گسترش آسیب نرم تحت شرایط تنش سه بعدی: عددی و تجربی

محمد مشایخی[*]، سعید ضیایی‌راد[**] و جمشید پرویزیان[***]

دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکدهٔ مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله: ۸٤/۹/۱۳– دریافت نسخه نهایی: ۸۵/۳/۲۷)

چکیده – **امروزه مکانیک آسیب پیوسته به عنوان یک ابزار کارا در شبیه‌سازی شکست نرم شناخته می‌شود. در این مقاله اعتبار مدل مکانیک آسیب پیوسته لمتر، به صورت تجربی و عددی برای فولاد A533B-C1 تحت شرایط تنش سه بعدی سنجیده می‌شود. ابتدا پارامترهای آسیب مدل توسط یک آزمایش کشش بر روی یک نمونه‌ی شیاردار در شرایط تنش سه بعدی به دست می‌آید. سپس این مدل برای نمونه‌ی تحت آزمایش به روش اجزای محدود شبیه‌سازی می‌شود. نتایج حاصل از آزمون و پیش‌بینی‌های تحلیل اجزای محدود تطابق قابل قبولی را نشان می‌دهند. در ادامه توانایی مکانیک آسیب در پیش‌بینی توزیع تنش در نقطه گلویی، تغییر شکل نهایی و زمان بروز شکست در یک نمونه کشش ساده به صورت عددی و تجربی محک زده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد پیش‌بینی‌های مدل آسیب نرم، تطابق خوبی با نتایج تجربی دارد. از دیگر نتایج این تحقیق، نشان دادن توانایی مکانیک آسیب در پیش‌بینی پدیده‌گلویی شدن و شکست نهایی برای نمونه‌ی کششی است.**

واژگان کلیدی : مکانیک آسیب پیوسته، شکست نرم، تنش سه محوره

Ductile Damage Evolution under Triaxial Stress Conditions: Computational and Experimental Evaluations

M. Mashayekhi, S. Ziaei-Rad, and J. Parvizian

Mechanical Engineering Department, Isfahan University of Technology
Industrial Engineering Department, Isfahan University of Technology

Abstract: ***The continuum mechanic simulation of micro-structural damage process is important in the study of ductile fracture mechanics. In this paper, the continuum damage mechanics model formulation proposed by Lematire has been validated against ductile damage evolution experimentally measured in A533B-C1 steel under stress triaxiality conditions. First, a***

---

* – دانشجوی دکترا ** – دانشیار *** – استادیار

procedure to identify the model parameters from test was defined. Then, the finite element model was used to simulate the experiment carried out on a notched flat rectangular bar. Good agreement was observed between the experimental results and finite element predictions. Next, the identified parameters on A533B-C1 steel were used to simulate the results from a conventional tensile test by finite element method. The specimen was prepared according to ASTM E08 standard. The stresses at necking stage and ultimate load calculated by the damage based method were compared with those obtained from the test. The comparisons indicate a good agreement between the simulated and the experimental results.

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

فهرست علائم

A	سطح مقطع نهایی	Y	نرخ رهایی انرژی آسیب
A_D	سطح مقطع آسیب دیده	$\boldsymbol{\varepsilon}$	تانسور کرنش
D	متغیر آسیب	$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p$	نرخ تانسور کرنش پلاستیک
$\dot{D}$	نرخ آسیب	$\dot{\varepsilon}^p_{eq}$	نرخ کرنش پلاستیک معادل
E	مدول یانگ	Φ	تابع تسلیم
e	تانسور کرنش انحرافی	$\dot{\gamma}$	ضریب سازگاری پلاستیک
G	مدول برشی	ν	نسبت پواسون
K	مدول حجمی	$\boldsymbol{\sigma}$	تانسور تنش کوشی
p	فشار هیدرواستاتیک	$\tilde{\boldsymbol{\sigma}}$	تانسور تنش موثر
R	رشد شعاعی سطح تسلیم	σ_{eq}	تنش معادل
r,s	پارامترهای آسیب وابسته به ماده	σ^0_Y	تنش تسلیم اولیه
s	تانسور تنش انحرافی	Ψ	پتانسیل اتلاف
v	کرنش حجمی		

۱- مقدمه

هدف از این تحقیق، توسعه یک مدل آسیب برای شبیه‌سازی رشد ترک در مواد نرم به کمک روش اجزای محدود است. بررسی رفتار مکانیکی حاکم بر سازه بر اساس مکانیک شکست کلاسیک در قالب پارامتر انتگرال J با محدودیتهایی همراه است. کاربرد روش مکانیک شکست کلاسیک تنها برای موادی با قابلیت شکل‌پذیری اندک، و مدلهایی با هندسه ترک کاملاً محدود میسر است. وسعت ناحیه گسستگی در مواد نرم و نیز محدودیت نواحی نوک ترک، توصیف رفتار ماده بر اساس مکانیک شکست را با دشواری روبرو می‌کند. مدلهای مکانیک آسیب، که در ادامه مورد بررسی تفضیلی قرار می‌گیرند، تقریباً مناسبترین روش برای ارزیابی رفتار شکست در مواد نرم به حساب می‌آیند. این مدلها می‌توانند شبیه‌سازی فرایند جوانه‌زنی، رشد و به هم پیوستن حفره‌ها را با استفاده از معادلات مکانیک محیطهای پیوسته به‌خوبی بیان کنند. مزیت بارز این روش در مقایسه با مکانیک شکست کلاسیک، وابستگی کامل پارامترهای مدل به ماده مورد بررسی، و در عوض استقلال آنها از هندسه مدل است. مدل مکانیک آسیب، امکان ارزیابی آسیب در هر نقطه‌ی سازه را، بدون توجه به هندسه مدل و بارگذاری اعمالی بر آن، مشروط بر آنکه مکانیزم رشد آسیب و میدان تنش-کرنش مشخص باشد، مهیا می‌سازد [۱].

آسیب در ماده، فرایند میکروسکوپی است که باعث تغییر در

ساختار ماده می‌شود. این فرایند زوال خواص مکانیکی ماده را به همراه دارد. هنگام وقوع آسیب، بافت ماده دچار تغییراتی شده که از جمله می‌توان به جوانه‌زنی، رشد و به هم پیوستن ریز حفره‌ها و ترکهای ریز اشاره کرد. این حفره‌ها می‌توانند تحت بارگذاریهای متفاوت، به یکدیگر ملحق شده، حفره‌های بزرگتری را به‌وجود آورده و در نهایت به شکست ماده منجر شوند.

اولین مدل در این زمینه توسط کاچانف ارائه شد [۱]. در این مدل کاهش سفتی و زوال ماده به ترکهای ریز درون آن نسبت داده شده است و می‌توان آن را توسط یک پارامتر آسیب ماکروسکوپی اندازه‌گیری کرد. در سال ۱۹۶۹ رایس و تریسی مدل آسیبی بر مبنای رفتار فیزیکی یک حفره واحد به شکل کره در یک محیط محدود که وارد حالت پلاستیک کامل شده است، ارائه کردند [۲]. مدلهای متنوعی که تاکنون در این عرصه ارائه شده است را می‌توان در سه دسته عمده طبقه‌بندی کرد: الف- مدلهای مبتنی بر معیار شکست ناگهانی، ب - پلاستیسیته متخلخل، ج- مکانیک آسیب پیوسته[1].

در اولین گروه از این مدلها وقتی یکی از متغیرهای خارجی، که وابسته به متغیرهای داخلی نیست، به مقدار بحرانی خود رسید، شکست اتفاق می‌افتد. به عنوان مثال روش رایس و تریسی که معیار رشد حفره بحرانی را معرفی کردند از این جمله است [۲].

