ماهنامه علمى پژوهشى



mme.modares.ac.ir



بررسی تجربی و عددی ضربه کم سرعت تکراری بر روی ورق آلومینیم از دیدگاه مکانیک آسيب محيط ييوسته

رحمت الله قاجاں'*، سيد محمد رضا خليلی'، مهدی يارمحمد توسکی"

۱-استاد، آزمایشگاه خواص مکانیکی مواد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران ۲- استاد، مرکز تحقیقات مواد و سازههای هوشمند دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران ۳- دانشجوی دکترای دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران * تهران، صندوق پستی ۱۹۹۹–۱۹۳۹، ghajar@kntu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیدہ
مقاله پژوهشی کامل دریافت: ۲۶ خرداد ۱۳۹۲ پذیرش: ۱۶ مهر ۱۳۹۲ ارائه در سایت: ۲۲ تیر ۱۳۹۳	در این تحقیق، بررسی تجربی و عددی ضربه تکراری با سرعت کم، بر روی ورق آلومینیوم انجام میگیرد. روش مکانیک آسیب محیط پیوسته بر اساس نمونه لمتق جهت بررسی واماندگی استفاده میشود. شبیهسازی عددی توسط نرمافزار اجزا محدود آباکوس انجام و کد نویسی آسیب با استفاده از زیر برنامه وی.یو.مت انجام میشود. ضربههای تکراری با انرژی مساوی بر روی ورق اصابت میکند. در ضربه اول اثر پلاستیسیته بر
کید واژگان: ضربه تکراری مکانیک آسیب محیط پیوسته سوراخ شدن انرژی جذبشده نیروی تماسی	— روی ورق دیده میشود. با اعمال صربات بعدی، اتر کرنش سختی تا قبل از ترک در الومینیوم ملاحظه میشود.بعد از ایجاد ترک، سفتی سازه کاهش می یابد و با انجام ضربههای بعدی، افت سفتی و آسیب در ورق افزایش یافته و در نهایت فرورفتن و سوراخ شدن اتفاق میافتد. همچنین صحتسنجی مدل حاضر با نتایج آزمایشگاهی انجام می گیرد؛ به طوری که مقایسه نتایج تجربی و عددی نمودارهای نیرو-زمان ونیرو-جابجایی توافق خوبی را نشان میدهد.

Experimental and numerical investigation on repeated low velocity impact response of Aluminum plate using continuum damage mechanics approach

Rahmatollah Ghajar*, Seyed Mohammad Reza Khalili, Mehdi Yarmohammad Tooski

Department of Mechanical Enginiering, K.N.Toosi Univ. of Tech., Tehran, Iran * P.O.B. 19395-1999 Tehran, Iran, ghajar@kntu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION	Abstract
Original Research Paper Received 16 June 2013 Accepted 08 October 2013 Available Online 13 July 2014	In this study, repeated low velocity impacts on aluminum plate are investigated experimentally and numerically. In order to investigate the failure mechanism, the Lemitre's model of the continuum damage mechanics is used. To examine the damage, a Vumat subroutine is developed in Abaqus FE code. Repeated impacts are performed on the plate with same level of energy.
Keywords: Repeated Impact Continuum Damage Mechanics Perforation Absorbed Energy Contact Force	Plastic deformation is observed on the plate in the first impact. During the subsequent impacts and prior to crack initiation, the effect of strain hardening on the aluminum plate is observed. After crack initiation, the stiffness of the structure decreased. As the impacts continue, stiffness decreased further and the damaged area was extended, and finally perforation and penetration appear on the plate. Also, the present model was validated with the experimental results. Comparisons of numerical with experimental results show a good agreement for force-time and force-displacement histories.

آسیب محیط پیوسته [۱]. در روش اول، معیار شکست با مدل ساختاری پلاستیسیته کوپل نیست و انباشتگی آسیب، مجزا از محاسبه تنشها و کرنشها است. هنگامی که شاخص آسیب در یک المان به مقدار بحرانی برسد المان تسليم و حذف المان با رسيدن تنشهاي آن به يک مقدار مشخص انجام می گیرد. روش دوم یعنی مدل پلاستیسیته متخلخل توسط گرسون [۲] ارائه شد که در آن رشد حفره بر روی سطوح تسلیم در نظر گرفته می شود. مکانیک آسیب محیط پیوسته روش جدیدی برای واماندگی نرم است. در این روش شاخص آسيب به عنوان متغير داخلي براي توصيف كاهش پيشرونده

۱- مقدمه

واماندگی نرم متأثر از جوانهزنی، رشد و به هم رسیدن حفرهها و ترکهای میکروسکوپی همراه با تغییر شکل پلاستیسیته قابل توجه است. در فرایند واماندگی، ماده قابلیت تحمل بار خود را تا رسیدن به شکست کامل از دست میدهد. برای مدلسازی تشکیل و رشد ترکهای نرم در اجزاء سازه، چندین روش عددی ارائه شده است. روشهای عددی به سه دسته کلی تقسیمبندی می شوند: ۱) روش واماندگی ناگهانی ۲) مدل پلاستیسیته متخلخل ۳) مکانیک

1- Ductile Failure

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید: R. Ghajar, S.M.R. Khalili, M. Yarmohammad Tooski, Experimental and numerical investigation on repeated low velocity impact response of Aluminum plate using continuum damage mechanics approach, Modares Mechanical Engineering, Vol. 14, No. 6, pp. 52-62, 2014 (In Persian)

مشخصات مکانیکی مواد معرفی میشود. مکانیک آسیب محیط پیوسته اساساً در روش پدیدهای فرمول،ندی میشود. در مقاله حاضر از این روش برای واماندگی نرم استفاده میشود [۱].

به طورکلی آسیب فلزات شامل فرایند جوانه زنی، رشد ریزترکها و حفرهها است. در این روش پدیده آسیب، ناپیوسته است. کاچانوف برای اولین بارمتغیر پیوسته مربوط به چگالی چنین عیوبی را معرفی کرد. معادلات رشد این متغیر بر حسب تنش یا کرنش وجود دارد که در محاسبات سازهای جهت پیشبینی جوانه زنی ماکروترکها مورد استفاده قرار میگیرند [۳]. این معادلات بنیادی در چارچوب ترمودینامیک فرمولبندی شده و در حالتهای مختلف خستگی کم چرخه و پرچرخه فلزها، کوپل میان آسیب و خزش، اثر متقابل خستگی وخزش و واماندگی نرم در پلاستیسیته کاربرد دارند [۴].

در فرمول بندی ها، آسیب به صورت ایزوتروپیک و غیرایزوتروپیک در نظر گرفته می شود. در اغلب اوقات فرض آسیب ایزوتروپیک پیشبینی خوبی از تحمل بار و تعداد سیکل تا واماندگی محلی را ارائه میدهد. به دلیل طبیعت اسکالر بودن آسیب، محاسبات خیلی پیچیده نیست. برای آسیب غیر ایزوتروپیک، متغیر آسیب طبیعت تانسوری دارد و محاسبات آن پیچیده است [۷]. مروری بر فرمول بندی آسیب ناهمسانگرد توسط محققین مختلف ارائه شده است [٨]. لمتق براي اولين بار اصطلاح مكانيك آسيب پيوسته را به کاربرد و توضیحات مفصلی درباره آن ارائه کرد [۹]. قانون رشد آسیب جدیدی برای واماندگی نرم توسط چبوچه و ونگ [۱۰،۱۱] ارائه شد به طوری که انباشت آسیب، تابعی غیرخطی از کرنش پلاستیک است. سه روند ممکن رشد آسیب برای فلزات مختلف توسط بنورا ارائه شد [۱۲]. تاکنون از مدل لمتق برای مسائل متعددی استفاده شده است و بعضاً آن را توسعه دادهاند؛ مثلاً بورویک و همکاران، قانون رشد آسیب مدل لمتق را با مدل جانسون کوک جایگزین کردند [۱۳]. پیرس و همکارانش مدل اصلی آسیب لمتق را با معرفی اثر بسته شدن ترک بهبود بخشیدند [۱۴]. اثر زاویه لود و ضریب سه محوره تنش در واماندگی نرم روی نمونههایی با هندسه متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است. این تحقیق نشان داد که ضریب سه محوره تنش باعث میشود که واماندگی زودتر اتفاق افتد، ولی پارامتر لود تأثیری در جوانهزنی ترک ندارد [۱۵]. مکانیک آسیب محیط پیوسته در بارگذاریهای مختلف کاربرد دارد به طوری که برونیگ و همکاران [۱۶]مکانیک آسیب را در بارگذاری دینامیکی مورد استفاده قراردادند.

