

پیش‌بینی ترک‌های مرکزی در فرایند اکستروژن مستقیم با استفاده از مکانیک آسیب پیوسته

محمد مشایخی*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله: ۱۳۸۷/۵/۲۹ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۸۹/۳/۵)

چکیده -

واژگان کلیدی:

Prediction of Central Burst in Forward Extrusion Using Continuum Damage Mechanics

M. Mashayekhi

Mechanical Engineering Department, Isfahan University of Technology

Abstract: *The Continuum Damage Mechanics is a branch of applied mechanics that predicts the initiation of cracks in metal forming processes. In this paper, a modified ductile damage model is applied to predict initiation of the micro-void as a central burst along the bar axis during the forward extrusion. The implicit integration scheme of the coupled constitutive equations is presented. The effects of various process parameters including die semi-angle, reduction in area, friction coefficient and material ductility on central bursts are discussed. To verify the quality of simulations, numerical predictions were compared with published experimental results, and good agreement was observed.*

Keywords: *Continuum Damage Mechanics, Ductile fracture, extrusion*

* - استادیار

Y	نرخ رهایی انرژی آسیب	A	سطح مقطع نهایی
α	زاویه قالب	A_D	سطح ریز حفره‌ها
$\Delta\gamma$	پارامتر پلاستیک	A_T	ضریب کاهش سطح مقطع
μ	ضریب اصطکاک	D	متغیر آسیب
v	کرنش حجمی	\dot{D}	نرخ آسیب
ϵ	تانسور کرنش	E	مدول یانگ
ϵ^p	نرخ تانسور کرنش پلاستیک	E	تانسور مدول الاستیسیته
ϵ_{eq}^p	نرخ کرنش پلاستیک معادل	e	تانسور کرنش انحرافی
Φ	تابع تسلیم	G	مدول برشی
$\dot{\gamma}$	ضریب سازگاری پلاستیک	h	اثر بسته شدن ریز ترکها
ν	نسبت پواسون	K	مدول حجمی
ρ	چگالی	L	طول قالب
σ	تانسور تنش کوشی	t_n	زمان مربوط به قدم n ام
$\tilde{\sigma}$	تانسور تنش مؤثر	p	فشار هیدرواستاتیک
σ^{trial}	تانسور تنش کوشی آزمایشی	R	رشد شعاعی سطح تسلیم
σ_{eq}	تنش معادل	R_1, R_2	شعاعهای قالب
σ_Y^0	تنش تسلیم اولیه	r, s	پارامترهای آسیب وابسته به ماده
Ψ	پتانسیل اتلاف	s	تانسور تنش انحرافی

۱- مقدمه

دستاوردها در این زمینه، پیش‌بینی بروز شکست و زوال در محصول فرایند است. یکی از شاخه‌های نسبتاً جدید مکانیک که می‌تواند در پیش‌بینی شکست به کار گرفته شود، مکانیک آسیب است. مکانیک آسیب به عنوان ابزاری کارا برای پیش‌بینی وقوع شکست به کار گرفته می‌شود [۱].

در فرایند اکستروژن سطح مقطع یک شمش، معمولاً فلزی، در اثر عبور از داخل دهانه قالب تحت فشار زیاد، کم می‌شود. این فرایند اغلب برای تولید میله‌های استوانه‌ای و لوله‌های توخالی به کار می‌رود ولی شکلهای با مقطع نامنظم از فلزات نرمتر، مانند آلومینیوم، نیز به روش اکستروژن قابل تولید هستند. امروزه، این فرایند به عنوان یک فرایند مهم تجاری شناخته شده

در چند دهه اخیر، پیشرفتهای زیادی در زمینه شبیه‌سازی فرایندهای شکل‌دهی فلزات به کمک روش اجزای محدود حاصل شده است. استفاده از نرم‌افزارهای تجاری به منظور طراحی و بهینه کردن فرایندهای شکل‌دهی به صورت رقابتی گسترش یافته است. تحلیل‌های اجزای محدود توانایی پیش‌بینی ابعاد و شکل نهایی محصول، نیروهای فرایند، کرنشهای پلاستیک و تنشهای باقیمانده را در محصول نهایی فراهم آورده است. مزیت اصلی در استفاده از شبیه‌سازیهای عددی، اطلاع از تأثیر پارامترهای مختلف شکل‌دهی در محصول نهایی و پیش‌بینی خواص محصول است. یکی دیگر از مهمترین

است. وارد شدن شمش فلز در محفظه قالب با تنشهای فشاری بالا، کاهش ترک در محصول نهایی را به همراه دارد. این دلیل باعث کاربرد روز افزون فرایند اکستروژن برای فلزاتی شده است که به سختی شکل می‌گیرند. با این وجود، محصول خروجی از محفظه قالب همیشه بدون عیب نخواهد بود. از آنجا که فرایند اکستروژن با تغییر شکل‌های بزرگ پلاستیک همراه است امکان بروز عیوبی در محصول نهایی وجود دارد. ترکهای ظاهر شده در سطح خارجی محصول و ترکهای مرکزی یا جناقی شکل (به شکل، <) که در وسط قطعه و روی خط محوری شمش اتفاق می‌افتد، از مهمترین این عیوب‌اند. اگر چه ترکهای مرکزی با فاصله معینی از یکدیگر اتفاق می‌افتند ولی از آنجا که از خارج قطعه قابل رویت نیستند لازم است توسط روشهای غیر مخرب شناسایی و تحت کنترل قرار گیرند.

برای شناسایی این عیوب تاکنون تحقیقات تجربی و تحلیلی متنابهی انجام گرفته است. زیمرمان و همکاران به کمک آزمایشهای تجربی موفق شدند "ناحیه مطمئن"، ناحیه‌ای که ترکهای مرکزی در آن اتفاق نمی‌افتد را شناسایی کنند. ایشان ناحیه مطمئن برای فرایند اکستروژن را زاویه کوچک قالب و نسبت بالای "ضریب کاهش سطح مقطع" معرفی کردند [۲]. آراواز اولین مطالعه عددی را بر روی ترکهای مرکزی در فرایند اکستروژن مستقیم انجام داد. وی به کمک مدل آسیب گرسون تنها توانست تأثیر پارامترهای مؤثر بر وقوع ترکهای مرکزی را بررسی کند ولی موفق به مدلسازی ترکهای مرکزی نشد [۳]. کو در سال ۲۰۰۰ توانست به کمک یک مدل شکست نرم "ناحیه مطمئن"، ناحیه عدم بروز ترک در فرایند اکستروژن را هماهنگ با نتایج تجربی به دست آورد [۴]. همبلی و همکاران فرایند اکستروژن را به کمک مدل آسیب لمر شیبیه‌سازی کردند. شیبیه‌سازی آنان تنها قادر به پیش‌بینی ترکهای سطحی در محصول نهایی بود. آنها در کار خود موفق به پیش‌بینی ترکهای مرکزی در شمش خروجی نشدند [۵]. دلیل این امر را می‌توان به تأثیر یکسان تنشهای کششی و فشاری در مدل رشد آسیب لمر نسبت داد. اخیراً سانومی به کمک یک مدل آسیب پیوسته توانسته است

به خوبی محل و زمان بروز ترکهای مرکزی را پیش‌بینی نماید و وقوع این ترکها را شبیه‌سازی کند [۶].

عوامل متعددی در پیدایش عیوب محصول نهایی فرایند اکستروژن نقش دارند. ضریب کاهش سطح مقطع نمونه، زاویه قسمت مخروطی قالب، اصطکاک بین سطوح تماس فلز با قالب و خواص مکانیکی فلز از جمله مهمترین عوامل بروز عیوب در محصول نهایی فرایند هستند.

در این تحقیق، فرایند اکستروژن مستقیم با استفاده از مدل آسیب اصلاح شده لمر، مدلی که اثر بسته شدن ترک را منظور می‌کند، شبیه‌سازی می‌شود. در این شبیه‌سازی با استفاده از این مدل آسیب نرم وقوع عیوب، به ویژه ترکهای ناپیوسته مرکزی، در محصول نهایی فرایند اکستروژن مستقیم مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و تأثیر پارامترهای مؤثر به صورت کمی بررسی می‌شود. در این شبیه‌سازی از روش اجزای محدود صریح که برای شرایط تماسی پیچیده ابزاری کارگشاست، سود برده می‌شود.