در دومین گروه تأثیر آسیب نرم در شرایط تسلیم ماده لحاظ می‌شود. به عبارت دیگر به واسطه رشد منافذ، سطح تسلیم ماده مرتباً کوچک می‌شود. مدل آسیب گرسون (۱۹۷۷)، مدل اصلاح شده گرسون(۱۹۸۴) و مدل روسیلیر (۱۹۸۷) از این جمله‌اند [۳]. اگرچه مدل اصلاح شده گرسون در این گروه برای مطالعه و تحلیل شکست نرم و انتشار ترک به طور چشمگیری توسعه یافته است، ولی هنوز دارای محدودیتهای قابل توجهی است که از جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: ۱- به دست آوردن پارامترهای آسیب در این مدل (افزون بر ۹ ثابت) مشکل بوده و در مواردی این پارامترها دارای تأثیرات متقابل بر یکدیگرند. ۲- بعضی از پارامترهای مورد استفاده در این مدل دارای تعبیر فیزیکی نیستند، بنابراین به طور مستقیم قابل اندازه‌گیری نبوده و یک فرایند کالیبراسیون تکرار شونده، شامل شبیه‌سازی اجزای محدود و اطلاعات منتج از آزمایش، را طلب می‌کنند. ۳- انتقال به هندسه‌های گوناگون و داشتن حالتهای متفاوت تنش معمولاً رضایت‌بخش نیست، چرا که پارامترهای آسیب با آزمون کشش تک محوره بدون وجود شکاف و یا ترک به دست آمده‌اند. بنابراین تعدیل پارامترهای آسیب برای شبیه‌سازی صحیح شکست نرم تحت شرایط گوناگون اجتناب ناپذیر است [۳].

در سومین گروه، آسیب به عنوان یک متغیر داخلی در نظر گرفته می‌شود. این متغیر بر روی پاسخ ساختاری ماده در یک فرایند برگشت‌ناپذیر که در ریز ساختار ماده اتفاق می‌افتد، اثرگذار است [۱]. در دو دهه اخیر، مدلهای متنوعی از مکانیک آسیب پیوسته با فرمولبندیهای متفاوت ولی عمدتاً بر مبنای پتانسیل اتلاف آسیب ارائه شده‌اند [۴]. در این دیدگاه با فرض کرنش معادل و وجود پتانسیل اتلاف آسیب که از نظریه پلاستیسیته اقتباس شده، معادلات ساختاری برای مواد نرم آسیب دیده، حاصل می‌شود. به دنبال مدل اولیه لمتر، تاکنون مدلهای متعددی بر مبنای پتانسیل اتلاف آسیب بیان شده است. متأسفانه در این مدلها نیز محدودیتهایی وجود دارد که برخی از آنها عبارت‌اند از: ۱- انتخاب پتانسیل اتلاف آسیب، وابستگی کامل به ماده دارد. به طور مثال مدل آسیبی که مناسب برای مس است، برای آلومینیوم و فولاد و کربن مناسب نیست. ۲- معمولاً قانون رشد آسیب اعتبار خود را تنها با داده‌های تجربی از آزمایش کشش تک محوره کسب می‌کند. بنابراین انتقال چنین پارامترهایی به حوزه تنش سه بعدی لزوماً معتبر نخواهد بود. ۳- پیامدهای نسبی دیگر نظیر تأثیر تنش سه محوره[2] بر روی پارامترهای آسیب و قانون سینماتیک توسعه آسیب اغلب صرف‌نظر می‌شوند [۴].

در ابتدای این تحقیق، مدل آسیب پیوسته لمتر تشریح و فرمول‌بندی آن بیان شده است. سپس رشد آسیب نرم تحت

شرایط تنش سه بعدی بر روی فولاد A533B-C1 به روش تجربی مورد بررسی قرار گرفته و پارامترهای مورد نیاز برای مدل آسیب پیوسته لمتر تحت شرایط تنش سه بعدی استخراج شده است. در ادامه این مدل برای یک نمونه مستطیل شکل با شیار جانبی به روش اجزای محدود شبیه‌سازی، و نتایج آن با مقادیر ناشی از آزمایش مقایسه شده است. در ادامه و به عنوان مثالی دیگر، توانایی مکانیک آسیب در پیش‌بینی توزیع تنش در نقطه گلویی، تغییر شکل نهایی نمونه و زمان بروز شکست، در یک آزمایش استاندارد کشش ساده مورد بررسی قرار گرفته است. با استخراج منحنی "بارگذاری-تغییر مکان" از آزمون تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود آن به کمک پارامترهای آسیب استخراج شده برای فولاد A533B-C1 از آزمایش اول، مدل آسیب لمتر محک زده شد. دستیابی به توزیع تنش در محل گلویی و تعیین شکل نهایی نمونه از دیگر نتایج اقتباس شده از این شبیه‌سازی است.

۲- مدل مکانیک آسیب پیوسته

مبانی مکانیک آسیب پیوسته برای آسیب نرم اولین بار توسط لمتر ارائه شد [۵]. در اینجا 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 سطح تسلیم در ناحیه الاستیک، در تنش تسلیم واقعی و دیگر خواص ماده می‌شود. در اثر تغییر شکل پلاستیک در یک فرایند ترکهای ریز و ریز حفره‌ها ایجاد شده، رشد کرده و به یکدیگر ملحق می‌شوند تا آسیب نرم اتفاق بیافتد. از دیدگاه فیزیکی، آسیب بر حسب کاهش سطح مقطع موثر به واسطه ترکها و حفره‌های ریز در یک المان حجمی از ماده به‌صورت زیر قابل تعریف است:

$$D=\frac{A_D}{A},\qquad 0\le D<1 \qquad (۱)$$

A_D بیانگر سطح آسیب دیده و A سطح مقطع کل است. بر اساس این تعریف متغیر کمّی آسیب، بین صفر و یک قرار می‌گیرد که $D=0$ بیانگر حالت بدون آسیب و $D=1$ بیانگر گسیختگی مقطع است. در این حالت تنش مؤثر $\tilde{\boldsymbol{\sigma}}$ برای سطح مؤثر واقعی به صورت زیر قابل تعریف است:

$$\tilde{\boldsymbol{\sigma}}=\frac{\boldsymbol{\sigma}}{1-D} \qquad (۲)$$

از طرف دیگر بر مبنای کرنش موثر، معادلات ساختاری مواد آسیب دیده و مواد بدون آسیب یکسان است. تنها تنش کوشی با تنش مؤثر جایگزین خواهد شد و تغییر دیگری در معادلات ساختاری به‌وجود نمی‌آید. بر اساس این مفهوم می‌توان برای متغیر D نوشت:

$$D=1-\frac{E_D}{E_0} \qquad (۳)$$

که در آن E_0 و E_D به ترتیب مدول الاستیسیته ماده بدون آسیب و ماده آسیب دیده است.

با تعریف متغیرهای حالت و وابسته، تابع پتانسیل رفتار سینماتیکی حاکم بر توسعه متغیرهای موجود در مسئله را بیان می‌کند. قانون دوم ترمودینامیک برای مسایل الاستیک-پلاستیک-آسیب یعنی نامعادله کلازیوس- دوهم به صورت زیر قابل بیان است [٤]:

$$\boldsymbol{\sigma}:\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{p}-R\,\dot{\varepsilon}^{p}_{eq}-Y\dot{D}\ge 0 \qquad (۴)$$

در اینجا $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{p}$ تانسور کرنش پلاستیک، $\dot{\varepsilon}^{p}_{eq}$ نرخ کرنش پلاستیک معادل $\dot{\varepsilon}^{p}_{eq}=\sqrt{2/3}\,\|\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{p}\|$، و Y نرخ رهایی انرژی آسیب و یا متغیر وابسته به آسیب است:

$$-Y=\frac{\sigma_{eq}^2}{2E(1-D)^2}\left[\frac{2}{3}(1+\nu)+3(1-2\nu)\left(\frac{p}{\sigma_{eq}}\right)^2\right] \qquad (۵)$$

σ_{eq} تنش معادل، $\sigma_{eq}=\sqrt{3/2}\,\|\boldsymbol{s}\|$، که در آن $\boldsymbol{s}$ تانسور تنش انحرافی، p تنش هیدرواستاتیکی، $p=(1/3)\,\mathrm{tr}(\boldsymbol{\sigma})$، E مدول یانگ و ν ضریب پواسون است. عبارت $-Y\dot{D}$ بیانگر اتلاف انرژی به واسطه فرایند زوال داخلی ماده است. معادلات رشد متغیرهای داخلی از تابع پتانسیل اتلاف، Ψ، به‌دست 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 [۴]:

$$\Psi = \Psi^{p} + \Psi^{d} = \Phi + \frac{r}{(1-D)(s+1)}\left(\frac{-Y}{r}\right)^{s+1} \qquad (۶)$$