در اثر برخورد اجسام با یکدیگر میدان تنش بالایی در ناحیه تماس ایجاد میشود و تکرار برخوردها، ضربات تکراری را ایجاد میکنند. میناماتور و همکاران [۱۷] آنالیز ضربه تکراری روی یک میله فولادی را با در نظر گرفتن رفتار ویسکوپلاستیک برای فولادها با استفاده از نرمافزار ال.اس.داینا^۱ بررسی کردند. ضریب برگشتپذیری برای ضربات تکراری به صورت عددی و آزمایشگاهی توسط سفرید و همکاران [۱۸] بررسی شده است. در میله آلومینیومی با افزایش تعداد ضربه، ضریب برگشتپذیری افزایش یافت. نیشیمورا و همکاران [۱۹] رشد آسیب در آلومینیوم و فولاد را تحت ضربه تکراری با استفاده از اسکن-D و اسکن-B بررسی کردند. علاوه بر فلزات، تعدادی تحقیق در مورد ضربه تکراری بر روی سازههای هیبریدی کامپوزیت-فلز⁷ انجام گرفته است.راجکومار و همکاران [۲۰،۲۱] کاهش خواص در اثر ضربه تکراری سرعت پایین بر روی کامپوزیت-فلز با الیاف کربن و شیشه را مورد بررسی قراردادند.اگر در کامپوزیت-فلز از الیاف شیشه نوع S استفاده

شود گلار حاصل می شود. رشد آسیب در ضربه تکراری کم سرعت [۲۲] بر روی گلار^۳ مورد بررسی قرار گرفته است. اثر فاصله محل ضربههای تکراری بر میزان آسیب ایجادشده در گلار نیز [۲۳] ارائه شده است. وجود فلز آلومینیوم نقش مهمی در ضربه تکراری روی گلار دارد. قبل از جوانهزنی ترک در آلومینیوم، کاهش فاصله محل ضربهها، سبب افزایش سفتی ورق، افزایش نیروی تماسی و کاهش زمان تماس می شود. با تشکیل ترک در فلز، کاهش فاصله محل ضربهها، سبب کاهش سفتی ورق و در نتیجه کاهش نیروی تماسی و افزایش زمان تماس می شود.

آلومینیوم در صنعت کاربرد فراوانی دارد ازجمله: در بال هواپیما، پره بالگرد، بال و پره هواپیماهای سبک مانند جایروپلن. هواپیماها و بالگردها هنگام بلند شدن از زمین یا فرود آمدن به زمین ممکن است تحت ضربات سنگریزهها و یا حتی در حین پرواز تحت ضربههای تگرگ قرار گیرند. بدیهی است که این ضربههای تکراری متمایز از ضربه انفرادی است و تحلیل خاص خود را می طلبد. اگر چه اکثر مطالعات انجام گرفته در ضربه تکراری به صورت تجربی است ولی محققین در مراجع [۱۷،۱۸] با استفاده از مدل اجزاء محدود، شبیهسازی ضربه تکراری بر روی میله فلزی را ارائه دادند به طوری که رفتار فلز الاستوپلاستیک و ویسکوپلاستیک در نظر گرفتهشده و از هیچ مدل آسیبی در شبیهسازی استفاده نکردهاند. در مطالعات تجربی ضربات تکراری بر روی فلز، عموماً از میله فلزی استفاده شده است. کاربرد زیاد ورق آلومینیوم در صنایع به خصوص صنایع هوایی، بررسی ضربههای تکراری روی این ورق را الزامی می کند لذا در این مقاله به این موضوع پرداخته می شود. در مدلسازی علاوه بر لحاظ رفتار الاستوپلاستیک از روش مکانیک آسیب محيط پيوسته براى واماندگى ورق استفاده مىشود.نمودارهاى نيرو-جابجايى و انرژی جذبشده از آزمایشها استخراج و با استفاده از مکانیک آسیب محیط پیوسته، شبیهسازی به کمک نرمافزار آباکوس در زیر برنامه وي.يو.مت أانجام خواهد شد.

۲- مدل آسیب

درچارچوب مکانیک آسیب محیط پیوسته، آسیب به عنوان یکی از متغیرهای ترمودینامیکی ارائه و قانون رشد آن به عنوان تابعی از متغیرهای دیگر مانند تنش، کرنش پلاستیک، دما و غیره در نظر گرفته میشود. از دیدگاه کلی، متغیر آسیب با استفاده از فرمولبندی تانسوری توصیف میشود. از دیدگاه فیزیکی، متغیر آسیب کاهش پیشرونده خواص مادی ناشی از ایجاد و رشد ریز حفرهها و ریزترکهااست. آسیب میتواند به وسیله کاهش سطح مقطع اسمی المان حجمی نمایانگر به صورت رابطه (۱) بیان شود [۱۲].

$$D_n = 1 - \frac{A_{\text{eff}}^n}{A_0^n} \tag{1}$$

n مطح مقطع اسمی المان حجمی نمایانگر و $A_{
m eff}^n$ سطح مقطع مؤثر و n بردار عمود بر سطح است. ملاحظه می شود که ریز حفرهها و عیبها از سطح مقطع اسمی کاسته شدهاند.

با در نظر گرفتن فرض آسیب ایزوتروپیک، متغیر آسیب به جهت n بستگی ندارد و میتواند با کمیت اسکالر D نشان داده شود. بر اساس فرضیه کرنش معادل لمتق [۹]، کرنش همراه با حالت آسیب تحت تنش اعمالی با کرنش همراه با حالت بدون آسیب تحت تنش مؤثر معادل است و رفتار ماده در شکل تنش مؤثر بیان میشود. رابطه (۲) با استفاده از فرضیه کرنش معادل

¹⁻ LsDyna 2- Fibre Metal Laminates

مهندسی مکانیک مد*ر*س، مرداد ۱۳۹۳، دوره ۱٤، شما*ر*ه ۶

³⁻ GLARE(Glass Fiber Reinforced) 4- Vumat

لمتق، متغير آسيب را به اين صورت بيان ميكند [٩].

$$D = 1 - \frac{E_{\text{eff}}}{E_0} \tag{(Y)}$$

كه $_{0}^{}E_{eff}$ به ترتيب مدول الاستيسيته ماده بدون آسيب و آسيب ديده E_{eff} هستند. در چارچوب مکانیک آسیب محیط پیوسته، علاوه بر پتانسیل ناشی از پلاستیسته، پتانسیل اتلاف آسیب F_D نیز موجود است.به طور کلی پتانسیل اتلافی، مجموع یتانسیل اتلاف پلاستیسیته و آسیب است که به صورت رابطه (۳) بیان میشود:

$$F = f(\overline{\sigma}, R, X) + F_D(Y, P, D) \tag{(7)}$$

f در رابطه (۳) Y متغیر داخلی همراه آسیب، P کرنش پلاستیک انباشته و پتانسیل اتلاف همراه با تغییر شکل پلاستیک (تابع تسلیم) است که تابع R و $\overline{\sigma}$ و سينماتيكى $\overline{\sigma}$ و $\overline{\sigma}$ و $\overline{\sigma}$ تانسور تنش واقعى $\overline{\sigma}$ است.اگر عبارتهای دو پتانسیل مشخص باشند، قانون رشد متغیرهای داخلی با استفاده از قانون عمود بودن بردار کرنش جزیی بر سطح تسلیم به دست میآید [۸]. معادلات بنیادی مواد با سختی ایزوتروییک به صورت رابطه (۴) استخراج میشوند و کرنش کل به دو مؤلفه کرنش الاستیک و پلاستیک تجزیه میشود.

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{ij}^{T} = \boldsymbol{\varepsilon}_{ij}^{e} + \boldsymbol{\varepsilon}_{ij}^{p} \tag{(f)}$$

رابطه (۵) کرنش الاستیک را به صورت زیر تعریف می کند:

$$\varepsilon_{ij}^{e} = \frac{1+\nu}{E} \frac{\sigma_{ij}}{1-D} - \frac{\nu}{E} \frac{\sigma_{kk}}{1-D} \delta_{ij}$$
(δ)

همچنین رابطه (۶) تابع تسلیم بر حسب تنش فون میسز و آسیب را به صورت زير بيان ميكند.

$$f(\sigma, R; D) = \frac{\sigma_{eq}}{1 - D} - R(r) - \sigma_{y}$$
(9)

در روابط (۵) و (۶)، $\sigma_{_{
m eq}}, \sigma_{_{
m eq}}, \sigma_{_{
m eq}}$ و R(r) به ترتیب ضریب پواسون، تنش معادل، تنش تسلیم و سختشوندگی ایزوتروپیک هستند. در روابط (۷) و (۸) نرخ کرنش پلاستیک و سختشوندگی ایزوتروپیک از پتانسیل اتلاف يلاستيسيته به دست مي آيند.