۲- مدل مکانیک آسیب پیوسته

مبانی مکانیک آسیب پیوسته^۱ برای آسیب نرم اولین بار توسط لمر ارائه شد [۷]. در این مدل، آسیب یک متغیر ترمودینامیکی است که بیانگر کاهش تحمل بار در یک فرایند برگشت‌ناپذیر است. به عبارت دیگر آسیب ضعیف شدن ماده را بیان می‌کند که این تضعیف باعث کاهش مدول الاستیسیته در ناحیه الاستیک، تنش تسلیم و دیگر خواص ماده می‌شود. در اثر تغییر شکل پلاستیک در یک فرایند ریزحفره‌ها و ترکهای ریز ایجاد شده، رشد کرده و به یکدیگر ملحق می‌شوند تا آسیب نرم اتفاق افتد. از دیدگاه فیزیکی، آسیب بر حسب کاهش سطح مقطع مؤثر به واسطه ترکها و حفره‌های ریز در یک المان حجمی از ماده به صورت زیر قابل تعریف است:

$$D = \frac{A_D}{A}, \quad 0 \leq D < 1 \quad (1)$$

A_D بیانگر سطح ریزحفره‌ها و A سطح مقطع کل است. بر اساس این تعریف متغیر کمی آسیب، بین صفر و یک قرار

می‌گیرد که $D=0$ بیانگر حالت بدون آسیب و $D=1$ بیانگر گسیختگی مقطع است.

۱-۲- مدل آسیب پیوسته لمتر

مدل آسیب لمتر در حالت الاستیک خطی، به کمک مدول الاستیسیته همراه با آسیب، بیان می‌شود:

$$\sigma = (1-D)E : \epsilon^e \quad (2)$$

σ ، تانسور تنش کوشی، ϵ^e ، تانسور کرنش الاستیک و E ، تانسور مدول الاستیسیته همسان برای ماده‌ی بدون آسیب، (یا ماده بکر، $D=0$) است. برای تانسور تنشهای انحرافی، S می‌توان قانون الاستیسیته خطی همراه با آسیب را به صورت زیر نوشت:

$$s = 2(1-D)Ge^e, \quad p = (1-D)Kv^e \quad (3)$$

G ، مدول برشی، K ، مدول حجمی و v^e و e^e به ترتیب تانسور کرنش انحرافی الاستیک و کرنش حجمی الاستیک و p ، تنش هیدروستاتیک، $p = 1/3tr(\sigma)$ هستند. برای نسخه ساده شده مدل آسیب لمتر، با نادیده گرفتن کار سختی سینماتیکی، می‌توان تابع تسلیم را به صورت زیر تعریف کرد:

$$f = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{\|s\|}{(1-D)} - \sigma_Y(R) \quad (4)$$

R ، نشان دهنده متغیر داخلی کار سختی همسان یا به عبارت دیگر بیانگر رشد شعاعی سطح تسلیم و σ_Y ، تنش تسلیم ماده است. معادلات رشد متغیرهای داخلی از تابع پتانسیل اتلاف، Ψ ، به دست می‌آیند. Ψ ، یک تابع محدب اسکالر از متغیرهای داخلی است که قابل تفکیک به دو قسمت پلاستیک Ψ^p و قسمت آسیب Ψ^d است. برای فرایندهای با کار سختی و آسیب همسان، Ψ قابل بیان به شکل زیر است [۱]:

$$\Psi = \Psi^p + \Psi^d = f + \frac{r}{(1-D)(s+1)} \left(\frac{-Y}{r} \right)^{s+1} \quad (5)$$

r و s ، پارامترهای آسیب ماده و از آزمایش به دست می‌آیند. بر مبنای نظریه شرکت‌پذیر، جریان پلاستیک در جهت عمود بر سطح تسلیم بوده، از این رو معادله جریان پلاستیک

عبارت است از:

$$\dot{\epsilon}^p = \dot{\gamma} \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{s}{\|s\|} = \dot{\gamma} \frac{3}{2} \frac{s}{\sigma_{eq}} \quad (6)$$

معادلات رشد متغیرهای داخلی عبارت‌اند از:

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_{eq}^p &= -\dot{\gamma} \frac{\partial \Psi}{\partial R} = \dot{\gamma}, \\ \dot{D} &= -\dot{\gamma} \frac{\partial \Psi}{\partial Y} = \dot{\gamma} \frac{1}{1-D} \left(\frac{-Y}{r} \right)^s \end{aligned} \quad (7)$$

ضریب پلاستیک، لازم است شرایط سازگاری در بارگذاری و باربرداری را ارضا کند:

$$\dot{\gamma} \geq 0, \quad f \leq 0, \quad \dot{\gamma} f = 0 \quad (8)$$

و نرخ‌هایی انرژی آسیب به صورت زیر قابل تعریف است:

$$Y = \frac{-1}{2E(1-D)^2} \left[(1+\nu)\sigma : \sigma - \nu(tr\sigma)^2 \right] \quad (9)$$

از آنجا که معادلات رشد متغیرهای داخلی دارای رفتار غیر خطی شدیدی‌اند، باید از یک الگوریتم انتگرال‌گیری کارا در این زمینه استفاده شود. در این تحقیق انتگرال‌گیری از معادلات ساختاری الاستیک-پلاستیک-آسیب به کمک یک روش ابتکاری [۸] برای مدل آسیب نرم لمتر انجام می‌پذیرد.

هدف از انتگرال‌گیری معادلات ساختاری آن است که با داشتن مجموعه σ_n^p ، $\epsilon_{eq,n}^p$ و D_n در زمان t_n و با اعمال نمو کرنش $\Delta \epsilon = \epsilon_{n+1} - \epsilon_n$ ، بتوان مجموعه σ_{n+1} ، ϵ_{n+1}^p ، $\epsilon_{eq,n+1}^p$ و D_{n+1} را در زمان t_{n+1} محاسبه کرد. اساس انتگرال‌گیری از معادلات ساختاری بر مبنای الگوریتم نگاهت برگشتی است.

قدم اول در این الگوریتم پیش‌بینی گام به صورت الاستیک است، در این صورت متغیرهای داخلی وابسته به گام پلاستیک همان متغیرهای زمان t_n خواهند بود:

$$\epsilon_{n+1}^{e, trial} = \epsilon_n^e + \Delta \epsilon, \quad \epsilon_{eq,n+1}^{p, trial} = \epsilon_{eq,n}^p \quad (10)$$

از این رو تانسور تنش آزمایشی برابر است با:

$$\sigma^{trial} = \sigma_n + E : \Delta \epsilon \quad (11)$$

با تقسیم تنش به مؤلفه‌های هیدروستاتیکی و انحرافی خواهیم داشت:

$$s_{n+1} = \left(1 - \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2G\Delta\gamma}{\|s^{\text{trial}}\|} \right) s^{\text{trial}}, \quad p_{n+1} = p^{\text{trial}},$$

$$\sigma_{n+1} = s_{n+1} + p_{n+1}I, \quad \varepsilon_{\text{eq},n+1}^p = \varepsilon_{\text{eq},n}^p + \Delta\gamma, \quad (20)$$

$$\varepsilon_{n+1}^e = \frac{1}{2G} s_{n+1} + \frac{1}{3K} p_{n+1}I, \quad D_{n+1} = D(\Delta\gamma)$$

۲-۲- مدل آسیب اصلاح شده لمتر

در مدل استاندارد لمتر تانسور تنش مؤثر برای حالت کششی به صورت زیر معرفی شد:

$$\tilde{\sigma} = \frac{\sigma}{1-D} \quad (21)$$

در این مدل تنش مؤثر برای حالت فشاری نیز به همین صورت تعریف می‌شود. آزمایشهای تجربی نشان داده است که ریزترکها و ریزحفره‌ها که در بارگذارهای کششی باز می‌شوند، در اثر نیروهای فشاری بازشدگی آنها با تاخیر مواجه می‌شود و در مواردی بسته خواهند شد. از این رو برای تطبیق با نتایج تجربی لازم است اثر بسته شدن ترکها در تنشهای فشاری در نظر گرفته شود. برای این منظور برای تنشهای فشاری در حالت تنش تک محوره رابطه تنش و کرنش به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\tilde{\sigma} = \frac{\sigma}{1-hD}, \quad 0 \leq h \leq 1 \quad (22)$$

مشاهدات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که مقدار ثابت h ، در محدوده فوق قرار دارد.