که r و s پارامترهای آسیب ماده و Φ تابع تسلیم ماده است و می‌توان آن را به صورت زیر بیان کرد:

$$\Phi(\boldsymbol{\sigma}, \varepsilon^{p}_{eq}, D) = \frac{\sigma_{eq}}{(1-D)} - [\sigma^{0}_{Y} + R(\varepsilon^{p}_{eq})] \qquad (۷)$$

در معادله‌های فوق σ^{0}_{Y} تنش تسلیم اولیه، R بیانگر رشد شعاعی سطح تسلیم است. برمبنای نظریه شرکت‌پذیر[۳]، جریان پلاستیک در جهت عمود بر سطح تسلیم بوده و از این رو معادله جریان پلاستیک عبارت است از:

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{p} = \dot{\gamma}\sqrt{\frac{3}{2}}\frac{\boldsymbol{s}}{\|\boldsymbol{s}\|} = \dot{\gamma}\frac{3}{2}\frac{\boldsymbol{s}}{\sigma_{eq}} \qquad (۸)$$

معادلات رشد متغیرهای داخلی عبارت‌اند از:

$$\dot{\varepsilon}^{p}_{eq} = -\dot{\gamma}\frac{\partial \Psi}{\partial R} = \dot{\gamma}$$
$$\dot{D} = -\dot{\gamma}\frac{\partial \Psi}{\partial Y} = \dot{\gamma}\frac{1}{1-D}\left(\frac{-Y}{r}\right)^{s} \qquad (۹)$$

$\dot{\gamma}$، ضریب سازگاری پلاستیک است که شرایط کوهن-تاکر را در بارگذاری و باربرداری ارضا می‌کند:

$$\dot{\gamma} \geq 0, \qquad \Phi \leq 0, \quad \dot{\gamma}\Phi = 0 \qquad (۱۰)$$

از آنجا که معادلات رشد متغیرهای داخلی دارای رفتار غیر خطی شدیدی است، باید از یک الگوریتم انتگرال‌گیری کارا در این زمینه استفاده کرد. بخش بعدی این انتگرال‌گیری را با جزییات بیشتری تشریح می‌کند.

۲-۱- انتگرال‌گیری عددی از معادلات ساختاری برای ماده‌ی آسیب دیده

در ادامه الگوریتم انتگرال‌گیری عددی از معادلات ساختاری الاستیک-پلاستیک-آسیب ارائه می‌گردد. مبنای این الگوریتم براساس روش استاندارد "پیش‌بینی الاستیک-اصلاح پلاستیک" است. مطابق این الگوریتم محاسبات مربوط به نقاط انتگرال‌گیری شبکه (نقاط گوس) در بازه $[t_n, t_{n+1}]$ به صورت زیر ارائه می‌شود.

اگر مقدار افزایش کرنش را برابر $\Delta\boldsymbol{\varepsilon}$ فرض کنیم:

$$\Delta\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}_{n+1} - \boldsymbol{\varepsilon}_{n} \qquad (۱۱)$$

و مقادیر $\boldsymbol{\sigma}_n$، $\boldsymbol{\varepsilon}^{p}_{n}$، $\varepsilon^{p}_{eq,n}$ و D_n در زمان t_n معلوم باشد، الگوریتم انتگرال‌گیری عددی باید مقادیر به‌هنگام شده $\boldsymbol{\sigma}_{n+1}$، $\boldsymbol{\varepsilon}^{p}_{n+1}$، $\varepsilon^{p}_{eq,n+1}$ و D_{n+1} را در پایان قدم زمانی t_{n+1} به دست آورد. قابل ذکر است که سازگاری مقادیر به‌هنگام شده با معادلات ساختاری باید در نظر گرفته شود.

در اولین مرحله از الگوریتم، ارزیابی موقعیت آزمایشی به صورت الاستیک انجام می‌پذیرد. در واقع در این پیش‌بینی آزمایشی، گام به صورت کاملاً الاستیک فرض می‌شود و متغیرهای داخلی نظیر آسیب و کرنش پلاستیک دارای هیچ رشدی نیستند. تانسور کرنش آزمایشی الاستیک و کرنش پلاستیک معادل آزمایشی عبارت‌اند از:

$$\boldsymbol{\varepsilon}^{e,trial}_{n+1} = \boldsymbol{\varepsilon}^{e}_{n} + \Delta\boldsymbol{\varepsilon}, \qquad \varepsilon^{p,trial}_{eq,\,n+1} = \varepsilon^{p}_{eq,\,n} \qquad (۱۲)$$

تانسور تنش آزمایشی الاستیک مربوطه به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\boldsymbol{\sigma}^{trial} = \boldsymbol{\sigma}_{n} + \boldsymbol{E} : \Delta\boldsymbol{\varepsilon} \qquad (۱۳)$$

که $\mathbf{E}$ تانسور الاستیسیته همسان استاندارد است. معادله (۱۳) قابل تفکیک به دو بخش تنش انحرافی و تنش هیدرواستاتیکی است:

$$\boldsymbol{s}^{trial} = \boldsymbol{s}_{n} + 2G\Delta\boldsymbol{e}, \qquad p^{trial} = p_{n} + K\Delta v \qquad (۱۴)$$

که G و K به ترتیب مدول برشی و مدول حجمی، $\mathbf{e}$ تانسور کرنش انحرافی، v کرنش حجمی و p تنش هیدرواستاتیکی است.

در مرحله دوم از الگوریتم شرایط سازگاری پلاستیک بررسی می‌شود. در واقع در این مرحله صحت و سقم پیش‌بینی الاستیک مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. با داشتن متغیرهای $\varepsilon^{p}_{eq,n}$ و D_n در زمان t_n، Φ^{trial} به صورت زیر محاسبه می‌شود:

جدول ۱- تحلیل شیمیایی یک نمونه از بلوک فولاد A533B-C1

%C	%Mn	%P	%S	%Si	%Cr	%Ni	%Mo
۰/۱۹	۱/۴۱	۰/۰۱۱	۰/۰۱۱	۰/۲۰	۰/۱۳	۰/۶۹	۰/۴۸

$$\Phi^{trial}=\sqrt{\frac{3}{2}}\frac{\|\boldsymbol{s}^{trial}\|}{(1-D_n)}-[\sigma_Y^0+R(\varepsilon_{eq,n}^p)] \qquad (۱۵)$$

اگر $\Phi^{trial}<0$ باشد، جریان پلاستیک وجود نداشته و افزایشی در آسیب و متغیرهای داخلی وجود ندارد، یعنی:

$$\boldsymbol{\sigma}_{n+1}=\boldsymbol{\sigma}^{trial},\quad \varepsilon_{eq,n+1}^p=\varepsilon_{eq,n}^p,\quad D_{n+1}=D_n \qquad (۱۶)$$

اگر $\Phi^{trial}\geq 0$ باشد اصلاح پلاستیک توسط الگوریتم نگاشت برگشتی[۴] انجام می‌پذیرد. بنابراین معادلات رشد $\boldsymbol{\varepsilon}^p$، $\varepsilon_{eq,n}^p$ و D با توجه به شرایط اولیه از موقعیت آزمایشی انتگرال‌گیری می‌شود. در این صورت معادلات (۸) و (۹) به صورت زیر در می‌آیند:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}^p=\boldsymbol{\varepsilon}_n^p+\Delta\gamma\sqrt{\frac{3}{2}}\frac{\boldsymbol{s}^{trial}}{\|\boldsymbol{s}^{trial}\|} \qquad (۱۷)$$

و

$$\begin{aligned}\varepsilon_{eq,n+1}^p&=\varepsilon_{eq,n}^p+\Delta\gamma\\ D_{n+1}&=D_n+\frac{\Delta\gamma}{1-D_{n+1}}\left(\frac{-Y_{n+1}}{r}\right)^s\end{aligned} \qquad (۱۸)$$

معادلات فوق باید با شرایط سازگاری تکمیل شوند. به عبارت دیگر موقعیت تنش در پایان قدم پلاستیک باید بر روی سطح تسلیم به‌هنگام شده قرار گیرد:

$$\Phi_{n+1}=\sqrt{\frac{3}{2}}\frac{\|\boldsymbol{s}_{n+1}\|}{(1-D_{n+1})}-[\sigma_Y^0+R(\varepsilon_{eq,n+1}^p)]=0 \qquad (۱۹)$$

با استفاده از اصول استاندارد در الگوریتم نگاشت برگشتی [۶] می‌توان معادلات گسسته سازی شده (۱۷) و(۱۸) را به یک معادله غیر خطی بر حسب ضریب پلاستیک به شکل زیر نوشت:

$$\begin{aligned}&\sqrt{\frac{3}{2}}\|\boldsymbol{s}^{trial}\|-3G\Delta\gamma-(1-D_{n+1})[\sigma_Y^0\\ &+R(\varepsilon_{eq,n}^p+\Delta\gamma)]=0\end{aligned} \qquad (۲۰)$$

و یا

$$D_{n+1}=D(\Delta\gamma)\equiv 1-\frac{\sqrt{\frac{3}{2}}\|\boldsymbol{s}^{trial}\|-3G\Delta\gamma}{[\sigma_Y^0+R(\varepsilon_{eq,n}^p+\Delta\gamma)]} \qquad (۲۱)$$

عبارت D_{n+1} به صورت ضمنی تابع $\Delta\gamma$ است. برای توضیحات بیشتر و استخراج معادلات به مرجع [۷] رجوع شود.

