



دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مکانیک

مدل‌های آسیب برای فلزات نرم در نرم‌افزار آباکوس

Damage and failure model for ductile metals in ABAQUS



مدل‌های آسیب در نرم افزار ABAQUS

در نرم افزار ABAQUS برای مواد نرم مدل‌های مختلف آسیب زیر ارایه شده است:

- ❖ معیار آسیب نرم
- ❖ معیار آسیب جانسون- کوک
- ❖ معیار آسیب برشی
- ❖ معیار آسیب FLD
- ❖ معیار آسیب FLSD
- ❖ معیار آسیب M-K
- ❖ معیار آسیب MSFLD



مدل‌های آسیب در نرم افزار ABAQUS

سه معیار اول برای مسایل حجمی، صفحه‌ای و پوسته‌ای، و چهار معیار بعدی فقط برای مدل‌سازی شروع ناپایداری گلویی شدن در ورق‌های فلزی توصیه شده‌اند.



مدل آسیب نرم (Ductile Damage)

معیار آسیب نرم مدلی برای پیش‌بینی آسیب مربوط به جوانه‌زنی ریزحفره‌ها، رشد و به هم پیوستن آنها در فلزات نرم است. در این مدل فرض می‌شود کرنش پلاستیک معادل در مدل آسیب، تابعی از نسبت تنش سه محوره و نرخ کرنش است.

$$\sigma_{tr} = \frac{\sigma_H}{\sigma_{eq}}$$

σ_{eq} : تنش معادل فون میزز و σ_H : تنش هیدرواستاتیک است

هویوترا و همکاران عبارت ساده‌ای برای معیار آسیب نرم ارائه کردند که نیاز به تعداد محدودی آزمایش دارد. بر اساس این مدل، کرنش پلاستیک معادل در آسیب

برابر است با:

$$\bar{\varepsilon}_f(\sigma_{tr}) = \frac{\varepsilon_T^+ \sinh[k_0(\sigma_{tr}^- - \sigma_{tr})] + \varepsilon_T^- \sinh[k_0(\sigma_{tr} - \sigma_{tr}^+)]}{\sinh[k_0(\sigma_{tr}^- - \sigma_{tr}^+)]}$$



مدل آسیب نرم (Ductile Damage)

ε_T^- و ε_T^+ : کرنش‌های پلاستیک معادل در آسیب نرم برای حالت کشش دو محوری یکسان و فشار دو محوری یکسان هستند. برای مواد همسانگرد، نسبت تنش سه محوره در حالت کشش دو محوری یکسان برابر با: $\sigma_{tr} = 2/3$ و در حالت فشار دو محوری یکسان برابر با $\sigma_{tr} = -2/3$ است.

شرط معیار آسیب نرم تا رسیدن به شکست:

$$D = \int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \frac{d\bar{\varepsilon}}{\bar{\varepsilon}_f(\sigma_{tr})} = 1$$



مدل آسیب برشی (Shear Damage)

معیار آسیب برشی مدلی برای پیش‌بینی آسیب مربوط به پهنای برش محلی است. در این مدل فرض می‌شود کرنش پلاستیک معادل در مدل آسیب، تابعی از نسبت تنش برشی و نرخ کرنش است. این معیار نیز توسط هوپوترا و همکاران معرفی شده و شبیه

به معیار آسیب نرم است

$$\theta_s = (1 - k_s \sigma_{tr}) \frac{\tau_{\max}}{\sigma_{eq}}$$

کرنش پلاستیک معادل برای استخراج آسیب برابر است با:

$$\bar{\varepsilon}_f(\sigma_{tr}) = \frac{\varepsilon_s^+ \sinh[f(\theta_s - \theta_s^-)] + \varepsilon_s^- \sinh[k_0(\theta_s^+ - \theta_s)]}{\sinh[f(\theta_s^+ - \theta_s^-)]}$$



مدل آسیب برشی (Shear Damage)

ε_s^- و ε_s^+ : کرنش‌های پلاستیک معادل در آسیب نرم برای حالت کشش دوماحوری یکسان و فشار دو محوری یکسان هستند.

شرط معیار آسیب برشی تا رسیدن به شکست:

$$D = \int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \frac{d\bar{\varepsilon}}{\bar{\varepsilon}_f(\sigma_{tr})} = 1$$

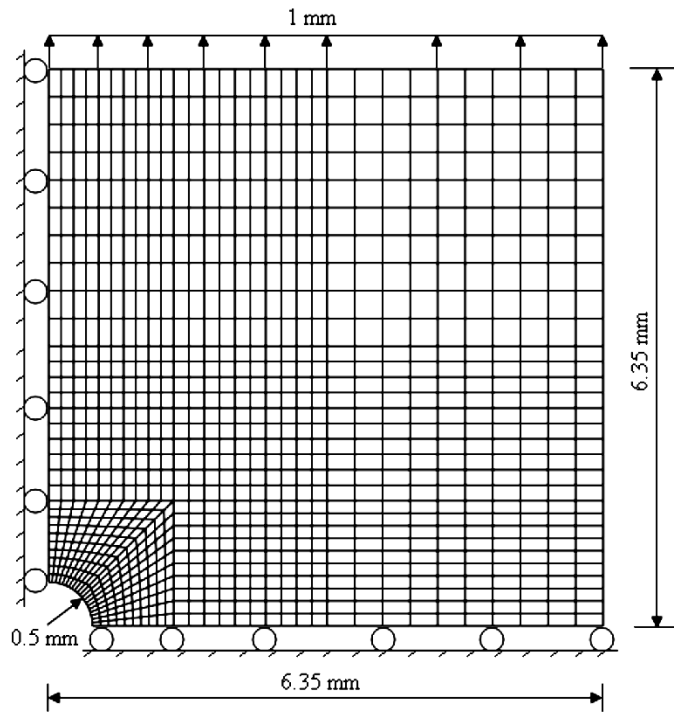


آزمون کشش صفحه‌ی سوراخ‌دار

یک صفحه مربعی شکل فولادی به طول 12.7 mm ، ضخامت 1 mm دارای یک سوراخ مرکزی به قطر 1 mm است. صفحه در راستای عمودی تحت جابجایی 1 میلیمتر از هر طرف قرار دارد. به علت تقارن، یک چهارم از هندسه؛ شبیه‌سازی شده و شرایط تقارن بر روی محورهای تقارن صفحه اعمال می‌گردد. برای بدست آوردن نتایج مطلوب اطراف سوراخ از المان‌های ریزتر و در نواحی دیگر از المان‌های درشت‌تر استفاده شده است. با توجه به ضخامت کم صفحه و بارگذاری داخل صفحه، شرایط مسأله به حالت تنش صفحه‌ای نزدیک بوده، بنابراین از المان‌های تنش صفحه‌ای استفاده می‌گردد.

آزمون کشش صفحه‌ی سوراخ‌دار

❖ معیار آسیب نرم



خواص مکانیکی و پارامترهای آسیب نرم فولاد

$\rho(Kg / m^3)$	7800
$E(GPa)$	210
ν	0.3
σ_{y0}	776
σ_y	$950(0.0072 + \varepsilon_{eq})^{0.041}$
ε_T^+	1.2
ε_T^-	2.6
k_0	0.1956

مدل اجزای محدود صفحه سوراخ‌دار



آزمون کشش صفحه‌ی سوراخ‌دار

❖ معیار آسیب نرم

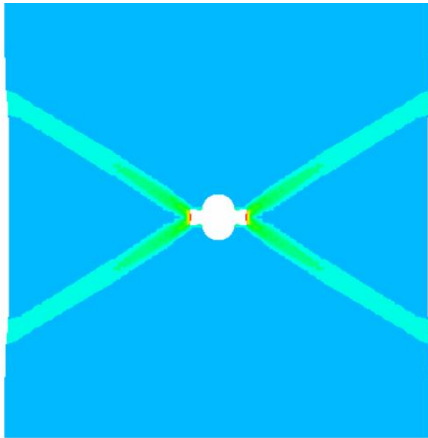
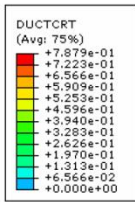
برای نشان دادن ترک‌ها از تکنیک حذف المان موجود در نرم افزار استفاده شده است. با استفاده از این تکنیک می‌توان المان‌هایی که مقدار آسیب 0.9 رسیده را حذف نمود.

نتایج پیش‌بینی شروع ترک و شکست توسط معیار آسیب نرم

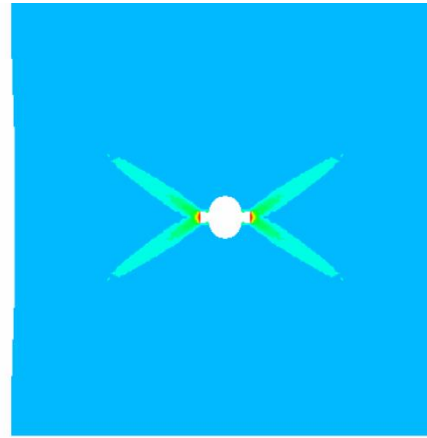
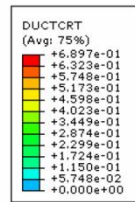
برای مقایسه با نتایج عملی، هندسه کامل نمایش داده شده است. مطابق شکل ترک از نقاط سمت راست و چپ سوراخ شروع شده و با افزایش بارگذاری رشد نموده و در جهت‌های مورب (۴۵ درجه) انتشار می‌یابد.

آزمون کشش صفحه‌ی سوراخ‌دار

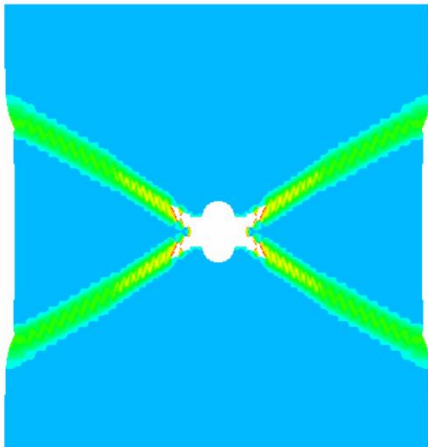
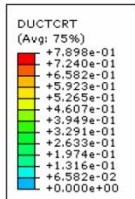
معيار آسیب نرم



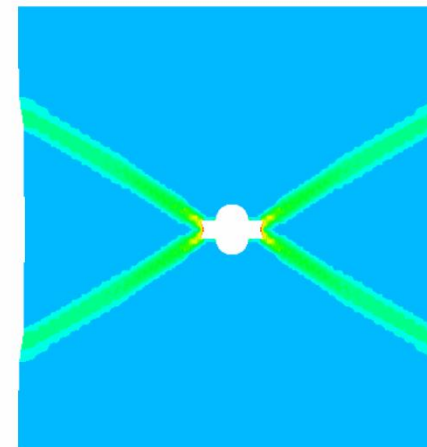
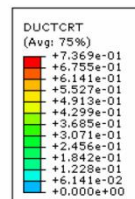
(ب)



(گ)



(د)

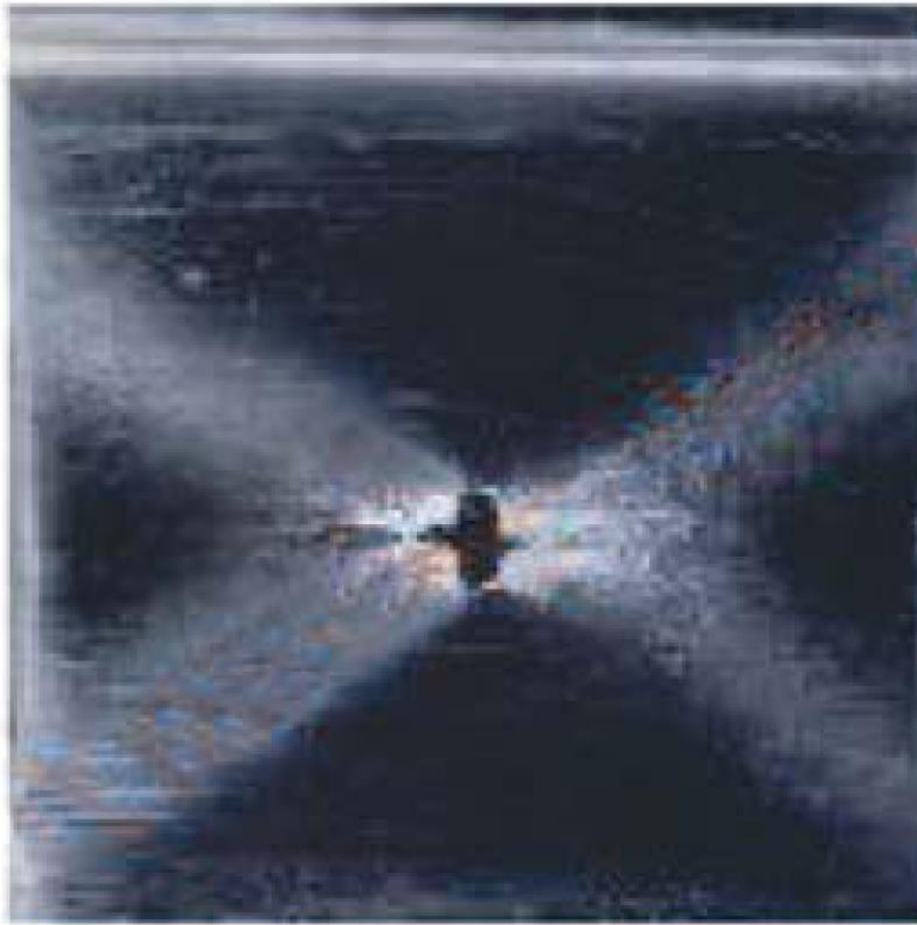


(ج)

نتایج پیش‌بینی شروع ترک و شکست توسط معیار آسیب نرم به ازای جابجایی عمودی

الف - ۰/۱۶ میلیمتر، ب - ۰/۲ میلیمتر، ج - ۰/۲۶ میلیمتر، د - ۰/۴۴ میلیمتر.

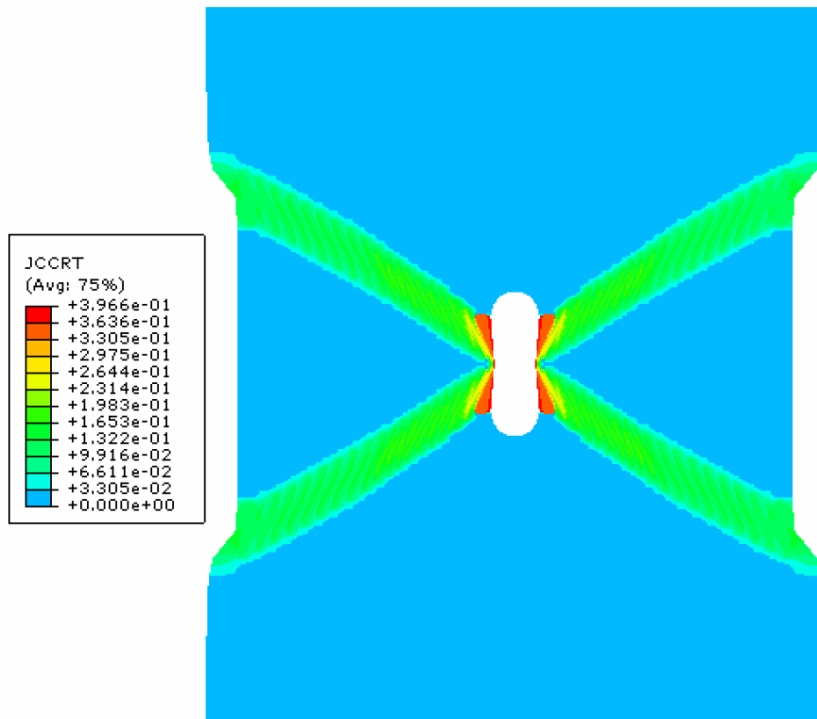
آزمون کشش صفحه‌ی سوراخ‌دار



نتایج آزمون تجربی کشش صفحه‌ی سوراخ‌دار

آزمون کشش صفحه‌ی سوراخ‌دار

❖ معیار آسیب جانسون- کوک



نتایج پیش‌بینی شروع ترک و شکست

معیار آسیب جانسون- کوک

پارامترهای آسیب جانسون- کوک فولاد

d_1	0.05
d_2	3.44
d_3	-2.12
d_4	0.002
d_5	0.01
θ_{melt}	1520
θ_{trans}	27
$\dot{\epsilon}_{eq0}$	1



آزمون کشش صفحه‌ی سوراخ‌دار

❖ معیار آسیب جانسون- کوک

نتایج نشان می‌دهد که با اعمال کل جابجایی، مقدار آسیب حداکثر در اطراف سوراخ به 0.3966 می‌رسد. این مقدار کوچکتر از یک بوده و در نتیجه برای بروز ترک یا شکست باید بارگذاری ادامه یابد. این پیش‌بینی با نتایج تجربی مغایرت دارد. مدل آسیب جانسون-کوک برای مسایل شبه استاتیکی توصیه نمی‌شود.



آزمون کشش صفحه‌ی سوراخ‌دار

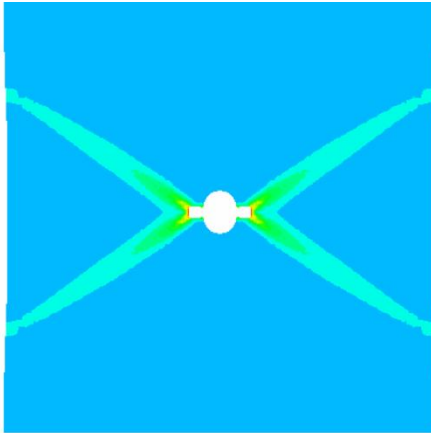
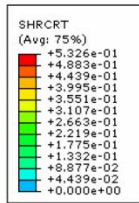
❖ معیار آسیب برشی

پارامترهای آسیب برشی فولاد

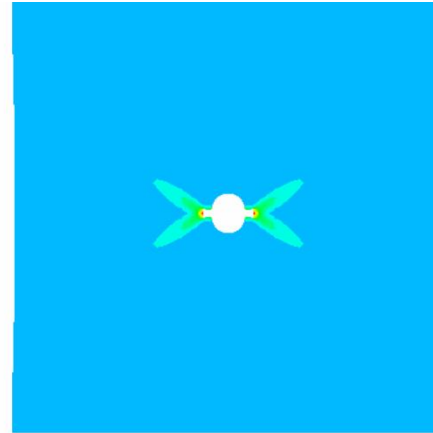
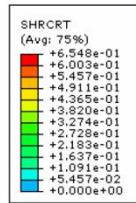
ϵ_s^+	1.22
ϵ_s^-	0.86
f	1.56
k_s	0.03

آزمون کشش صفحه‌ی سوراخ‌دار

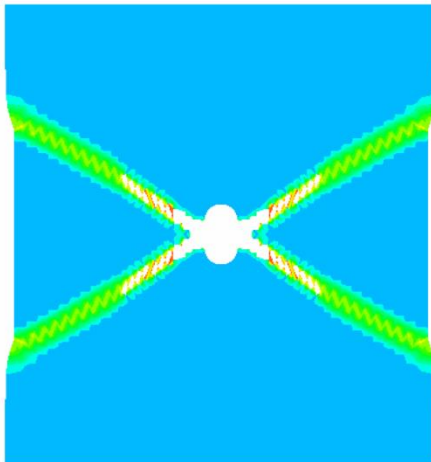
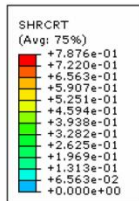
❖ معیار آسیب برشی



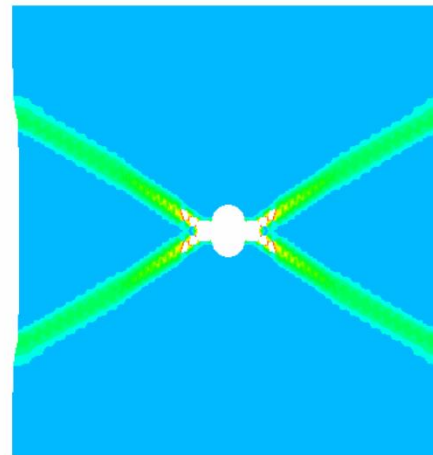
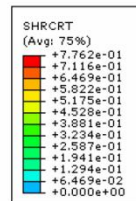
(ب)



(گ)



(د)



(ز)

نتایج پیش‌بینی شروع ترک و شکست توسط معیار آسیب برشی به ازای جابجایی عمودی

الف - ۰/۱۲ میلیمتر، ب - ۰/۱۶ میلیمتر، ج - ۰/۳۰ میلیمتر، د - ۰/۴۴ میلیمتر.



آزمون کشش صفحه‌ی سوراخ‌دار

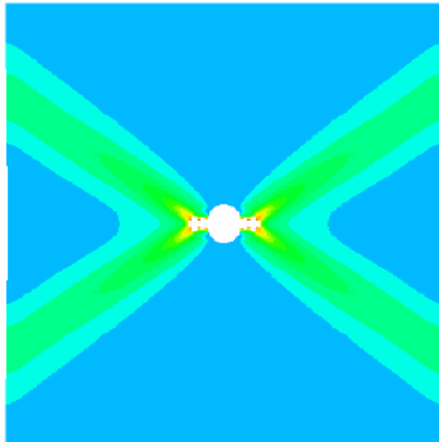
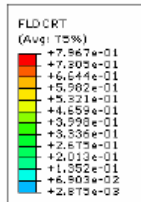
❖ معیار آسیب FLD

پارامترهای آسیب FLD فولاد

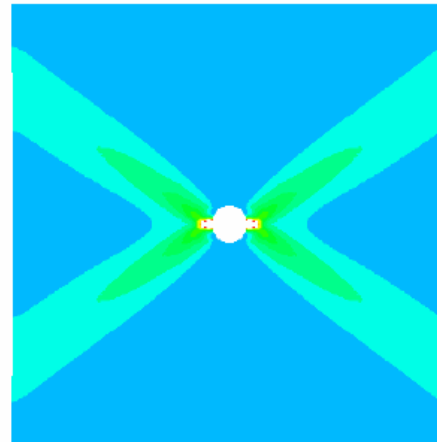
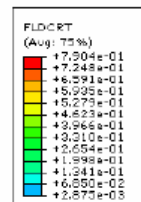
ϵ_{\max}	ϵ_{\min}
0.2756	-0.1253
0.2371	-0.0863
0.2056	-0.0561
0.1867	-0.0340
0.1674	-0.0152
0.1485	0.0000
0.1578	0.0158
0.1813	0.0368
0.2166	0.0650
0.2567	0.1027
0.2918	0.1459
0.3266	0.1960
0.3531	0.2472
0.3688	0.2950
0.3643	0.3279
0.3531	0.3531

آزمون کشش صفحه‌ی سوراخ‌دار

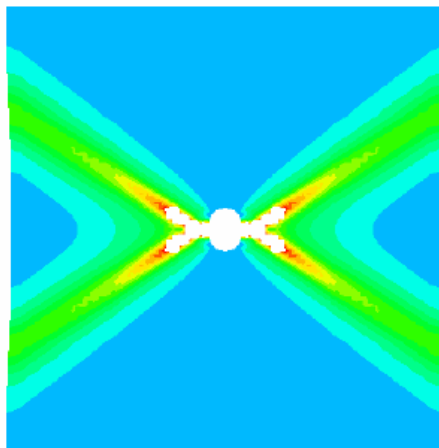
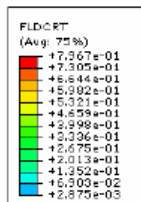
❖ معیار آسیب FLD



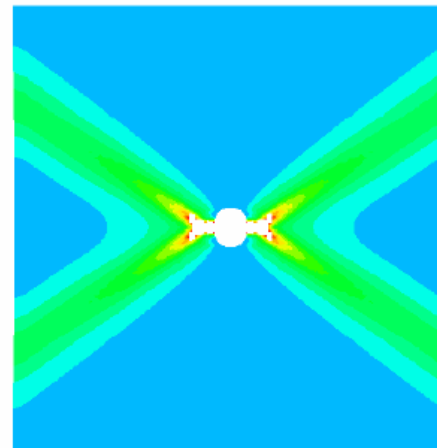
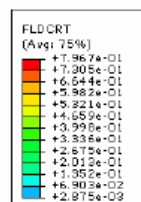
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

نتایج پیش‌بینی شروع ترک و شکست توسط معیار آسیب FLD به ازای جابجایی عمودی

الف- ۰/۰۶ میلیمتر، ب- ۰/۱۰ میلیمتر، ج- ۰/۱۲ میلیمتر، د- ۰/۱۶ میلیمتر.



