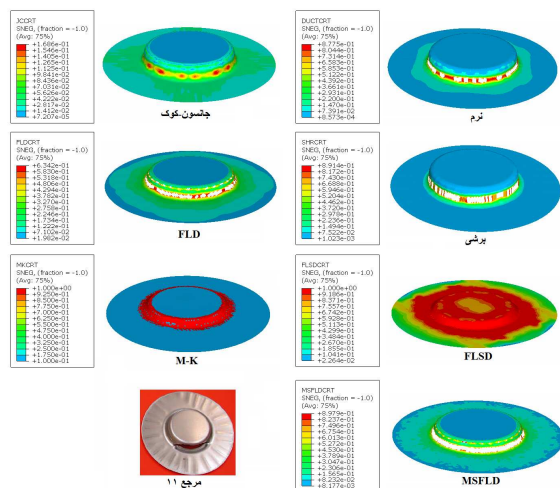
شکل ۱۳- نصف هندسه و مدل اجزاء محدود هیدروفرمینگ لوله



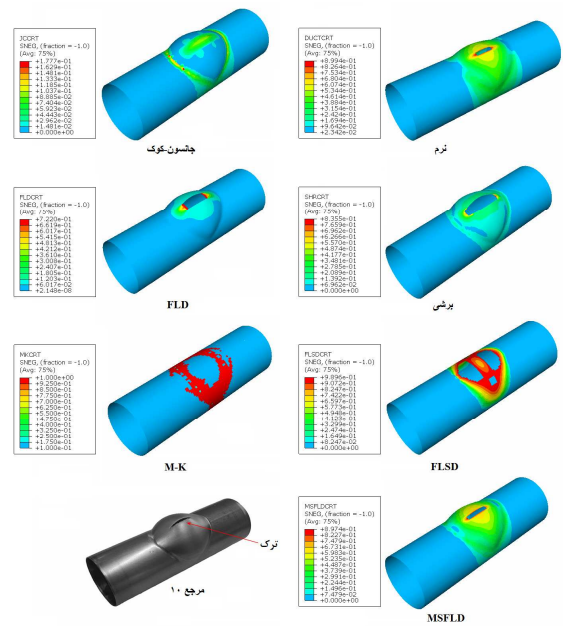
شکل ۱۴- مسیر بارگذاری خطی



شکل ۱۶- یک چهارم هندسه و مدل اجزاء محدود کشش عمیق هیدرونیامیکی با فشار شعاعی



شکل ۱۷- نتایج پیش بینی ترک و شکست در کشش عمیق هیدرونیامیکی با فشار شعاعی توسط معیارهای آسیب و مقایسه با نتایج مرجع [۱۱]



شکل ۱۵- نتایج پیش بینی ترک و شکست در هیدروفرمینگ لوله توسط معیارهای آسیب و مقایسه با نتایج مرجع [۱۰]

نتایج پیش بینی معیارهای آسیب نرم و MSFLD تطابق بسیار خوبی با نتایج عملی مرجع [۱۰] داشته و از این آزمون موفق بیرون می آیند. همچنین معیارهای آسیب برشی و FLD اندکی تفاوت از خود نشان می دهند. همانند آزمون های قبلی، نتایج معیارهای FLSD و M-K اختلاف فاحشی با نتایج عملی

نتیجه‌گیری

برای ارزیابی مدل‌های آسیب نرم افزار ABAQUS تعدادی مسائل آزمون و فرآیندهای شکل دهی شبیه سازی شده، با آزمایش‌های عملی مقایسه گردیده و نتایج زیر حاصل شد:

پیش بینی‌های معیار جانسون-کوک در آزمون‌ها نامناسب بوده و این مدل برای وضعیت بارگذاری شبه استاتیکی توصیه نمی‌شود. پیش بینی معیارهای آسیب برشی، FLD و MSFLD در برخی از آزمون‌ها مناسب، در بعضی نامناسب و پیش بینی معیارهای آسیب FLSD و M-K دور از انتظار بود. پیش بینی معیار آسیب نرم در فرآیندهای شبه استاتیکی شکل دهی ورق مناسب و توصیه می‌گردد.

مراجع

- [1] ABAQUS Documentation User's Manual.
- [2] Hooputra, H., Gese, H., Dell, H., Werner, H., "A comprehensive failure model for crashworthiness simulation of aluminum extrusions", Int. J. Crash., Vol. 9, 449-463, 2004.
- [3] Johnson, G.R., Cook, W.H., "Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures", Int. J. Eng. Frac. Mech., Vol. 21, 31-48, 1985.
- [4] Keeler, S.P., Backofen, W.A., "Plastic instability and fracture in sheets stretched over rigid punches", ASM Trans. Quarterly., Vol. 56, 25-48, 1964.
- [5] Stoughton, T.B., "A general forming limit criterion for sheet metal", Int. J. Mech. Sci., Vol. 42, 1-27, 2000.
- [6] Marciniak, Z., Kuczynski, K., "Limit strains in the processes of stretch forming sheet metal", Int. J. Mech. Scienc., Vol. 9, 609-620, 1967.
- [7] Muschenborn, W., Sonne, H., "Influence of strain path on the forming limits of sheet metal", Arch. Fur. Das. Eisen., Vol. 46, 597-602, 1975.
- [8] Gray, G.T., Maudlin, P.J., Hull, L.M., Zuo, Q.K., Chen, A.R., "Predicting material strength damage and fracture", Los. Science., Vol. 29, 80-93, 2005.
- [9] Mediavilla, J., Peerlings, R. H. J., Geers, M.G., "A robust and consistent remeshing-transfer operator for ductile fracture simulations", Comp. Struc., Vol. 84, 604-623, 2006.
- [10] Loh- Mousavi, M., Mori, K., Hayashi, K., Maki, S., Bakhshi, M., "3-D finite element simulation of pulsating T-shape hydroforming of tubes", Key Eng. Mat., Vol. 340-341, 353-358, 2007.
- [11] Lang, L., Danckert, J., Nielsen, K.B., "Investigation into hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure of aluminum alloy", J. Mat. Proc. Tech., Vol. 148, 119-131, 2004.