۳- استخراج پارامترهای آسیب

برای پیاده‌سازی مدل مکانیک آسیب پیوسته لازم است پارامترهای آسیب ماده، r و s از طریق آزمون کشش به‌دست آیند. در این تحقیق، با انجام یک آزمون کشش تحت شرایط تنش سه بعدی پارامترهای فوق استخراج شده‌اند. برای ارزیابی و محک زدن مدل آسیب پیوسته، مدل آسیب لمتر به کمک روش اجزای محدود مورد پیاده‌سازی قرار گرفته است. در بخش ۳-۲ نتایج حاصل از این شبیه‌سازی با نتایج آزمون مورد مقایسه قرار گرفته است.

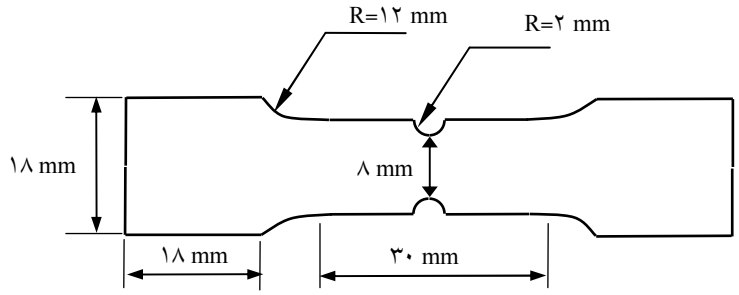
۳-۱- شرایط آزمایش

به طور معمول پارامترهای آسیب به کمک آزمایش کشش ساده بر روی نمونه‌ای با سطح مقطع یکنواخت به‌دست می‌آیند [۴]. این در حالی است که در عمل شرایط حاکم بر مسایل کاربردی معمولاً شرایط تنش سه بعدی است. از این‌رو در این تحقیق هندسه نمونه کششی به گونه‌ای اختیار شد تا شرایط حاکم بر آن تنش سه‌بعدی باشد. ماده مورد بررسی، بلوک فولادی با ضخامت ۱۱۰ میلی‌متر از جنس A533B-C1 است. ساختار میکروسکوپی این بلوک مارتنزیت تمپر شده است. تحلیل شیمیایی نمونه‌ای از بلوک فولادی به روش کوانتومتری انجام و نتایج حاصل در جدول (۱) آورده شده

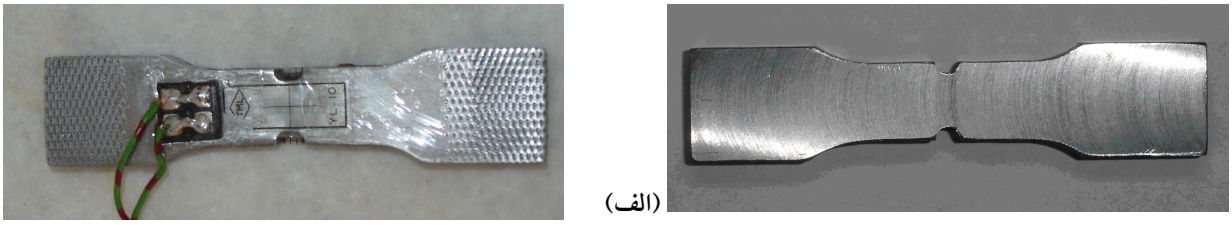
جدول ۲- خواص مکانیکی نمونه‌ای از فولاد A533B-C1

σ_Y^0 MPa	$\sigma_{T.S.}$ MPa	e_u %	E GPa	$^*k$ (MPa) hardening coefficient	n^* hardening power
۱/٤۱	٦۰۰	۹/۳	۲۰۰	۹۹۸	۰/۱۸

*- کار سختی ماده بصورت $\sigma_Y = k\varepsilon_p^{\,n}$ در نظر گرفته شده است.



شکل ۱- هندسه نمونه شیاردار برای تعیین پارامترهای آسیب



شکل ۲- نمونه شیاردار تهیه شده برای تعیین پارامترهای آسیب

الف) نمونه قبل از بارگذاری، ب) نمونه پس از بارگذاری و چگونگی اتصال کرنش‌سنج به نمونه

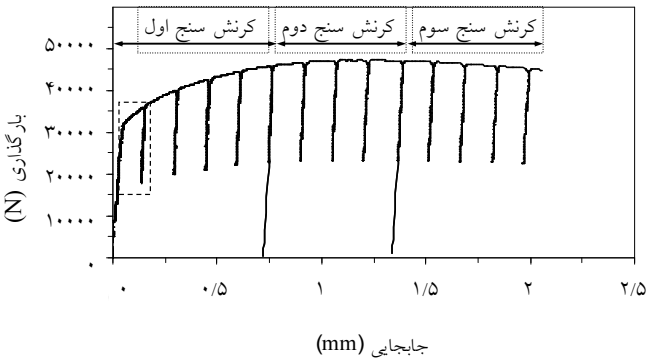
است. برای تعیین خواص مکانیکی ماده، ابتدا نمونه‌ای از آن مطابق استاندارد ASTM E8-04 تهیه و آزمایش کشش ساده بر روی آن انجام شد [۸]. آزمایش کشش ساده بر روی سه نمونه انجام گرفته و میانگین خواص مکانیکی استخراج شده از این آزمایش در جدول (۲) آورده شده است. سپس برای ارزیابی آسیب با شرایط تنش سه‌بعدی، یک میله تخت با مقطع مستطیل و دارای شیار جانبی از بلوک مذکور تهیه و مورد آزمایش قرار گرفت. ابعاد نمونه مورد نظر در شکل (۱) آورده شده است. برای انجام آزمایش مراحل زیر صورت پذیرفت:

الف) یک کرنش‌سنج با ابعاد $۱۰x۸\ mm^2$ در موضعی که نمونه دارای کوچکترین سطح مقطع است، با چسب اپوکسی به آن متصل شد. مقاومت اولیه این کرنش‌سنج برابر۱۲۰ اهم بوده و کرنش سنج قادر است تغییر شکلی تا ۲۰ درصد را تحمل کند، شکل (۲).

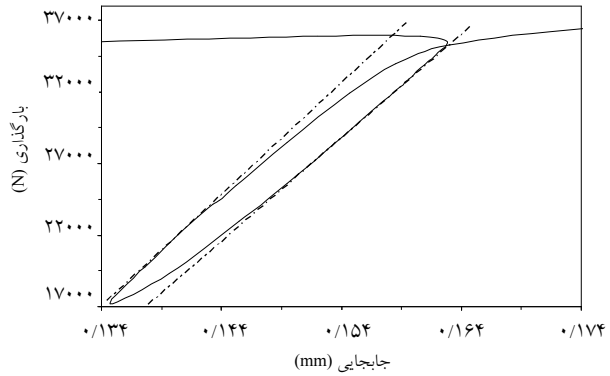
ب) نمونه در یک ماشین کشش با ظرفیت KN ۱۰۰ و سرعت بارگذاری mm/min ۰/۵ تحت کشش قرار گرفت.