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{p} = \dot{\lambda} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} = \dot{\lambda} \frac{3}{2} \frac{\dot{S}_{ij}}{1 - D} \frac{1}{\sigma_{eq}} \tag{Y}$$

$$\dot{r} = -\dot{\lambda} \frac{\partial f}{\partial R} \tag{A}$$

$$\dot{D} = -\dot{\lambda} \frac{\partial P_{D}}{\partial Y} \tag{9}$$

$$F_{D} = \frac{S}{(s+1)(1-D)} \left(\frac{Y}{S}\right) \tag{1.1}$$

رابطه (۱۱) نیروی همراه آسیب ۲ را تعریف میکند.

$$Y = \frac{1}{2}\varepsilon^e : E : \varepsilon^e \tag{11}$$

و در نهایت قانون رشد آسیب با مشتق گرفتن از پتانسیل اتلاف آسیب بر حسب نیروی همراه آسیب در رابطه (۱۲) به دست میآید [۹].

$$\dot{D} = -\frac{\dot{\lambda}}{1-D} \left(\frac{Y}{S}\right)^{s} \tag{17}$$

در رابطه (۱۲) ثابتهای Sو sاز آزمایش به دست میآیند.در بارگذاری و باربرداری شرایط کان-تاکر [۲۴] که به صورت رابطه (۱۳) هستند، باید ارضا شود.

$$\dot{\lambda} \ge 0; \quad f \le 0; \quad \dot{\lambda} f = 0$$
 (17)

۳- فرمول بندى الاستو پلاستيك كو پل شده با آسيب

در اثر ضربه، ورق آلومینیوم رفتار الاستوپلاستیک ارائه و آسیب در آن ایجاد می شود.به دلیل غیرخطی بودن رفتار یک ماده الاستوپلاستیک کوپل با آسیب، مسئله به صورت نموی و مرحلهای حل می شود به گونهای که بتوان در هر مرحله رفتار را خطی فرض کرد. تنش، کرنش الاستیک، کرنش پلاستیک، جابجایی و آسیب انتهای هر مرحله، به عنوان دادههای ورودی مرحله بعد وارد می شوند. الگوریتم مورد استفاده بر اساس جدا کردن عملگرها آست که در آن یک اپراتور پیشبینی کننده الاستیک و یک عملگر اصلاح کننده پلاستیک-آسیب⁶ مورد استفاده قرار می گیرد. در عملگر الاستیک، فرض بر این است که کل بارگذاری صورت گرفته در این مرحله به صورت الاستیک باشد. از آنجا که رشد آسیب بر اساس رشد پلاستیسیته است، در بارگذاری الاستیک مقدار آن صفر است؛ بنابراین روابط (۱۴) تا (۱۸) را مي توان ارائه كرد.

$$\varepsilon_{n+1}^{\text{e-trial}} = \varepsilon_n + \Delta \varepsilon \tag{14}$$

$$\sigma_{n+1}^{\text{trial}} = (1 - D_n)C : \varepsilon_{n+1}^{\text{e-trial}}$$
(12)

$$\varepsilon_{n+1}^{\text{p-trial}} = \varepsilon_n^p \tag{19}$$

$$r_{n+1}^{\text{trial}} = r_n \tag{1Y}$$

$$D_{n+1}^{\text{trial}} = D_n \tag{1A}$$

در رابطه فوق کمیتها با بالانویس trial، مقادیر به دست آمده از پیشبینی الاستیک هستند. شرایط کان-تاکر برای این مقادیر باید چک شوند. چنانچه باشد این شرایط برقرار است و مقادیر به دست آمده نهایی هستند. $f \leq 0$ چنانچه $0 \succ f$ باشد شرایط کان-تاکر ارضا نشده و مقادیر به گونهای هستند كه نقطه تسليم بيرون از سطح تسليم قرار مى گيرد. الكوريتم اصلاحى پلاستیک-آسیب که نگاشت بازگشتی۶ نامیده می شود مورد استفاده قرار می گیرد تا مقادیر را به گونهای اصلاح کند که شرایط کان-تاکر برقرار شود. در حالتی که شرط فوق برقرار نباشد، مقدار کرنش پلاستیک برابر صفر نیست و کرنش پلاستیک در فرمول بندی ها باید وارد شود تا مقدار افزایش تنش در این مرحله کاهش یابد. همچنین آسیب نیز همزمان با پلاستیسیته شروع به رشد مىكند؛ بنابراين باقيماندەھاى كرنش پلاستيك، سخت شوندگى ایزوتروپیک و آسیب به صورت روابط (۱۹) تا (۲۱) قابل تعریف هستند. 10P (12 2 C)

$$Re_{n+1}^{h} = -\varepsilon_{n+1}^{\nu} + \varepsilon_{n}^{h} + (\Delta \lambda \partial_{\sigma} f)_{n+1}$$

$$Re_{n+1}^{h} = -\varepsilon_{n+1}^{\nu} + \varepsilon_{n+1}^{h} + (-\Delta \lambda \partial_{\sigma} f)_{n+1}$$

$$(19)$$

$$Re_{n+1}^{n} = -D_{n+1} + D_n + (-\Delta \lambda \partial_Y F_D)_{n+1}$$

$$(17)$$

$$Re_{n+1}^{n} = -D_{n+1} + D_n + (-\Delta \lambda \partial_Y F_D)_{n+1}$$

$$(17)$$

روابط (۱۹) تا (۲۱) روابط (۲۲) تا (۲۴) حاصل می شود.

DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.6.14.3

¹⁻ Hardening back stress

²⁻ Kinematic back stress

³⁻ Operator split

⁴⁻ Elastic predictor operator

⁵⁻ Damage- plastic predictor operator6- Return mapping

(k

(k

$$MK = \frac{\partial_D f_{n+1} \left(\partial_Y F_{n+1}^D - FS_{n+1}^D : \left(FS_{n+1}^p\right)^{-1} : \partial_\sigma f_{n+1} \right)}{FS_{n+1}^D : \left(FS_{n+1}^p\right)^{-1} FD_{n+1}^p - FD_{n+1}^D} \\ + \partial_r R_{n+1} + \partial_\sigma f_{n+1} : \left(- \left(FS_{n+1}^p\right)^{-1} : FD_{n+1}^p \right) \\ \times \frac{\left(\partial_Y F_D^{n+1} - FS_{n+1}^D : \left(FS_{n+1}^p\right)^{-1} \partial_\sigma f_{n+1} \right)}{FS_{n+1}^D : \left(FS_{n+1}^p\right)^{-1} FD_{n+1}^p - FD_{n+1}^D} \\ - \left(FS_{n+1}^p\right)^{-1} \partial_\sigma f_{n+1}$$
((*))

که به ترتیب
$$FS_{n+1}^{p}$$
، FD_{n+1}^{p} ، FD_{n+1}^{p} ، FS_{n+1}^{p} طبق روابط (۳۲) تا (۳۵) عبارتاند از:

$$FS_{n+1}^{p} = \left(\frac{C^{-1}}{1 - D_{n+1}} + \Delta\lambda_{n+1}\partial_{\sigma\sigma}f_{n+1}\right)$$
(TY)

$$FD_{n+1}^{p} = \frac{C^{-1} : \sigma_{n+1}}{\left(1 - D_{n+1}\right)^{2}} + \Delta\lambda_{n+1}\partial_{\sigma D}f_{n+1} \tag{(YY)}$$

$$FS_{n+1}^{D} = \frac{1}{2} \Delta \lambda_{n+1} \partial_{YY} F_{n+1}^{D} \left(\frac{\sigma_{n+1} C^{-1}}{\left(1 - D_{n+1}\right)^{2}} + \frac{\varepsilon_{n+1}^{e}}{1 - D_{n+1}} \right)$$
(75)

$$FD_{n+1}^{D} = \frac{1}{2} \Delta \lambda_{n+1} \partial_{YY} F_{n+1}^{D} \left(\frac{\varepsilon_{n+1}^{e} : \sigma_{n+1} : \sigma_{n+1} : C^{-1} : \sigma_{n+1}}{(1 - D_{n+1})^{2}} + \frac{\sigma_{n+1} : C^{-1} : \sigma_{n+1}}{(1 - D_{n+1})^{3}} \right) + \Delta \lambda_{n+1} \partial_{YD} F_{n+1}^{D} - 1$$
(Y\Delta)