پارامتر h ، اثر بسته شدن ریزترکها را نشان می‌دهد و به کمک آن می‌توان تأثیر آسیب را به صورت متفاوت در حالت کشش و فشار اعمال کرد. مقدار h ، توسط آزمایشهای متعددی بر روی فلزات برابر ۰/۲ ارزیابی شده است [۱].

در حالت یک بعدی تعریف تنش مؤثر برای حالت کششی و یا فشاری به سادگی امکانپذیر است. تعمیم چنین وضعیتی به حالت سه بعدی چندان ساده نیست. مسئله اصلی در اینجا تمیز دادن حالت کششی یا فشاری بودن تنش در هر نقطه در حالت سه بعدی است. مطابق پیشنهاد مرجع [۱]، می‌توان مؤلفه‌های اصلی تانسور تنش را به مقادیر مثبت و منفی تقسیم‌بندی کرد.

$$s^{\text{trial}} = s_n + 2G\Delta e, \quad p^{\text{trial}} = p_n + K\Delta v \quad (12)$$

قدم دوم در این الگوریتم بررسی امکان وقوع حالت پلاستیک است. با دانستن متغیرهای $\varepsilon_{\text{eq},n}^p$ و D_n در زمان t_n می‌توان تابع تسلیم را محاسبه کرد:

$$f^{\text{trial}} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{\|s^{\text{trial}}\|}{(1-D_n)} - [\sigma_Y^0 + R(\varepsilon_{\text{eq},n}^p)] \quad (13)$$

در صورتی که $f^{\text{trial}} \leq 0$ باشد، جریان پلاستیک واقع نشده و آسیب هم رشد نکرده است و می‌توان نوشت:

$$\sigma_{n+1} = \sigma^{\text{trial}}, \quad \varepsilon_{\text{eq},n+1}^p = \varepsilon_{\text{eq},n}^p, \quad D_{n+1} = D_n \quad (14)$$

در غیر این صورت؛ $f^{\text{trial}} > 0$ ، لازم است اصلاح پلاستیک انجام شود. برای این منظور باید از معادلات مربوط به $\varepsilon_{\text{eq},n}^p$ و D مطابق روش اویلر پسرو انتگرال‌گیری شود:

$$\varepsilon_{n+1}^p = \varepsilon_n^p + \Delta\gamma \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{s^{\text{trial}}}{\|s^{\text{trial}}\|} \quad (15)$$

و

$$\varepsilon_{\text{eq},n+1}^p = \varepsilon_{\text{eq},n}^p + \Delta\gamma, \quad D_{n+1} = D_n + \frac{\Delta\gamma}{1-D_{n+1}} \left(\frac{-Y_{n+1}}{r} \right)^s \quad (16)$$

معادلات فوق به همراه موقعیت تنش حاصل، باید شرایط سازگاری در انتهای گام پلاستیک، را ارضا کنند (سطح تسلیم):

$$f_{n+1} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{\|s_{n+1}\|}{(1-D_{n+1})} - [\sigma_Y^0 + R(\varepsilon_{\text{eq},n+1}^p)] = 0 \quad (17)$$

مطابق الگوریتم اصلاح پلاستیک می‌توان معادله (۱۷) را به صورت زیر نوشت [۸]:

$$\sqrt{\frac{3}{2}} \|s^{\text{trial}}\| - 3G\Delta\gamma - (1-D_{n+1})[\sigma_Y^0 + R(\varepsilon_{\text{eq},n}^p + \Delta\gamma)] = 0 \quad (18)$$

و یا:

$$D_{n+1} = D(\Delta\gamma) \equiv 1 - \frac{\sqrt{\frac{3}{2}} \|s^{\text{trial}}\| - 3G\Delta\gamma}{[\sigma_Y^0 + R(\varepsilon_{\text{eq},n}^p + \Delta\gamma)]} \quad (19)$$

که D_{n+1} به صورت ضمنی تابع $\Delta\gamma$ خواهد شد. با قرار دادن معادله (۱۹) در معادله (۱۶)، یک معادله غیر خطی برحسب پارامتر پلاستیک $\Delta\gamma$ به دست می‌آید [۸]. در نهایت با محاسبه $\Delta\gamma$ ، می‌توان تنشها و آسیب بهنگام شده را استخراج کرد:

اگر در فضای تنشهای اصلی، تانسور تنش به صورت زیر نشان داده شود:

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix} \quad (23)$$

می توان با تعریف تابع براکت علامت به صورت معادله (24) مولفه های مثبت و منفی تنشهای اصلی را جدا کرد.

$$\langle x \rangle = \begin{cases} x & \text{if } x \geq 0 \\ 0 & \text{if } x < 0 \end{cases} \quad (24)$$

با اعمال تابع براکت علامت بر روی تانسور تنش می توان نوشت:

$$\sigma = \begin{bmatrix} \langle \sigma_1 \rangle & 0 & 0 \\ 0 & \langle \sigma_2 \rangle & 0 \\ 0 & 0 & \langle \sigma_3 \rangle \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \langle -\sigma_1 \rangle & 0 & 0 \\ 0 & \langle -\sigma_2 \rangle & 0 \\ 0 & 0 & \langle -\sigma_3 \rangle \end{bmatrix}, \quad (25)$$

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

که σ^+ ، تانسور مولفه های کششی تنش و σ^- ، تانسور مولفه های فشاری تنش خواهند بود.

۲-۳- تأثیر بسته شدن ترکها در رشد آسیب

بسته شدن ترکها در اثر تنشهای فشاری، تأثیر به سزایی در رشد آسیب دارد. در نظر گرفتن چنین عواملی در بسیاری از کاربردهای عملی ضروری به نظر می رسد. در فرایندهای مکانیکی نظیر اکستروژن که بارگذاری عمدتاً به صورت فشاری اعمال می شود، اثر بسته شدن ریزترکها کاملاً مشهود است. یکی از راههای اعمال چنین اثراتی در قانون رشد آسیب، توسط مرجع [۱] پیشنهاد شده است. در این روش تابع پتانسیل الاستیک، Ψ^e ، را برای یک ماده بدون آسیب بر حسب تانسور تنش به صورت زیر بیان می کند:

$$\Psi^e = \frac{1}{2\rho E} \left[(I + \nu) \sigma : \sigma - \nu (\text{tr} \sigma)^2 \right] \quad (26)$$

با توجه به تجزیه تانسور تنش به مولفه های کششی، σ^+ ، و فشاری، σ^- ، تابع پتانسیل الاستیک، Ψ^e ، به صورت زیر قابل بیان است:

$$\Psi^e = \frac{1}{2\rho E} \left[(I + \nu) \sigma^+ : \sigma^+ - \nu (\text{tr} \sigma)^2 \right] + \frac{1}{2\rho E} \left[(I + \nu) \sigma^- : \sigma^- - \nu (\text{tr} \sigma)^2 \right] \quad (27)$$

برای یک ماده آسیب دیده همسان و مطابق مفهوم تنش مؤثر، برای عبارت اول معادله (27)، ضریب $(1-D)$ و برای عبارت دوم، ضریب $(1-hD)$ ظاهر می شود:

$$\Psi^e = \frac{1}{2\rho E(1-D)} \left[(I + \nu) \sigma^+ : \sigma^+ - \nu (\text{tr} \sigma)^2 \right] + \frac{1}{2\rho E(1-hD)} \left[(I + \nu) \sigma^- : \sigma^- - \nu (\text{tr} \sigma)^2 \right] \quad (28)$$

از این رو می توان نرخ رهایی آسیب اصلاح شده را به صورت زیر به دست آورد:

$$Y = -\rho \frac{\partial \Psi^e}{\partial D} = \frac{-1}{2E(1-D)^2} \left[(I + \nu) \sigma^+ : \sigma^+ - \nu (\text{tr} \sigma)^2 \right] - \frac{h}{2E(1-hD)^2} \left[(I + \nu) \sigma^- : \sigma^- - \nu (\text{tr} \sigma)^2 \right] \quad (29)$$