ج) آزمایش تحت شرایط کنترل جابه‌جایی انجام پذیرفت. تعداد ۱۱ سیکل بارگذاری و باربرداری بر روی قطعه انجام شد. تغییر شیب الاستیک در سیکلهای بارگذاری و باربرداری با افزایش کرنش کاملاً مشهود بود.

د) فرایند بارگذاری تا پایان محدوده‌ی کاری کرنش‌سنج ادامه پیدا کرد. برای تعویض کرنش‌سنج باربرداری کامل از نمونه صورت گرفت. سپس نمونه از دستگاه کشش خارج شده و کرنش‌سنج جدید بر روی آن نصب و بارگذاری مجدداً انجام



شکل۳- نمودار تغییرات بار بر حسب جابه‌جایی در کوچکترین مقطع نمونه شیاردار (جزییات کادر خط‌چین در شکل(۴) آمده است)



شکل۴- جزییات نمودار باربرداری الاستیک برای محاسبه آسیب، مدول الاستیسیته ماده به کمک برازش یک منحنی خطی در حین باربرداری اندازه‌گیری شد

شد. فرایند بارگذاری تا به‌وجود آمدن حالت گلویی شدید در نمونه ادامه پیدا کرد.

۳-۱-۲- شناسایی پارامترهای آسیب

از آنجا که آسیب به صورت مستقیم قابل اندازه‌گیری نیست، ارزیابی آسیب به کمک اندازه‌گیری پارامترهای فیزیکی مرتبط با الاستیسیته و یا پلاستیسیته انجام می‌پذیرد. برای تعیین پارامترها مطابق روش پیشنهادی مرجع [۴] اقدام شد. مطابق معادله (۳) با ازدیاد تغییر شکل پلاستیک در ماده و رشد آسیب، مقدار مدول الاستیسیته کاهش می‌یابد. برای یافتن مقدار مدول الاستیسیته لازم است در حال آزمایش، عمل بارگذاری و باربرداری به صورت متوالی انجام پذیرد.

دستیابی به مدول الاستیسیته دقیق مستلزم اندازه‌گیری کرنشهای خیلی کوچک است. از آنجایی که پدیده آسیب به صورت محلی عمل می‌کند، ضروری است از کرنش‌سنجهای دقیق و با ابعاد کوچک استفاده شود. در این آزمایش از کرنش‌سنجهای با طول اولیه ۱۰ میلی‌متر استفاده شده است شکل (۲). به‌دلیل پدید آمدن حالت گلویی شدید در کوچکترین سطح مقطع از یک طرف و خارج شدن از محدوده مجاز کرنش‌سنج از طرف دیگر، لازم است کرنش‌سنجهای جدید در طول آزمایش جایگزین شدند. در این آزمایش برای استخراج تغییر مکان در نمونه از سه کرنش‌سنج استفاده شد. شکل (۳) نمودار تغییرات بار بر حسب کرنش در نمونه را نشان می‌دهد.

هنگام هر باربرداری از نمونه لازم است مدول الاستیسیته اندازه‌گیری شود. مطابق شکل (۴)، تخمین مدول الاستیسیته در حالت بارگذاری و باربرداری دارای حداکثر اختلافی حدود ۲ درصد بود. نتایج حاصل از انجام آزمایش که از معدل‌گیری مقادیر به‌دست آمده از باربرداری و بارگذاری محاسبه شده، در جدول (۳) آمده است. برای اطمینان از نتایج حاصل، آزمایش برای سه نمونه تکرار شد.

با توجه به معادله‌های (۵) و (۹) و شرایط آزمایش نمونه می‌توان نوشت:

$$\dot{D} = \frac{\sigma^2}{2Er(1-D)^2}\dot{\varepsilon}_p \qquad (۲۲)$$

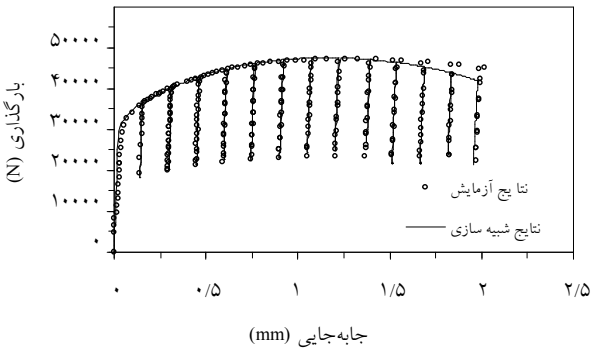
ویا

$$r = \frac{\sigma^2}{2E(1-D)^2\frac{dD}{d\varepsilon_p}} \qquad (۲۳)$$

با تعیین $\frac{dD}{d\varepsilon_p}$ از جدول (۳) و قرار دادن σ و D در هر نقطه از منحنی بارگذاری مقدار r از معادله (۲۳) قابل محاسبه است. مقدار r حاصل از متوسط‌گیری در نقاط مختلف، برابر با ۲/۵۴

جدول ۳- مدول‌های الاستیسیته کاهش یافته، کرنش پلاستیک و آسیب محاسبه شده

D آسیب،	ε_pکرنش پلاستیک،	E(Gpa) مدول الاستیسیته،
۰/۱۳۰۹	۰/۰۴۴۵	۱۸۷/۴
۰/۱۷۲۰	۰/۰۷۲۳	۱۶۸/۰
۰/۲۰۴۲	۰/۰۹۵۶	۱۵۸/۳
۰/۲۲۲۵	۰/۱۰۹۵	۱۵۳/۶
۰/۲۴۱۳	۰/۱۲۴۴	۱۴۹/۴
۰/۲۵۹۶	۰/۱۳۹۶	۱۴۵/۶
۰/۲۶۳۰	۰/۱۴۲۵	۱۴۵/۰
۰/۲۸۵۳	۰/۱۶۲۳	۱۴۰/۹
۰/۳۱۲۶	۰/۱۸۸۵	۱۳۶/۳
۰/۳۴۴۷	۰/۲۲۳۱	۱۳۱/۳
۰/۴۰۳۸	۰/۳۰۶۴	۱۲۲/۴
۰/۴۲۸۶	۰/۳۶۱۳	۱۱۸/۱



شکل۵- نمودار تغییرات بار بر حسب جابه‌جایی در کوچکترین مقطع نمونه‌ی شیاردار، حاصل از آزمون تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود

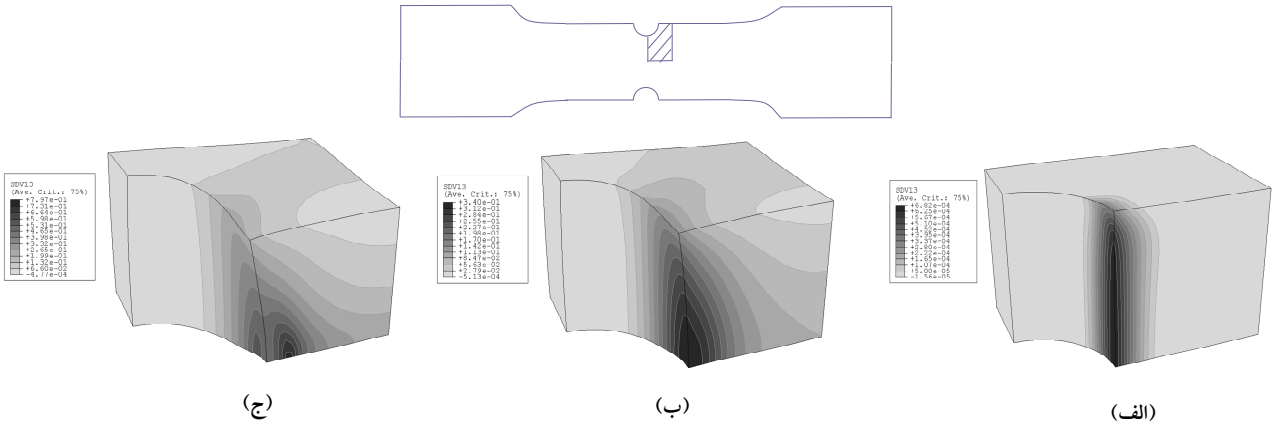
به‌دست آمد. مقدار s با اقتباس از مرجع [۴] برابر با ۱ اختیار شده که تطابق خوبی با نتایج تجربی نشان می‌دهد.