آزمون کشش صفحه‌ی سوراخ‌دار

❖ معیار آسیب FLSD

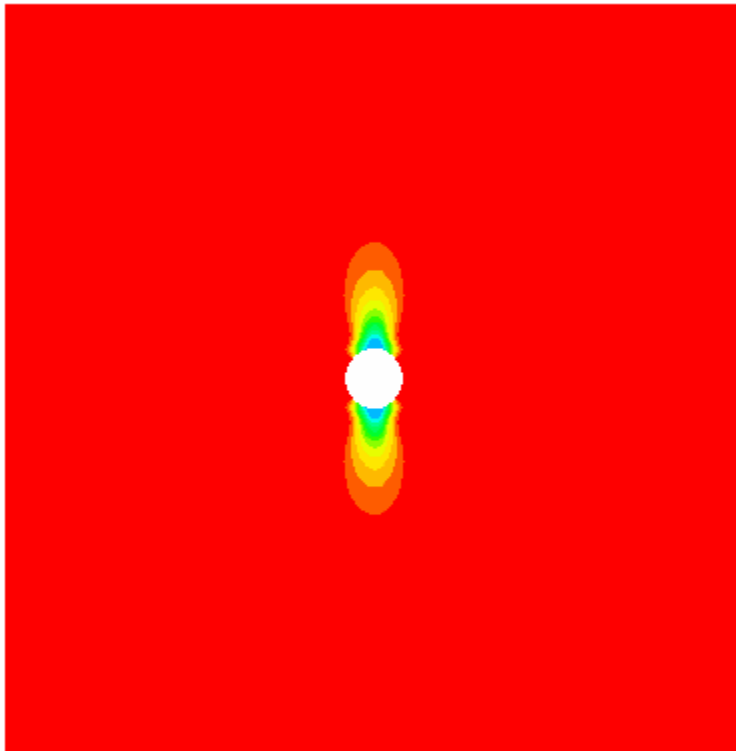
پارامترهای آسیب FLSD فولاد

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

آزمون کشش صفحه‌ی سوراخ‌دار

❖ معیار آسیب FLSD

مطابق شکل، مقدار آسیب در همان لحظات اولیه و برای اکثر نواحی دور سوراخ همزمان با هم به مقدار شکست یعنی ۱ رسیده است، حال آن که با توجه به نتایج تجربی، ترک تنها از نقاط سمت چپ و راست سوراخ آغاز می‌گردد.



نتایج پیش‌بینی شروع ترک و شکست توسط معیار

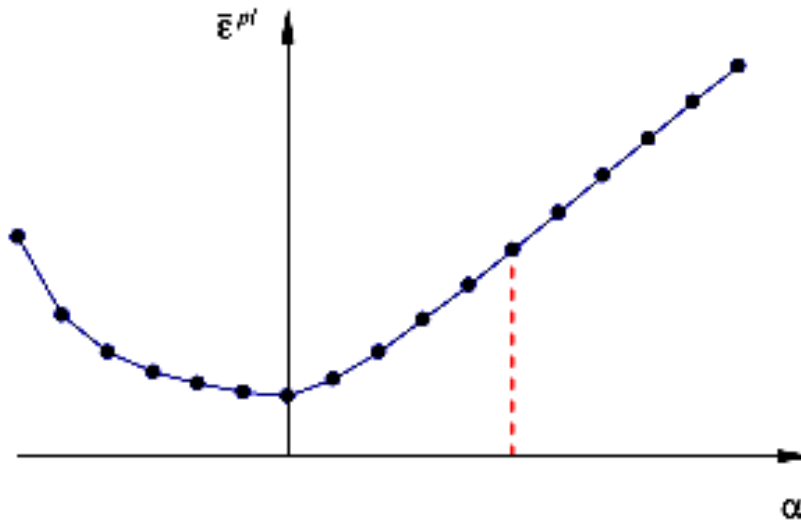
آسیب FLSD

معیار آسیب FLSD مقدار آسیب در نقاط اطراف سوراخ را کمتر از سایر نواحی پیش‌بینی کرده است. از این رو، معیار آسیب FLSD همانند معیار آسیب

جانسون-کوک توصیه نمی‌شود.

Müschenborn-Sonne forming limit diagram (MSFLD) criterion

(b) MSFLD



$$\alpha = \frac{\epsilon_{\text{minor}}}{\epsilon_{\text{major}}}$$

$$\bar{\epsilon}^{pl} = \epsilon_{\text{major}} \sqrt{\frac{4}{3}(1 + \alpha + \alpha^2)}$$



آزمون کشش صفحه‌ی سوراخ‌دار

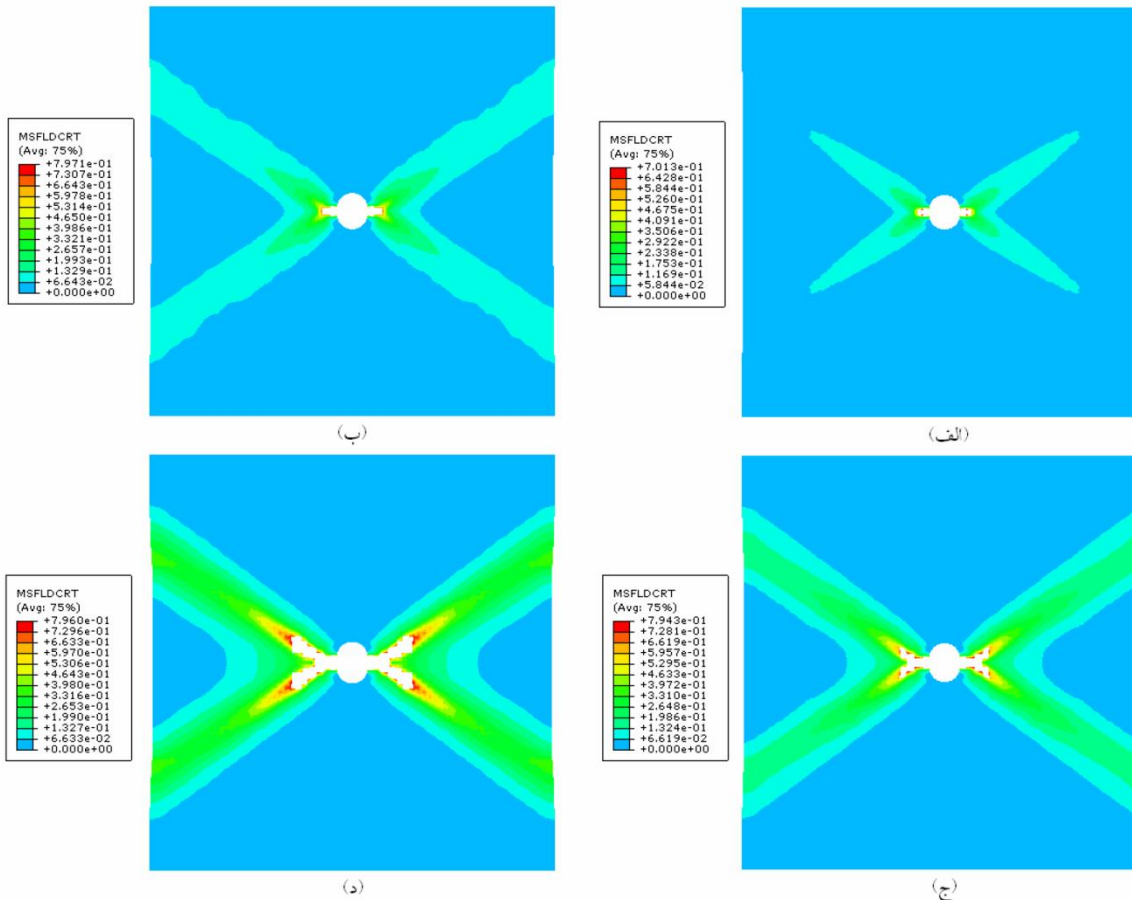
❖ معیار آسیب MSFLD

پارامترهای آسیب MSFLD فولاد

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

آزمون کشش صفحه‌ی سوراخ‌دار

❖ معیار آسیب MSFLD



نتایج پیش‌بینی شروع ترک و شکست توسط معیار آسیب MSFLD به ازای جابجایی

عمودی الف - $0/06$ میلیمتر، ب - $0/10$ میلیمتر، ج - $0/16$ میلیمتر، د - $0/20$ میلیمتر.



آزمون کشش صفحه‌ی سوراخ‌دار

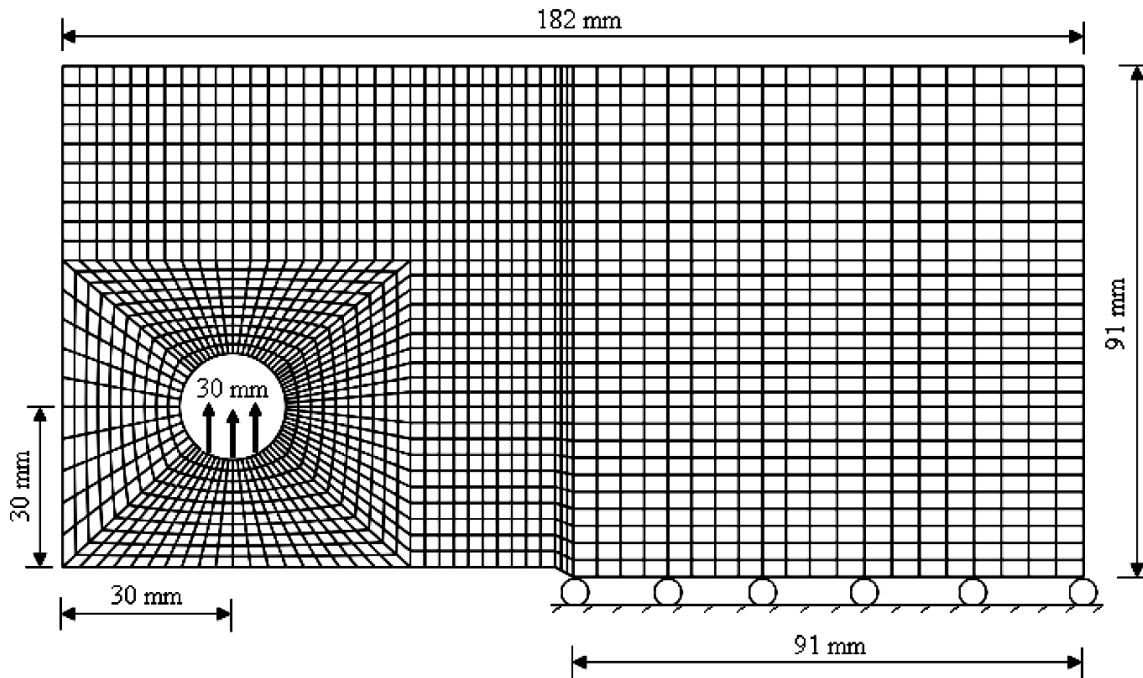
❖ معیار آسیب MSFLD

این نتایج با نتایج آزمایش تجربی هماهنگ است از این رو معیار آسیب MSFLD نظیر معیارهای آسیب نرم، برشی و FLD نیز آزمون اول را با موفقیت می‌گذرانند.



آزمون کشش فشرده

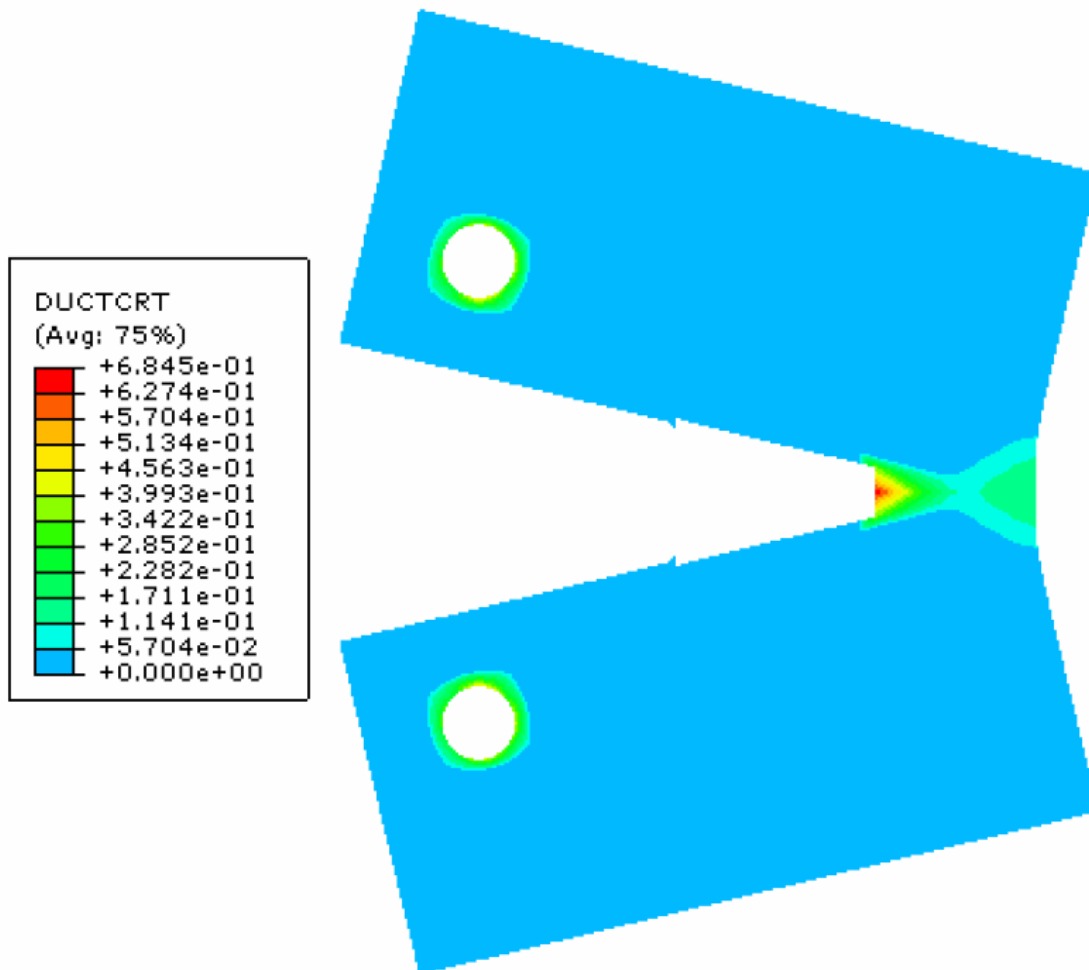
یک مسئله محک برای ارزیابی پیش‌بینی رشد ترک در معیارهای آسیب، آزمون کشش فشرده (CT) است. یک صفحه با ضخامت 2.3 میلی‌متر، سوراخ‌هایی به قطر ۱۹ میلی‌متر و در ناحیه وسط دارای شیار اولیه 3x3 میلی‌متر است. جابجایی عمودی ۳۰ میلی‌متر توسط پین‌هایی که داخل سوراخ‌های صفحه قرار می‌گیرند اعمال می‌شود. به دلیل تقارن، نصف مسأله شبیه‌سازی شده و شرایط تقارن بر روی محور تقارن صفحه اعمال می‌شود. با توجه به ضخامت کم صفحه در مقابل ابعاد آن و بارگذاری داخل صفحه، از المان تنش صفحه‌ای استفاده می‌شود.



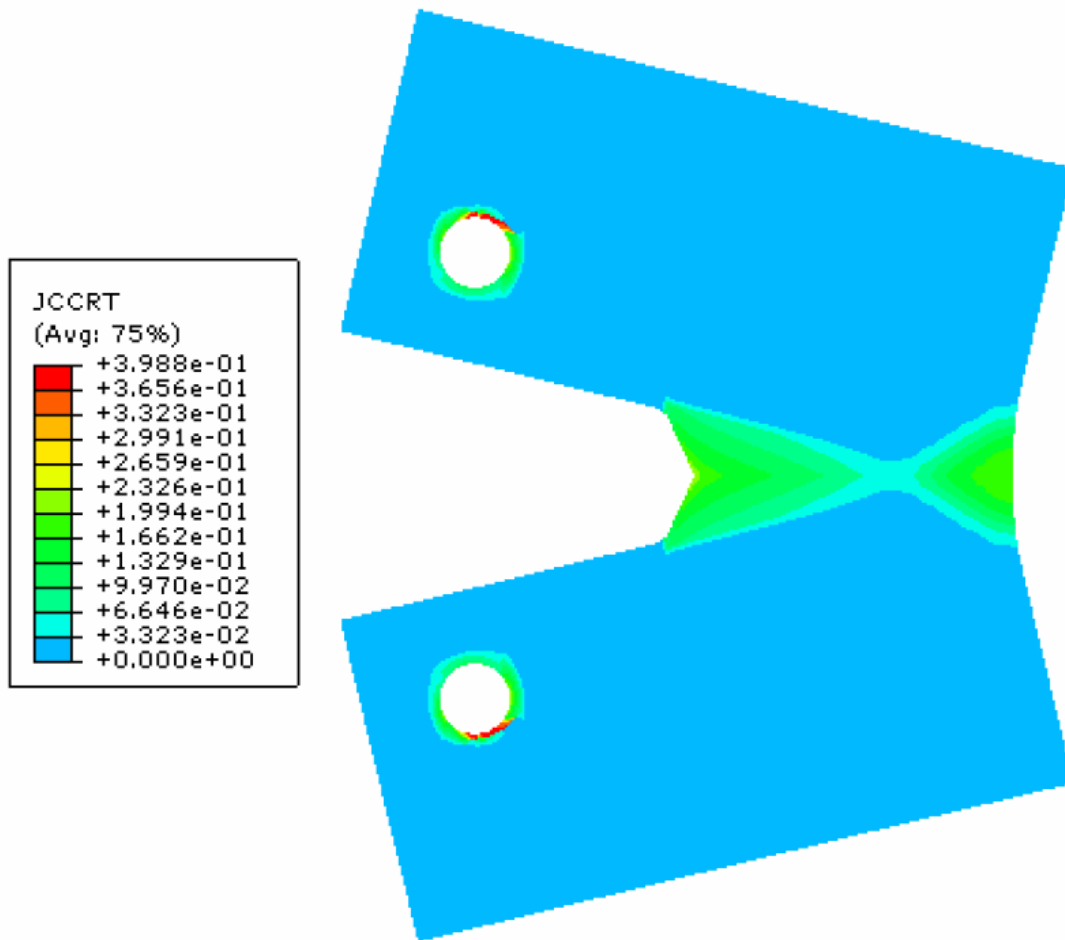
مدل اجزای محدود آزمون کشش فشرده

آزمون کشش فشرده

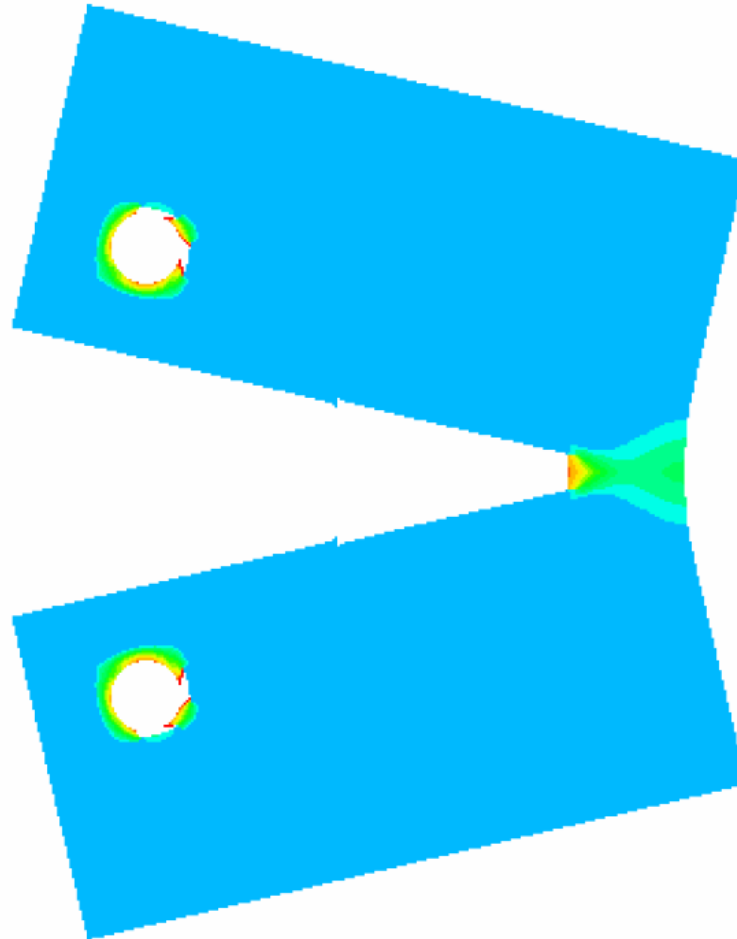
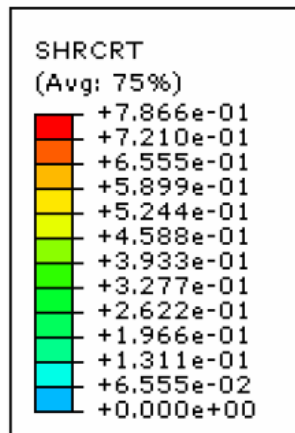
نتایج پیش‌بینی رشد ترک و شکست در آزمون کشش فشرده توسط معیار آسیب نرم



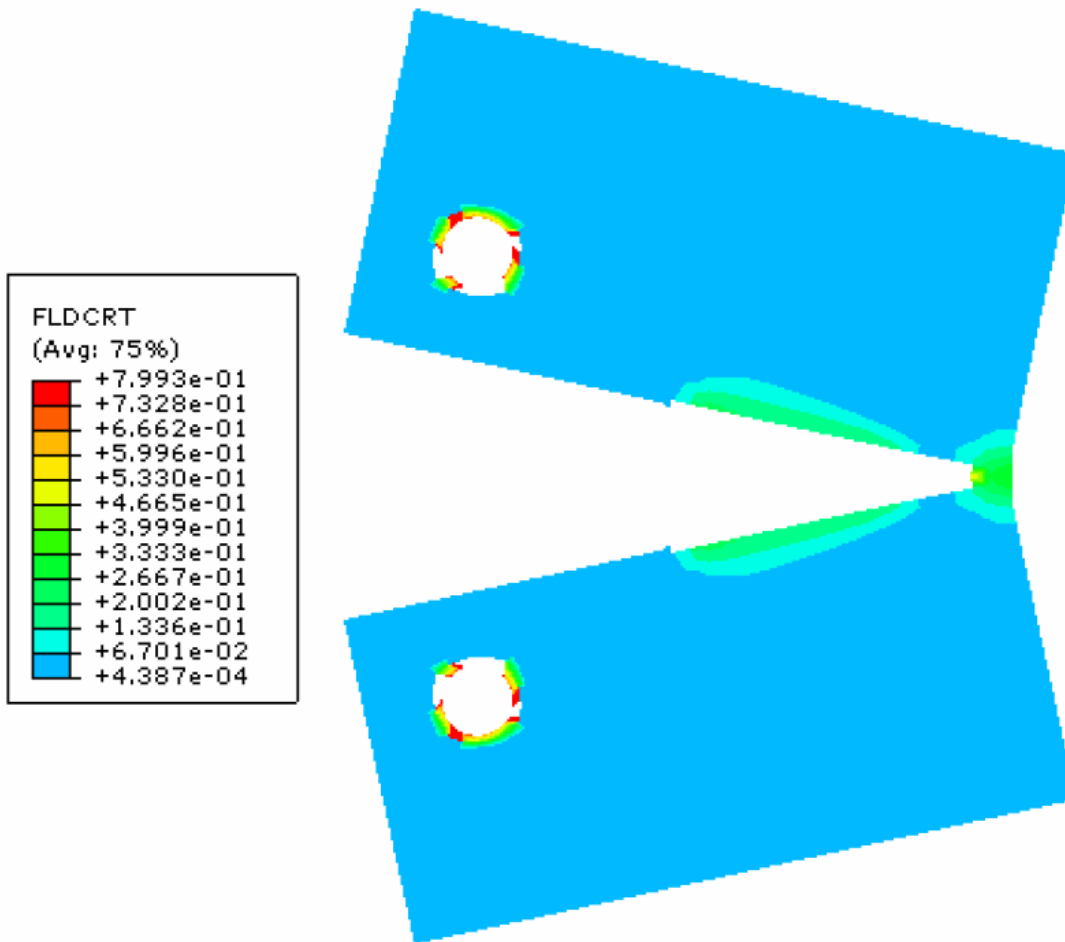
نتایج پیش‌بینی رشد ترک و شکست در آزمون کشش فشرده توسط معیار جانسون-کوک