در این صورت قانون رشد آسیب بر حسب نرخ رهایی انرژی آسیب اصلاح شده برابر است با:

$$\dot{D} = \left(-\frac{Y}{r} \right) \dot{\epsilon}_p^{\text{eq}} \quad (30)$$

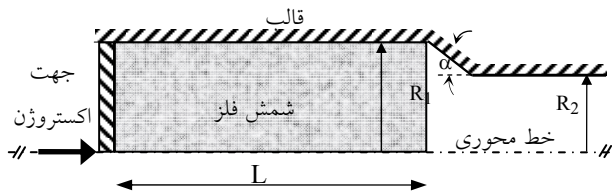
$$\dot{D} = \left\{ \frac{1}{2Er(1-D)^2} \left[(I + \nu) \sigma^+ : \sigma^+ - \nu (\text{tr} \sigma)^2 \right] + \frac{h}{2Er(1-hD)^2} \left[(I + \nu) \sigma^- : \sigma^- - \nu (\text{tr} \sigma)^2 \right] \right\} \dot{\epsilon}_p^{\text{eq}}$$

الگوریتم انتگرال گیری عددی از معادلات ساختاری در این حالت بر مبنای الگوریتم نگاشت برگشتی و همانند بخش ۲-۱ انجام می گیرد.

۳- کاربرد مکانیک آسیب در پیش بینی ترکهای

مرکزی در فرایند اکستروژن مستقیم

برای پیاده سازی مدل مکانیک آسیب پیوسته از نرم افزارهای تجاری که قابلیت استفاده تعریف رفتار ماده را دارند می توان استفاده کرد. در این نرم افزارها می توان انواع معادلات ساختاری را به کمک یک زیربرنامه، که توسط کاربر تهیه می شود، پیاده سازی کرد. در این تحقیق با تهیه یک زیر برنامه برای مدل ارائه شده در بخش (۲) و پیاده سازی آن در نرم افزار اجزای محدود ABAQUS، امکان به کارگیری این مدل در شبیه سازی فرایندهای مکانیکی فراهم شد. امتیاز اصلی



شکل ۱- شماتیک فرایند اکستروژن مستقیم

جدول ۱- خواص مکانیکی فولاد اکستروژن شده

مقادیر عددی	خصوصیات ماده
۲۱۰۰۰۰ MPa	E
۷۸۵۰ Kg/m ³	ρ
۰/۳	ν
۲۹۴MPa	σ_Y
$\sigma_Y(\epsilon_{eq}^p) = 294 + 159/3[1 - \exp(-5/12\epsilon_{eq}^p)]$ MPa	منحنی کارسختی
۰/۲ MPa	r
۱	s

مکانیکی و پارامترهای آسیب نمونه فولادی تحت فرایند اکستروژن، در جدول (۱) آمده است.

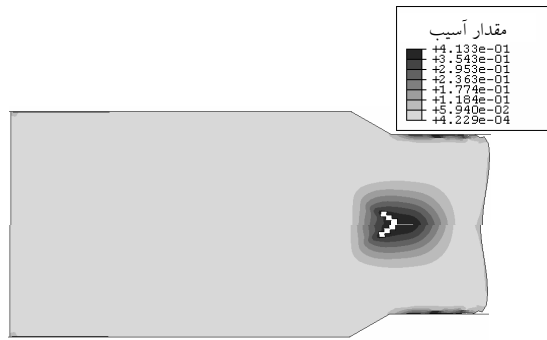
المانهای به کار رفته در مدل اجزای محدود، المانهای چهار گره‌ای تقارن محوری‌اند. مجموعه قالب و سنبه به صورت اجسام صلب در نظر گرفته شده‌اند. سنبه با سرعت ثابت ۱ میلی‌متر بر ثانیه حرکت می‌کند. تماس بین شمش و قالب به صورت اصطکاک کلمب با ضریب اصطکاک $\mu=0/05$ در نظر گرفته شده است. شبیه‌سازی ترکهای ماکروسکوپی و رشد آنان با حذف المانهایی که به آسیب بحرانی رسیده‌اند، صورت می‌گیرد [۱۰].

در این فرایند، یک میله استوانه‌ای به طول $L=75$ میلی‌متر و با شعاع اولیه $R_1=20$ میلی‌متر طی فرایند اکستروژن با ضریب کاهش سطح مقطع، $A_r=20\%$ و زاویه قالب $\alpha=30^\circ$ به شعاع نهایی، $R_2=16$ میلی‌متر می‌رسد، شرایط هندسی برای این فرایند به گونه‌ای انتخاب شده است که در محدوده وقوع ترکهای مرکزی، ناحیه نامطمئن، قرار می‌گیرد [۲].

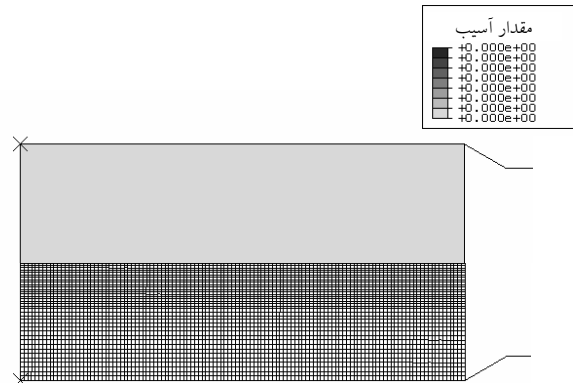
استفاده از زیر برنامه در یک کد تجاری، آن است که دامنه وسیعی از انواع المان، مدل‌های ماده و دیگر امکانات، نظیر حلگر دستگاه معادلات با راندمان بالا در اختیار برنامه نویس است.

شکل (۱) فرایند اکستروژن مستقیم تقارن محوری یک میله مدور را نشان می‌دهد. شمش با طول اولیه L و شعاع R_1 با عبور از یک قالب با زاویه α به شعاع R_2 تقلیل می‌یابد. ضریب کاهش سطح مقطع، $A_r=(R_2-R_1)/R_1$ ، زاویه قالب، α ، روانکاری سطح قالب، دمای فرایند و خواص ماده نظیر شکل‌پذیری نقش مهمی در کیفیت محصول نهایی و بروز ترکهای مرکزی در قطعه دارند [۲].

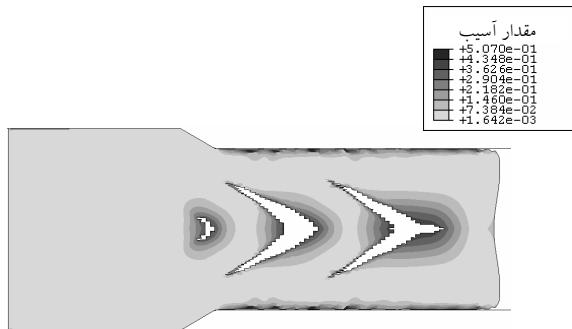
در این بخش، تأثیر هر یک از پارامترهای فوق به کمک مدل آسیب نرم معرفی شده در بخش ۲ مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ابتدا، برای اعتبارسنجی مدل آسیب از یک سو و صحت پیاده‌سازی روش عددی از طرف دیگر، فرایند اکستروژن معرفی شده در مرجع [۴] انتخاب می‌شود. خواص



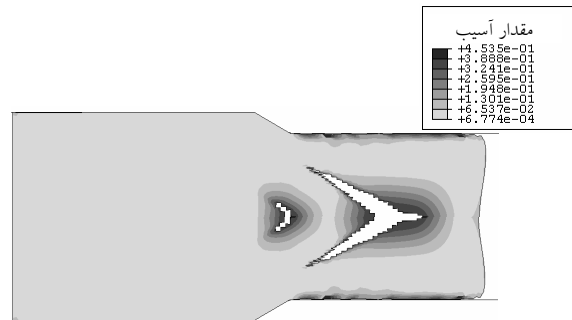
شکل ۲-ب) شکل گیری اولین ترک، $u=16.1 \text{ mm}$