۳-۲- تحلیل اجزای محدود

برای ارزیابی عملکرد مدل آسیب به کار گرفته شده از یک سو و بازبینی فرمولبندی پیاده شده از سوی دیگر تحلیل اجزای محدود سه بعدی همراه با آسیب برای نمونه انجام گرفت.

هندسه نمونه تحت آزمایش، شرایط تنش صفحه‌ای و کرنش صفحه‌ای ندارد. بلکه تحت شرایط تنش سه بعدی است. بنابراین برای تحلیل دقیق آن استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود سه بعدی اجتناب‌ناپذیر است. برای پیاده‌سازی مدل مکانیک آسیب پیوسته از نرم افزار تجاری ABAQUS استفاده شد. در این نرم افزار با نوشتن یک زیر برنامه تحت عنوانUMAT مدل ارائه شده در بخش (۲) پیاده‌سازی شد. امتیاز اصلی استفاده از زیر برنامه در این 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.

به علت وجود تقارن، یک هشتم هندسه نمونه مدل‌سازی شده است. از المانهای هشت گره‌ای آجری برای شبکه‌بندی استفاده شد. با توجه به این نکته که نتایج حاصل از محاسبات مکانیک آسیب در حالت کلی وابسته به اندازه المان است، برای شبکه بندی نمونه چندین مدل المان محدود تهیه و پس از بررسی اثر اندازه المان، شبکه منتهی به حل مستقل از اندازه المان انتخاب شد. نتایج حاصل از این پیش‌بینی همراه با مقادیر حاصل از آزمایش در شکل (۵) با یکدیگر مقایسه شده است. تطابق بسیار خوبی در نمودار بار اعمال شده بر حسب کرنش محوری بین نتایج آزمایش و پیش‌بینی اجزای محدود وجود دارد. با توجه به آنکه المان هشت گره‌ای آجری رفتار سخت‌تری برای ماده



(ج) (ب) (الف)

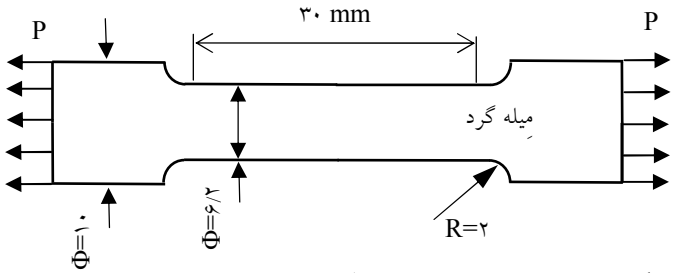
شکل ۶- کانتورهای آسیب در قسمت میانی نمونه شیاردار به ازای
الف) جابه‌جایی 0.04 mm در انتهای نمونه، ب) جابه‌جایی 1 mm در انتهای نمونه، ج) جابه‌جایی 1.2 mm در انتهای نمونه

پیش‌بینی می‌کند نتایج اجزای محدود در تخمین بار، حداکثر به ۱۰ درصد می‌رسد. کاهش سفتی ناشی از رشد آسیب هنگام باربرداری از نمونه، تاییدی بر نتایج آزمایش است. حداکثر اختلاف بین شیبهای بار-کرنش در باربرداری بین نتایج آزمایش و پیش‌بینی اجزای محدود حداکثر به ۱۸ درصد می‌رسد.

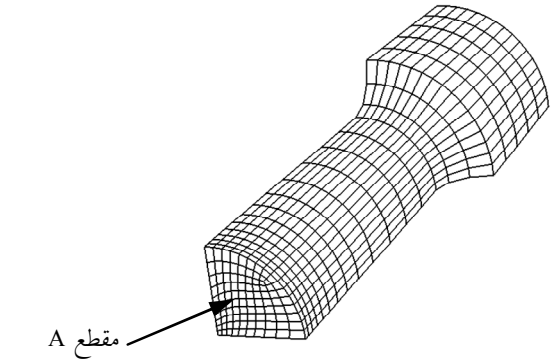
رشد آسیب در کوچکترین مقطع نمونه برای ارزیابی زمان و مکان وقوع شکست نرم قابل توجه است. در شکل (۶) کانتورهای آسیب به ازای بارگذاریهای مختلف رسم شده‌اند. بر خلاف انتظار شروع شکست نرم از مرکز سطح مقطع نمونه شروع نشده است. لازم به ذکر است در نمونه‌های با مقطع یکنواخت شکست نرم از مرکز نمونه شروع و به سمت خارج ادامه پیدا می‌کند. در این حالت یک رقابت بین تنش سه محوره و کرنش پلاستیک، قابل کنترل با اثر شیار، برای تعیین موقعیت شروع شکست در نزدیک شیار وجود دارد. در این نمونه شکست نرم نزدیک شیار شروع و سپس در سراسر مقطع گسترش می‌یابد. هنگامی که اولین المان دچار آسیب بحرانی شد با افزایش جزیی در بار اعمالی، شکست نرم سریعاً در مقطع ادامه پیدا می‌کند.

٤- پیاده‌سازی تجربی و عددی مکانیک آسیب در نمونه کششی

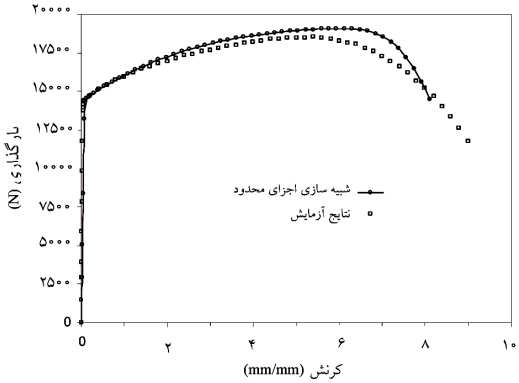
به عنوان مثال دوم یک آزمایش کشش ساده بر روی یک نمونه استاندارد مورد بررسی قرار می‌گیرد. تعیین نمودار تنش-کرنش مواد که در طراحی‌های الاستیک-پلاستیک کاربرد فراوانی دارد، مورد توجه محققان زیادی قرار گرفته است. آزمایش کشش به عنوان مهمترین روش در تعیین نمودار تنش-کرنش مواد شناخته شده است. آزمایش کشش علی‌رغم کاربرد فراوان آن، مشکل گلویی شدن[5] نمونه را به همراه دارد. هنگام بروز این پدیده تنش از حالت یک بعدی خارج شده و حالت تنش سه بعدی را به خود می‌گیرد. نتیجه این پدیده ایجاد تنشهای شعاعی و عرضی است که باعث ازدیاد تنش طولی برای ایجاد جریان پلاستیک می‌شود. بنابراین بخشی از نمودار که پس از نقطه پایداری قرار دارد را نمی‌توان به عنوان سطح تسلیم ماده مورد استفاده قرار داد. در روشهای تجربی برای محاسبه سطح تسلیم واقعی و جبران دخالت تنشهای عرضی در نقطه گلویی نمونه، از ضرایب اصلاحی بریجمن [۹]، تروزکوفسکی[۱۰] و یا دیویدنکو [۱۱] استفاده می‌گردد. در این مثال نشان خواهیم داد، مکانیک آسیب پیوسته توانایی پیش‌بینی توزیع تنش در نقطه گلویی، تغییر شکل و زمان بروز شکست نمونه، منطبق بر نتایج تجربی را خواهد داشت. برای دستیابی به هدف فوق آزمایش استاندارد کشش ساده انتخاب شد. ابتدا با انجام آزمایش مطابق استاندارد ASTM E8-04 منحنی "نیرو-تغییر مکان در امتداد نیرو" به‌دست آمد [۸]. سپس شبیه‌سازی



شکل۷- هندسه نمونه کششی، مطابق استاندارد ASTM E8-04



شکل۸- مدل اجزای محدود یک هشتم از نمونه کششی (المان‌بندی با توجه به تقارن انجام شده است)



شکل۹- نمودار "نیرو - جابه‌جایی در امتداد نیرو" برای نمونه کششی حاصل از آزمون تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود

آزمایش با در نظر گرفتن فرایند آسیب و با پارامترهای آسیب استخراج شده از مثال اول، به کمک روش اجزای محدود انجام گرفت. در پایان نتایج ناشی از شبیه‌سازی با نتایج آزمایش مقایسه شده است.