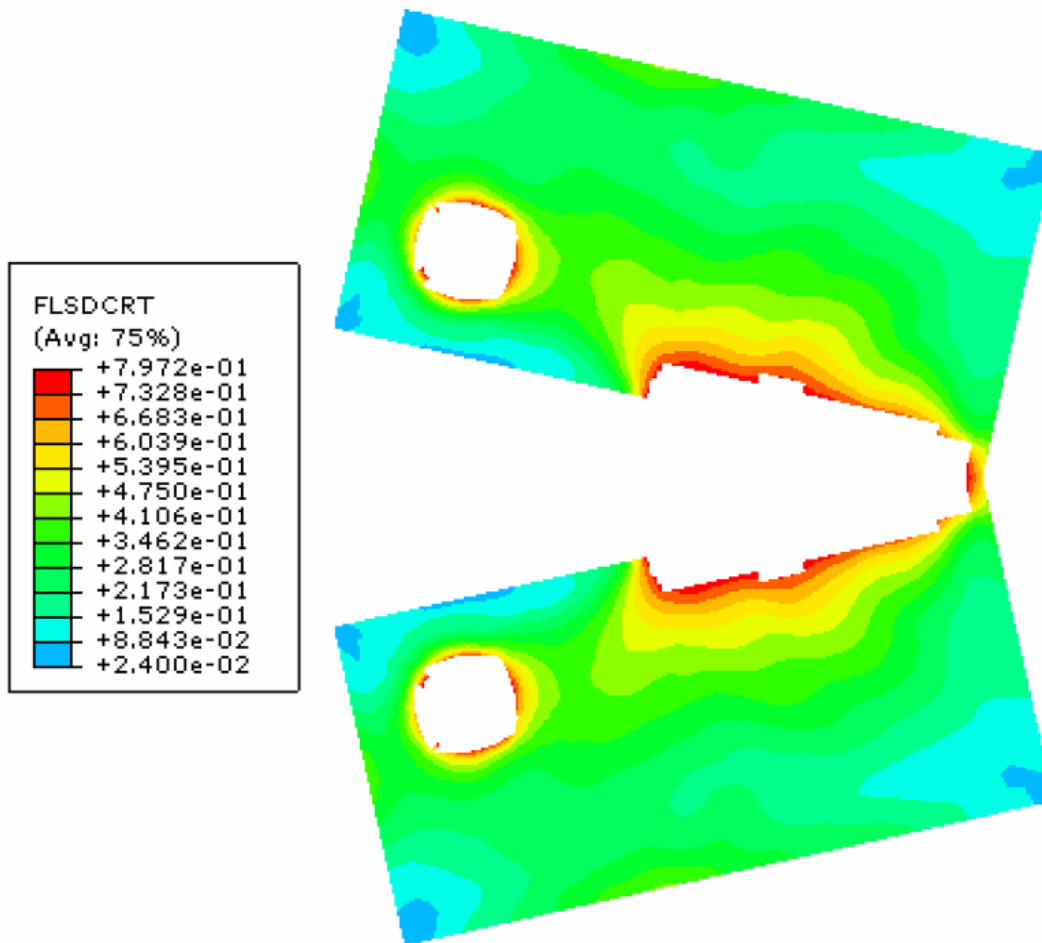
نتایج پیش‌بینی رشد ترک و شکست در آزمون کشش فشرده توسط معیار آسیب برشی



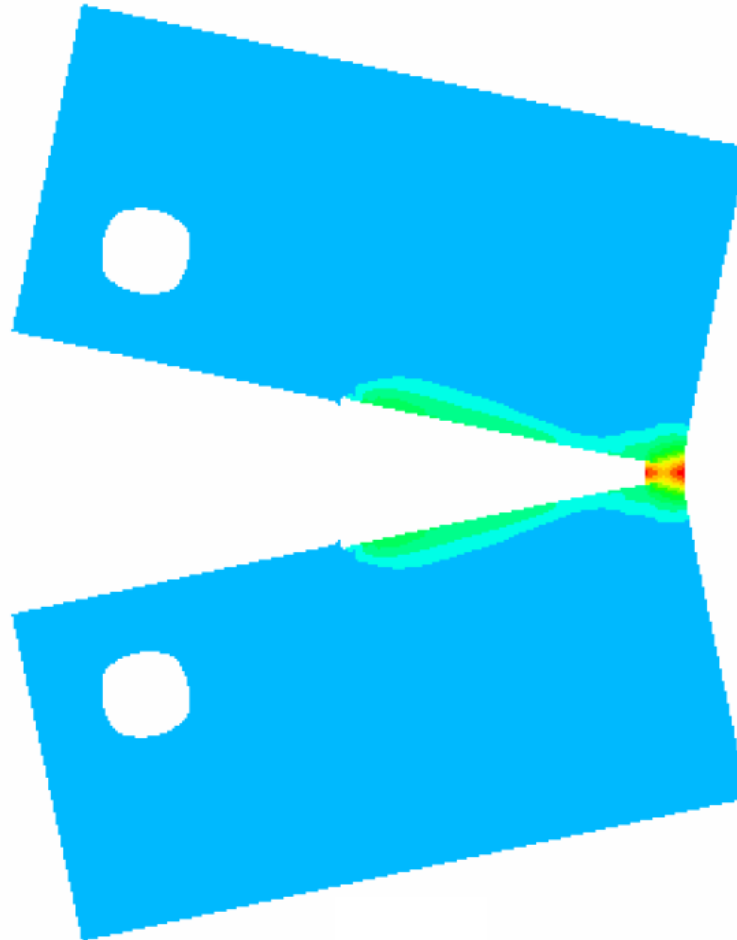
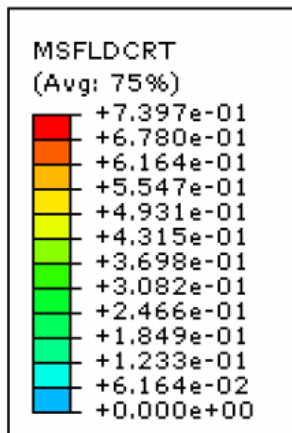
نتایج پیش‌بینی رشد ترک و شکست در آزمون کشش فشرده توسط معیار **FLD**



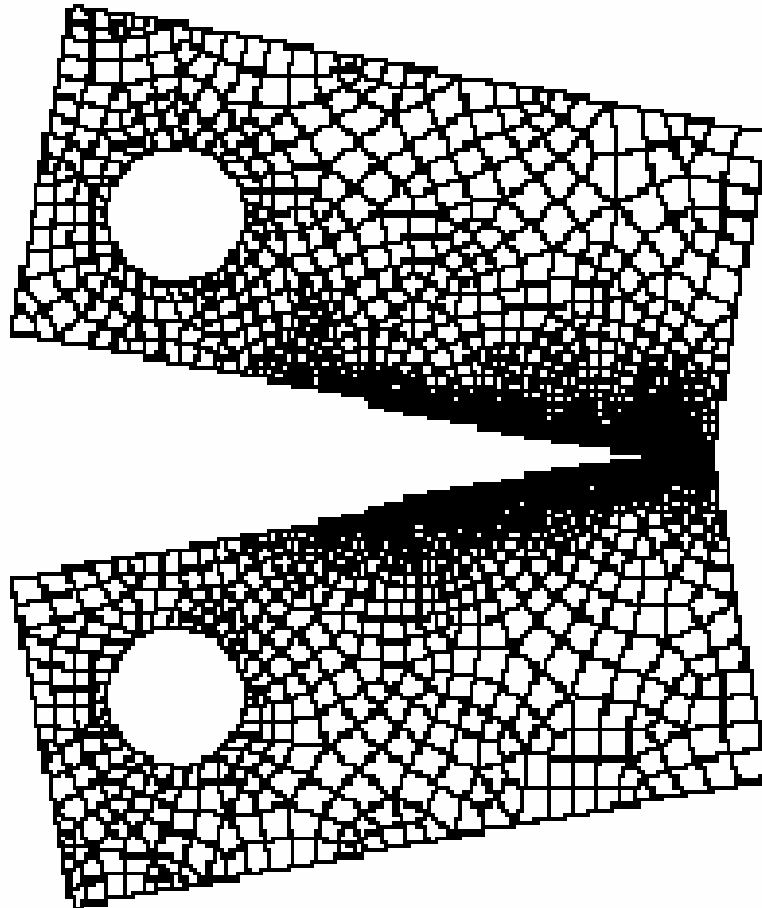
نتایج پیش‌بینی رشد ترک و شکست در آزمون کشش فشرده توسط معیار **FLSD**



نتایج پیش‌بینی رشد ترک و شکست در آزمون کشش فشرده توسط معیار **MSFLD**



نتایج پیش‌بینی رشد ترک و شکست در آزمون کشش فشرده [مرجع Mediavilla, 2006]



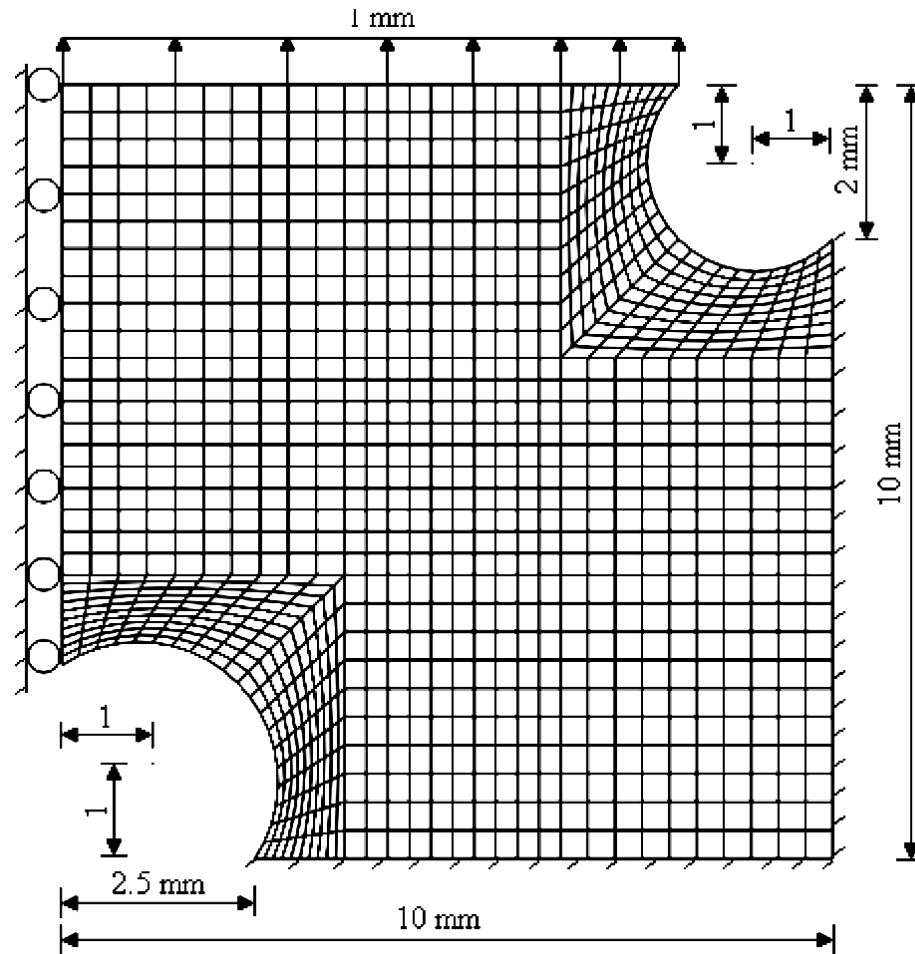
نتایج نشان می‌دهد ترک از نوک شیار شروع شده و با افزایش بارگذاری رشد کرده و در جهت افقی گسترش می‌یابد. نتایج پیش‌بینی معیار آسیب نرم بیشترین تطابق را با نتایج تجربی داشته است. همچنین نتایج معیارهای آسیب برشی، FLD و $MSFLD$ ، در ناحیه میانی رضایت‌بخش بوده ولی این معیارها در نواحی اطراف سوراخ و محل اعمال جابجایی نیز آسیب‌های را پیش‌بینی نموده‌اند که با نتایج تجربی مغایرت دارد. (علت: عدم اعمال اثر بسته‌شدن ترک‌ها در این معیارها) نتایج معیارهای $M-K$ و $FLSD$ اختلاف قابل توجهی با نتایج مورد انتظار دارد. بیشترین مقدار آسیب پیش‌بینی شده توسط معیار جانسون-کوک مقدار عددی 0.398 است به معنی آن که در آخرین مرحله، شکستی توسط این معیار پیش‌بینی نمی‌شود. این معیار بیشتر برای شبیه‌سازی‌های دینامیکی توصیه شده است.



آزمون کشش نمونه دو سوراخه

یک مسئله محک دیگر برای ارزیابی پیش‌بینی رشد ترک در معیارهای آسیب، آزمون کشش نمونه دو سوراخه است. یک صفحه دارای ضخامت یک میلیمتر و در دو گوشه بالا و پایین دارای سوراخ‌های ناقص پادمتقارن است. جابجایی عمودی برابر با یک میلیمتر به بالای صفحه اعمال می‌شود. با توجه به ضخامت کم صفحه در مقایسه با سایر ابعاد آن و بارگذاری داخل صفحه، از المان تنش صفحه‌ای استفاده می‌شود.

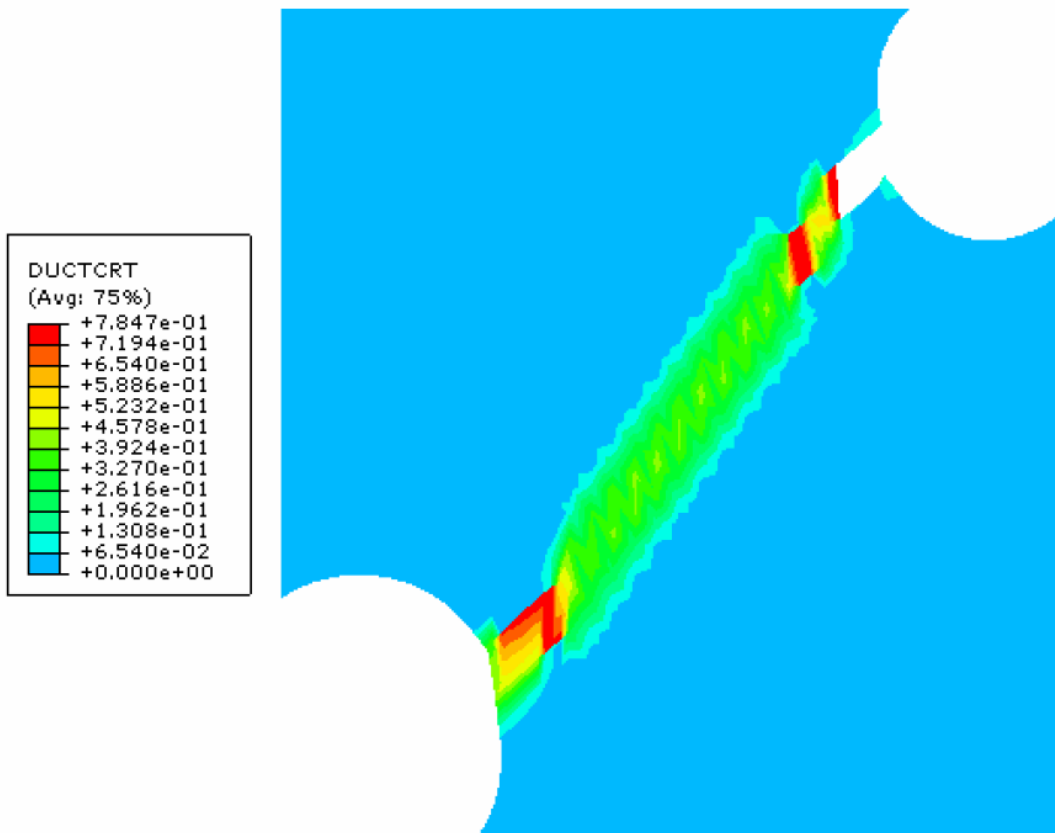
آزمون کشش نمونه دو سوراخه



مدل اجزای محدود آزمون کشش نمونه دو سوراخه

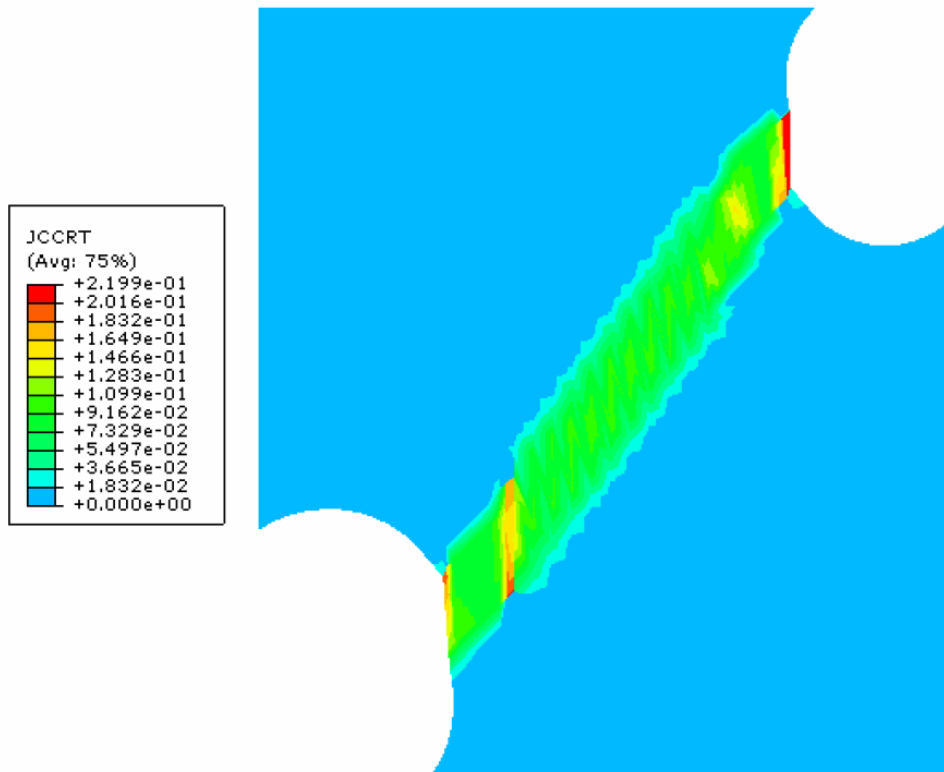
آزمون کشش نمونه دو سوراخه

نتایج پیش‌بینی رشد ترک و شکست در آزمون کشش فشرده توسط معیار آسیب نرم



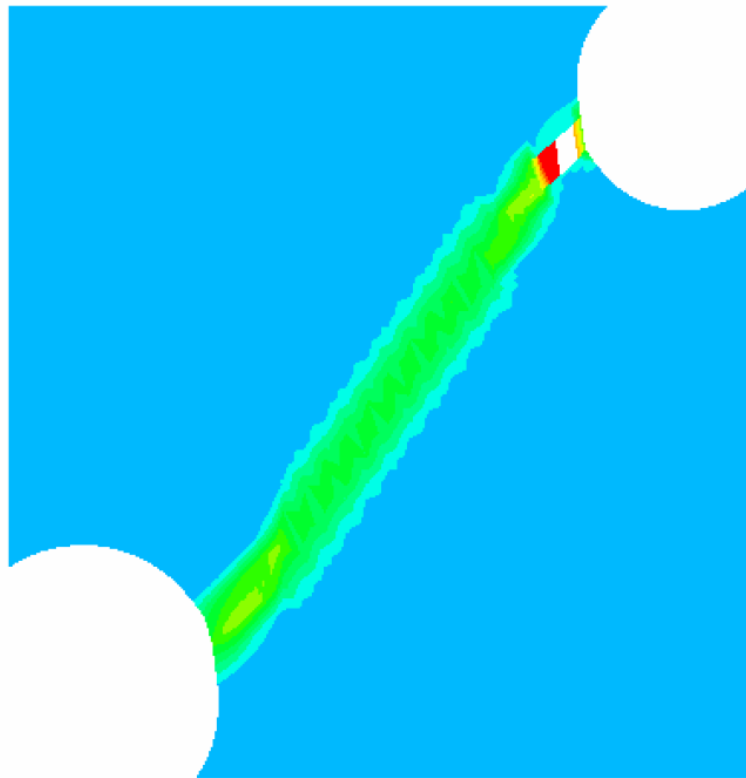
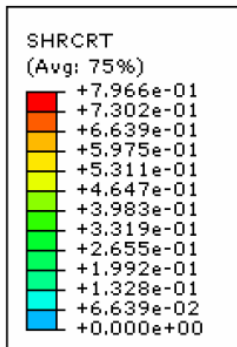
آزمون کشش نمونه دو سوراخه