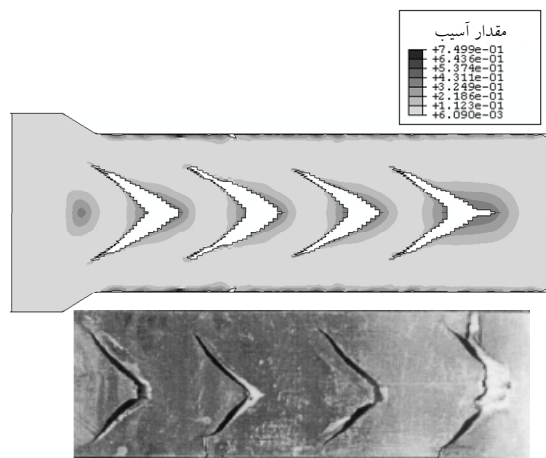
شکل ۲-الف) ابتدای فرایند، $u=0 \text{ mm}$



شکل ۲-د) شکل گیری ترک سوم، $u=40.6 \text{ mm}$



شکل ۲-ج) شکل گیری ترک دوم، $u=28.7 \text{ mm}$

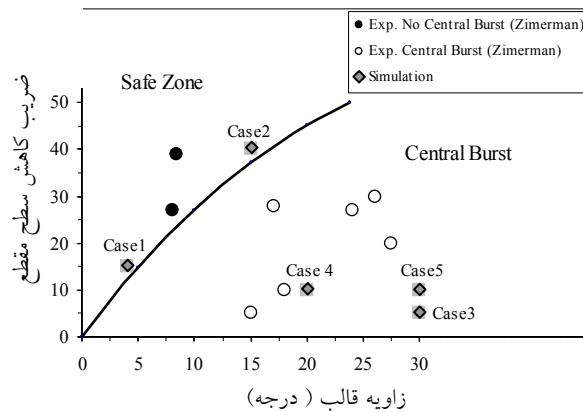


شکل ۲-ه) پایان فرایند، $u=65 \text{ mm}$ ، همراه با نمونه تجربی فرایند اکستروژن [۴]

شکل ۲- پیش‌بینی ترکهای مرکزی و منحنیهای آسیب در فرایند اکستروژن مستقیم ($\alpha=3^\circ$ ، $A_r = 70\%$)

شکل (۲) آمده است. شکل (۲-الف) سنبه را در موقعیت اولیه خود یعنی $u=0$ میلی‌متر به همراه المان‌بندی نمونه نشان می‌دهد. شکل (۲-ب) موقعیت سنبه را در $u=16/1$ میلی‌متر نشان می‌دهد. در این موقعیت اولین حفره مرکزی در خط محوری نمونه ایجاد شده است. این حفره در ادامه حرکت سنبه

به دلیل وجود تقارن محوری، تنها یک دوم سطح مقطع نمونه با استفاده از المانهای تقارن محوری مدل‌سازی و شرایط مرزی تقارن محوری بر خط محوری نمونه اعمال می‌شود. نتایج حاصل از این شبیه‌سازی همراه با منحنیهای آسیب برای چهار موقعیت شمش که از حرکت سنبه حاصل شده در



شکل ۳- نمودار زیمرمان، معرفی محدوده تشکیل ترکهای مرکزی در فرایند اکستروژن [۲].

ترکهای مرکزی استفاده کرد. در ادامه چگونگی تأثیر عوامل مهم بر وقوع ترکهای مرکزی در فرایند اکستروژن یعنی ضریب کاهش سطح مقطع نمونه، زاویه قالب، اصطکاک بین سطح تماس فلز با قالب و خواص مکانیکی فلز مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳-۱- بررسی اثر هندسه قالب

ترکهای مرکزی در فرایند اکستروژن مستقیم هنگامی اتفاق می‌افتد که شرایط هندسی و خواص ماده برای بروز این پدیده مهیا باشد. این شرایط توسط زیمرمان [۲] و آراواز [۳] و بسیاری دیگر از محققان معرفی شده است. در این بخش، فرایند اکستروژن برای پنج قالب با هندسه مختلف ولی برای یک نوع فولاد که خواص مکانیکی آن در جدول (۱) آمده است، شبیه‌سازی می‌شود:

حالت اول: ضریب کاهش سطح مقطع، $A_r = 1/15$ با زاویه قالب $\alpha = 4^\circ$.
 حالت دوم: ضریب کاهش سطح مقطع، $A_r = 1/40$ با زاویه قالب $\alpha = 15^\circ$.
 حالت سوم: ضریب کاهش سطح مقطع، $A_r = 1/5$ با زاویه قالب $\alpha = 30^\circ$.
 حالت چهارم: ضریب کاهش سطح مقطع، $A_r = 1/10$ با زاویه قالب $\alpha = 20^\circ$.
 حالت پنجم: ضریب کاهش سطح مقطع، $A_r = 1/10$ با زاویه قالب $\alpha = 30^\circ$.

شمس اولیه یک میله استوانه‌ای به شعاع $R_1 = 14/75$ میلی‌متر با طول $L = 75$ میلی‌متر برای هر یک از حالت‌های فوق

باز شده و به صورت یک ترک مرکزی در سطح مقطع شمش رشد می‌کند. در شکل (۲-ج) دو ترک مرکزی در جابه‌جایی $u = 28/7$ میلی‌متر سنبه ایجاد شده است. در ادامه فرایند سه ترک مرکزی در جابه‌جایی $u = 40/6$ میلی‌متر شکل می‌گیرد (شکل ۲-د). شکل (۲-ه) پایان فرایند همراه با چهار ترک مرکزی در جابه‌جایی $u = 65$ میلی‌متر در کنار نمونه تجربی [۴] را نشان می‌دهد. ترکهای سطحی در سطوح خارجی شمش، که زبری سطح خارجی محصول را به همراه دارد، در شکلهای فوق قابل مشاهده‌اند. ترکهای مرکزی هم جهت با جریان فلز و در امتداد زاویه قالب ایجاد می‌شوند. فاصله تقریبی بین دو ترک تقریباً ۳۱ میلی‌متر است.

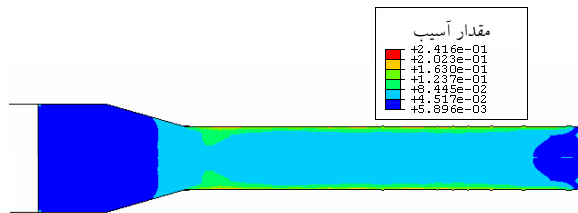
نتایج فوق منطبق بر کارهای تجربی زیمرمان و همکاران است [۲]. آنان با توجه به نتایج تجربی، معیاری برای ایجاد ترکهای مرکزی بر حسب ضریب کاهش سطح مقطع و زاویه قالب در فرایند اکستروژن معرفی کردند. در این معیار صفحه "ضریب کاهش سطح مقطع" بر حسب "زاویه قالب" به دو ناحیه تقسیم می‌شود:

ناحیه وقوع ترک مرکزی و دیگری ناحیه مطمئن، شکل (۳). با توجه به نمودار زیمرمان مسئله شبیه‌سازی شده فوق با $A_r = 1/20$ و $\alpha = 30^\circ$ در محدوده وقوع ترک واقع شده است.

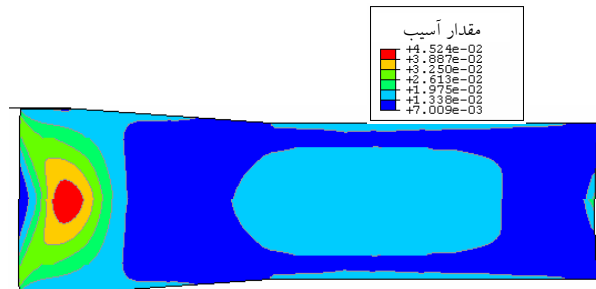
علاوه بر این، نتایج به دست آمده هماهنگ با تحقیق آراواز نیز هست [۳]. وی از مدل آسیب گرسون [۱۱] برای شبیه‌سازی

جدول ۲- تعداد ترکهای مرکزی در فرایند اکستروژن با هندسه‌های مختلف قالب

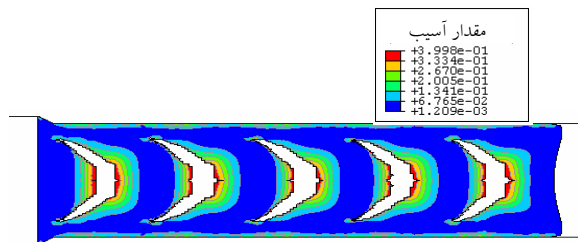
حالت	A_r	α (درجه)	تعداد ترک	فاصله دو ترک متوالی (mm)
اول	۱۵	۴	ندارد	----
دوم	۴۰	۱۵	ندارد	----
سوم	۵	۳۰	۲	۲۱/۳
چهارم	۱۰	۲۰	۵	۲۱/۷
پنجم	۱۰	۳۰	۴	۱۷/۵