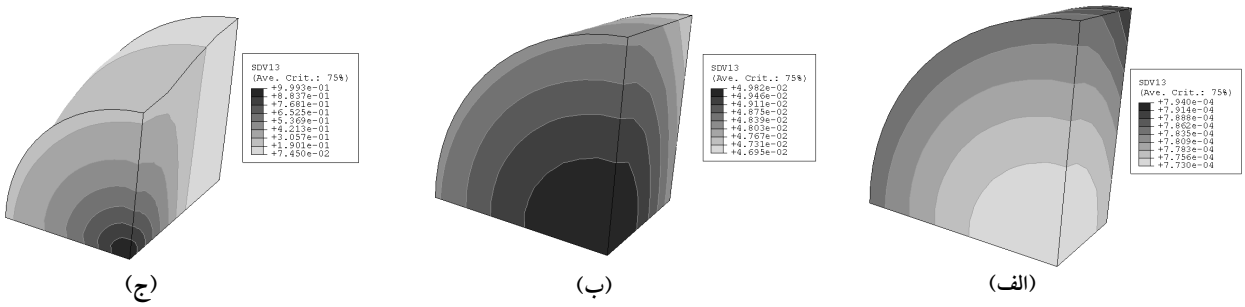
٤-١- روش آزمایش

برای تعیین منحنی "نیرو-تغییر مکان در امتداد نیرو" مطابق استاندارد ASTM E8-04 عمل شد. ماده مورد بررسی، همان فولاد A533B-C1 است که خواص مکانیکی آن در جدول (۲) آمده است. نمونهٔ کششی با قطر ۶/۲ میلی‌متر مطابق شکل (۷)، از بلوک فولادی آماده و مورد آزمایش قرار گرفت. نمونه در یک ماشین کشش ۱۰۰KN با سرعت ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه تحت کشش قرار داده شد. با استفاده از سیستم ثبت ماشین و سیگنالهای سلول‌بار[۶] و اکستنسیومتر، نمودار دقیق "نیرو- جابه‌جایی در امتداد نیرو" ترسیم شد. دقت اکستنسیومتر ۰/۰۰۵ میلی‌متر در جابه‌جایی پنج میلی‌متر و با دقت ۹۹/۹٪

دارای رفتار خطی بود. شکل (۹) نمودار تغییرات بار بر حسب جابه‌جایی در امتداد نیرو را برای نمونه کششی نشان می‌دهد.

٤-٢- شبیه‌سازی نمونه کششی به کمک مکانیک آسیب

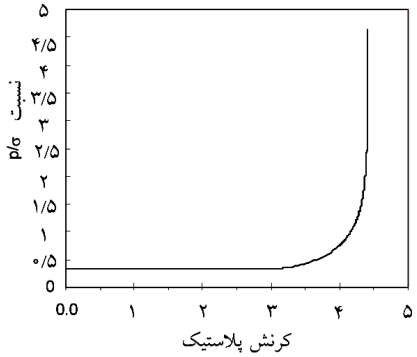
برای اعتبار سنجی مدل آسیب و نشان دادن توانایی مکانیک آسیب، نمونه کششی با مدل آسیب محک زده شد. با توجه به تقارن موجود در نمونه کششی، یک هشتم هندسه نمونه مدل‌سازی شد. از المانهای هشت گره‌ای آجری برای شبکه‌بندی استفاده شد، شکل (۸). شرایط موجود در آزمایش بر روی مدل نمونه اعمال شد. برای بارگذاری یک طرف مدل با تغییر مکان صفر ثابت شده و طرف دیگر نمونه شرط جابه‌جایی اعمال شد. بارگذاری تا هنگامی ادامه پیدا کرد که مقدار آسیب برای اولین بار در نقاط انتگرال‌گیری به مقدار بحرانی $D_{cr}=0.9$ رسید. نتایج حاصل از این پیش‌بینی همراه با مقادیر حاصل از آزمایش در شکل (۹) با یکدیگر مقایسه شده‌اند. تطابق در نمودار بار اعمال شده بر حسب کرنش محوری بین پیش‌بینی اجزای محدود



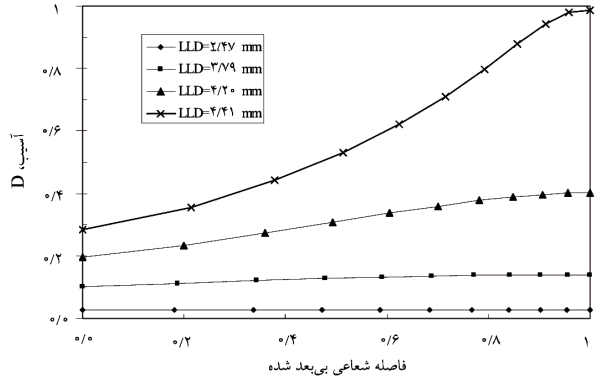
(ج) (ب) (الف)

شکل ۱۰- کانتورهای آسیب در قسمت میانی نمونه کششی، به ازای

الف- جابه‌جایی ۰/۰۹۶ mm در انتهای نمونه، ب- جابه‌جایی ۳/۲۷ mm در انتهای نمونه، ج- جابه‌جایی ۴/۴۱ mm در انتهای نمونه



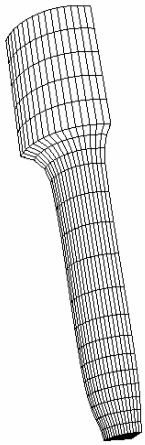
شکل ۱۱- نمودار رشد تنش سه محوره در المان مرکز نمونه



شکل ۱۲- رشد آسیب در امتداد شعاعی به ازای جابه‌جاییهای مختلف، LLD

همراه با آسیب و نتایج تجربی بسیار مشهود است. رشد آسیب در کوچکترین مقطع نمونه، مقطع A، به کمک کانتورهای آسیب به ازای بارگذاریهای مختلف در شکل (۱۰) نشان داده شده‌است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در قدمهای نخست بارگذاری، آسیب در لبه خارجی سطح مقطع A نمونه اتفاق می‌افتد. با افزایش بارگذاری سطح آسیب دیده به سمت داخل نمونه حرکت می‌کند و در قدمهای پایانی با تغییر مکانی برابر با ۴/۴۱۵ میلی‌متر مقدار آسیب به بیشینه خود، آسیب بحرانی، در مرکز نمونه خواهد رسید. مطابق این پیش‌بینی شکست اولیه در مرکز نمونه اتفاق می‌افتد و به سمت خارج گسترش می‌یابد. این پیشگویی منطبق بر نتیجه آزمون انجام گرفته، و دیگر نتایج تجربی نیز هست [۱۲]. علت رشد سریع آسیب در مرکز نمونه را می‌توان به وابستگی شدید رشد آسیب به تنش سه محوره، $\frac{p}{\sigma_{eq}}$، نسبت داد. این نسبت در مرکز نمونه مطابق شکل (۱۱) در قدمهای پایانی بارگذاری با تغییرات شدیدی به بیشترین مقدار خود می‌رسد. در این شبیه‌سازی ملاحظه می‌شود رشد آسیب در صفحه میانی نمونه، مقطع A، در جهت شعاع به صورت یکنواخت اتفاق نمی‌افتد. شکل (۱۲) نشان می‌دهد در ابتدای فرایند مقدار آسیب بیشینه در لبه خارجی نمونه روی می‌دهد. در ادامه فرایند با افزایش بار گذاری و متاثر از آن افزایش تنش سه محوره باعث می‌شود ناحیه بحرانی به سمت مرکز نمونه حرکت کند. در اینجا خاطر نشان می‌شود نظریه الاستیک- پلاستیک بدون آسیب بر مبنای مدل فون میزز و با معیار شکست کرنش پلاستیک معادل، شروع شکست نرم نمونه را از لبه خارجی مقطع نمونه پیش‌بینی می‌کند که منطبق بر نتایج تجربی نیست. در شکل (۱۳) نمونه آزمایش شده پس از شکست با شکل نمونه در مرحله پایانی بارگذاری حاصل از شبیه‌سازی با یکدیگر مقایسه شده‌اند. می‌توان حالت گلویی و

(الف)



(ب)

شکل۱۳- نمونه کششی پس از شکست الف- حاصل از آزمایش، ب- حاصل از شبیه‌سازی

بسیاری از موارد دیگر را در این دو تصویر با یکدیگر مشاهده و مقایسه کرد.