تمامی ترمهای روابط (۲۵) تا (۳۵) بالانویس ^(k) مربوط به زیر مرحله رادارند. با داشتن $d\Delta\lambda_{n+1}$ میتوان سایر پارامترهارا محاسبه و بهروزرسانی کرد. به طوری که طبق روابط (۳۶) تا (۴۰) خواهیم داشت:

$${}^{(k+1)}\Delta\lambda_{n+1} = {}^{(k)}\Delta\lambda_{n+1} + {}^{(k)}d\Delta\lambda_{n+1}$$

$${}^{(k+1)}\varepsilon_{n+1}^{p} = {}^{(k)}\varepsilon_{n+1}^{p} + {}^{(k)}d\varepsilon_{n+1}^{p}$$

$${}^{(YY)}$$

$$\sum_{n+1}^{(k+1)} \sigma_{n+1} = \sum_{n+1}^{(k+1)} a \sigma_{n+1}$$

$$(\Upsilon A)$$

$$r_{n+1}^{(k+1)}r_{n+1}^{(k+1)} = r_{n+1}^{(k+1)}r_{n+1}^{(k+1)} + r_{n+1}^{(k)}r_{n+1}^{(k+1)}$$
 (ma)

$${}^{(k+1)}D_{n+1} = {}^{(k)}D_{n+1} + {}^{(k)}dD_{n+1} \tag{(f.)}$$

در انتهای هر زیر مرحله شرایط کان-تاکر باید بررسی شود. اگر این شرایط برقرار باشد، مقادیر به دست آمده، نهایی و قابلقبول هستند؛ در غیر این صورت مراحل باید تکرار شوند.

۴- تعیین پارامترهای آسیب

همانطور که بیان شد در این مقاله مدل لمتق برای آسیب همسانگرد انتخاب شده است. با فرض آسیب همسانگرد، استفاده از تعریف آسیب و فرض کرنش معادل، میتوان رابطه آسیب با کاهش مدول یانگ (معادله ۲) را استخراج کرد. در این صورت مدول یانگ ماده سالم و آسیبدیده ضروری هستند. مدول یانگ را میتوان به روشهای متفاوتی تعیین کرد. در روشهای مکانیکی معمولاً این پارامتر به وسیله باربرداری و بارگذاری حین آزمون اندازه گیری سرعت عبور موج فرا صوت از قطعه یا تغییرات مقاومت الکتریکی ماده نیز وجود دارد که در [۲۵] به آنها پرداخته شده است. نتایج حاصل از آسیب در مواد شکل پذیر از یک کرنش پلاستیک مشخص شروع و سپس رشد میکند و نهایتاً منجر به شکست قطعه میشود، میتوان یک آزمون کشش ساده در مراحل مختلف بارگذاری و باربرداری را انجام و شیب بارگذاری را

۵۵

$$^{(k)}\operatorname{Re}_{n+1}^{h} - {}^{(k)}dr_{n+1} + {}^{(k)}d\left(-\Delta\lambda\partial_R f\right)_{n+1} = 0$$
(YY)

$${}^{(k)} \operatorname{Re}_{n+1}^{D} + {}^{(k)} d \operatorname{Re}_{n+1}^{D} = 0 \Longrightarrow$$

$${}^{(k)} \operatorname{Re}_{n+1}^{D} - {}^{(k)} d D + {}^{(k)} d (-\Lambda \lambda \partial ... E_{n}) = 0$$

$${}^{(k)} \operatorname{Re}_{n+1}^{D} + {}^{(k)} d D + {}^{(k)} d (-\Lambda \lambda \partial ... E_{n}) = 0$$

صورت روابط (۲۵) تا (۲۵) به دست می آیند:

$$\begin{aligned} D dr_{n+1} &= \operatorname{Re}_{n+1}^{h} - d\Delta\lambda_{n+1} \\ O d\Delta D_{n+1} &= \frac{\left(Re_{n+1}^{D} - FS_{n+1}^{D} : \left(FS_{n+1}^{p}\right)^{-1} : Re_{n+1}^{p}\right)}{FS_{n+1}^{D} : \left(FS_{n+1}^{p}\right)^{-1} : FD_{n+1}^{p} - FD_{n+1}^{D}} \end{aligned}$$

$$+\frac{\left(\partial_{Y}F_{n+1}^{D}-FS_{n+1}^{D}:\left(FS_{n+1}^{p}\right)^{-1}:\partial_{\sigma}f_{n+1}\right)d\Delta\lambda_{n+1}}{FS_{n+1}^{D}:\left(FS_{n+1}^{p}\right)^{-1}:FD_{n+1}^{p}-FD_{n+1}^{D}}$$
(YF)

$${}^{(k)}d\Delta\sigma_{n+1} = \frac{\left(-\left(FS_{n+1}^{p}\right)^{-1}:FD_{n+1}^{p}\right)Re_{n+1}^{D}}{FS_{n+1}^{p}:\left(FS_{n+1}^{p}\right)^{-1}:FD_{n+1}^{p}-FD_{n+1}^{D}} \\ -\left(FS_{n+1}^{p}\right)^{-1}:Re_{n+1}^{p} \\ + \frac{\left(\left(FS_{n+1}^{p}\right)^{-1}:FD_{n+1}^{p}\right)\left(FS_{n+1}^{D}:\left(FS_{n+1}^{p}\right)^{-1}:Re_{n+1}^{p}\right)}{FS_{n+1}^{p}:\left(FS_{n+1}^{p}\right)^{-1}:FD_{n+1}^{p}-FD_{n+1}^{D}} \\ + \left(\frac{\left(\frac{\partial_{Y}F_{n+1}^{D}-FS_{n+1}^{D}:\left(FS_{n+1}^{p}\right)^{-1}:\partial_{\sigma}f_{n+1}\right)}{FS_{n+1}^{p}:\left(FS_{n+1}^{p}\right)^{-1}:FD_{n+1}^{p}-FD_{n+1}^{D}} \\ \times \left(-\left(FS_{n+1}^{p}\right)^{-1}:FD_{n+1}^{p}\right)-\left(FS_{n+1}^{p}\right)^{-1}:\partial_{\sigma}f_{n+1}\right)d\Delta\lambda_{n+1}$$
 (YY)

$${}^{(k)}d\varepsilon^p_{n+1} = -C^{-1}d\Delta\sigma_{n+1} \tag{YA}$$

با جایگذاری روابط (۲۵) تا (۲۲) در شرایط سازگاری
$$f=0$$
 و $f= extsf{c}$ مقدار $f^{(k)} d\Delta\lambda_{n+1}$

$$\int_{M}^{(k)} d\Delta \lambda_{n+1} = -\frac{ST}{MK}$$
(Y9)

طبق روابط (۳۰) و (۳۱) داریم:

$$\begin{split} ST &= f_{n+1} + \frac{\partial_D f_{n+1} \left(Re_{n+1}^D - FS_{n+1}^D : \left(FS_{n+1}^p \right)^{-1} : Re_{n+1}^p \right)}{FS_{n+1}^D : \left(FS_{n+1}^p \right)^{-1} : FD_{n+1}^p - FD_{n+1}^D} \\ &- \partial_r R_{n+1} Re_{n+1}^h + \frac{\partial_\sigma f_{n+1} : \left(- \left(FS_{n+1}^p \right)^{-1} : FD_{n+1}^p \right) Re_{n+1}^D}{FS_{n+1}^D : \left(FS_{n+1}^p \right)^{-1} : FD_{n+1}^p - FD_{n+1}^D} \\ &+ \frac{\left(\left(FS_{n+1}^p \right)^{-1} : FD_{n+1}^p \right) \partial_\sigma f_{n+1} : \left(FS_{n+1}^p \right)^{-1} : FD_{n+1}^p - FD_{n+1}^D}{FS_{n+1}^D : \left(FS_{n+1}^p \right)^{-1} : FD_{n+1}^p - FD_{n+1}^D} \\ &- \partial_\sigma f_{n+1} : \left(FS_{n+1}^p \right)^{-1} : Re_{n+1}^p \end{split}$$

مهندسی مکانیک مدرس، مرداد ۱۳۹۳، دوره ۱٤، شماره ۶

محاسبه و از آن تغییرات مدول یانگ را استخراج کرد.

