



بررسی تجربی و عددی ضربه کم سرعت تکراری بر روی ورق آلومینیم از دیدگاه مکانیک آسیب محیط پیوسته

رحمت الله قاجار^{۱*}، سید محمد رضا خلیلی^۲، مهدی یارمحمد توسکی^۳

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 دکتری دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
 * صندوق پستی ۱۹۹۹-۱۹۳۹۵، ghajar@kntu.ac.ir

چکیده

در این تحقیق، بررسی تجربی و عددی ضربه تکراری با سرعت کم، بر روی ورق آلومینیم 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 روی ورق دیده می‌شود. با اعمال ضربات بعدی، اثر کرنش سختی تا قبل از ترک در آلومینیم ملاحظه می‌شود. بعد از ایجاد ترک، سفتی سازه کاهش می‌یابد 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 می‌گیرد؛ به طوری که مقایسه نتایج تجربی و عددی نمودارهای نیرو-زمان و نیرو-جابجایی توافق خوبی را نشان می‌دهد.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
 دریافت: ۲۶ خرداد ۱۳۹۲
 پذیرش: ۱۶ مهر ۱۳۹۲
 ارائه در سایت: ۲۲ تیر ۱۳۹۳
 کلید واژگان:
 ضربه تکراری
 مکانیک آسیب محیط پیوسته
 سوراخ شدن
 انرژی جذب‌شده
 نیروی تماسی

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

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
 Received 16 June 2013
 Accepted 08 October 2013
 Available Online 13 July 2014

Keywords:
 Repeated Impact
 Continuum Damage Mechanics
 Perforation
 Absorbed Energy
 Contact Force

ABSTRACT

In this study, repeated low velocity impacts on aluminum plate are investigated experimentally and numerically. In order to investigate the failure mechanism, the Lemire'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. 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. 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.

۱- مقدمه

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 تسلیم و حذف المان با رسیدن تنش‌های آن به یک مقدار مشخص انجام می‌گیرد. روش دوم یعنی مدل پلاستیسیته متخلخل توسط گرسون [۲] ارائه شد که در آن رشد حفره بر روی سطوح تسلیم در نظر گرفته می‌شود. مکانیک آسیب محیط پیوسته روش جدیدی برای واماندگی نرم است. در این روش شاخص آسیب به عنوان متغیر داخلی برای توصیف کاهش پیش‌رونده

واماندگی نرم^۱ 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 می‌شوند: (۱) روش واماندگی ناگهانی (۲) مدل پلاستیسیته متخلخل (۳) مکانیک

1- Ductile Failure

Please cite this article using:

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)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

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

به طور کلی آسیب فلزات شامل فرایند جوانه زنی، رشد ریزترک‌ها و حفره‌ها است. در این روش پدیده آسیب، ناپیوسته است. کاجانوف برای اولین بار متغیر 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 و خزش و واماندگی نرم در پلاستیسیته کاربرد دارند [۴-۶].

در فرمول‌بندی‌ها، آسیب به صورت ایزوتروپیک و غیرایزوتروپیک در نظر گرفته می‌شود. 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 فرمول‌بندی آسیب ناهمسانگرد توسط محققین مختلف ارائه شده است [۸]. لمتق برای اولین بار اصطلاح مکانیک آسیب پیوسته را به کاربرد و توضیحات مفصلی درباره آن ارائه کرد [۹]. قانون رشد آسیب جدیدی برای واماندگی نرم توسط چوپچه 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 برونینگ و همکاران [۱۶] مکانیک آسیب را در بارگذاری دینامیکی مورد استفاده قرار دادند.

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.داین^۱ بررسی کردند. ضریب برگشت‌پذیری برای ضربات تکراری به صورت عددی و آزمایشگاهی توسط سفید 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-C و اسکن-B بررسی کردند. علاوه بر فلزات، تعدادی تحقیق در مورد ضربه تکراری بر روی سازه‌های هیبریدی کامپوزیت-فلز^۲ 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 قرار دادند. اگر در کامپوزیت-فلز از الیاف شیشه نوع S استفاده

شود گلار حاصل می‌شود. 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 می‌شود. با تشکیل ترک در فلز، کاهش فاصله محل ضربه‌ها، سبب کاهش سفتی ورق و در نتیجه کاهش نیروی تماسی و افزایش زمان تماس می‌شود.

آلومینیوم در صنعت کاربرد فراوانی دارد از جمله: در بال هواپیما، پره بالگرد، بال و پره هواپیماهای سبک مانند جاپروپلن. 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 می‌طلبد. اگر چه اکثر مطالعات انجام‌گرفته 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 می‌کند لذا در این مقاله به این موضوع پرداخته می‌شود. در مدل‌سازی علاوه بر لحاظ رفتار الاستوپلاستیک از روش مکانیک آسیب محیط پیوسته برای واماندگی ورق استفاده می‌شود. نمودارهای نیرو-جابجایی و انرژی جذب‌شده از آزمایش‌ها استخراج و با استفاده از مکانیک آسیب محیط پیوسته، شبیه‌سازی به کمک نرم‌افزار آباکوس در زیر برنامه وی.یو.مت^۴ انجام خواهد شد.