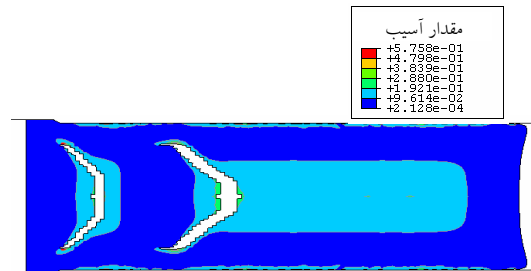
شکل ۴- ب) حالت دوم: $\alpha=15^\circ$, $A_r=40\%$



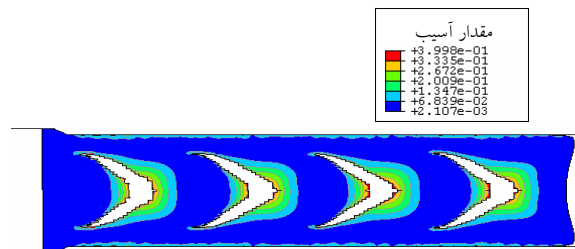
شکل ۴- الف) حالت اول: $\alpha=4^\circ$, $A_r=15\%$



شکل ۴- د) حالت چهارم: $\alpha=20^\circ$, $A_r=10\%$



شکل ۴- ج) حالت سوم: $\alpha=30^\circ$, $A_r=5\%$



شکل ۴- ه) حالت پنجم: $\alpha=30^\circ$, $A_r=10\%$

شکل ۴- پیش‌بینی ترک مرکزی و منحنیهای آسیب در محصول نهایی فرایند اکستروژن با قالبهای مختلف

حالت‌های اول و دوم در ناحیه مطمئن نمودار زیمرمان یعنی ناحیه‌ای که هیچ‌گونه ترک مرکزی رخ نمی‌دهد واقع شده‌اند. در حالت اول، مقدار آسیب در خط مرکزی نمونه حداکثر به $D=0/04$ می‌رسد که برای وقوع ترک کافی نیست. در حالت دوم، مقدار آسیب آن هم در سطوح خارجی نه در خط مرکزی

تحت فرایند اکستروژن قرار می‌گیرد. نتایج حاصل از این شبیه‌سازی در جدول (۲) آمده است. این نتایج در نمودار تجربی زیمرمان [۲] وارد شده‌اند، شکل (۳). منحنیهای آسیب در پایان فرایند برای پنج حالت فوق در شکل (۴) آمده است.

جدول ۳- تعداد ترکهای مرکزی در فرایند اکستروژن با شعاعهای مختلف شمش ورودی با، $A_r = 10\%$ ، $\alpha = 30^\circ$.

حالت	R_1 (mm)	L (mm)	تعداد ترک	فاصله دو ترک متوالی (mm)
اول	۱۵	۷۵	۴	۲۲
دوم	۲۵	۷۵	۳	۳۰
سوم	۳۵	۷۵	۲	۳۹/۴
چهارم	۶۰	۷۵	۱	----

۳-۳- بررسی اثر خواص شمش ورودی

از دیگر پارامترهای مهم اثرگذار در تشکیل ترکهای مرکزی در محصول فرایند اکستروژن مستقیم، خواص شمش ورودی به ویژه نرمی آن است. این خاصیت ماده در پارامترهای کارسختی و آسیب ماده به ویژه، σ ظاهر می شود. برای این منظور، شبیه سازی فرایند اکستروژن برای دو نرمی مختلف، یکی با $r = 0/2 \text{MPa}$ و دیگری با $r = 1 \text{MPa}$ که نرمی بیشتری از خود نشان می دهد، انجام می گیرد. هندسه شمش و قالب برای هر دو حالت یکسان و مشخصات آن عبارت است از: $R_1 = 22/25$ میلی متر، طول اولیه $L = 75$ میلی متر، $A_r = 10\%$ و زاویه قالب $\alpha = 30^\circ$. نتایج حاصل از دو شبیه سازی در شکل (۶) نشان داده شده است. برای محصولی با نرمی بیشتر، هیچ گونه ترک مرکزی حاصل نشد، شکل (۶-الف). در این حالت، حداکثر آسیب به مقدار $D = 0/09$ رسیده است که این مقدار برای وقوع ترک کافی نیست. در صورتی که برای محصولی با نرمی کمتر سه ترک مرکزی در خط محوری شمش به وجود آمده است. از این رو وقوع ترک مرکزی در فرایند اکستروژن برای ماده ای با نرمی بالا، به ندرت اتفاق می افتد.

۳-۴- بررسی اثر اصطکاک قالب با شمش فولادی

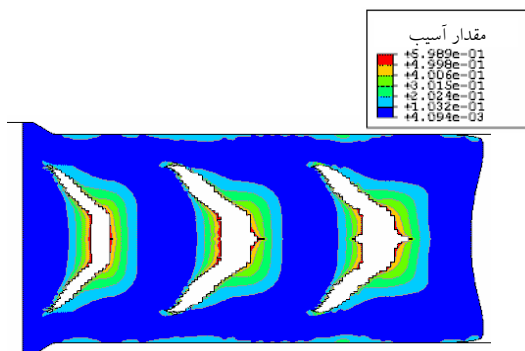
در فرایند اکستروژن مقدار اصطکاک بین سطح قالب و شمش یکی از پارامترهای مهم اثرگذار بر روی وقوع ترکهای مرکزی است که در این بخش مورد مطالعه قرار می گیرد. برای دستیابی به این هدف، فرایند اکستروژن با سه ضریب اصطکاک مختلف شبیه سازی می شود. ضرایب اصطکاک بین

نمونه، حداکثر به $D = 0/2$ می رسد که تنها ترکهای سطحی را به وجود می آورد و ترک مرکزی به وجود نمی آید. برای حالت سوم، دو ترک مرکزی، شکل (۴-ج)، در حالت چهارم، پنج ترک مرکزی، شکل (۴-د)، و برای حالت پنجم، چهار ترک مرکزی، شکل (۴-ه)، اتفاق افتاده است. فاصله بین دو ترک متوالی در جدول (۲) آمده است.

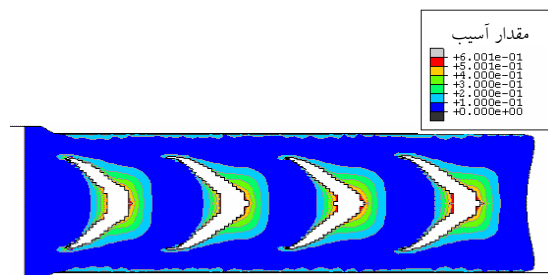
به طور خلاصه می توان گفت؛ اگر در فرایند اکستروژن مستقیم زاویه کم قالب و ضریب کاهش سطح مقطع فرایند بالا باشد؛ امکان ایجاد ترکهای مرکزی در خط محوری محصول از بین می رود و محصول نهایی بدون عیوب داخلی خواهد بود. از این رو زاویه تیز قالب همراه با ضریب کاهش سطح مقطع پایین در فرایند اکستروژن، پیدایش ترکهای مرکزی را به دنبال دارد.