نتایج پیش‌بینی رشد ترک و شکست در آزمون کشش فشرده توسط معیار جانسون-کوک



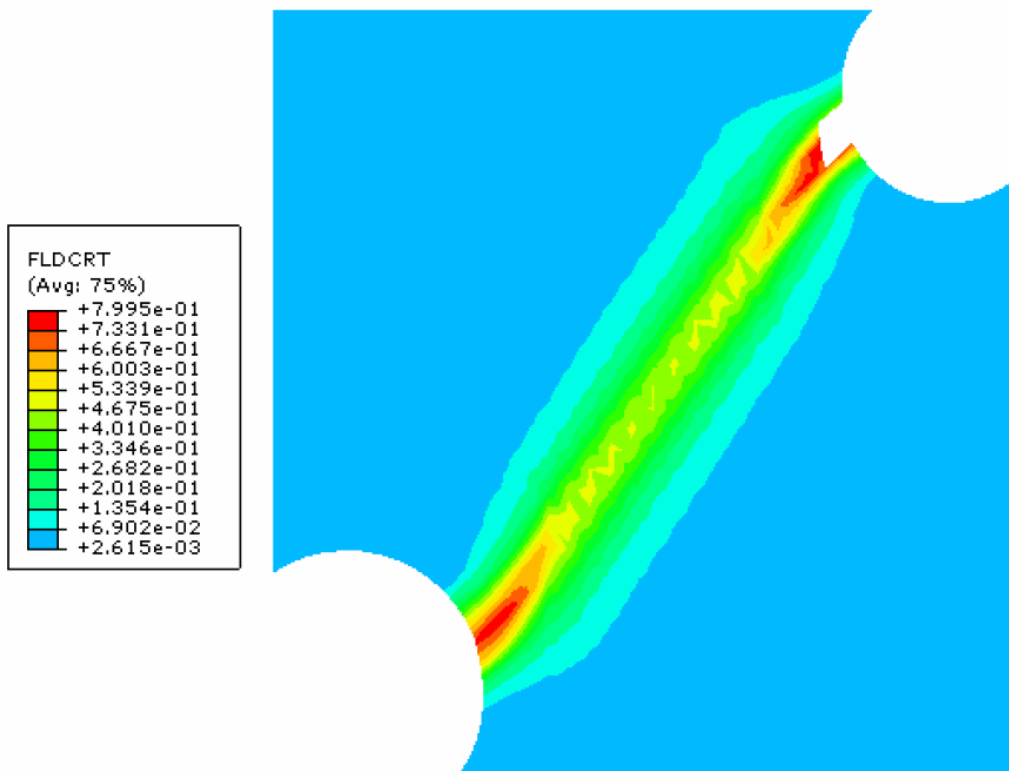
آزمون کشش نمونه دو سوراخه

نتایج پیش‌بینی رشد ترک و شکست در آزمون کشش فشرده توسط معیار آسیب برشی



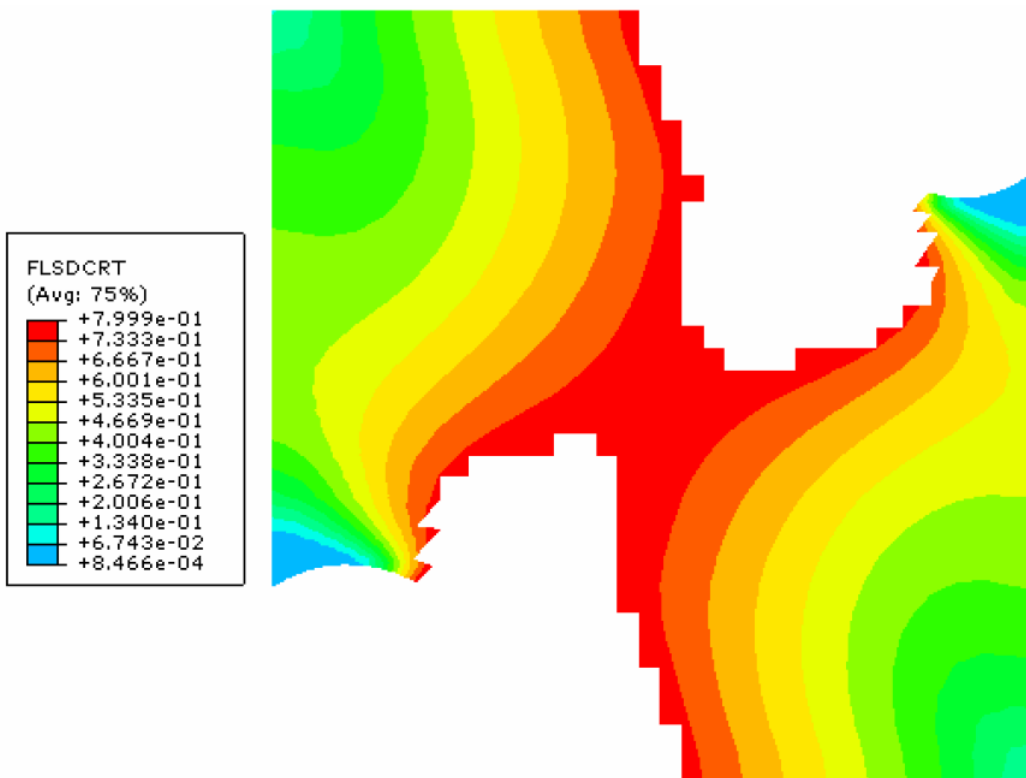
آزمون کشش نمونه دو سوراخه

نتایج پیش‌بینی رشد ترک و شکست در آزمون کشش فشرده توسط معیار **FLD**



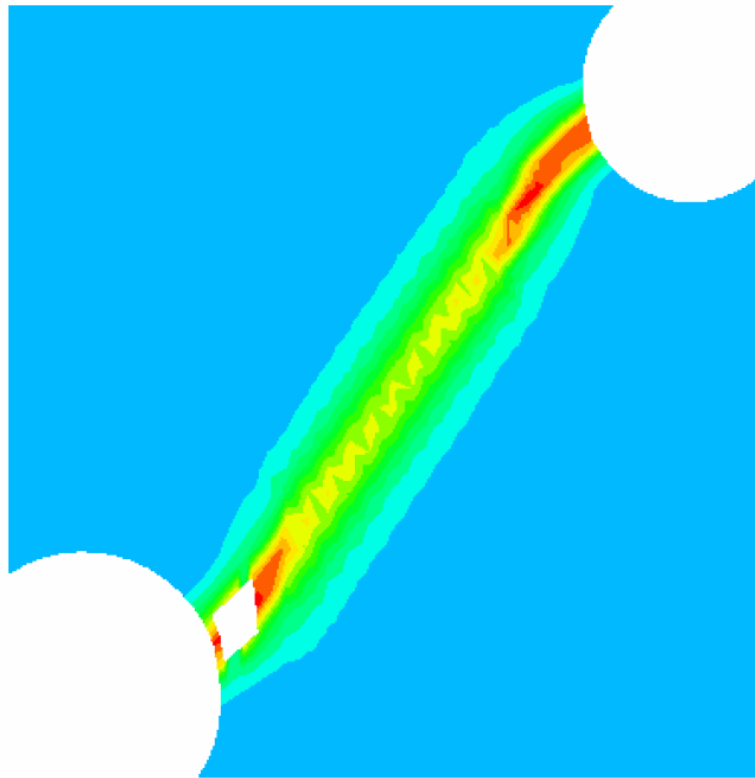
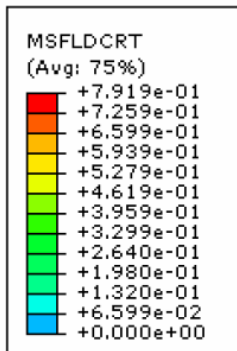
آزمون کشش نمونه دو سوراخه

نتایج پیش‌بینی رشد ترک و شکست در آزمون کشش فشرده توسط معیار **FLSD**



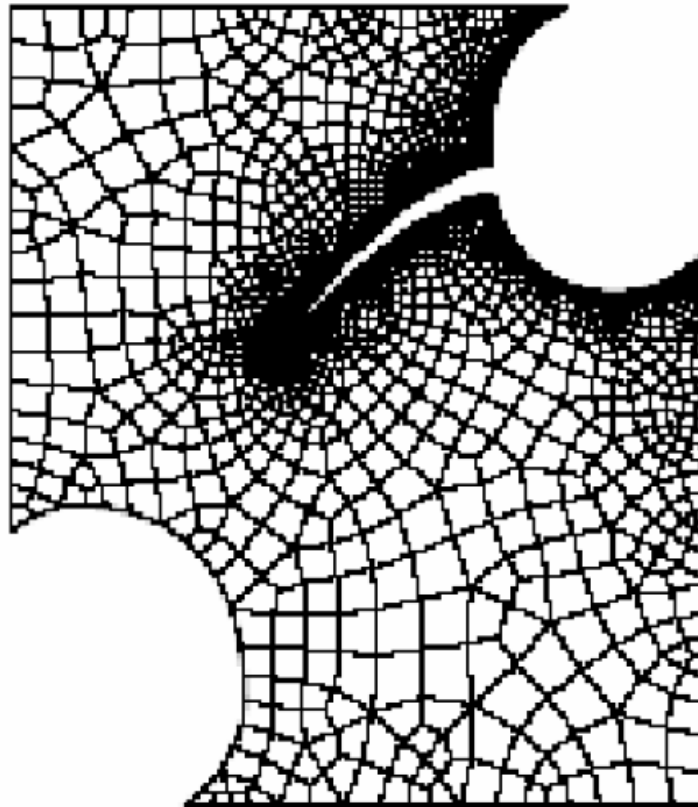
آزمون کشش نمونه دو سوراخه

نتایج پیش‌بینی رشد ترک و شکست در آزمون کشش فشرده توسط معیار **MSFLD**



آزمون کشش نمونه دو سوراخه

نتایج پیش‌بینی رشد ترک و شکست در آزمون کشش فشرده [مرجع Mediavilla, 2006]





آزمون کشش نمونه دو سوراخه

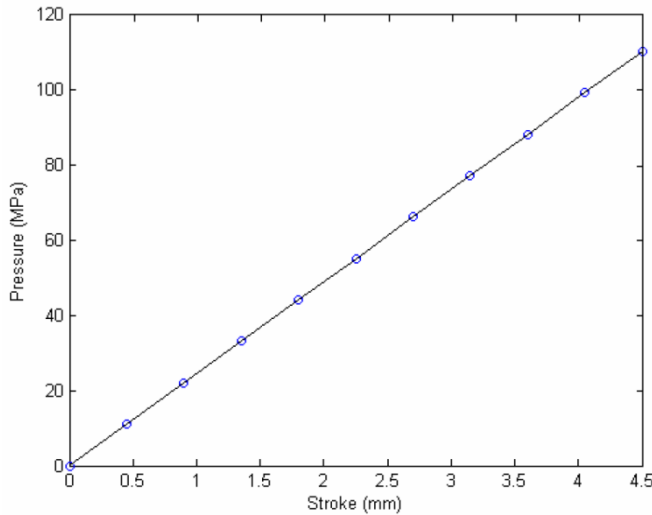
نتایج نشان می‌دهد ترک از ناحیه سمت چپ سوراخ بالایی شروع شده و با افزایش بارگذاری رشد نموده و در جهت مورب و رو به پایین انتشار می‌یابد. نتایج پیش‌بینی معیارهای آسیب نرم و FLD بیشترین همخوانی را با نتایج مرجع دارد. همچنین نتایج معیار آسیب برشی اختلاف اندکی تفاوت را نشان می‌دهد. همانند آزمون قبل، نتایج معیارهای FLSD و MSFLD اختلاف زیادی با نتایج مورد انتظار دارد.

فرآیند هیدروفرمینگ لوله

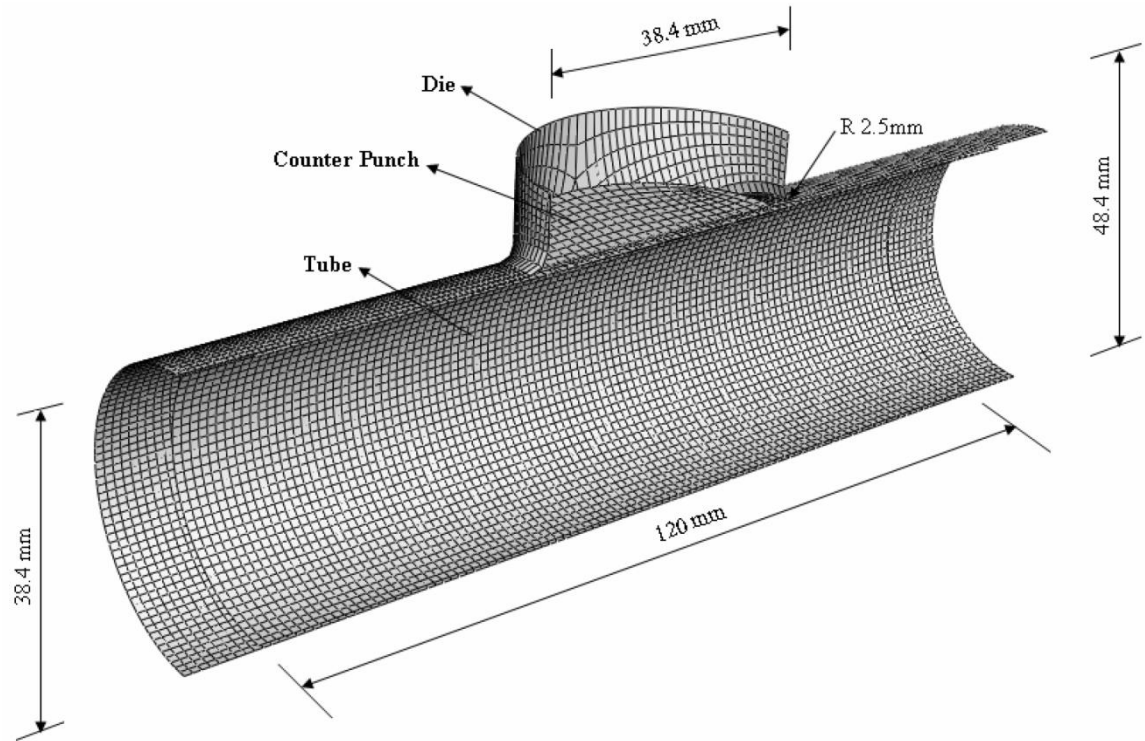
در فرآیند هیدروفرمینگ لوله؛ با اعمال همزمان بار محوری از یک طرف یا دو طرف به لوله و افزایش فشار داخل لوله توسط یک سیال، لوله شکل قالب را به خود می‌گیرد. پارامترهای زیادی در این فرآیند نقش دارند که می‌توان به خواص مکانیکی ماده، ضخامت لوله، اصطکاک لوله و قالب، فشار سیال داخلی، تغییرات فشار سیال بر حسب تغذیه محوری (مسیر بارگذاری) و هندسه قالب و ابزار اشاره کرد. با انتخاب نامناسب هر یک از پارامترهای فوق ممکن است مودهای شکست مختلفی نظیر گسیختگی، چروکیدگی و یا کمانش بر روی قطعه ظاهر گردد.

فرآیند هیدروفرمینگ لوله

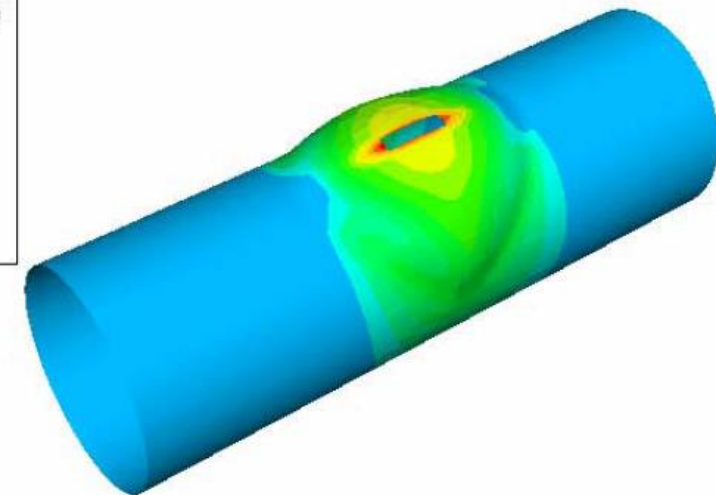
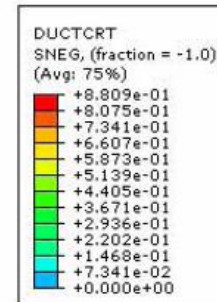
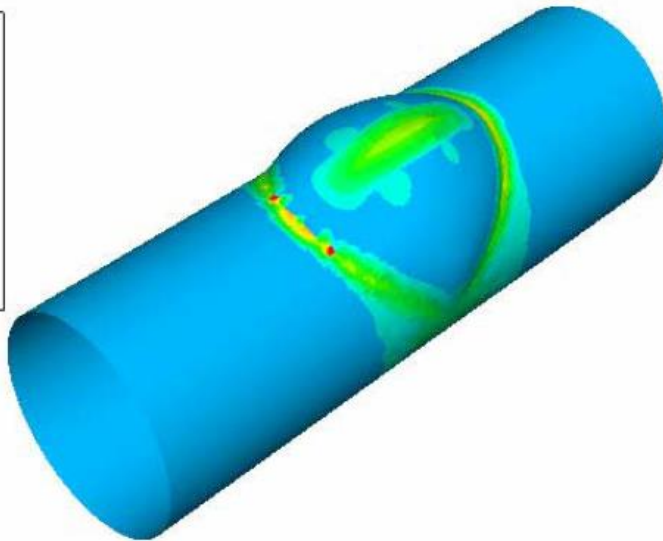
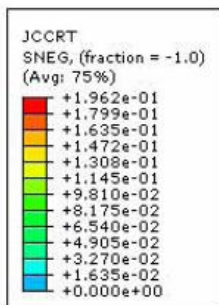
وجود صفحه کنترلی در کنترل شکل دهی لوله در قسمت خروجی و تولید یک محصول سالم ضروری است. از طرف دیگر مسیر بار گذاری نیز پارامتری مؤثر در این فرآیند است. به علت تقارن، نصف هندسه شبیه سازی شده و شرایط تقارن بر صفحه تقارن لوله اعمال می شود. برای شبکه اجزای محدود لوله و قالب از المان های پوسته ای استفاده می شود. ضخامت لوله ۱ میلیمتر و ضریب اصطکاک برابر 0.05. اعمال می گردد. برای پیش بینی شکست در این فرآیند، شرایط به گونه ای انتخاب می شود که شکست اتفاق افتد. بنابراین بدون استفاده از صفحه کنترلی و با فرض مسیر بار گذاری خطی بار گذاری، شبیه سازی انجام می شود. همچنین فرآیند به صورت یک طرفه بوده، در نتیجه سمت چپ لوله کاملاً ثابت شده و تغذیه محوری تنها از سمت راست لوله انجام می گیرد.



مسیر بار گذاری اولیه



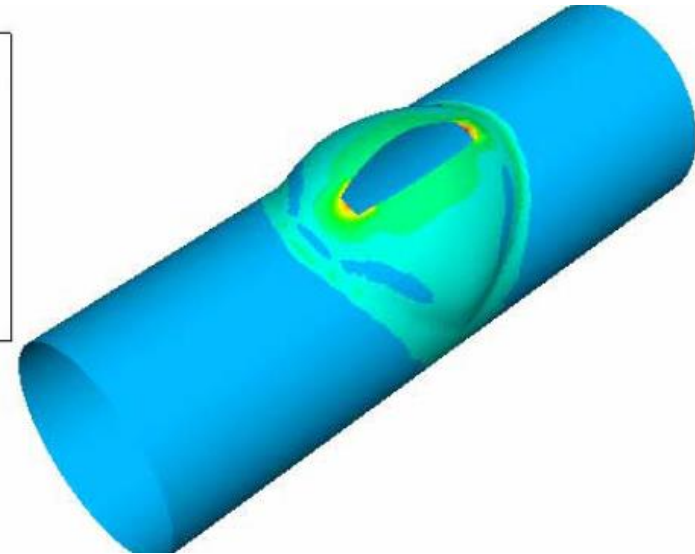
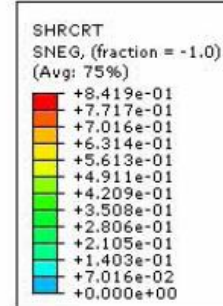
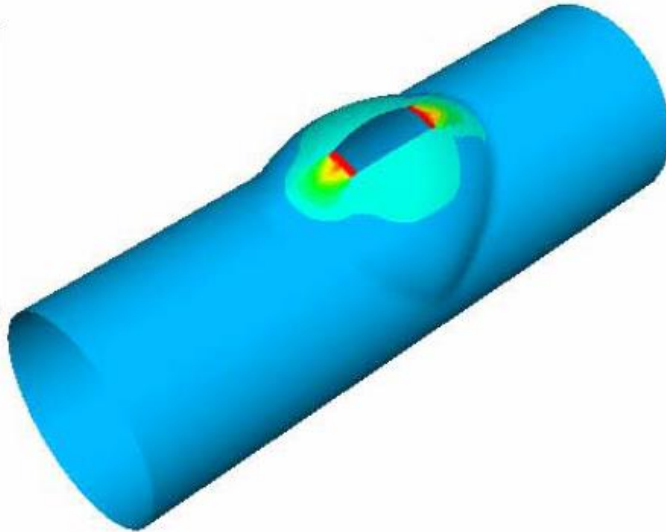
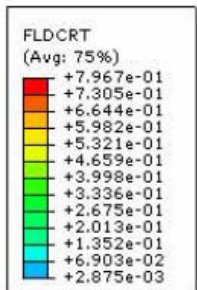
مدل اجزای محدود فرآیند هیدروفرمینگ لوله T شکل



پیش بینی معیار جانسون-کوک

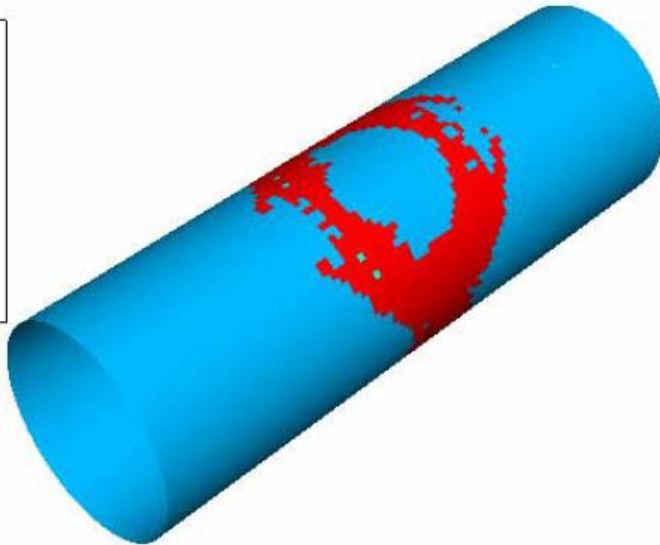
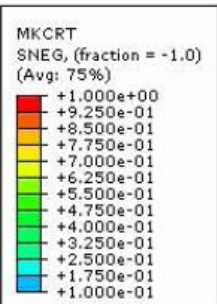
پیش بینی معیار آسیب نرم

فرآیند هیدروفرمینگ لوله

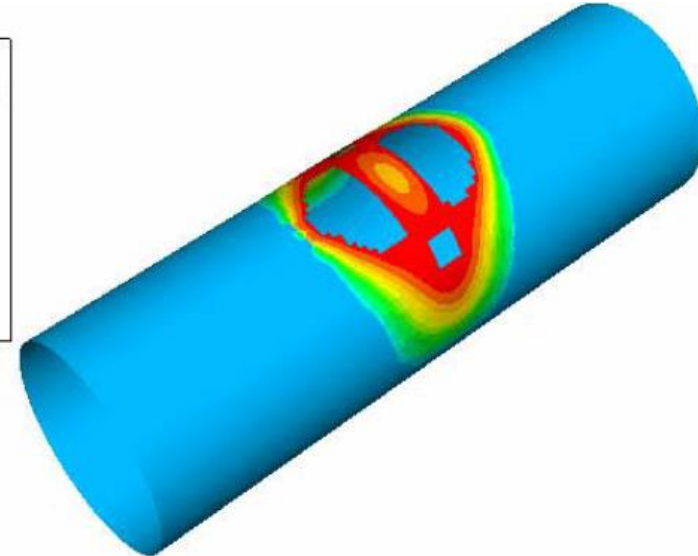
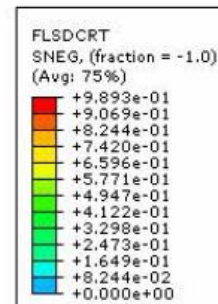


پیش‌بینی معیار FLD

پیش‌بینی معیار آسیب برشی

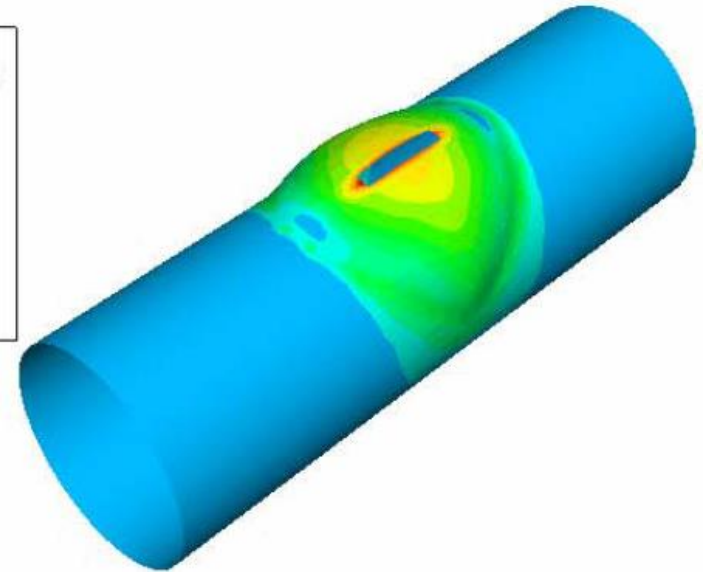
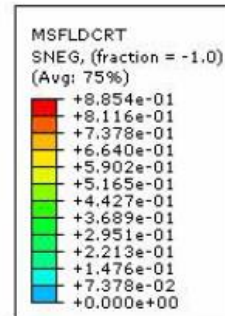


پیش بینی معیار M-K



پیش بینی معیار FLSD

فرآیند هیدروفرمینگ لوله



[Loh- Mousavi, 2007]

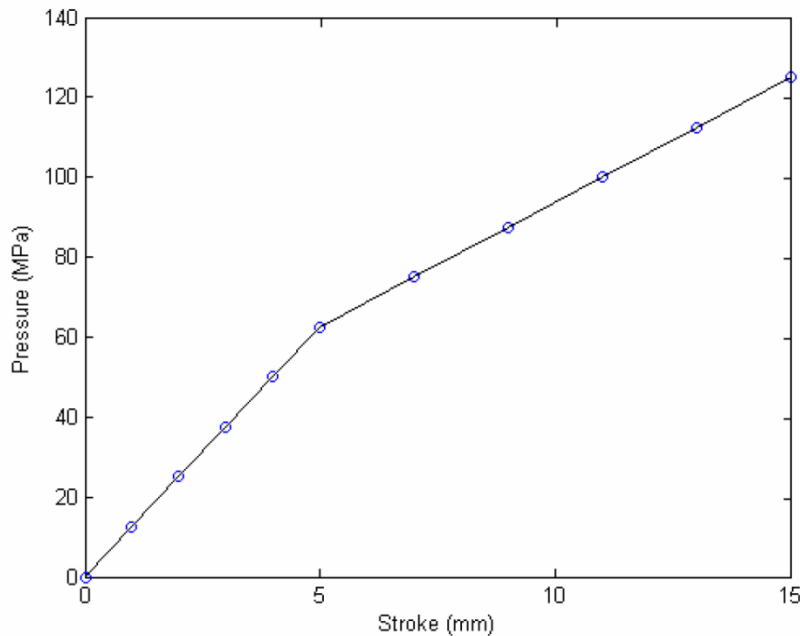
پیش بینی معیار MSFLD

فرآیند هیدروفورمینگ لوله

مطابق نتایج، بدون استفاده از صفحه کنترلی، حتی با تغذیه محوری نسبتاً کم 4.5 میلیمتری نیز ترک به وجود می‌آید. ترک از مرکز لوله در ناحیه خروجی شروع شده و با افزایش بارگذاری رشد نموده و در جهت محور لوله انتشار می‌یابد. نتایج پیش بینی معیارهای آسیب نرم و MSFLD تطابق خوبی با نتایج آزمون تجربی از خود نشان می‌دهند. همچنین معیارهای آسیب برشی و FLD اندکی تفاوت از خود نشان می‌دهند. نتایج معیارهای FLSD و M-K اختلاف زیادی با نتایج مورد انتظار داشته و رضایت‌بخش نیستند معیار جانسون-کوک شکستی را حتی در آخرین مرحله پیش بینی نکرده و مانند مسائل قبلی نتایج مناسبی ارائه نمی‌دهد.