به این منظور، مطابق مرجع [۲۷] نمونههایی از جنس آلومینیوم ۲۵ به ضخامت ۲ میلیمتر همانند شکل ۱ انتخاب و آزمایش کشش شامل بارگذاری و باربرداری توسط دستگاه MTS-100 kN بر روی آنها انجام گرفت. در ابتدا برای اندازه گیری کرنش، از کرنش سنج استفاده شد ولی به دلیل نرم بودن نمونهها، سطح نمونهها در محل نصب کرنش سنجها پس از دو بار بارگذاری و باربرداری دچار تقعر شد و کرنش سنجها دیگر قادر به ارائه میزان دقیق کرنشها نبودند. برای رفع مشکل از دوربینهای سه بعدی استفاده شد.

با استفاده از دو دوربین سه بعدی از تمامی مراحل باربرداری و بارگذاری عکس گرفته شد. پس از اتمام آزمایشها تمامی عکسها به نرمافزار مرتبط با دوربین سه بعدی^۱ وارد و برای ناحیه انتخاب شده تمامی تغییرمکانها و کرنشهای صفحهای محاسبه شدند. شکل ۲ مقدار کرنش در راستای بارگذاری برای نقاط ناحیه مشخص شده در بار ۲/۱ نیوتن را نشان می دهد.



شکل ۱ نمونه آلومینیومی جهت آزمایش کشش (ابعاد بر حسب میلیمتر)



شکل ۲ نمودار کرنش در راستای بارگذاری در بار ۳/۱ نیوتن با استفاده از دوربین سه بعدی



¹⁻ Vic- snap 2007

همچنین برای تمامی این نقاط نمودار تنش- کرنش برای مراحل بارگذاری و باربرداری به دست میآید. به عنوان مثال شکل ۳ این نمودار را برای مرکز سطح مقطع کمینه نشان میدهد. با محاسبه شیب بارگذاری و باربرداری و استفاده از فرمولهای (۲)، (۸)، (۱۱) و (۱۲) ثابتهای آسیب *S* و ۶ برای نمونههای مختلف به دست میآیند. با متوسط گیری از نتایج حاصل مقادیر *S* و ۶ به ترتیب برابر ۲۸۸۹۹، مگاپاسکال و ۲/۶۲۰۸ به دست میآیند.

۵- آزمایشها

آزمایشهای ضربه با دستگاه ضربه افتان در دانشگاه هوافضا پلی تکنیک دلفت^۲کشور هلند انجام شده است.نمونه انتخاب شده از جنس آلومینیوم با ضخامت ۲ میلیمتر و مقطع مستطیل به ابعاد ۱۵ و ۱۰ سانتیمتر است. در متصل می شوند دو قاب سوراخ دار گذاشته و قاب ها توسط شش پیچ به یکدیگر می متصل می شوند. با گشتاورمتر به هر پیچ گشتاور ۳۰ نیوتن متر اعمال و باعث ناحیه آزاد تحت ضربه دارای طول ۱۲/۵ سانتیمتر و عرض ۱۷۵ سانتیمتر باشد شود.دستگاه ضربه ازای طول ۱۲/۵ سانتیمتر و عرض ۱۷۵ سانتیمتر باشد شود.دستگاه ضربه افتان همراه با نمونه، تکیهگاهها و ضربه زننده در شکل ۴ نشان داده شده است. ضربات مختلف از ارتفاع ۱۲۵ سانتیمتر (با انرژی ضربه ازمایش روی ۵ تا ۶ نمونه انجام و بعد از هر ضربه با استفاده از یک تکه فلزی آزمایش روی ۵ تا ۶ نمونه انجام و بعد از هر ضربه با استفاده از یک تکه فلزی از ضربههای بعدی جلوگیری می شود.

ضربههای تکراری با انرژی ضربه یکسان به مقدار ۱۱/۵ ژول در وسط ورق اعمال میشود.



شکل ۴ دستگاه ضربه افتان همراه با نمونه، تکیهگاهها و ضربه زننده

2- TuDelft







شکل ۷ نمای نمونه پس از ۵ ضربه (الف) نمای صفحه ضربه خورده (ب) نمای پشت صفحه ضربه خورده

با اصابت ضربه بر روی ورق، پاسخ ضربه توسط دستگاه ضبط می شود. با انجام ضربه اول بر روی آلومینیم، گودی بر روی ورق دیده شده و در محل ضربه تغییر شکل پلاستیک پدیدار می شود؛ ولی با دور شدن از محل اصابت، میزان آن کم می شود.

در شکل ۵ پاسخ نیرو- زمان برای ضربههای اول تا چهارم نشان داده شده است. ملاحظه میشود که در ضربه اول تا رسیدن به نیروی بیشینه، زمان زیادی طول کشیده و پس از آن در زمان کمتری ضربه زننده از نمونه جدا میشود. در ضربه اول اثر پلاستیسیته بر روی نمونه دیده میشود. با اعمال ضربه دوم، نیروی بیشینه افزایش و زمان تماس کاهش مییابد و اثر تغییر سفتی بر روی ورق در منحنی نیرو- زمان دیده میشود.

تاریخچه نیرو-زمان ضربه سوم تقریباً بر تاریخچه نیرو- زمان ضربه دوم منطبق است. در ضربه چهارم بر خلاف ضربه سوم، پاسخ ورق بر ضربه قبلی منطبق نیست ولی همانند ضربات قبلی، سفتی ورق افزایش مییابد. به طور کلی در ضربههای دوم، سوم و چهارم سفتی سازه نسبت به ضربه اول افزایش یافته است. این افزایش سفتی به اثر کرنش سختی برمی گردد.

تاریخچه نیرو- زمان برای ضربههای چهارم تا هشتم در شکل ۶ نشان داده شده است.

در ضربه پنجم افت سفتی نسبت به ضربه چهارم و کاهش نیروی تماس و افزایش زمان تماس مشاهده میشود. با بررسی نمونهها مشخص میشود که در ضربه اول، دوم و سوم در نمونه، گودی ایجاد شده است. با افزایش تعداد ضربه عمق گودی افزایش مییابد. در ضربه چهارم ترک بسیار کوچکی در پشت صفحه ضربه خورده مشاهده می شود. به عنوان نمونه نمای صفحه ضربه خورده و پشت صفحه ضربه خورده بعد از پنج ضربه در شکل ۷ نشان داده شده است. در ضربه پنجم تقریباً ترک محیطی در صفحه ضربه خورده و پشت صفحه ضربه خورده دیده می شود. در ضربه ششم، ترکهای مذکور گسترشیافتهاند. در ضربه هفتم پدیده فرورفتن و در ضربه هشتم پدیده سوراخ شدن^۲به وقوع پیوسته است. فرورفتن حالتی در نظر گرفته میشود که سیمی به قطر ۲/۳ میلیمتر از نمونه عبور کند. سوراخ شدن حالتی است که اگر ضربه زننده بر روی نمونه قرار گیرد با نگاه کردن از پشت ورق، ضربه زننده دیده شود. همان طور که در شکل ۶ مشاهده می شود از ضربه پنجم به بعد سفتی ورق کاهش مییابد. در هر ضربه نسبت به ضربه قبلی نیروی تماس کاهش و زمان تماس افزایش مییابد.در ضربه هشتم که فرورفتن اتفاق افتاده، کمترین نیروی تماس و بیشترین زمان تماس مشاهده میشود.

در شکل ۸ نمودار نیرو-جابجایی برای ضربههای مختلف رسم شده است. در هر ضربه مقدار تغییر مکان نسبی ضربه محاسبه و توسط دستگاه خوانده میشود. لیکن با توجه به رسم این نمودارها و انطباق تمامی آنها لازم است تا جهت خواندن و تفسیر نمودارها، آنها بر روی هم قرار نگیرند.

در نتیجه از روش جابجایی مبدأ^۲ استفادهشده و جابجایی هر ضربه را بعد از جابجایی ضربه قبلی رسم کرده تا مقدار مطلق آن محاسبه شود؛ بنابراین مبدأ رسم نمودار هر ضربه جابجا می شود، لیکن جابجایی کلی، همان جابجایی کل ورق بعد از هشت ضربه است.

همان طور که در شکل ۸ مشخص است مقدار تغییر مکان دائمی ورق با افزایش تعداد ضربه افزایش مییابد. در ضربه اول به خاطر اثر پلاستیسیته تا قبل از رسیدن به نیروی بیشینه، تغییر مکان زیادی در ورق ایجاد ولی پس از رسیدن به نیروی بیشینه در جابجایی کمتری به نیروی صفر میرسد به طوری که شیب بارگذاری و باربرداری متفاوت است.