۳-۲- بررسی اثر شعاع اولیه نمونه

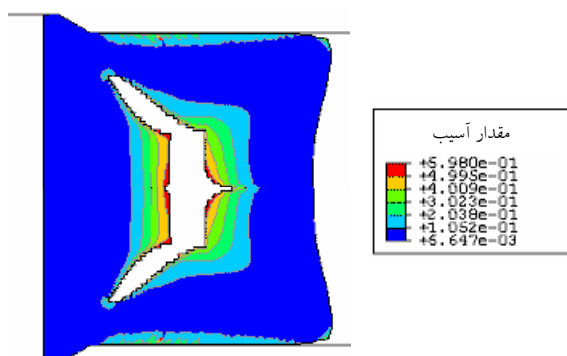
در این بخش، تأثیر شعاع اولیه شمش بر روی شکل گیری ترکهای مرکزی مورد بررسی قرار می گیرد. برای این هدف، شمش ورودی با چهار شعاع مختلف وارد یک قالب با ضریب کاهش سطح مقطع، $A_r = 10\%$ و زاویه $\alpha = 30^\circ$ می شود. خواص شمش فولادی در جدول (۱) آمده است. طول اولیه شمش در این فرایند ۷۵ میلیمتر در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از شبیه سازی این فرایند و ترکهای مرکزی ایجاد شده در جدول (۳) و شکل (۵) آمده است. شکل (۵) نشان می دهد با وجود ثابت بودن ضریب کاهش سطح مقطع و زاویه قالب، طول شعاع اولیه شمش فلز نقش مهمی در تعداد ترکهای مرکزی و فاصله متوالی بین دو ترک دارد.



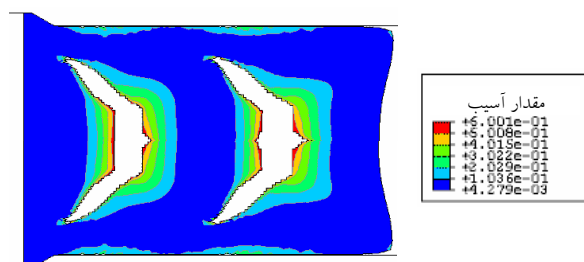
شکل ۵-ب) حالت دوم: $R_1 = 25 \text{ mm}$



شکل ۵-الف) حالت اول: $R_1 = 15 \text{ mm}$

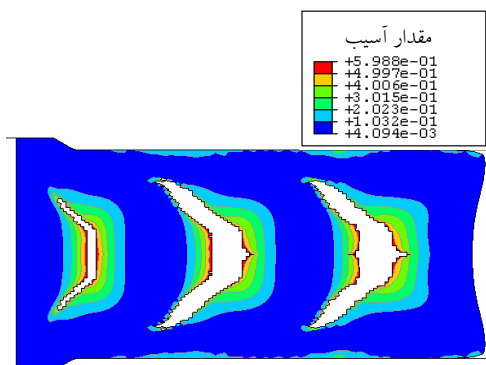


شکل ۵-د) حالت چهارم: $R_1 = 60 \text{ mm}$

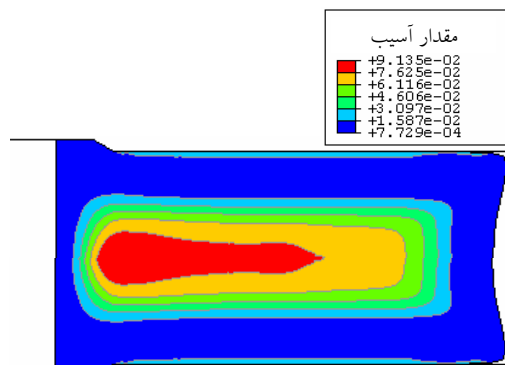


شکل ۵-ج) حالت سوم: $R_1 = 35 \text{ mm}$

شکل ۵- پیش‌بینی ترک مرکزی و منحنیهای آسیب برای شعاعهای مختلف شمش ورودی با، $A_r = 10^\circ$ ، $\alpha = 30^\circ$.



شکل ۶-ب) شمش با نرمی پایین.



شکل ۶-الف) شمش با نرمی بالا.

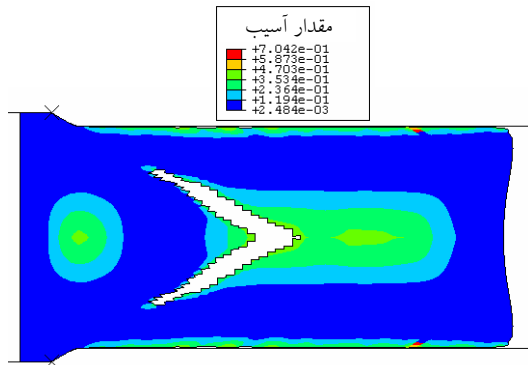
شکل ۶- تأثیر نرمی فلز بر وقوع ترک مرکزی برای فرایند اکستروژن با، $A_r = 10^\circ$ ، $\alpha = 30^\circ$.

خواص شمش فولادی در جدول (۱) آمده است. نتایج حاصل از این شبیه‌سازی در جدول (۴) و منحنیهای آسیب در پایان فرایند در شکل (۷) آمده است. با توجه به شکل (۷) واضح است درحالتی که ضریب اصطکاک پایین است (روغنکاری مناسب سطوح تماس) حداکثر تعداد ترکهای مرکزی در شمش،

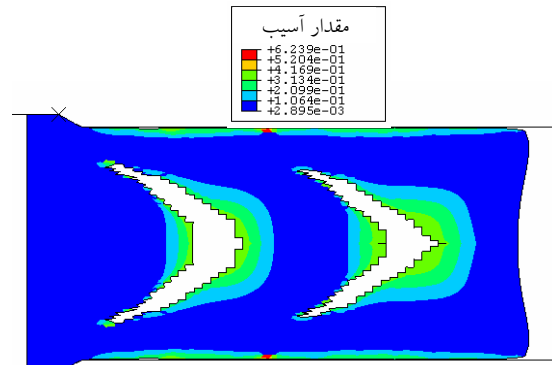
$\mu = 0$ ، که بیانگر لغزش کامل سطوح تماس شمش و قالب است، و $\mu = 0.25$ که بیانگر تماس فلز-فلز با چسبندگی بالاست، انتخاب شده‌اند. برای این شبیه‌سازی، شمش ورودی با شعاع $R_1 = 25$ میلیمتر و طول $L = 75$ میلیمتر وارد یک قالب با ضریب کاهش سطح مقطع، $A_r = 10^\circ$ و زاویه $\alpha = 30^\circ$ می‌شود.

جدول ۴- تعداد ترکهای مرکزی برای مقادیر مختلف اصطکاک با، $A_r = 10\%$ ، $\alpha = 3^\circ$.

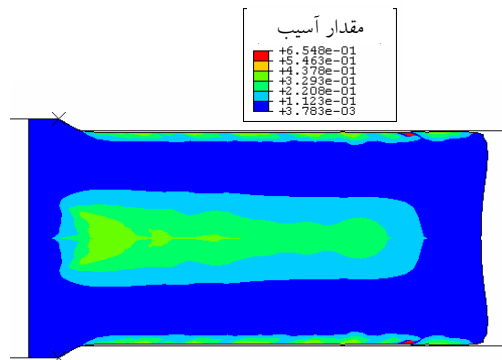
حالت	ضریب اصطکاک	تعداد ترک	فاصله دو ترک متوالی (mm)
اول	۰/۰۵	۲	۳۶
دوم	۰/۱	۱	----
سوم	۰/۱۵	ندارد	----



شکل ۷-ب) حالت دوم: $\mu = 0.1$.



شکل ۷-الف) حالت اول: $\mu = 0.05$.

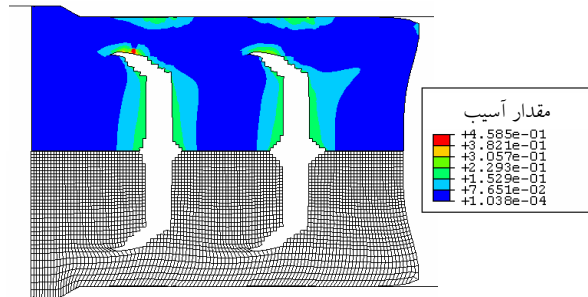


شکل ۷-ج) حالت سوم: $\mu = 0.15$.

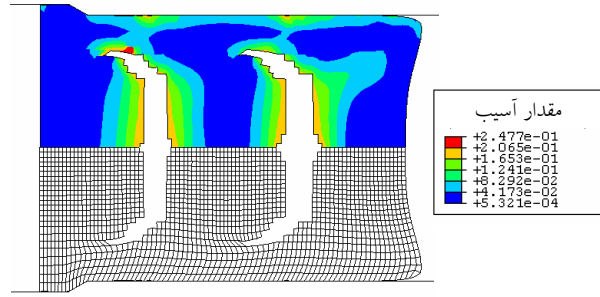
شکل ۷- تأثیر ضریب اصطکاک بین شمش فلز و سطح قالب بر وقوع ترک مرکزی با، $A_r = 10\%$ ، $\alpha = 3^\circ$.