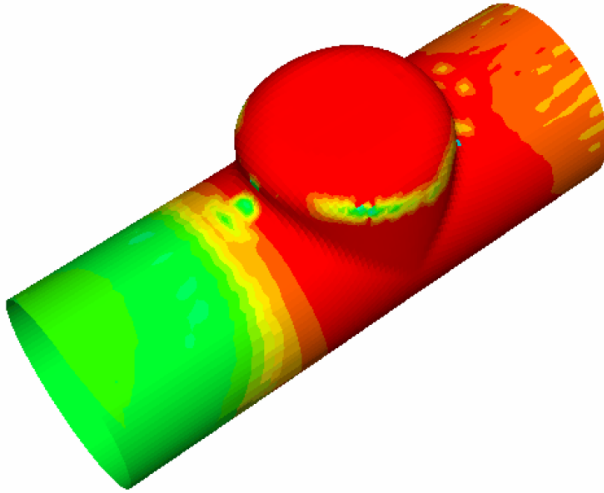
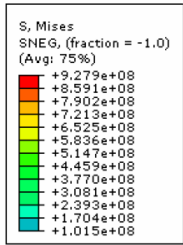
فرآیند هیدروفرمینگ لوله

برای داشتن محصولی بدون ترک و سالم، وجود صفحه کنترلی لازم است. همچنین مسیر بارگذاری نیز نقش عمده‌ای در کیفیت محصول خروجی دارد. بنابراین صفحه کنترلی به فرآیند اضافه شده و مسیر بارگذاری نیز به صورت دوخطی و تعدیل شده در نظر گرفته می‌شود.

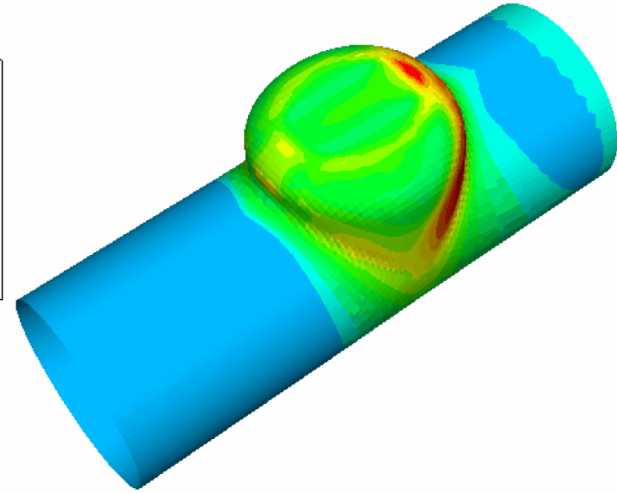
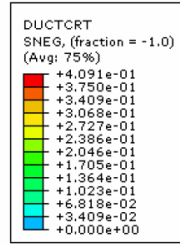


مسیر بارگذاری اولیه

فرآیند هیدروفورمینگ لوله



(ب)



(الف)



(ج)

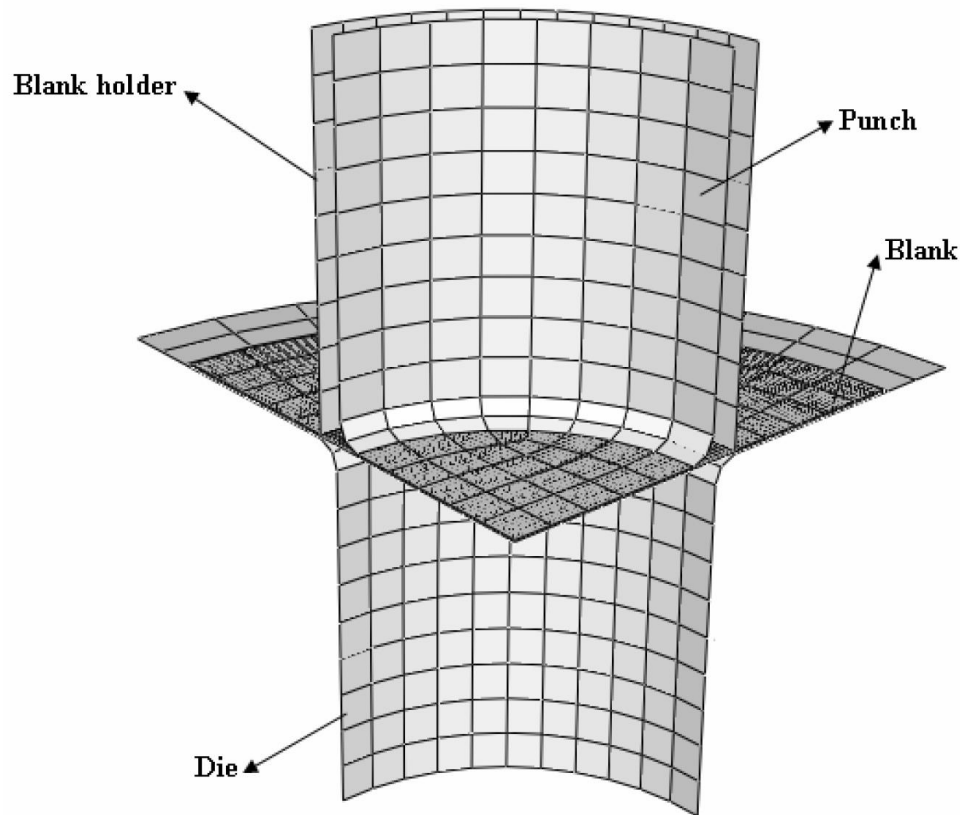
نتایج هیدروفورمینگ لوله T شکل، الف) توزیع آسیب، ب) توزیع تنش، ج) آزمون تجربی [Loh- Mousavi, 2007]



فرآیند هیدروفرمینگ لوله

با توجه به شرایط جدید، شبیه‌سازی‌ها انجام شد و نتایج آسیب و تنش با توجه به پیش‌بینی‌های معیار آسیب نرم به دست می‌آید. مطابق پیش‌بینی‌های معیار آسیب نرم، در انتهای فرآیند مقدار آسیب حداکثر به 0.409 می‌رسد که بیانگر تولید محصول بدون ترک یا شکست است. نتایج به دست آمده با نتایج آزمایش‌های تجربی مطابقت داشته و رضایت بخش است.

فرآیند کشش عمیق



در فرآیندهای شکل‌دهی ورق، امکان بروز آسیب و شکست در قطعه کار وجود دارد. بنابراین تعیین حد شکل‌دهی و پیش‌بینی مودهای شکست نقش اساسی در کاهش آزمون‌های پرهزینه و تولید محصولات بدون عیب بازی می‌کند. به علت تقارن، یک چهارم هندسه شبیه‌سازی می‌شود.



فرآیند کشش عمیق

در فرآیندهای شکل‌دهی ورق، امکان بروز آسیب و شکست در قطعه کار وجود دارد. بنابراین تعیین حد شکل‌دهی و پیش‌بینی مودهای شکست نقش اساسی در کاهش آزمون‌های پرهزینه و تولید محصولات بدون عیب بازی می‌کند. به علت تقارن، یک چهارم هندسه شبیه‌سازی می‌شود.



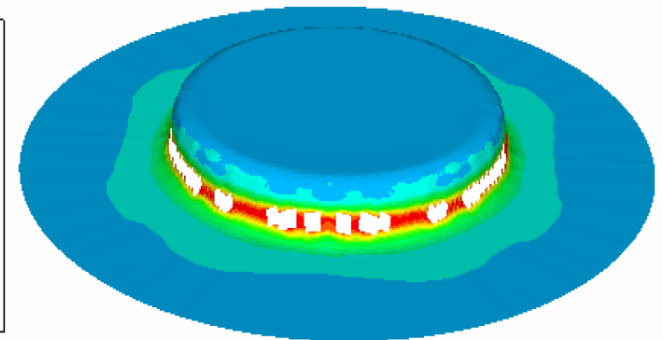
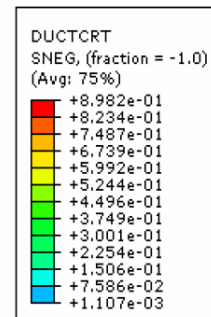
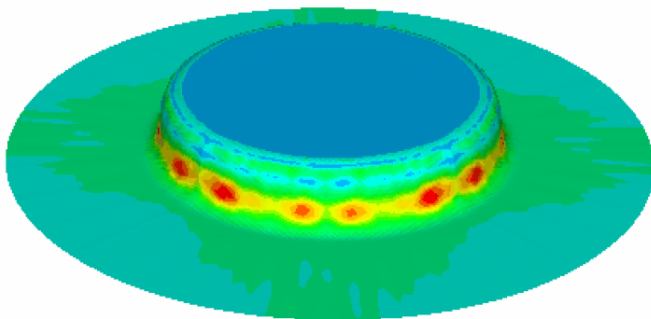
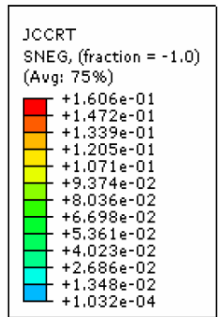
فرآیند کشش عمیق

خواص مکانیکی و پارامترهای آسیب آلومینیوم

[Hooputra, 2004]

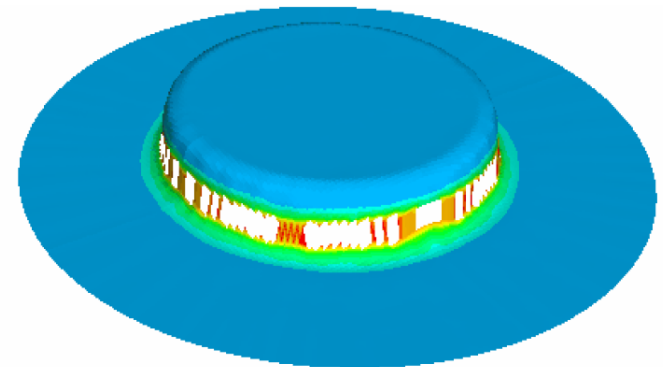
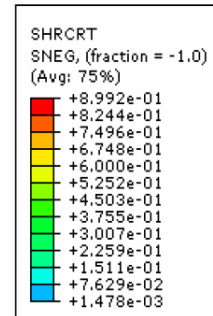
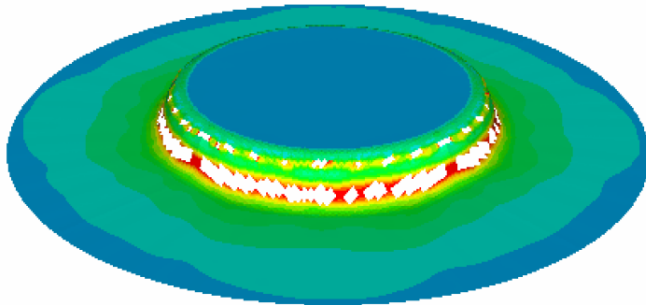
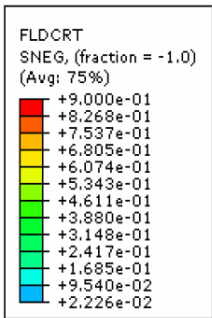
ضخامت ورق 0.82 میلیمتر و ضریب اصطکاک برابر 0.05 است. برای المانهای ورق و اجزای صلب نظیر سنبه، قالب و ورق گیر از المانهای پوسته‌ای استفاده می‌شود.

$\rho(Kg / m^3)$	2700
$E(GPa)$	70
ν	0.33
σ_{y0}	311
σ_y	$511.5(0.012 + \varepsilon_{eq})^{0.1148}$
ε_T^+	0.26
ε_T^-	193
k_0	1.759
ε_s^+	0.26
ε_s^-	4.16
f	4.04



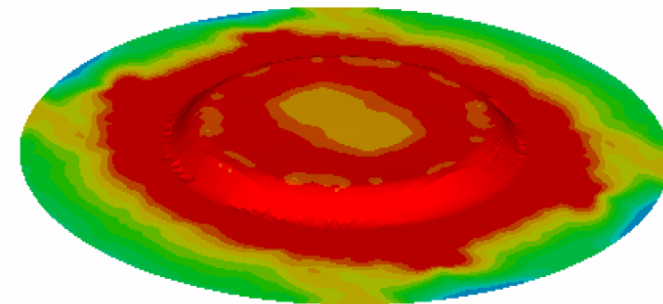
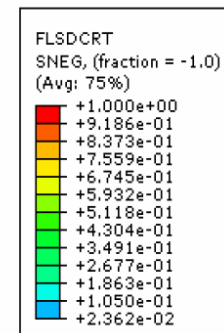
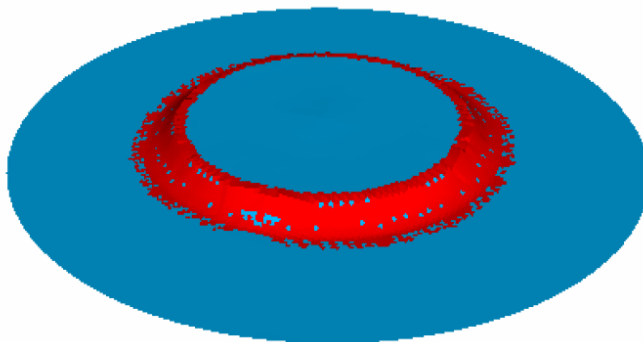
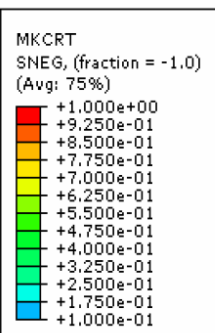
پیش بینی معیار جانسون-کوک

پیش بینی معیار آسیب نرم



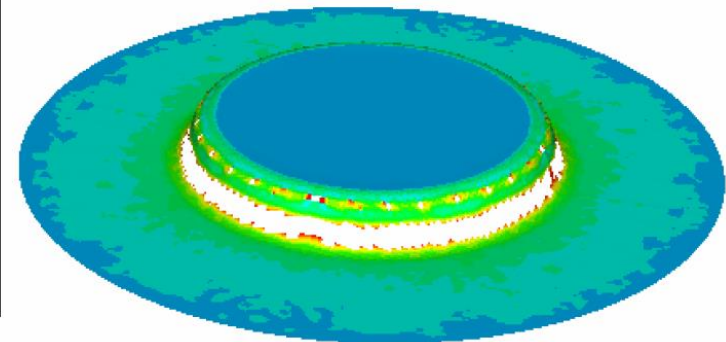
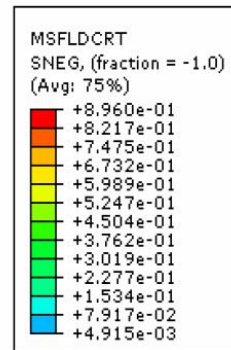
پیش بینی معیار FLD

پیش بینی معیار آسیب برشی



پیش‌بینی معیار M-K

پیش‌بینی معیار FLSD



[Lang, 2004]

پیش بینی معیار MSFLD

آزمون کشش فشرده

مقایسه نتایج پیش‌بینی مدل‌های آسیب نرم ABAQUS در برخی از فرآیندهای شکل‌دهی ورق

در حالت شبه استاتیکی

کشش عمیق	هیدروفرمینگ لوله	کشش نمونه دو سوراخه	کشش فشرده	کشش صفحه سوراخدار	معیار
***	***	***	***	***	آسیب نرم
-	-	-	-	-	جانسون-کوک
**	**	**	**	***	آسیب برشی
*	**	***	**	***	FLD
-	-	-	*	-	FLSD
-	-	-	*	-	M-K
**	***	-	**	***	MSFLD

مدل آسیب نرم لمتر در یک زیر برنامه آسیب

• مدل آسیب لمتر:

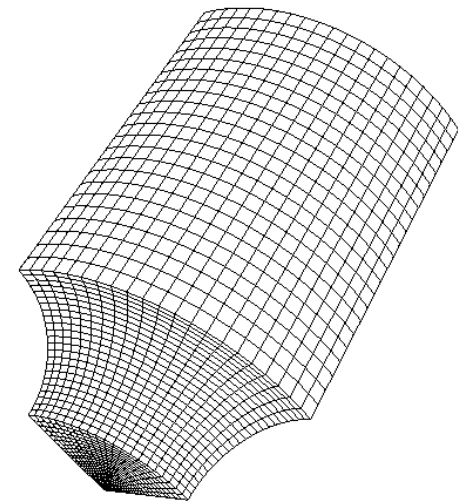
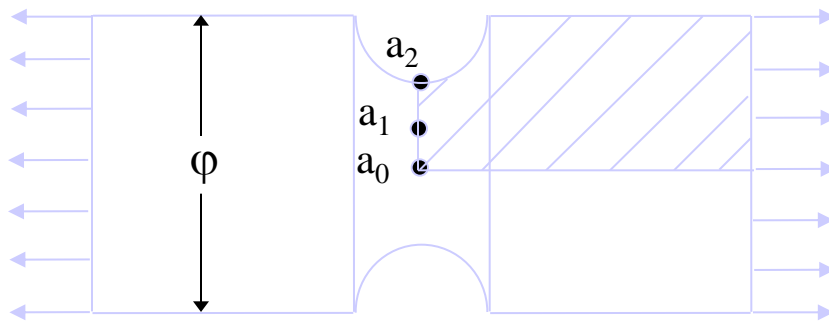
$$\dot{D} = \frac{1}{1-D} \left(\frac{Y}{r} \right)^s \dot{\varepsilon}_{eq}^p$$

$$Y = \frac{\sigma_{eq}^2}{2E(1-D)^2} \left[\frac{2}{3}(1+\nu) + 3(1-2\nu) \left(\frac{\sigma_H}{\sigma_{eq}} \right)^2 \right]$$

این یک مدل همسان و دارای رشدی همسان است. پارامترهای موثر در این مدل، کرنش پلاستیک، تنش سه محوره، $\frac{\sigma_H}{\sigma_{eq}}$ ، هستند. S و r پارامترهای آسیب ماده هستند.

مدل آسیب نرم لمتر در یک زیر برنامه آسیب

- آزمایش کشش ساده برای یک میله مدور با شیار جانبی



میله با شیار جانبی تحت کشش

مدل اجزای محدود یک هشتم میله

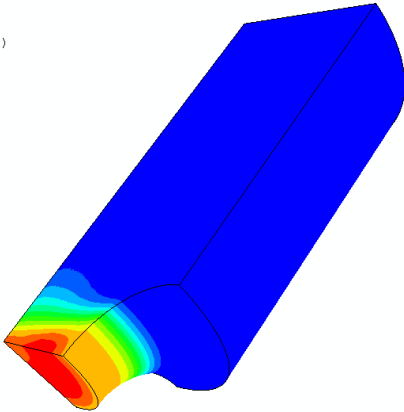
مدل آسیب نرم لمتر در یک زیر برنامه آسیب

(تغییر مکان انتهای میله = LLD)

● دیاگرام های رشد آسیب

SDV13
(Ave. Crit.: 75%)

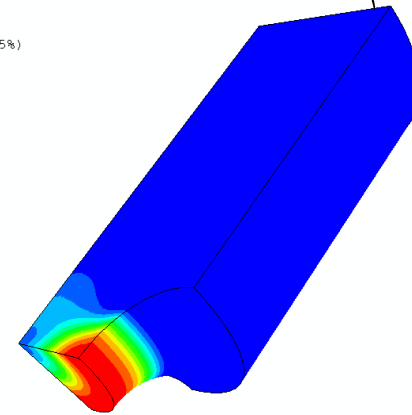
+	1.02e-02
+	9.30e-03
+	8.45e-03
+	7.60e-03
+	6.75e-03
+	5.90e-03
+	5.05e-03
+	4.20e-03
+	3.36e-03
+	2.51e-03
+	1.66e-03
+	8.07e-04
-	4.30e-05



ب - LLD = 0.75 mm

SDV13
(Ave. Crit.: 75%)

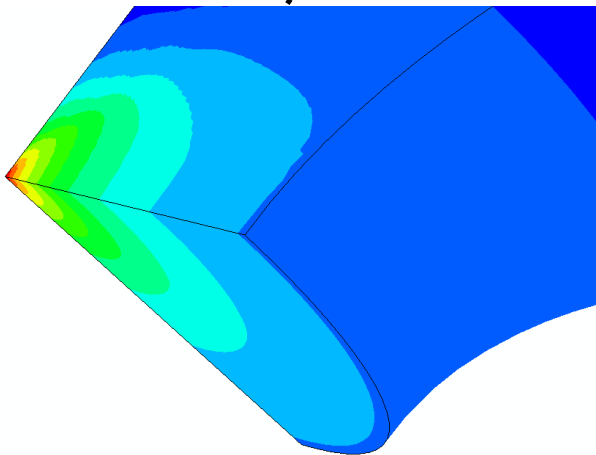
+	3.29e-03
+	3.02e-03
+	2.74e-03
+	2.46e-03
+	2.19e-03
+	1.91e-03
+	1.63e-03
+	1.36e-03
+	1.08e-03
+	8.03e-04
+	5.27e-04
+	2.50e-04
-	2.64e-05



الف - LLD = 0.5 mm

SDV13
(Ave. Crit.: 75%)

+	7.30e-01
+	6.69e-01
+	6.08e-01
+	5.47e-01
+	4.86e-01
+	4.26e-01
+	3.65e-01
+	3.04e-01
+	2.43e-01
+	1.82e-01
+	1.22e-01
+	6.07e-02
-	6.67e-05