Perforation
 Penetration
 Offset



Ť را محاسبه کن $^{(k)} \epsilon_{n+1}^p$ ابطه (۳۷)

پايان

محاسبه کن روابط (۳۸) تا (۴۰) **شکل ۹ روند** نمای زیر برنامه وی.یو.مت

 $\int_{a}^{(k)} \sigma_{n+1} , \overset{(k)}{} r_{n+1} , \overset{(k)}{} D_{n+1}$



شکل ۱۰ مشبندی ورق و ضربه زننده

در ضربههای دوم، سوم و چهارم نیروی بیشینه در حال افزایش و تغییر مکان دائمی هر ضربه نسبت به ضربه قبلی در حال کاهش است. همچنین شیب بارگذاری و باربرداری تقریباً مساوی است. از ضربه پنجم به بعد که آسیب ایجادشده در ورق در حال پیشروی است باعث می شود نیروی تماس کاهش و مقدار تغییر مکان دائمی هر ضربه نسبت به ضربه قبلی افزایش یابد. همچنین رفتار نیرو-جابجایی در حالت بارگذاری و باربرداری متفاوت است.

در جدول ۱ مقادیر جابجایی بیشینه، جابجایی دائمی، نیروی بیشینه، انرژی جذب شده، زمان تماس، زمان نیروی بیشینه و زمان جابجایی بیشینه برای ضربههای مختلف ارائه شده است. در ضربه اول که اثر پلاستیسیته در آن مشاهده شد، مقادير جابجايي بيشينه، جابجايي دائمي، انرژي جذبشده و زمان تماس نسبت به ضربه دوم بیشتر است. با اعمال ضربههای بعدی (ضربه دوم، سوم و چهارم) مقادیر جابجایی بیشینه، جابجایی دائمی، انرژی جذب شده و زمان تماس کاهش می یابند. از ضربه پنجم این مقادیر شروع به افزایش کرده و تا ضربه هشتم روند صعودی این مقادیر ادامه دارد. روند تغییرات نیروی بیشینه در ضربههای مختلف به طور کلی متفاوت با روند تغییرات مقادیر جابجایی بیشینه، جابجایی دائمی، انرژی جذب شده و زمان تماس است. رفتار سازه در ضربه چهارم مهم است، به طوری که کمترین مقدار برای جابجایی بیشینه، جابجایی دائمی، انرژی جذب شده و زمان تماس (با توجه به جدول ۱) به وجود میآید. بیشترین مقدار برای نیروی بیشینه نیز در ضربه چهارم است. مقایسه زمان بروز نیروی بیشینه و جابجایی بیشینه جالب است. برای تمامی ضربه ها، زمان نیروی بیشینه و جابجایی بیشینه متفاوت است به طوری که در ضربه اول تا هفتم اختلاف بین ۶ تا ۲۶ درصد بوده ولی در ضربه هشتم اختلاف ۵۲ درصد است. همچنین مقدار زمان جابجایی بیشینه از زمان رخ دادن نیروی بیشینه برای همه ضربهها بیشتر

۶- شبیه سازی عددی و صحه گذاری

ضربه سرعت پایین بر روی آلومینیوم با نرمافزار آباکوس 1-6.12 شبیهسازی و آنالیز مسئله به روش دینامیکی صریح انجام می گیرد. کدنویسی آسیب با استفاده از زير برنامه وي.يو.مت انجام گرفته كه به نرمافزار المان محدود آباکوس مرتبط است. برای حل مسئله در این زیر برنامه، در هر نقطه انتگرال-گیری با داشتن نمو کرنش، محاسبه تنش انجام می گیرد. ورودی های زیر برنامه، نمو کرنش، تعداد مؤلفههای تنش و کرنش و خواص ماده است. خروجیهای زیر برنامه شامل تنش، انرژی و متغیرهای حالت است. متغیرهای حالت در واقع خروجیهایی هستند که جهت افزایش انعطاف زیر برنامه در اختیار کاربر قرار داده شده است تا بسته به نوع تحلیل، تعدادی خروجی دلخواه توسط کاربر تعریف گردد. در این تحقیق، مؤلفههای تانسور کرنش پلاستیک و آسیب توسط متغیرهای حالت تعریف و در محیط گرافیکی در دسترس قرار می گیرند. نمودار گردشی شکل ۹ نشان دهنده عملیاتی است که در زیر برنامه انجام می شود. در شبیه سازی ضربه سرعت پایین، ورق آلومینیومی مستطیلی به ابعاد ۱۲/۵ در ۷/۵ سانتیمتر تحت شرایط مرزی گیردار - گیردار مورد برسی قرار می گیرد. از المان C3D8R و R3D4 به ترتیب برای مشبندی هدف و ضربهزننده استفاده می شود. ضربه زننده که صلب است، فقط در راستای Z حرکت میکند. برای تماس بین ضربه زننده و ورق از مدل تماس کلی^۱ استفاده میشود. شکل ۱۰ مشبندی هدف و ضربهزننده را نشان میدهد.

DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.6.14.3

Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-28

¹⁻ General Contact

جدول ۱ جابجایی، انرژی جذب شده، زمان و نیروی بیشینه در ضربههای مختلف									
نیروی بیشینه (kN)	جابجایی بیشینه (mm)	جابجایی دایمی (mm)	انرژی جذبشده (J)	زمان تماس (μ s)	زمان نیروی بیشینه (µS)	زمان جابجایی بیشینه (μS)	تعداد ضربه		
۴/۳۰	۵/۴۹	۴/۵۰	۱۰/۱۱	۲۷۳۵	1878	١٨٣۴	١		
۵/۷۳	۳/٨۶	۲/۳۳	٨/١٨	۲۲۳۵	1778	171.	۲		
۶/•۲	٣/۶٩	۲/۳۰	λ/•λ	5119	1 • 1 1	1787	٣		
$\mathcal{F}/\Delta V$	٣/٢٣	1/87	٧/٧۴	۲۰۴۳	٨٩٠	1155	۴		
۶/•۴	٣/۵٢	١/٨٩	٨/ • ٣	TIVY	٨٩۵	1777	۵		
۵/۵۱	٣/٧٩	۲/۴۹	٨/۵٩	2228	١١٢۵	1848	۶		
۵/۱۴	$\nabla / \Lambda \Lambda$	۲/۶۶	٩/٢۶	227.	1187	1808	٧		
۴/٩۶	٣/٨۴	7/47	٩/• ٩	2421	844	1418	٨		





لازم به ذکر است که در تمامی نتایج عددی که در ادامه ارائه میشوند، اثر پلاستیسته و آسیب در شبیهسازی لحاظ شده و تاریخچه نیرو-زمان و نیرو-جابجایی با در نظر گرفتن آنها به دست میآیند. مقایسه نتایج تجربی و عددی برای ضربههای اول و دوم در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همان طور که مشهود است، در ضربه اول تطابق خوبی بین روند نمودار و مقادیر عددی و تجربی برقرار است. بیشینه اختلاف بین نتایج تجربی و عددی ۲/۰۳ درصد است. برای مدلسازی ضربه دوم، شکل ورق تغییریافته در اثر ضربه اول درصد است. برای مدلسازی ضربه دوم، شکل ورق تغییریافته در اثر ضربه اول ابتدای ضربه دوم فراخوانی میشود. از مقایسه نتایج عددی و تجربی ضربه دوم ملاحظه میشود که روند مشابهی بین آنها در قبل و بعد از نیروی تماس بیشینه برقرار است. در ضربه دوم بیشینه اختلاف بین نتایج تجربی و عددی ۹/۳ است.

با توجه به کد آسیب نوشتهشده، میتوان تغییرات متغیر حالت آسیب ارائهشده در زیربرنامه مذکور را در بارگذاری ضربه مشاهده کرد. در شکل ۱۲، کانتور متغیر آسیب در پایان ضربه اول، دوم و سوم برای صفحه تحت ضربه مشاهده میشود. در هر سه ضربه، آسیب فقط در محل تماس ضربه زننده باهدف اتفاق افتاده است. در ضربه اول ناحیه آسیب دیده کوچک است ولی با افزایش تعداد ضربه افزایش مییابد به طوری که در ضربه سوم ناحیه آسیب و مقدار آن نسبت به ضربه اول و دوم بیشتر است.

همان طور که ذکر شد، از ضربه دوم تا چهارم اثر کرنش سختی در ورق به وجود میآید که موجب افزایش نیروی تماس و کاهش زمان تماس میشود. از ضربه چهارم به بعد پیشروی و رشد ترک در ورق نمایان میشود لذا در این قسمت به شبیهسازی عددی اثر کرنش سختی و پیشروی ترک پرداخته میشود.