۵- بحث و بررسی نتایج

یکی از معیارهای صحت نتایج روش اجزای محدود، بررسی تغییر در پاسخ به ازای تغییر در اندازه شبکه المان‌بندی است. با ریز کردن شبکه المان‌بندی و تکرار تحلیل، می‌توان میزان خطای نسبی ایجاد شده در مقدار آسیب را بررسی کرد. برای نمونه کششی تحلیل برای یک شبکه با المان‌بندی تا دو برابر ریزتر انجام گرفت و اختلاف آسیب برای دو شبکه به بیش از یک درصد نرسید که نشانگر همگرایی در حل است.

مقایسه پاسخهای روش اجزای محدود با نتایج تجربی، انجام گرفته در این تحقیق، نیز صحت روش عددی را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از پیش‌بینی روش اجزای محدود در بخش (۳-۲)، با پارامترهای آسیب استخراج شده، همراه با مقادیر حاصل از آزمایش در شکل (۵) با یکدیگر مقایسه شده است. تطابق خوبی در نمودار بار اعمال شده بر حسب کرنش محوری وجود دارد. اختلاف حداکثر ۱۰ درصدی در مراحل پایانی بارگذاری این دو منحنی را می‌توان به رفتار سخت‌تری که المان هشت گره‌ای آجری در روش اجزای محدود برای ماده پیش‌بینی می‌کند نسبت داد. افت شیب منحنی هنگام باربرداری از نمونه، ناشی از رشد آسیب، تاییدی دیگر بر نتایج آزمایش است. ارزیابی زمان و مکان وقوع شکست نرم، با بررسی رشد آسیب در کوچکترین مقطع نمونه میسر می‌شود. با توجه به کانتورهای آسیب در شکل (۶) محل وقوع شکست نرم قابل پیش‌بینی است. در این نمونه شکست از نزدیک شیار شروع و سپس در سراسر سطح مقطع گسترش می‌یابد. با استفاده از مدل آسیب می‌توان شکست نمونه به‌دلیل رشد آسیب را به دو پارامتر تنش سه محوره و کرنش پلاستیک موثر نسبت داد. در اینجا اثر شیار، این دو پارامتر را به گونه‌ای تعیین کرده که شکست نمونه از نقطه‌ای در نزدیک شیار شروع می‌شود. در صورت حذف شیار شروع شکست نرم از مرکز سطح مقطع نمونه خواهد بود که منطبق بر نتایج تجربی است.

نمونه کششی که برای اعتبار بخشی مدل آسیب در این تحلیل اجزای محدود مورد بررسی قرار گرفت با دقت قابل قبول نتایج تجربی را دنبال می‌کند. بارگذاری در این شبیه‌سازی تا هنگامی ادامه پیدا کرد که مقدار آسیب برای اولین بار در نقاط انتگرال‌گیری به مقدار بحرانی 0.9 رسید. شکل (۹) نتایج حاصل از پیش‌بینی مدل آسیب نرم و نتایج آزمایش را با یکدیگر مقایسه کرده است. تطابق قابل قبولی در نمودار بار اعمال شده بر حسب کرنش محوری بین پیش‌بینی اجزای محدود همراه با آسیب و نتایج تجربی وجود دارد. عدم تطابق در نواحی انتهای شبیه‌سازی را شاید بتوان به رفتار سخت‌تری

که در روش اجزای محدود وجود دارد، نسبت داد. شکل (۱۰) چگونگی رشد آسیب در کوچکترین مقطع نمونه‌ی کششی، مقطع A، را نشان می‌دهد. در ابتدای بارگذاری، آسیب در لبه بیرونی سطح مقطع A نمونه اتفاق می‌افتد. با افزایش بارگذاری آسیب به سمت داخل سطح نمونه حرکت و در انتهای بارگذاری مقدار آسیب به بیشینه مقدار خود، آسیب بحرانی، در مرکز نمونه می‌رسد. مطابق این پیش‌بینی شکست اولیه در مرکز نمونه اتفاق می‌افتد و سپس به سمت خارج گسترش می‌یابد. این پیش‌بینی منطبق بر نتیجه آزمون انجام گرفته است. بررسی سطح نمونه کششی پس از شکست کامل نشان داد که مرکز سطح مقطع A، دارای گودی و زبری فراوان است. در حالی‌که سطوح خارجی‌تر در سطح مقطع A، سطوحی صاف و بدون گودی و زبری بودند. این مشاهده بیانگر آن است که به دلیل بارگذاری، حفره‌ها در مرکز سطح نمونه رشد کرده و سپس به یکدیگر پیوسته‌اند و شکست نمونه را از مرکز سطح مقطع به‌وجود آورده‌اند.

از دیگر نتایج این تحقیق، امکان دستیابی به شکل نهایی نمونه کششی پس از شکست، توسط شبیه‌سازی مدل آسیب نرم است. پدیده‌ی گلویی شدن با دقت قابل توجه در شکل (۱۳) بین نمونه آزمایش شده پس از شکست و نمونه حاصل از شبیه‌سازی مقایسه شده است.

٦- نتیجه‌گیری

در این مقاله اثر تنش سه محوره بر روی رشد آسیب نرم در فلزات به صورت تجربی و عددی مورد ارزیابی قرارگرفت. برای مدل آسیب نرم از مدل لمتر استفاده شد. تنش سه محوره در رشد آسیب نقش اصلی را بازی می‌کند این امر با کاهش نرمی ماده هنگامی که تنش سه محوره افزایش پیدا می‌کند، تشریح شد. همچنین رشد آسیب نرم با تنش سه محوره و کرنش پلاستیک به کمک روش اجزای محدود تعیین شد. پیش‌بینیهای مدل آسیب نرم تطابق بسیار خوبی با نتایج آزمون کشش ساده دارد. مکانیک آسیب به‌خوبی توانست پدیده‌های محلی نظیر پدیده گلویی شدن و شکست نهایی نمونه را پیش‌بینی کند.

قدردانی

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند از همکاریهای صمیمانه "مرکز تحقیقات و تولید سوخت هسته‌ای اصفهان" به دلیل در اختیار قرار دادن آزمایشگاه مکانیکی آن مرکز برای انجام آزمایشهای تجربی سپاسگزاری کنند. همچنین از آقای مهندس ناجی مسئول محترم این آزمایشگاه صمیمانه تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

واژه نامه

1. continuum damage mechanics
2. triaxiality
3. associative
4. return mapping
5. necking
6. load cell

مراجع

1. Lemaitre, J., and Chaboche, J.L., *Mechanics of Solid Materials*, Cambridge University Press, 1990.
2. Rice, J.R., and Tracy, D.M., "On Ductile Enlargement of Triaxial Stress Field," *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 17, pp. 210-217, 1969.
3. Lemaitre, J., *Hand Book of Materials Behavior Models*, John Wiley, 2002.
4. Lemaitre, J., *A Course on Damage Mechanics*, Springer-Verlag, 1992.
5. Lemaitre, J., "A Continuous Damage Mechanics Model for Ductile Fracture," *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 107, pp. 83–89, 1985.
6. Simo, J.C., and Hughes, T., *Computational Inelasticity*, Springer-Verlag, New York, 1998.
7. Mashayekhi, M., Ziaei-Rad, S., Parvizian, J., Nikbin, K., and Hadavinia, H., "Numerical Analysis of Damage Evolution in Ductile," *Structure integrity & Durability*, Vol.1, No.1, PP. 67-82, 2005.

8. ASTM E 8 – "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials," Annual book of ASTM Standards, 1993.
9. Bridgman, P.W., *Studies in Large Plastic Flow and Fracture*,. Harvard University Press, 1964.
10. Davidenkov N.N., and Spridonova N. J., "Mechanical Method of Testing Analysis of the State of Stress in the Neck of a Tension Test Specimen," *proc. Am. Soc. Test. Mater*., 46, 1996.
11. Truszkowfski, W., and Jasienski, Z., "An Experimental Analysis of the Strain distribution in the Neck of a Tensile Specimen," *Journal of Institute of Metal*, Vol. 92, pp 225-300, 1993.
12. Hancock, J., and Mackenzie, AC. "On the Mechanism of Ductile Fracture in High-Strength Steels Subjected to Multiaxial Stress-States," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 24, pp. 147-169, 1976.