ج - LLD = 526 mm

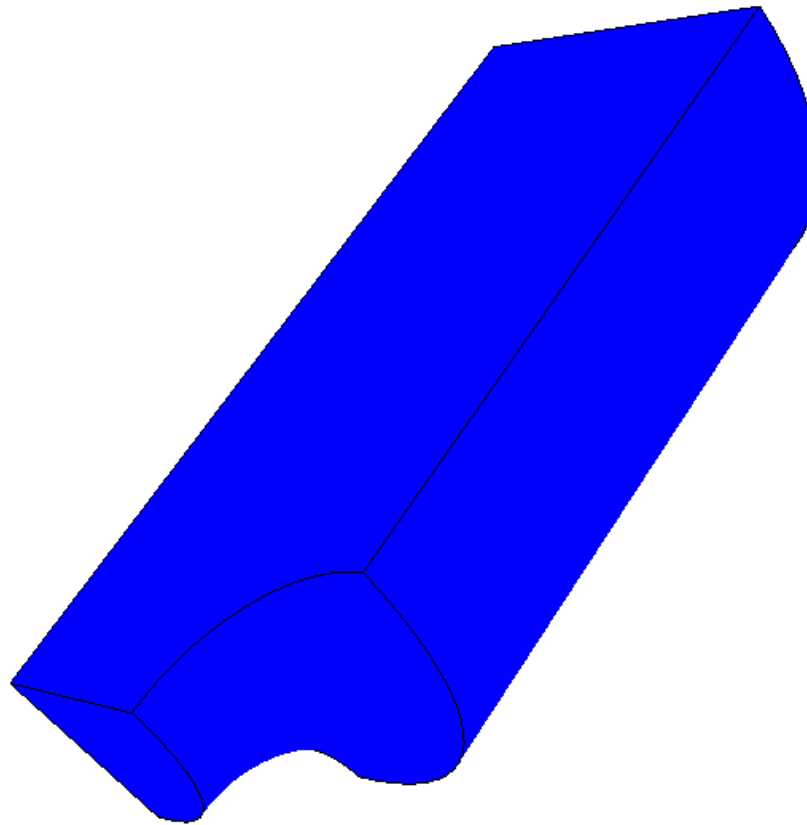
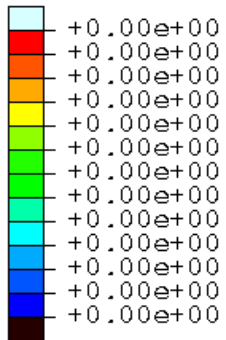


مدل آسیب نرم لمتر در یک زیر برنامه آسیب

● دیاگرام رشد آسیب

Step: Step-1 Frame: 0

SDV13
(Ave. Crit.: 75%)

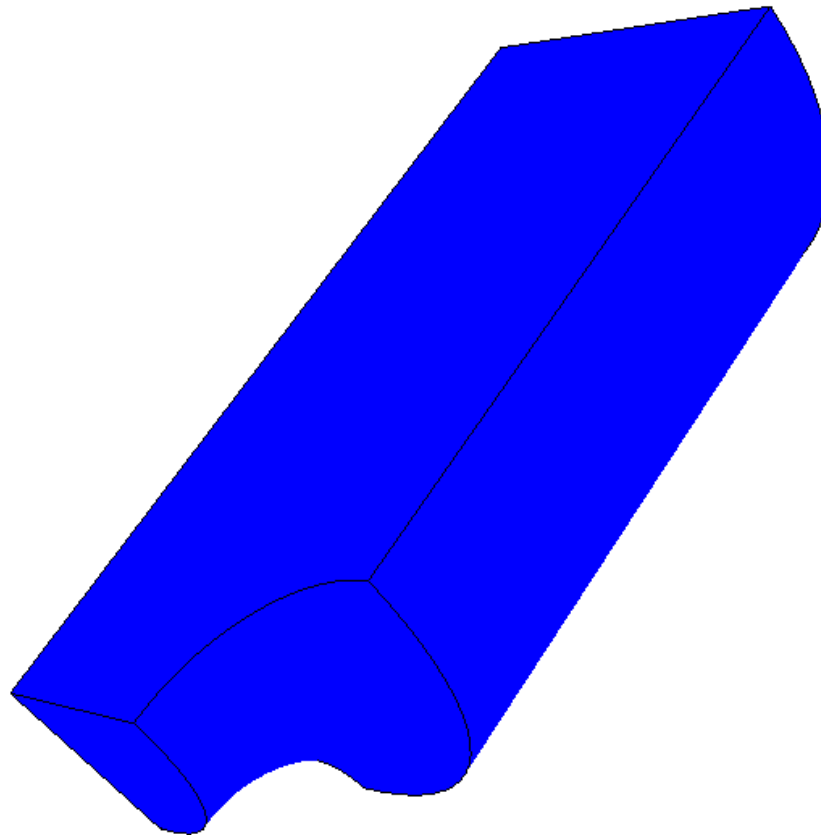
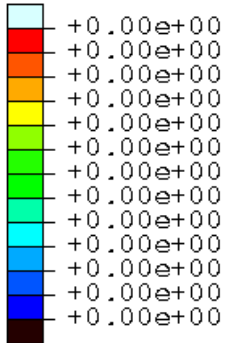




مدل آسیب نرم کمتر در یک زیر برنامه آسیب

● دیاگرام تنش فون میزز

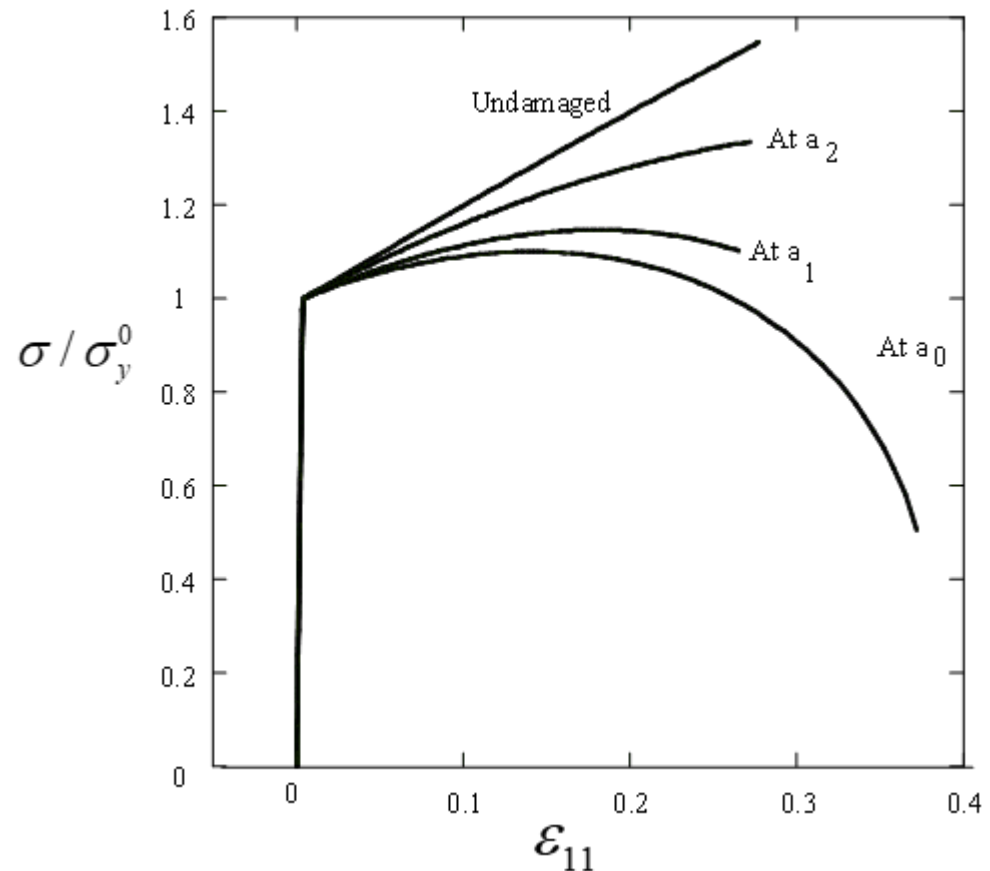
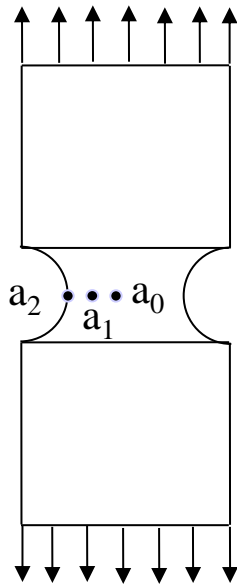
S, Mises
(Ave. Crit.: 75%)



Step: Step-1 Frame: 0

مدل آسیب نرم لمتر در یک زیر برنامه آسیب

● دیاگرام تنش- کرنش برای المان های a_0 ، a_1 و a_2



• اصلاح مدل آسیب نرم لمتر، تاثیر بسته شدن ترک در رشد آسیب

تجزیه تانسور تنش به مولفه‌های کششی و فشاری:

$$\sigma = \sigma^+ - \sigma^-$$

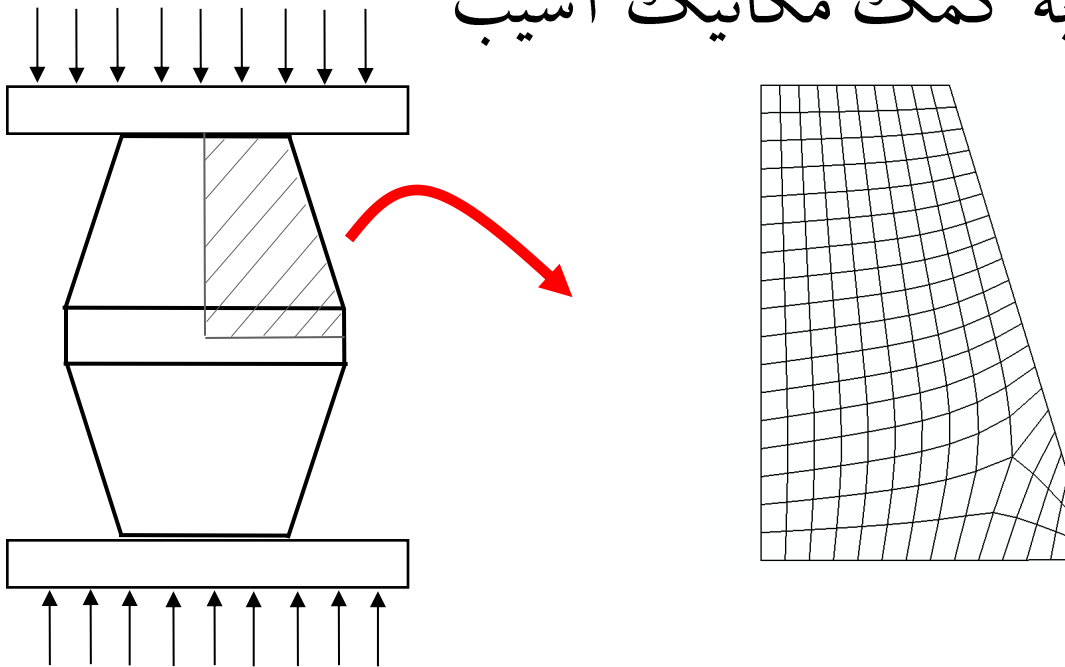
$$\sigma = \begin{bmatrix} \langle \sigma_1 \rangle & 0 & 0 \\ 0 & \langle \sigma_2 \rangle & 0 \\ 0 & 0 & \langle \sigma_3 \rangle \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \langle -\sigma_1 \rangle & 0 & 0 \\ 0 & \langle -\sigma_2 \rangle & 0 \\ 0 & 0 & \langle -\sigma_3 \rangle \end{bmatrix}$$

$$Y = \frac{1}{2E(1-D)^2} \left[(1+\nu)\sigma^+ : \sigma^+ - \nu \langle tr \sigma \rangle^2 \right] + \frac{h}{2E(1-hD)^2} \left[(1+\nu)\sigma^- : \sigma^- - \nu \langle -tr \sigma \rangle^2 \right]$$

$$\dot{D} = \left(\frac{Y}{r} \right)^s \dot{\varepsilon}_p^{eq}$$

آسیب نرم در بارگذاری‌های کششی - فشاری

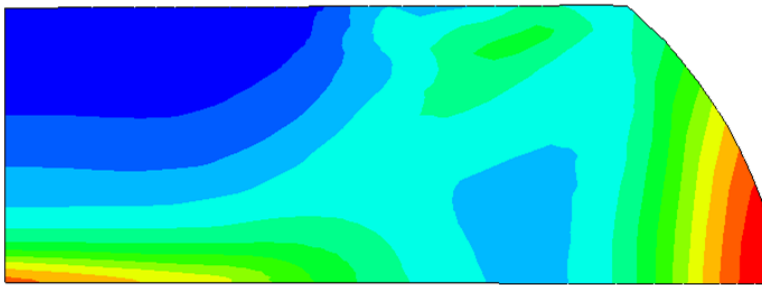
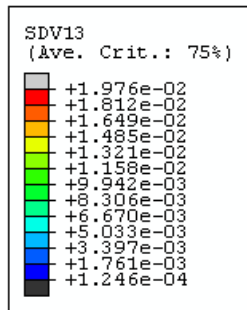
- تحلیل فرآیند کله‌زنی به کمک مکانیک آسیب



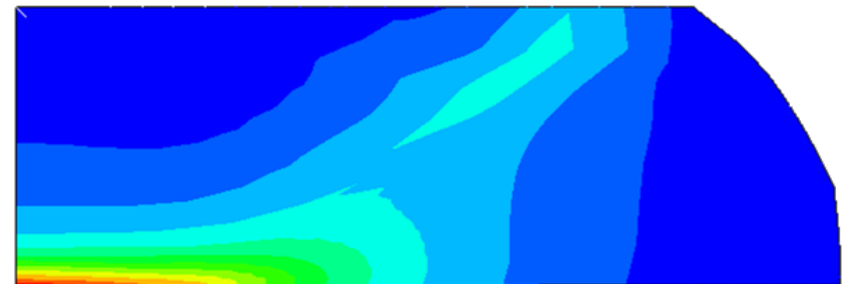
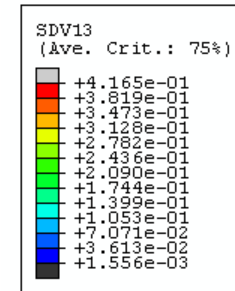
- مشاهدات تجربی، بروز شکست در این نمونه‌ی مخروطی را در سطوح خارجی نزدیک به طوقه‌ی نمونه نشان می‌دهد.

آسیب نرم در بارگذاری‌های کششی - فشاری

- تحلیل فرآیند کله‌زنی به کمک مکانیک آسیب

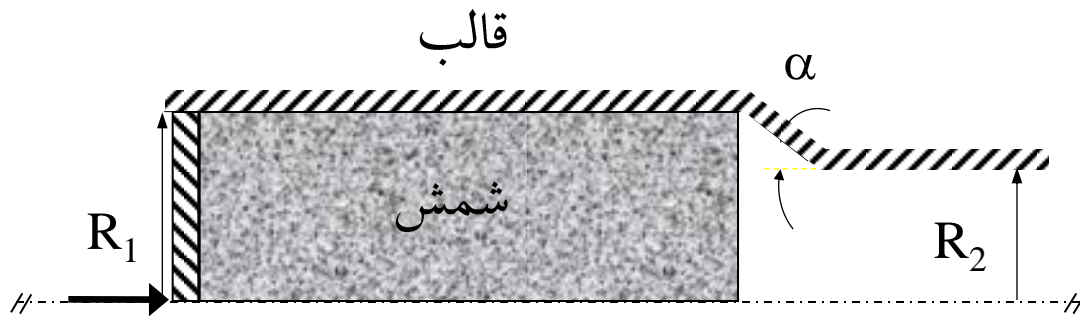


مدل آسیب کمتر اصلاح شده



مدل آسیب کمتر

تحلیل فرآیند اکستروژن مستقیم به کمک مکانیک آسیب

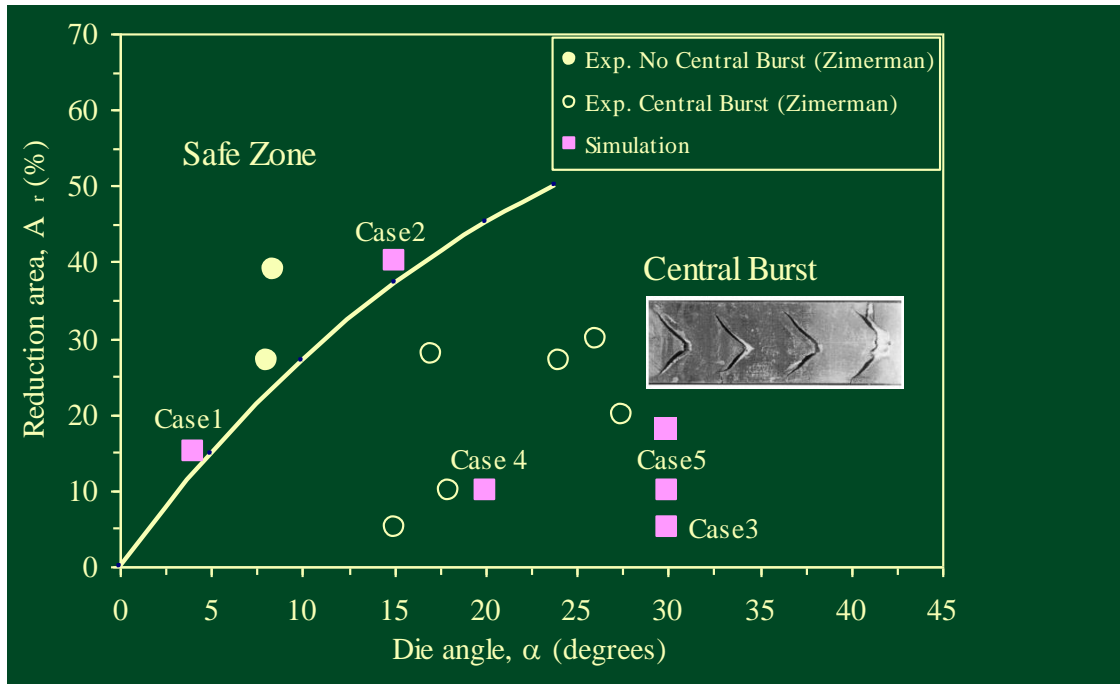


$$A_r = (R_2 - R_1) / R_1$$



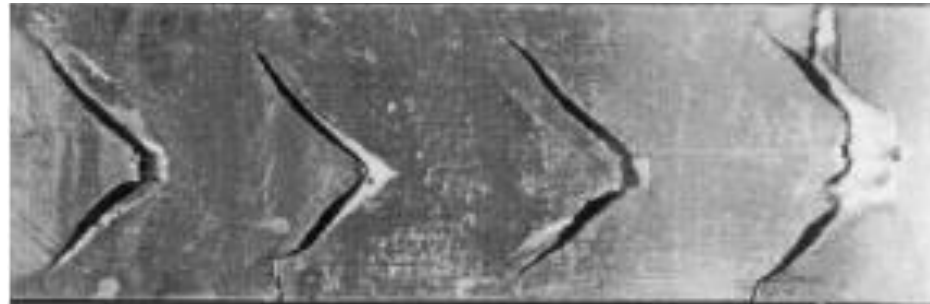
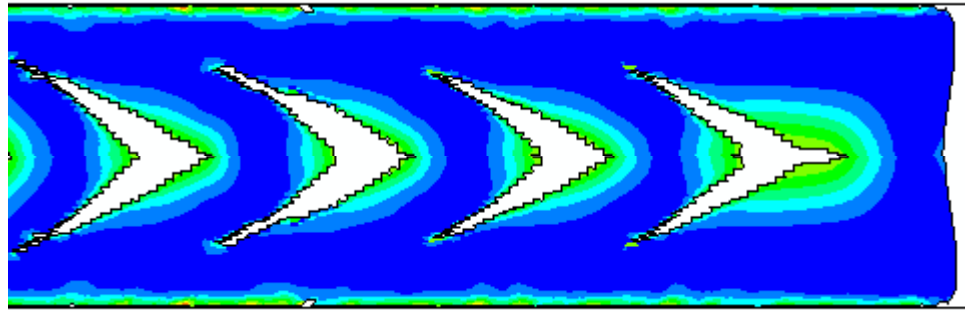
- ترک‌های سطحی در سطوح خارجی محصول و ترک‌های جناقی شکل (یا مرکزی) در خط محوری شمش از این جمله عیوب این فرآیند هستند.

- عوامل موثر در تشکیل ترک‌های مرکزی: نسبت کاهش سطح مقطع نمونه، A_r ، و زاویه قسمت مخروطی قالب، α .



تحلیل فرآیند اکستروژن مستقیم به کمک مکانیک آسیب

- شبیه‌سازی برای $A_r = 20\%$ ، و زاویه قسمت مخروطی قالب، $\alpha = 30^\circ$.





تحلیل فرآیند اکستروژن مستقیم به کمک مکانیک آسیب

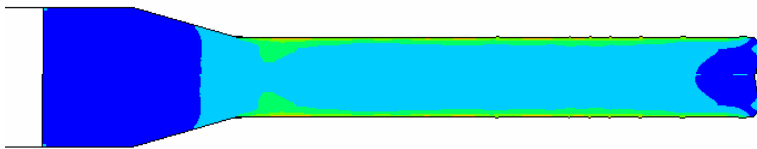
- شبیه‌سازی برای $A_r = 20\%$ ، و زاویه قسمت مخروطی قالب، $\alpha = 30^\circ$.



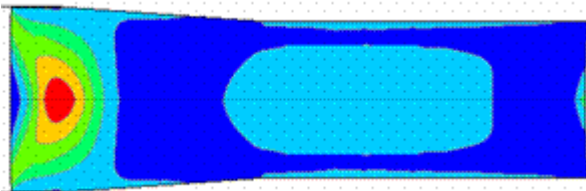
تحلیل فرآیند اکستروژن مستقیم به کمک مکانیک آسیب

- تأثیر هندسه قالب بر تشکیل ترک‌های مرکزی در فرآیند اکستروژن زاویه‌ی تیز قالب همراه با نسبت کاهش سطح مقطع پایین ترک‌های مرکزی را به دنبال دارد.