شکل ۱۲ کانتور متغیر آسیب نمای صفحه تحت ضربه برای (الف) ضربه اول، (ب) ضربه دوم و (ج) ضربه سوم

در شکلهای ۱۳ و ۱۴ مقایسه نتایج عددی و تجربی نیرو- زمان ضربههای سوم، چهارم، پنجم و ششم نشان داده شده است. در ضربه سوم مدل تغییر شکل یافتهای که از ضربه دوم حاصلشده را به همراه متغیرهای حالت مانند آسیب، فراخوانی کرده و ورق تحت ضربه قرار داده میشود و برای ضربات بعدی نیز این روند تکرار میشود. از مقایسه نتایج تجربی و عددی در شکل ۱۳، تطابق خوبی برای ضربه سوم ملاحظه میشود. همچنین در ضربه چهارم قبل از نیروی تماسی بیشینه نتایج تجربی و عددی به هم نزدیک و روند مشابهی دارند ولی بعد از بیشینه نیروی تماسی، کمی اختلاف دیده میشود.



شکل ۱۳ مقایسه نتایج عددی و تجربی نیرو-زمان برای ضربه سوم و چهارم





شکل ۱۵ مقایسه نتایج عددی و تجربینیرو-جابجایی برای ضربه اول، دوم و چهارم

در ضربه پنجم و ششم نمونه آزمایشگاهی ترک مشاهده شد. به همین منظور برای بررسی پدیده کاهش سفتی سازه از روش حذف المان استفاده شده است. از آزمایش کشش مقدار آسیب بحرانی با استفاده از معادله (۲) به دست میآید. این مقدار برای نمونه آزمایش شده ۰/۴۳ است. تا هنگامی که مقدار متغیر آسیب در المان کمتر از مقدار آسیب بحرانی باشد المان در فرآیند ضربه فعال است، ولی به محض رسیدن آسیب به مقدار بحرانی، المان توسط زیربرنامه وی.یو.مت حذف میشود. با انجام ضربههای تکراری مقدار آسیب افزایش مییابد. در ضربههای پنجم و ششم، مقدار متغیر آسیب در پیرامون محل ضربه در بعضی از المانها بیشتر از مقدار آسیب بحرانی بوده و در نتیجه این المانها از آنالیز حذف میشوند.



شکل ۱۶ تاریخچه نیرو- زمان ضربه اول تا چهارم برای فولاد X-100

شکل ۱۴ مقایسه نتایج عددی و تجربی نیرو- زمان ضربه پنجم و ششم را نشان میدهد و ملاحظه میشود که تطابق نسبتاً خوبی بین نتایج برقرار است.

علاوه بر قیاس نتایج عددی و تجربی، نمودارهای نیرو-زمان، نیرو-جابجایی نیز با یکدیگر مقایسه شدهاند. شکل ۱۵ مقایسه نتایج عددی و تجربی نیرو–جابجایی را برای ضربههای اول، دوم و چهارم نشان می دهد. ضربه است. با افزایش تعداد ضربههای تکراری، جابجایی دایمی نمودارهای ضربه است. با افزایش تعداد ضربههای تکراری، جابجایی دایمی نمودارهای نجربی و عددی کاهش می یابند؛ در حالی که نیروی بیشینه افزایش می یابد. در ضربه اول نتایج تجربی و عددی قبل از نیروی تماسی بیشینه بر هم منطبق و ضربه اول نتایج تجربی و عددی قبل از نیروی تماسی بیشینه بر هم منطبق و عددی و تجربی روند مشابهی دارند. در ضربه دوم و چهارم، نیروی تماسی بیشینه تجربی به ترتیب ۹/۵ و ۱/۹ درصد بیشتر از نتایج عددی است. همچنین بیشینه جابجایی تجربی به ترتیب ۹/۵ و پس از رسیدن به بیشینه نیروی عددی هستند. در ضربه دوم و چهارم، قبل و پس از رسیدن به بیشینه نیروی تماسی، نتایج تجربی و عددی روند مشابهی دارند.

در بخش قبلی شبیه سازی ضربه تکراری با استفاده از مکانیک آسیب محیط پیوسته بر روی ورق آلومینیومی انجام گرفت. با داشتن پارامترهای آسیب میتوان شبیه سازی ضربه تکراری را بر روی فلزات نرم دیگر انجام داد. پارامترهای آسیب برای هر ماده نرم مستقل بوده و تنها به وسیله آزمایش تجربی به دست میآید. در این قسمت فولاد 100-کانتخاب شده و پارامترهای آسیب S و S به ترتیب برابر ۱۰/۶ مگاپاسکال و ۱۶/۶ از مرجع [۲۸] اخذشده و شبیه سازی ضربه تکراری بر روی آن انجام می گیرد. شرایط مرزی، هندسه ضربه زننده و هدف، نوع المان و سرعت ضربهزنده بر روی فولاد یکسان با آلومینیوم انتخاب شده است تنها جنس هدف تغییر کرده که سبب تغییر خواص ماده و پارامترهای آسیب می شود. شکل ۱۶ تاریخچه نیروی تماسی-زمان را برای ضربات اول تا چهارم بر روی ورق فولادی نشان میدهد.

همان طور که در شکل نشان داده شده است با افزایش تعداد ضربه، نیروی تماسی افزایش و زمان تماس کاهش مییابد؛ بنابراین در شبیهسازی ضربه تکراری بر روی فولاد 100-Xنیز اثر کرنش سختی دیده میشود.

۷- بحث بر روی نتایج

ضربههای تکراری بر روی ورق آلومینیومی موجب تغییر سفتی و مقاومت آن میگردد. با اعمال ضربه اول، تغییر شکل دائمی در محل ضربه ایجادشده که به صورت گودی بروز میکند. ضربات بعدی موجب افزایش عمق گودی میشوند.

DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.6.14.3



شکل ۱۷ بیشینه نیروی تماسی و انرژی جذب شده بر حسب تعداد ضربه



شکل ۱۸ مقایسه تاریخچه نیروی تماسی-زمان ضربه اول و دوم آلومینیوم و فولاد X-100

در ضربه چهارم ترک بسیار کوچکی در پشت صفحه ضربه خورده مشاهده میشود. در ضربه پنجم و ششم ترکها گسترش و با اعمال ضربات بعدی، گسترش ترک سبب سوراخ شدن ورق میشود. افزایش عمق گودی، ایجاد و رشد ترک، سبب تغییر سفتی و مقاومت ورق میشود و در نتیجه، نیروی تماسی بیشینه و انرژی جذبشده تغییر میکنند.شکل ۱۷ روند تغییرات این دو پارامتر را نشان میدهد.

مقدار نیروی بیشینه در ضربه دوم ۳۳/۲۶ درصد بیشتر از ضربه اول است. این نیرو در ضربات سوم و چهارم افزایش ولی پس از آن کاهش مییابد؛ به طوری که در ضربه چهارم به بیشترین مقدار خود میرسد؛ اما انرژی جذبشده از ضربه اول تا چهارم روند نزولی داشته و در ضربه چهارم به کمترین مقدار خود میرسد. افزایش نیروی تماسی بیشینه و کاهش انرژی جذبشده از ضربه دوم تا چهارم، به خاطر اثر کرنش سختی آلومینیوم است.

پس از ضربه چهارم نیروی تماسی کاهشیافته و در ضربه هشتم به ۴/۹۶ کیلو نیوتن یعنی ۱۵/۳۵ درصد بیشتر از نیروی ضربه اول میرسد. انرژی جذبشده به خاطر افت سفتی و مقاومت در اثر رشد ترک گسترش مییابد. در ضربههایی که فرورفتن و سوراخ شدن رخ داده انرژی جذبشده بیش ترین مقدار را دارد.شبیه سازی جهت صحت سنجی ضربه تکراری بر روی آلومینیوم انجام گرفت. با مقایسه نتایج تجربی و نظریه، توافق خوبی بین آنها مشاهده شد و مقدار آسیب و ناحیه آسیب در ضربههای اول، دوم و سوم نشان داده شد. علاوه بر شبیه سازی ضربه تکراری بر روی آلومینیوم، شبیه سازی بر روی فولاد 100-X نیز انجام شد. شکل ۱۸ تاریخچه نیرو-زمان ضربات اول و دوم را برای فولاد و آلومینیوم نشان می دهد که در هر دو ضربه نیروی تماسی فولاد

از آلومینیوم به خاطر استحکام بالای فولاد بیشتر است. پارامترهای مورد نیاز مدل لمتق برای آلومینیوم در این مطالعه به دست آمد و پارامترهای فولاد از مرجع [۲۸] اخذ شد. از آنجایی که مدل لمتق در مکانیک محیط پیوسته در مواد نرم استفاده میشود [۹] به شرط داشتن پارامترهای مورد نیاز مدل لمتق میتوان از آن استفاده کرد بنابراین علاوه بر آلومینیوم و فولاد شبیه سازی ضربه تکراری برای مواد نرم دیگر به کار میرود و میتوان اثر پارامترهای مختلف مانند شرایط مرزی، سرعت و جرم ضربه زننده، هندسه ورق و غیره را تحت ضربه تکراری به صورت عددی مورد بررسی قرارداد و دیگر نیازی به انجام آزمایش تجربی نیست و باعث صرفهجویی در هزینه می شود.