مقدار آسیب در خط محوری محصول حداکثر به 0.2 می‌رسد که برای تشکیل ترک مرکزی کافی نیست. در عوض برای حالتی که اصطکاک بین فلز و قالب زیاد باشد ترکهای سطحی قابل توجهی در محصول نهایی به وجود می‌آید، شکل (۷-ج). از این رو افزایش اصطکاک، بروز ترکهای مرکزی را به تاخیر می‌اندازد ولی ترکهای سطحی مشهودی روی سطوح تماس شمش با قالب به وجود می‌آورد.

یعنی دو ترک به وجود می‌آید، شکل (۷-الف) و $\mu = 0.05$. برای حالت $\mu = 0.1$ با روغنکاری متوسط سطوح تماس یک ترک مرکزی در محصول نهایی ایجاد می‌شود، شکل (۷-ب). برای حالت $\mu = 0.15$ به عبارت دیگر روغنکاری کم سطوح، هیچ ترک مرکزی در شمش ایجاد نمی‌شود، شکل (۷-ج) و در این حالت، که تماس بین شمش و قالب دارای روغنکاری کم (یا بدون روغنکاری) صورت می‌گیرد؛ بیشترین



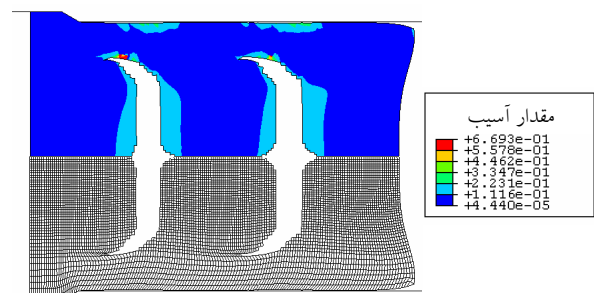
شکل ۸-ب) حالت دوم: شبکه‌ی متوسط.



شکل ۸-الف) حالت اول: شبکه درشت.



شکل ۸-د) - نمونه تجربی [۶].



شکل ۸-ج) حالت سوم: شبکه ریز.

شکل ۸- تأثیر اندازه المان بر وقوع ترک مرکزی با، $A_r = 10\%$ ، $\alpha = 30^\circ$.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی همراه با نمونه تجربی [۶] در شکل (۸) آمده است. شکل (۸) نشان می‌دهد که اندازه شبکه تأثیر زیادی بر وقوع ترکهای مرکزی و فاصله متوالی دو ترک ندارد. در صورتی که شکل ظاهری ترک مرکزی به اندازه شبکه وابسته است. علاوه بر این، تطابق نتایج شبیه‌سازی در پیش‌بینی ترک مرکزی و نتایج تجربی در شکل (۸) مشهود است.

۴- نتیجه‌گیری

در فرایندهای مکانیکی که بارگذاری ترکیبی در آنها وجود دارد، مولفه‌های فشاری تنش باعث بسته شدن ریزحفره‌ها می‌شوند و کند شدن رشد آسیب را به همراه دارند. مدل آسیب اصلاح شده کمتر می‌تواند به تاخیر افتادن رشد آسیب را به خوبی مدل کند. در این تحقیق، مدل آسیب اصلاح شده کمتر به خوبی توانست ترکهای سطحی و ترکهای مرکزی که در محصول فرایند اکستروژن مستقیم به وجود می‌آید را پیش‌بینی نماید. در این مقاله، اثر زاویه قالب، ضریب کاهش سطح مقطع،

۳-۵- بررسی اثر اندازه المان

در پایان، اثر اندازه شبکه بر روی بروز ترکهای مرکزی در فرایند اکستروژن مورد مطالعه قرار می‌گیرد. برای این منظور، نمونه‌ای به طول $L=75$ میلی‌متر و شعاع $R_1=22/25$ میلی‌متر، که قالبی با زاویه‌ای $\alpha=30^\circ$ ، کاهش سطح مقطع، 10% را تجربه می‌کند، شبیه‌سازی می‌شود. سرعت سنبه برای انجام فرایند 5 mm/s در نظر گرفته می‌شود. برای نمونه‌ای با شرایط فوق، با توجه به نتایج تجربی زیرمان، شکل (۳)، انتظار وقوع ترک مرکزی می‌رود. سه اندازه مختلف شبکه زیر در نظر گرفته شده است:

- الف) شبکه درشت: شامل المان مربعی تقارن محوری با اندازه متوسط $\Delta l = 16/1 \text{ mm}$ ، شکل (۸-الف)
- ب) شبکه متوسط: شامل المان مربعی تقارن محوری با اندازه متوسط $\Delta l = 0/78 \text{ mm}$ ، شکل (۸-ب)
- پ) شبکه ریز: شامل المان مربعی تقارن محوری با اندازه متوسط $\Delta l = 0/56 \text{ mm}$ ، شکل (۸-ج)

همراه دارد. این در حالی است که افزایش نرمی ماده ایجاد ترکهای مرکزی در فرایند اکستروژن را به تاخیر می‌اندازد. از این رو با نتایج حاصل از شبیه‌سازی فرایند اکستروژن مستقیم به کمک مکانیک آسیب می‌توان طراحی فرایند را بهبود بخشید و یا پارامترهای مؤثر را بهینه کرد.

پارامترهای ماده و اصطکاک بین سطح فلز و قالب در بروز ترکهای مرکزی در فرایند اکستروژن مورد بررسی قرار گرفت. در فرایند اکستروژن مستقیم، زاویه تیز قالب همراه با ضریب کاهش سطح مقطع پایین محصول امکان ایجاد ترکهای مرکزی را فراهم می‌سازد. اصطکاک زیاد بین شمش و سطح قالب، کاهش بروز ترکهای مرکزی و افزایش ترکهای سطحی را به

واژه نامه

1. continuum damage mechanics
2. ductility

مراجع

1. Lemaitre, J., *A Course on Damage Mechanics*, Springer Verlag, Berlin, 1992.
2. Zimmerman, Z., and Avitzur, B., "Analysis of the Effect of Strain Hardening on Central Bursting Defects in Drawing and Extrusion," *Trans. ASME, Journal of Engineering and Industrial*, pp. 92-135, 1970.
3. Aravas, N., "The Analysis of Void Growth that Leads to Central Bursts During Extrusion," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 34, No. 1, pp. 55-79, 1986.
4. Ko, D., C., and Kim, B., M., "The Prediction of Central Burst Defects in Extrusion and Wire Drawing," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 102, pp. 19-24, 2000.
5. Hambli, R., and Badie-Levet, D., "Damage and Fracture Simulation During the Extrusion Processes," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 186, pp. 109-120, 2000.
6. Saanouni, K., Mariage, J., Cherouat, A., and Lestriez, P., "Numerical Prediction of Discontinuous Central Bursting in Axisymmetric Forward Extrusion by Continuum Damage Mechanics," *Computers and Structures*, Vol. 82, pp. 2309-2332, 2004.
7. Lemaitre, J., "A Continuous Damage Mechanics Model for Ductile Fracture," *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 107, pp. 83-89, 1985.
8. Mashayekhi, M., Ziaei-Rad, S., Parvizian, J., Nikbin, K., and Hadavinia, H., "Numerical Analysis of Damage Evolution in Ductile Solids," *Structure Integrity & Durability*, Vol.1, No.1, pp. 67-82, 2005.
9. Simo, J. C., and Hughes, T. J., *Computational Inelasticity*, Springer Verlag, New York, 1998.
10. Mashayekhi, M., Ziaei-Rad, S., Parvizian, J., Hadavinia, H., and Niklewicz, J., "Ductile Crack Growth Based on Damage Criterion: Experimental and Numerical Studies," *Mechanics of Materials*, Vol. 39, pp. 623-636, 2007.
11. Gurson, A.L., "Continuum Theory of Ductile Rupture by Void Nucleation and Growth: part I- Yield Criteria and Flow Rules for Porous Ductile," *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 99, pp. 2-15, 1977.