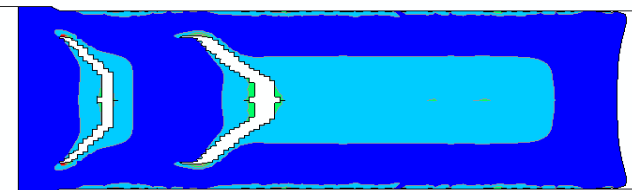
$$\alpha = 15^\circ, A_r = \%40$$



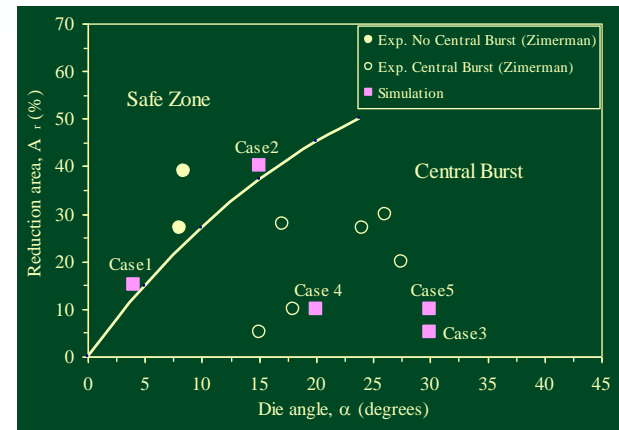
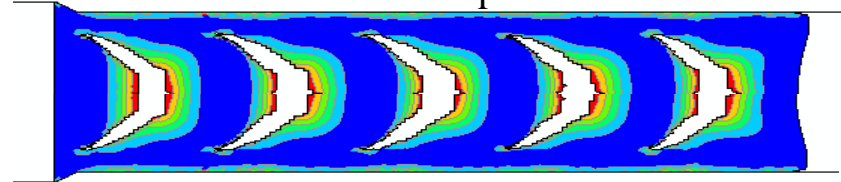
$$\alpha = 5^\circ, A_r = \%15$$



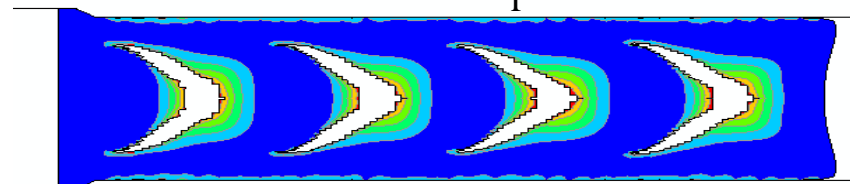
$$\alpha = 30^\circ, A_r = \%5$$



$$\alpha = 20^\circ, A_r = \%10$$

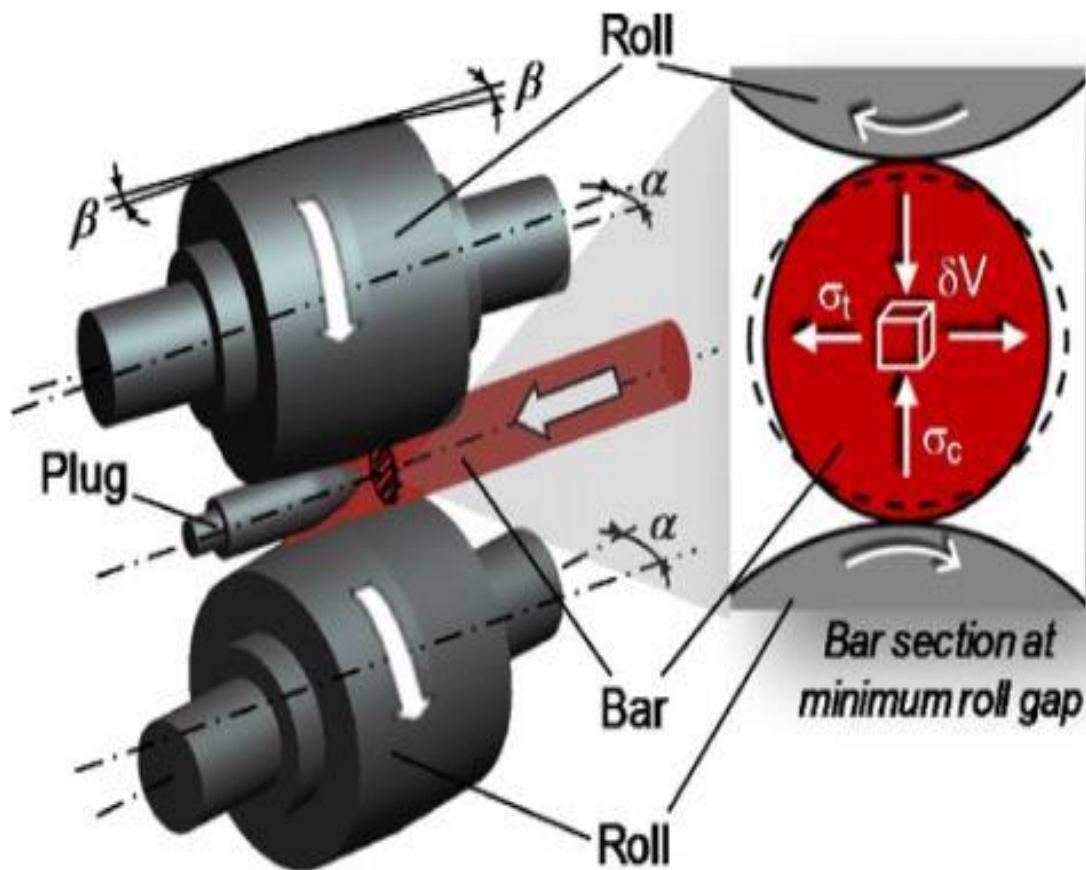


$$\alpha = 30^\circ, A_r = \%10$$



مدل سازی فرآیند نورد مانسمان

معرفی روش نورد مانسمان



مدل آسیب لمتر اصلاح شده

گام رشد آسیب

$$\dot{D} = \frac{\dot{\gamma}}{(1 - D_{n+1})} \left(\frac{Y}{r}\right)^s$$

$$Y^{i+1} = \frac{1}{2E(1 - D^{i+1})^2} \left[(1 + \nu) \boldsymbol{\sigma}^+ : \boldsymbol{\sigma}^+ - \nu \langle \text{tr} \boldsymbol{\sigma} \rangle^2 \right] +$$

نرخ رهایی انرژی
آسیب

$$\frac{h}{2E(1 - hD^{i+1})^2} \left[(1 + \nu) \boldsymbol{\sigma}^- : \boldsymbol{\sigma}^- - \nu \langle -\text{tr} \boldsymbol{\sigma} \rangle^2 \right]$$

$$f_{d,n+1}^{trial} = D_{n+1}^{trial} - D_n - \left(\frac{\dot{\gamma}_{n+1}^{trial}}{(1 - D_{n+1}^{trial})} \left(\frac{-Y_{n+1}^{trial}}{r} \right)^s \right)$$

سطح آسیب

مدل سخت شوندگی جانسون کوک

$$R_n = (A + B(\varepsilon_{eq}^p)^n) \left[1 + C \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}_{eq}^p}{\dot{\varepsilon}_{ref}}\right) \right] [1 - (T^*)]$$

سخت شوندگی
جانسون کوک

$$T^* = \begin{cases} 0 & (T \leq T_{ref}) \\ \left(\frac{T - T_{ref}}{T_{melt} - T_{ref}}\right)^m & (T_{ref} < T < T_{melt}) \\ 1 & (T_{melt} \leq T) \end{cases}$$

دما

$$f_{y,n+1}^{trial} = \frac{\sigma_{eq,n+1}^{trial}}{(1 - D_{n+1})} - R_{n+1}^{trial}$$

سطح تسلیم

روش حل معادلات ساختاری

Do while $\left[\left| f_y(\gamma^{i+1}, D^{i+1}), f_d(\gamma^{i+1}, D^{i+1}) \right| < tolerance \right]$

- Solve the system iteratively for $\dot{\gamma}_{n+1}$ and \dot{D}_{n+1}

$$\begin{Bmatrix} \Delta \dot{\gamma}^{i+1} \\ \Delta \dot{D}^{i+1} \end{Bmatrix} = - \begin{pmatrix} \frac{\partial f_y^{i+1}}{\partial \gamma^{i+1}} & \frac{\partial f_y^{i+1}}{\partial D^{i+1}} \\ \frac{\partial f_d^{i+1}}{\partial \gamma^{i+1}} & \frac{\partial f_d^{i+1}}{\partial D^{i+1}} \end{pmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} f_y(\gamma^{i+1}, D^{i+1}) \\ f_d(\gamma^{i+1}, D^{i+1}) \end{Bmatrix}$$

$$\dot{\gamma}^i + \Delta \dot{\gamma}^{i+1} \rightarrow \dot{\gamma}^{i+1}$$

$$\dot{D}^i + \Delta \dot{D}^{i+1} \rightarrow \dot{D}^{i+1}$$

$$\gamma^i + \dot{\gamma}^{i+1} \rightarrow \gamma^{i+1} = \varepsilon_{eq}^{p,i+1}$$

$$D^i + \dot{D}^{i+1} \rightarrow D^{i+1}$$

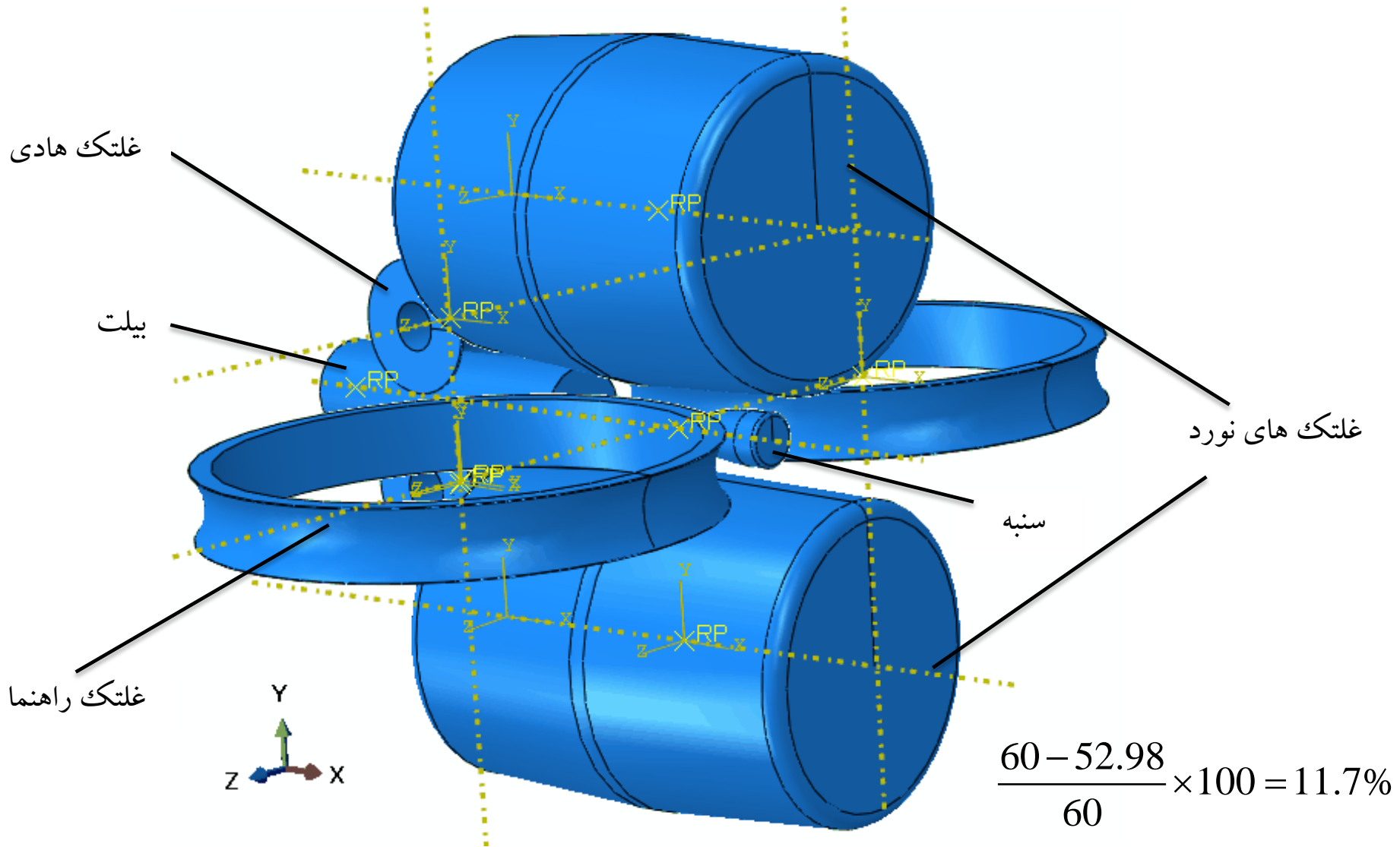
where "i" is the iteration number

$$\sigma^{i+1} = \frac{(1 - D^{i+1})}{(1 - D_n)} \sigma_n + (1 - D^{i+1})(\lambda Id \varepsilon^{el} + 2\mu d \varepsilon^{el})$$

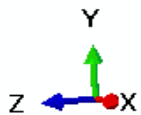
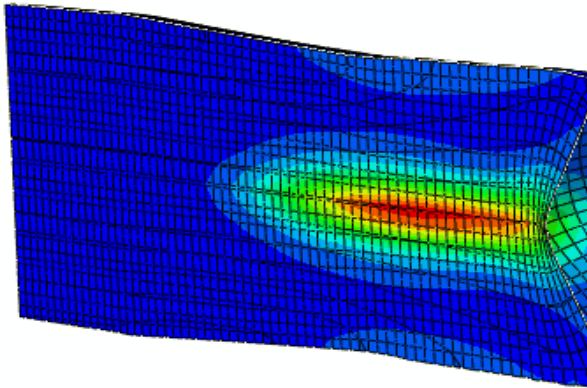
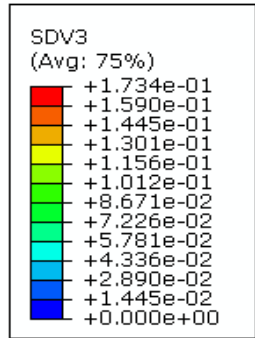
$$-Y^{i+1} = \frac{1}{2E(1 - D^{i+1})^2} \left[(1 + \nu) \sigma^+ : \sigma^+ - \nu \langle tr \sigma \rangle^2 \right] + \frac{h}{2E(1 - hD^{i+1})^2} \left[(1 + \nu) \sigma^- : \sigma^- - \nu \langle -tr \sigma \rangle^2 \right]$$

END Do

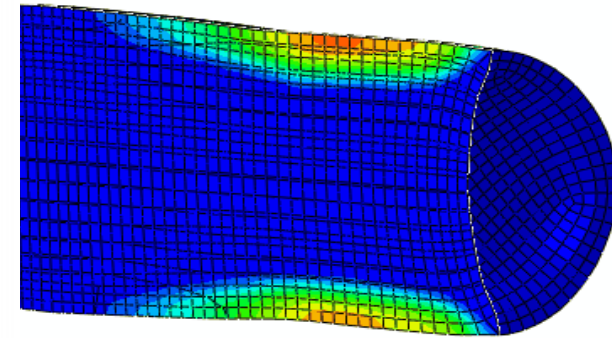
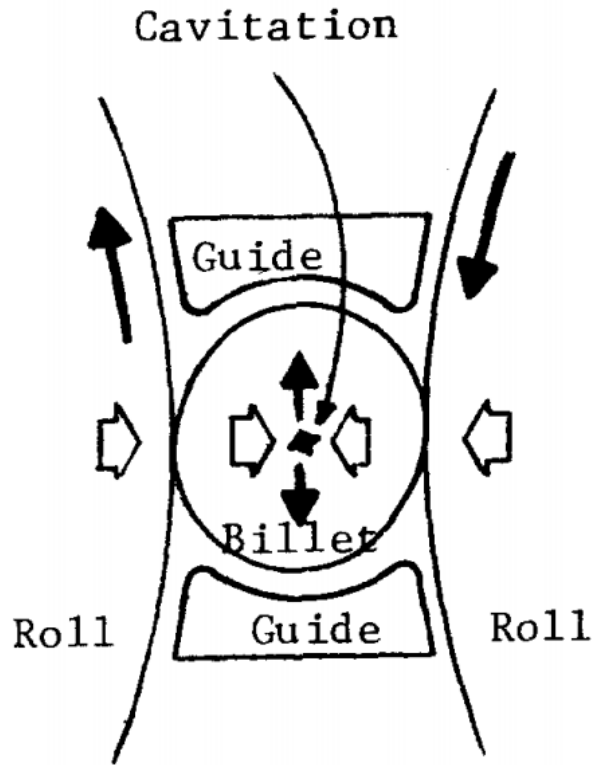
مدل سازی فرآیند نورد مانسمان



مدل سازی فرآیند نورد مانسمان



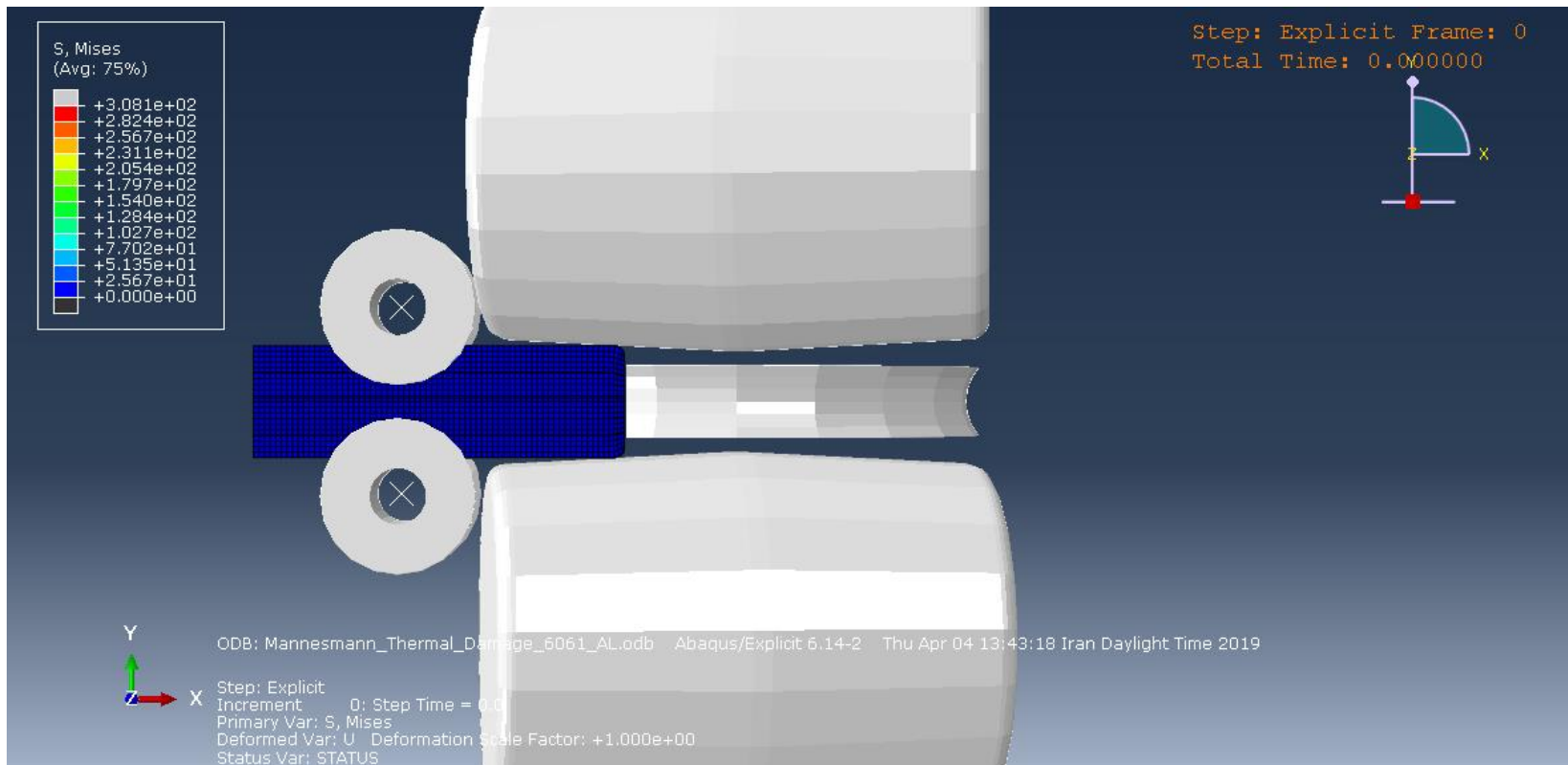
(ب)



(الف)

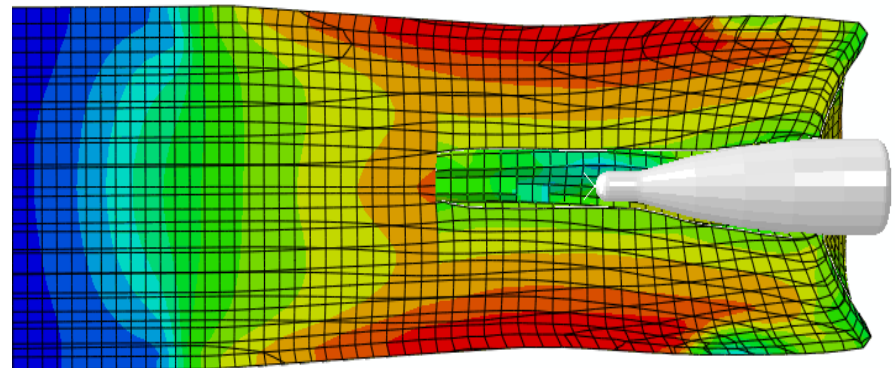
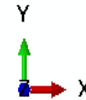
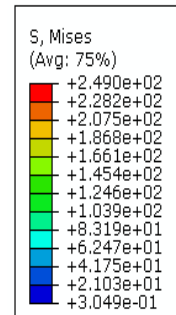
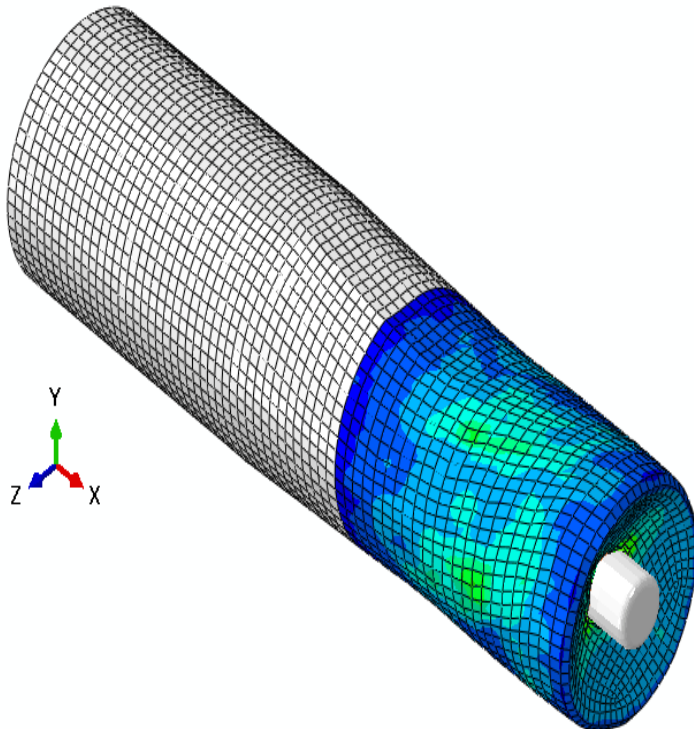
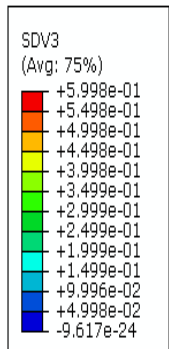
مدل سازی فرآیند نورد مانسمان

شبیه سازی تشکیل حفره ی محوری در فرآیند نورد مانسمان



مدل سازی فرآیند نورد مانسمان

شبیه سازی فرآیند نورد مانسمان با حضور سنبه



مدل سازی فرآیند نورد مانسمان

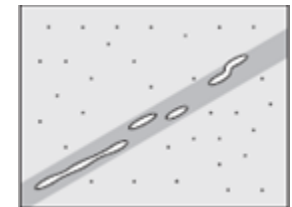
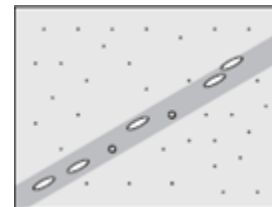
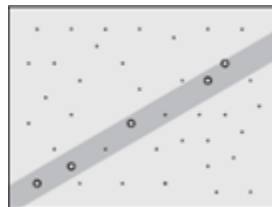
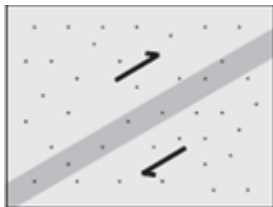
نتایج شبیه سازی فرآیند نورد مانسمان در مورد تأثیر دما و نرخ کرنش بر آسیب محوری ایجاد شده در مرکز بیلت:

- افزایش دما ← کاهش تنش سه محوره و در نتیجه کاهش آسیب در ماده
 - افزایش سرعت دورانی غلتک ها ← باعث افزایش نرخ کرنش و در نتیجه افزایش آسیب در ماده
- نتایج شبیه سازی فرآیند نورد مانسمان در مورد نیروی اصطکاک بین بیلت و غلتک های نورد نشان می دهد:
- کمترین مقدار ضریب اصطکاک مناسب جهت ایجاد نیروی اصطکاک کافی برای شروع فرآیند نورد ۰/۴ است.
 - افزایش دما ← کاهش نیروی اصطکاک بین بیلت و غلتک های نورد
 - افزایش ضریب اصطکاک از مقدار ۰/۴ ← تشدید آسیب ایجاد شده بر سطح خارجی بیلت

مدل آسیب غیرمحلی و کاربرد آن در فرآیند براده برداری

پدیده محلی شدن آسیب

هنگام بارگذاری در یک فرآیند مکانیکی با گسترش تغییر شکل‌ها، کل تغییر شکل در یک ناحیه با پهنا کم متمرکز می‌شود که به اصطلاح ناحیه محلی شده، شناخته می‌شود.