۸- نتیجه گیری

در این تحقیق، ضربه کم سرعت تکراری بر روی ورق آلومینیوم به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفت. در بررسی آسیب ناشی از ضربههای تکراری از روش مکانیک آسیب محیط پیوسته استفادهشده و شبیهسازی عددی توسط نرمافزار آباکوس و کدنویسی آسیب به کمک زیر برنامه وی.یو.متانجام شده است. ضربههای تکراری با انرژی ضربه یکسان بر روی روق آلومینیومی اعمال شدند. تغییر شکل پلاستیسیته ناشی از ضربه اول بر روی ورق دیده شد. با اعمال ضربههای بعدی (ضربه دوم، سوم و چهارم) اثر کرنش سختی تا قبل از ایجاد ترک در آلومینیوم ملاحظه و پس از ایجاد ترک، کاهش سفتی در سازه مشاهده شد. با انجام ضربههای بعدی آسیب افزایش و در نتیجه سفتی ورق کاهش یافت. در ضربههای هفتم و هشتم به ترتیب فرورفتن و سوراخ شدن ورق رخ داد.

با انجام ضربههای مختلف بر روی سازه، نیروی تماسی بیشینه تا قبل از ایجاد ترک در سازه ۲/۷۹٪ افزایش یافت؛ ولی پس از ایجاد ترک و رشد آن، کاهش در نیروی تماسی بیشینه دیده شد؛ به طوری که در ضربه آخر نیروی تماسی بیشینه ۲۴/۵۱٪ نسبت به بیشترین نیروی تماسی بیشینه کاهش یافت. با اعمال ضربه مقدار جذب انرژی تا قبل از ایجاد ترک کاهش و پس از شروع و گسترش ترک، انرژی جذبشده افزایش یافت.با استفاده از شبیه-سازی، مقدار آسیب و ناحیه آسیب در ضربات مختلف به دست آمد؛ به طوری که با افزایش تعداد ضربه، مقدار آسیب و ناحیه آسیب افزایش یافت و مشخص شد که با استفاده از روش مکانیک آسیب محیط پیوسته، میتوان پدیده ضربه تکراری را برای فلزات نرم تحلیل کرد و شرایط مختلف بارگذاری و هندسه ضربهزننده و هدف را مورد بررسی قرارداد.

۹- مراجع

- N. Bonora, D. Gentile, A. Pirondi, G. Newaz, Ductile damage evolution under triaxial state of stress: theory and experiments, *International Journalof Plasticity*, Vol. 21, pp. 981-1007, 2005.
- [2] A. Gurson, Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth: part 1-yield criteria and flow rules for porous ductile media, *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 99, pp. 2-15, 1997.
- [3] L.M. Kachanov, Time of the rupture process under creep conditions, TVZ Akad Nauk S.S.R Otd Tech. Naul, Vol.8, pp. 26-31, 1958.
- [4] F. Leckie, D. Hayhurst, Creep rupture of structures, Proc. R. Soc. London, Vol. A240, pp.323-330, 1974.
- [5] J. Hult, Creep in continua and structures Topic in Applied continuum mechanics, Springer-Verlag, Vienna, 1974.
- [6] H.W. Tai, Plastic damage and ductile fracture in mild steels, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 36, pp. 853-880, 1990.
- [7] J.L. Chaboche, Anisotropic creep damage in the framework of the continuum damage mechanics, *Nuclear Engineering and Design*, Vol.79, pp. 309-319, 1984.

- [19] N. Nishimura, K. Murase, T. Ito, R. Nowak, Ultrasonic evaluation of spall damage accumulation in aluminum and steel subjected to repeated impact, *International Journal of impact Engineering*, Vol. 38, No. 4, pp. 152-161, 2011.
- [20] G.R. Rajkumar, M. Krishna, H.N. Narasimha Murthy, S.C. Sharma, K.R. Vishnu Mahesh, Experimental investigation of low velocity Repeated impacts on Glass Fiber metal composites, *JMEPEG*, Vol. 21, No. 7, pp.1485-1490, 2012.
- [21] G.R. Rajkumar, M. Krishna, H.N. Narasimha Murthy, S.C. Sharma, K.R. Vishnu Mahesh, Investigation of Repeated low velocity impact behavior of GFRP/Aluminium and CFRP / Aluminium Laminates, *International of Journal Soft Computing Engineering*, Vol. 1, No. 6, pp. 50-58, 2012.
- [22] F.D. Moriniere, R.C. Alderliesten, M. Yarmohammad Tooski, R. Benedictus, Damage Evolution in GLARE-Fiber-Metal Laminate under Repeated Low-Velocity Impact Tests, *Central European Engineering*, Vol. 2, No. 4, pp. 603-611, 2012.
- [23] M. Yarmohammad Tooski, R.C. Alderliesten, R. Ghajar, S.M.R. Khalili, Experimental investigation on distance effects in repeated low velocity impact on Fiber-Metal Laminates, *Composite Structure*, Vol. 99, pp.31-40,2013.
- [24] J.C. Simo, T.J.R. Hughes, "Computational Inelasticity", Springer-Verlag New York, 2008.
- [25] J. Lemaitre, J. Dufailly,Damage measurements, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 28, No. 5-6, pp. 643-661, 1987.
- [26] N. Bonora, A. Ruggiero, S.D. Meo, D. Gentile, L. Esposito, A revised approach to damage measurement based on stiffness loss, *Proceeding of PVP2008, ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference July 27-*31, Chicago, Illinopis, USA,2008.
- [27] N. Bonora, D. Gentile, A. Pirondi, Identification of the parameters of a non-linear continuum damage mechanics model for ductile failure in metals, *Journal of strain Analysis*, Vol. 39, No. 6, pp. 639-651, 2004.
- [28] A. Keshavarz, A Continuum Damage Mechanics Approach to Ductile Failure Using Anisotropic, PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, 2012. (In Persian)

- [8] J. Lemaitre, How to use damage mechanics, Nuclear Engineering and Design, Vol.80, pp.233-245, 1984.
- [9] J. Lemaitre, A continuous damage mechanics model for ductile fracture. *Journal Engineering materials and Technology*, Vol. 107, pp. 83-89, 1985
- [10] J.L..Chaboche, Continuum damage mechanics:part II-damage growth, crack initiation and crack growth, *Journal Applied Mechanics*, Vol. 55, pp. 65-72, 1988.
- [11] T.J. Wang, Unified CDM model and local criterion for ductile fracture-I. Unified CDM model for ductile fracture, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 42, pp. 177-83, 1992.
- [12] N. Bonora, A nonlinear CDM model for ductile failure, *Engineering fracture mechanics*, Vol. 58, pp. 11-28, 1997.
- [13] T. Borvik, O.S. Hopperstad, T. Berstad, M.L Langseth, A computational model of viscoplasticity and ductile damage for impact and penetration, *European Journal of Mechanics A-Solids*, Vol. 20, pp. 685-712, 2001.
- [14] F.M. Andrade Pires, E.A. de Souza Neto, D.R.J. Owen, On the finite element prediction of damage growth and fracture initiation in finitely deforming ductile materials, *Computer Methods Applied Mechanic Engineering*, Vol. 193, pp. 5223-5256, 2004.
- [15] R. Ghajar, G. Mirone, A. Keshavarz, Ductile failure of X-100 pipeline steel-Experiments and fractography, *Materials and Design*, Vol. 43, pp. 513-525, 2013.
- [16] M. Brunig, S. Gerke, Simulation of damage evolution in ductile metals undergoing dynamics loading conditions, *International Journal of plasticity*, Vol. 27, pp. 1598-1617, 2011.
- [17] H. Minamoto, R. Seifried, P. Eberhard, S. Kawamura, Analysis of repeated impacts on a steel rod with visco-plastic material behavior, *European Journal of Mechanics A/Solids*, Vol. 30, pp. 336-344, 2011.
- [18] R. Seifried, W. Schiehlen, P. Eberhard, Numerical and experimental evaluation of the coefficient of restitution for repeated impacts, *International Journal of impact Engineering*, Vol. 32, pp.508-524, 2005.