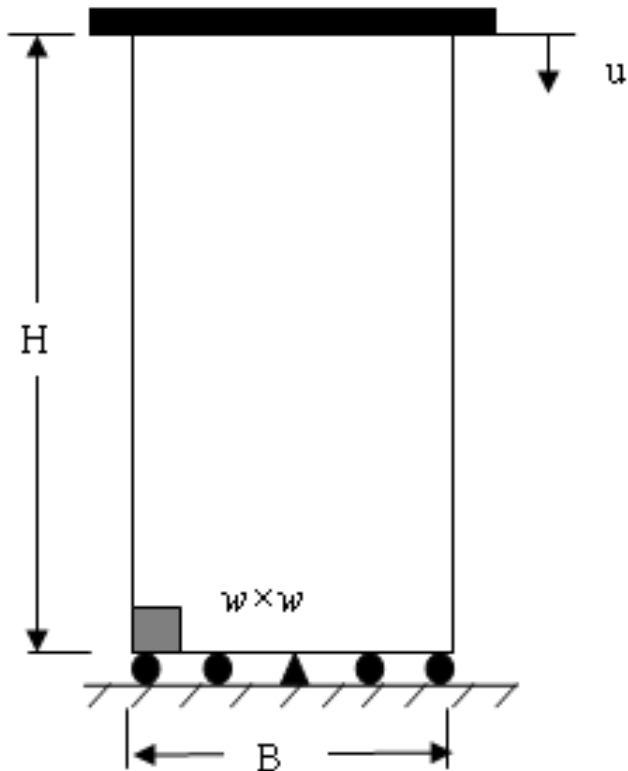


مدل آسیب غیرمحلی و کاربرد آن در فرآیند براده برداری

بر اساس فرمول‌بندی مکانیک پیوسته غیر محلی؛ رشد آسیب در یک نقطه متأثر از مقدار آسیب در یک محدوده مشخص از اطراف آن نقطه است. این محدوده (محدوده‌ای که در آن آسیب متمرکز شده و نرم شدگی در آن اتفاق می‌افتد) توسط طول مشخصه ماده مشخص می‌شود. مدل‌های غیرمحلی؛ به خوبی شروع آسیب و رشد آن را شبیه‌سازی می‌کنند. به طور کلی، رویکرد غیرمحلی شامل جایگزینی یک متغیر توسط همتای غیرمحلی آن به وسیله متوسط‌گیری آن متغیر در همسایگی آن نقطه است. بنابراین مدل غیرمحلی توانایی توصیف تغییرات زیاد کرنش، را در منطقه محلی شدن تغییر شکل‌ها دارد. از این مدل می‌توان برای شبیه‌سازی فرآیند ماشینکاری با توجه به شرایط خاص این فرآیند پرداخت.

مدل آسیب غیرمحلی و کاربرد آن در فرآیند براده برداری

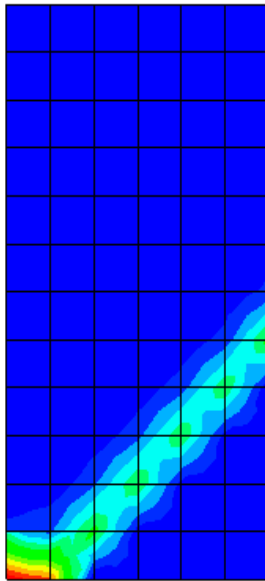
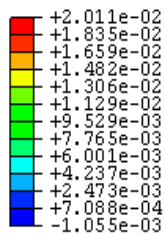
بررسی یک نمونه کرنش صفحه‌ای، تحت بارگذاری فشاری



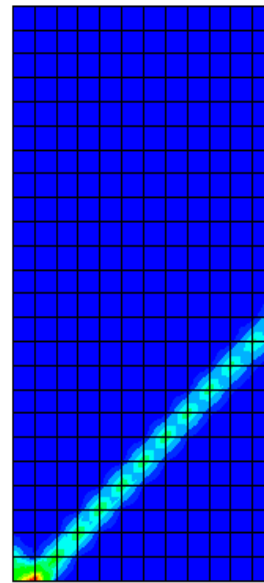
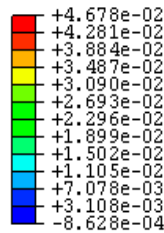
مدل آسیب غیرمحلی و کاربرد آن در فرآیند براده برداری

بررسی یک نمونه کرنش صفحه‌ای، تحت بارگذاری فشاری

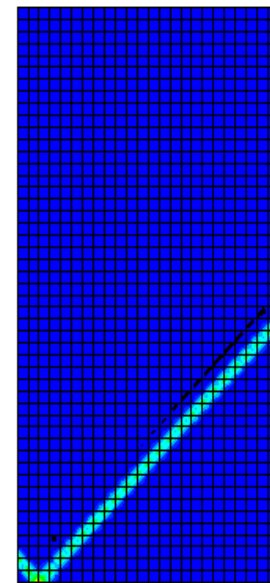
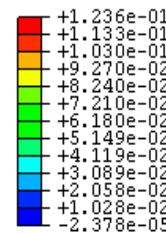
پیش‌بینی پهنای باند برشی هنگام محلی شدن تغییر شکل‌ها



ج



ب



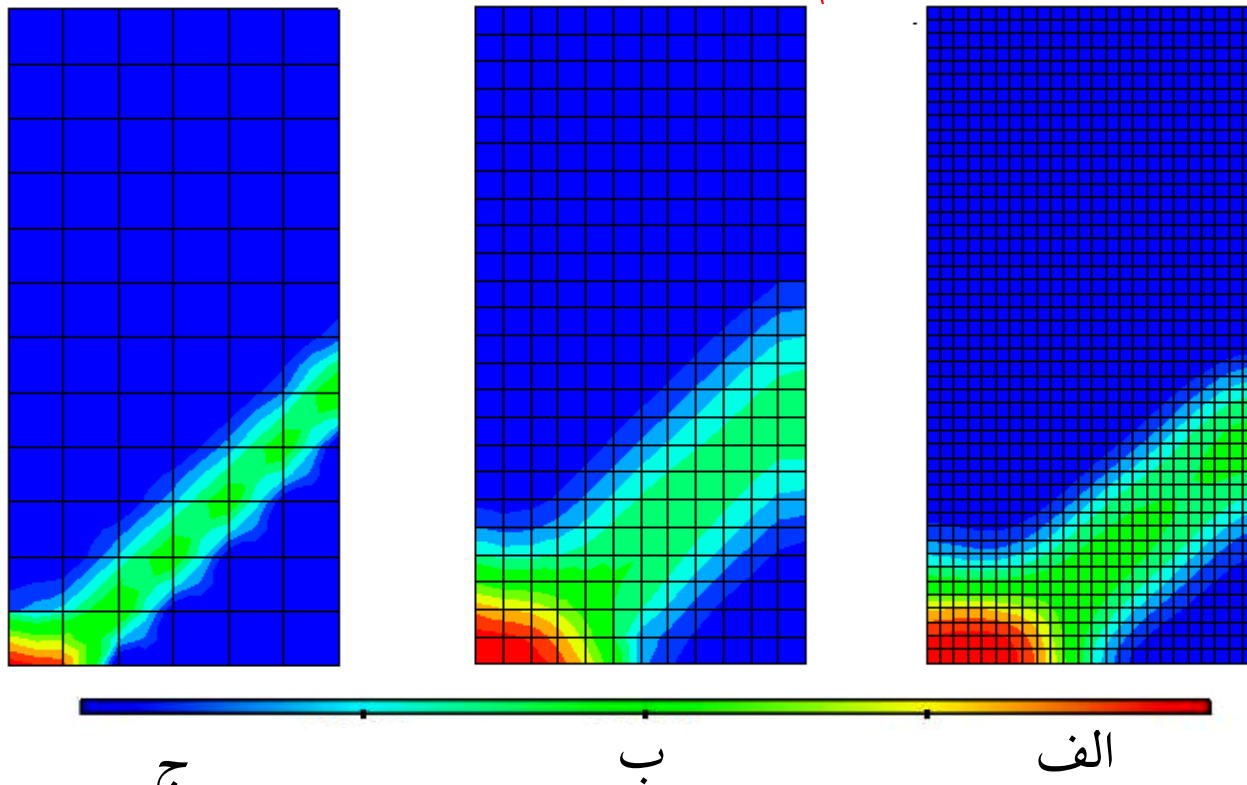
الف

وابستگی پهنای باند برشی و توزیع کرنش معادل پلاستیک محلی برای اندازه المان‌های ۱۲×۶ ،

۲۴×۱۲ و ۴۸×۲۴

مدل آسیب غیرمحلی و کاربرد آن در فرآیند براده برداری

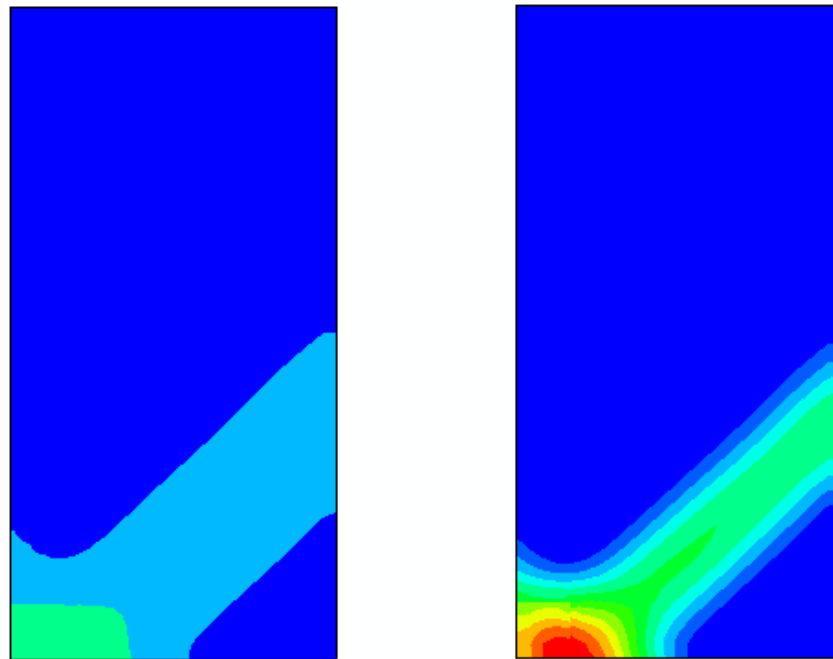
بررسی یک نمونه کرنش صفحه‌ای، تحت بارگذاری فشاری
پیش‌بینی پهنای باند برشی هنگام محلی شدن تغییر شکل‌ها



عدم وابستگی پهنای باند برشی به اندازه المان و توزیع کرنش معادل پلاستیک غیرمحلی برای اندازه المان‌های ۱۲×۶ ، ۲۴×۱۲ و ۴۸×۲۴

مدل آسیب غیرمحلی و کاربرد آن در فرآیند براده برداری

بررسی یک نمونه کرنش صفحه‌ای، تحت بارگذاری فشاری



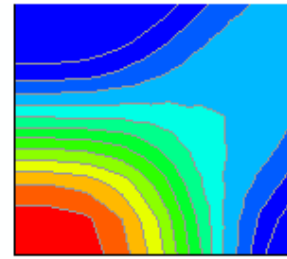
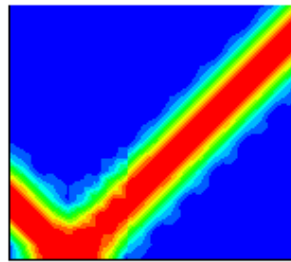
ب

الف

تأثیر اندازه طول مشخصه بر روی کرنش معادل پلاستیک غیرمحلی، الف - $l=9\text{mm}^2$ ب - $l=100\text{mm}^2$

مدل آسیب غیرمحلی و کاربرد آن در فرآیند براده برداری

بررسی یک نمونه کرنش صفحه‌ای، تحت بارگذاری فشاری



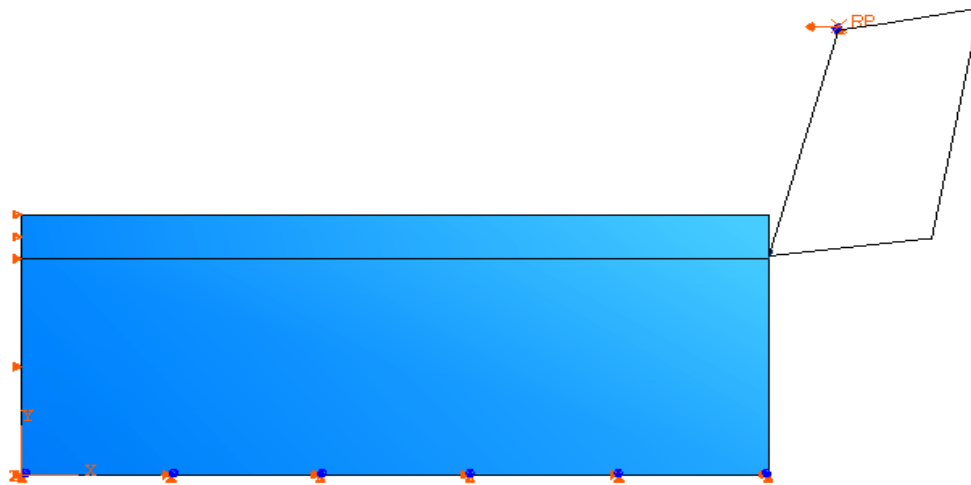
ب

الف

توزیع متغیر آسیب (الف) متغیر آسیب غیرمحلی (ب) متغیر آسیب محلی

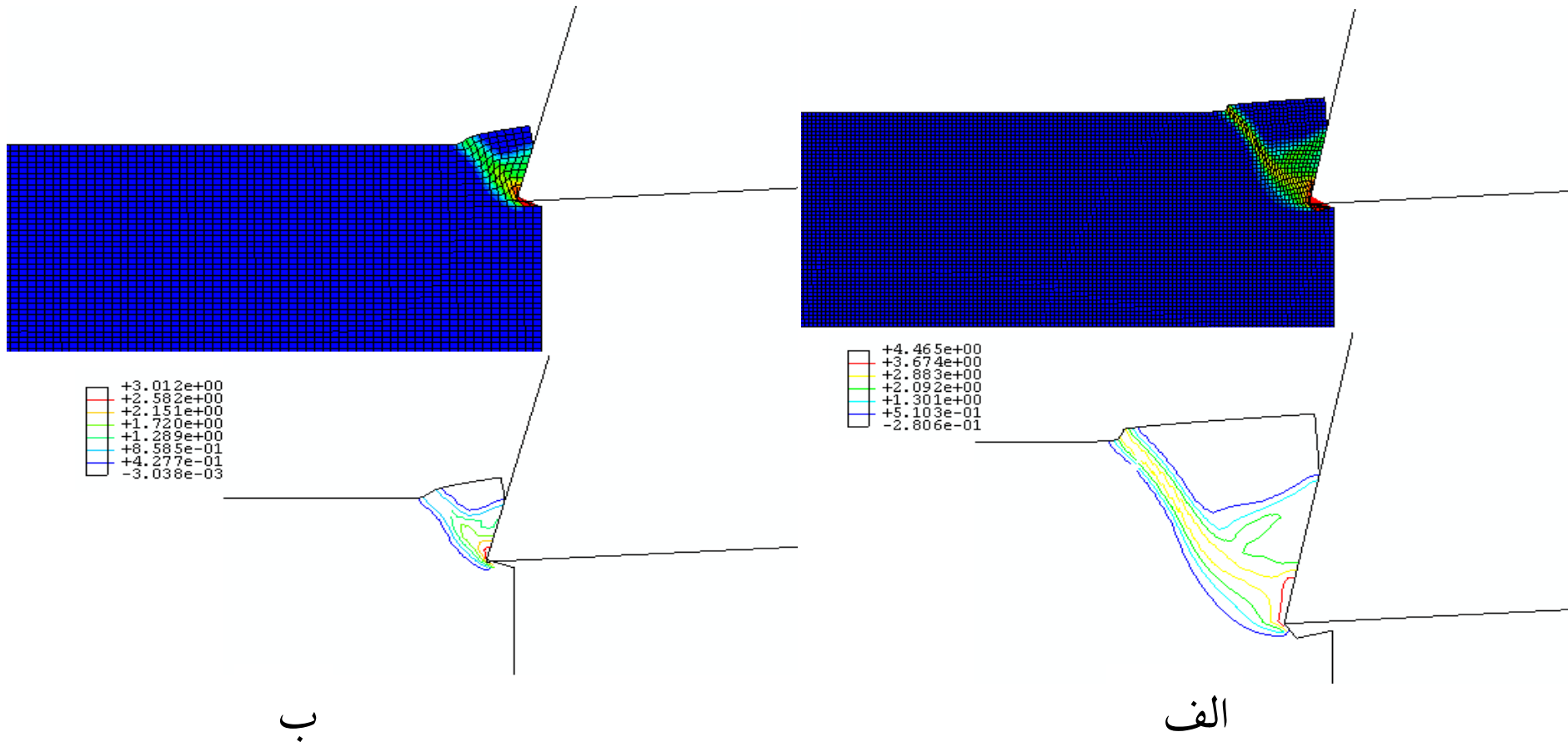
مدل آسیب غیرمحلی و کاربرد آن در فرآیند براده برداری

رهیافت آسیب غیرمحلی در فرآیند براده برداری



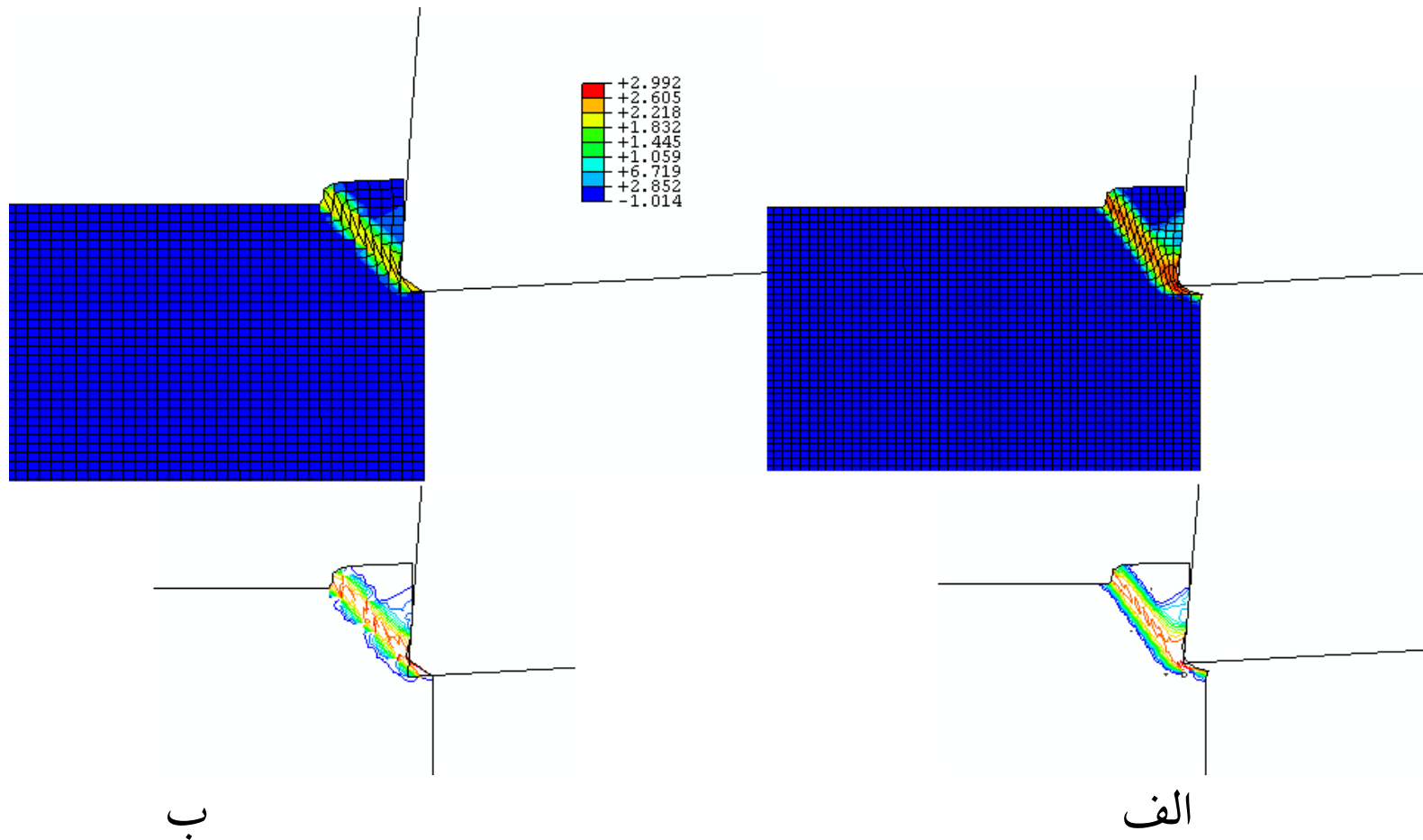
هندسه و شرایط مرزی مسئله

مدل آسیب غیرمحلی و کاربرد آن در فرآیند براده برداری



اثر اندازه المان بر پهنای باند برشی و کرنش معادل پلاستیک در مدل محلی، الف- ۶۰۰۰، ب- ۲۰۰۰ المان

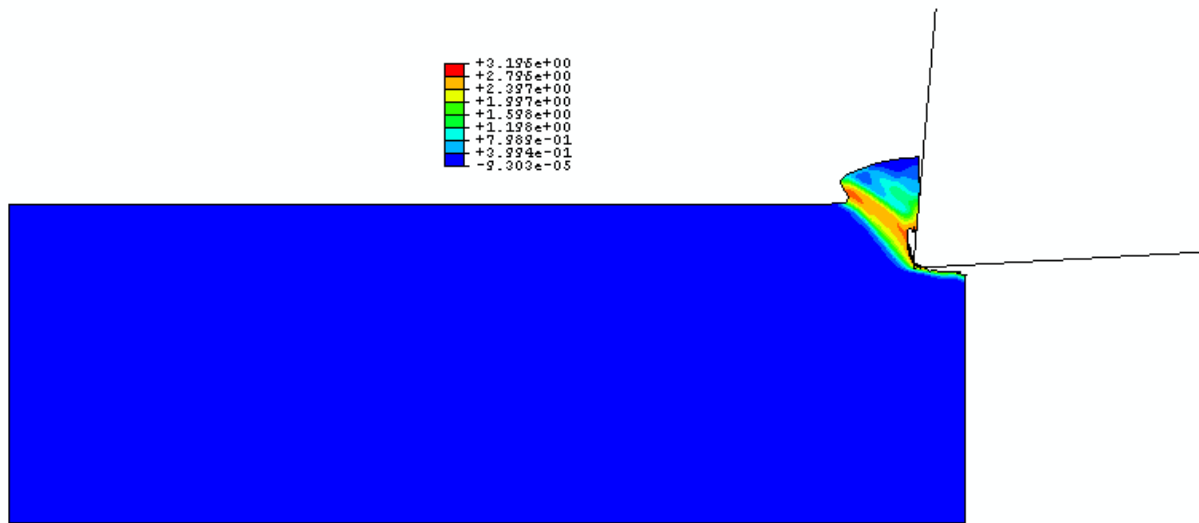
مدل آسیب غیرمحلی و کاربرد آن در فرآیند براده برداری



اثر اندازه المان بر پهنای باند برشی و کرنش معادل پلاستیک در مدل غیرمحلی، الف-۶۰۰۰، ب-۲۰۰۰ المان



مدل آسیب غیرمحلی و کاربرد آن در فرآیند براده برداری



توزیع کرنش پلاستیک معادل غیرمحلی با پیشروی ابزار و جدایش المان



- حاجی ابوطالبی، ف.، پیش‌بینی رشد آسیب در شکل دهی ورق های فلزی، رساله دکترا، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۸۹.
- نساج‌پور، م، شبیه‌سازی فرآیند ساخت لوله‌های بدون‌درز به‌روش مانسمان با رهیافت مکانیک آسیب پیوسته، ۱۳۹۸.
- شمس، ع، پیاده‌سازی مدل آسیب غیرمحلی در مواد شکل‌پذیر و کاربرد آن در فرآیند براده برداری متعامد، ۱۳۹۰.
- Habbitt Karlsson, Sorensen Inc., ABAQUS User's Manual
Version 6.14 , USA, 2014.