۲- مدل آسیب

در چارچوب 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 ریزترک‌هاست. آسیب می‌تواند به وسیله کاهش سطح مقطع اسمی المان حجمی نمایانگر به صورت رابطه (۱) بیان شود [۱۲].

$$D_n = 1 - \frac{A_{eff}^n}{A_0^n} \quad (1)$$

A_0^n سطح مقطع اسمی المان حجمی نمایانگر و A_{eff}^n سطح مقطع مؤثر و n بردار عمود بر سطح است. ملاحظه می‌شود 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

3- GLARE(Glass Fiber Reinforced)
4- Vumat

1- LsDyna
2- Fibre Metal Laminates

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].

$$\dot{D} = -\frac{\dot{\lambda}}{1-D} \left(\frac{Y}{S} \right)^s \quad (12)$$

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

$$\dot{\lambda} \geq 0; \quad f \leq 0; \quad \dot{\lambda} f = 0 \quad (13)$$

۳- فرمول‌بندی الاستوپلاستیک کوپل شده با آسیب

در اثر ضربه، ورق آلومینیوم رفتار الاستوپلاستیک ارائه و آسیب در آن ایجاد می‌شود. به دلیل غیرخطی بودن رفتار یک ماده الاستوپلاستیک کوپل با آسیب، مسئله به صورت نموی و مرحله‌ای حل می‌شود 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 می‌شوند. الگوریتم مورد استفاده بر اساس جدا کردن عملگرها است که در آن یک اپراتور پیش‌بینی کننده الاستیک^۳ و یک عملگر اصلاح کننده پلاستیک-آسیب^۵ مورد استفاده قرار می‌گیرد. 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 می‌توان ارائه کرد.

$$\varepsilon_{n+1}^{e-trial} = \varepsilon_n + \Delta \varepsilon \quad (14)$$

$$\sigma_{n+1}^{trial} = (1 - D_n) C : \varepsilon_{n+1}^{e-trial} \quad (15)$$

$$\varepsilon_{n+1}^{p-trial} = \varepsilon_n^p \quad (16)$$

$$r_{n+1}^{trial} = r_n \quad (17)$$

$$D_{n+1}^{trial} = D_n \quad (18)$$

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 $f \leq 0$ باشد این شرایط برقرار است و مقادیر به دست آمده نهایی هستند. چنانچه $f > 0$ باشد شرایط کان-تاکر ارضا نشده و مقادیر به گونه‌ای هستند که نقطه تسلیم بیرون از سطح تسلیم قرار می‌گیرد. الگوریتم اصلاحی پلاستیک-آسیب که نگاشت بازگشتی^۶ نامیده می‌شود مورد استفاده قرار می‌گیرد 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 فرمول‌بندی‌ها باید وارد شود تا مقدار افزایش تنش در این مرحله کاهش یابد. همچنین آسیب نیز همزمان با پلاستیسیته شروع به رشد می‌کند؛ بنابراین باقیمانده‌های کرنش پلاستیک، سخت شوندگی ایزوتروپیک و آسیب به صورت روابط (۱۹) تا (۲۱) قابل تعریف هستند.

$$Re_{n+1}^p = -\varepsilon_{n+1}^p + \varepsilon_n^p + (\Delta \lambda \partial_\sigma f)_{n+1} \quad (19)$$

$$Re_{n+1}^h = -r_{n+1} + r_n + (-\Delta \lambda \partial_r f)_{n+1} \quad (20)$$

$$Re_{n+1}^D = -D_{n+1} + D_n + (-\Delta \lambda \partial_Y F_D)_{n+1} \quad (21)$$

باقیمانده‌های فوق باید در انتهای مرحله برابر با صفر باشند، با خطی‌سازی روابط (۱۹) تا (۲۱) روابط (۲۲) تا (۲۴) حاصل می‌شود.

لمتق، متغیر آسیب را به این صورت بیان می‌کند [۹].

$$D = 1 - \frac{E_{eff}}{E_0} \quad (2)$$

که E_0 و E_{eff} به ترتیب مدول الاستیسیته ماده بدون آسیب و آسیب دیده هستند. در چارچوب مکانیک آسیب محیط پیوسته، علاوه بر پتانسیل ناشی از پلاستیسیته، پتانسیل اتلاف آسیب F_D نیز موجود است. به طور کلی پتانسیل اتلافی، مجموع پتانسیل اتلاف پلاستیسیته و آسیب است که به صورت رابطه (۳) بیان می‌شود:

$$F = f(\bar{\sigma}, R, X) + F_D(Y, P, D) \quad (3)$$

در رابطه (۳) Y متغیر داخلی همراه آسیب، P کرنش پلاستیک انباشته و f پتانسیل اتلاف همراه با تغییر شکل پلاستیک (تابع تسلیم) است که تابع تانسور تنش واقعی $\bar{\sigma}$ و پس‌تنش سخت‌شونده^۱ و سینماتیکی^۲ X و R 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 ایزوتروپیک به صورت رابطه (۴) استخراج می‌شوند و کرنش کل به دو مؤلفه کرنش الاستیک و پلاستیک تجزیه می‌شود.

$$\varepsilon_{ij}^T = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p \quad (4)$$

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

$$\varepsilon_{ij}^e = \frac{1+\nu}{E} \frac{\sigma_{ij}}{1-D} - \frac{\nu}{E} \frac{\sigma_{kk}}{1-D} \delta_{ij} \quad (5)$$

همچنین رابطه (۶) تابع تسلیم بر حسب تنش فون میسز و آسیب را به صورت زیر بیان می‌کند.

$$f(\sigma, R; D) = \frac{\sigma_{eq}}{1-D} - R(r) - \sigma_y \quad (6)$$

در روابط (۵) و (۶)، σ_y ، σ_{eq} ، ν 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 پلاستیسیته به دست می‌آیند.

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^p = \dot{\lambda} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} = \dot{\lambda} \frac{3}{2} \frac{\dot{S}_{ij}}{1-D} \frac{1}{\sigma_{eq}} \quad (7)$$

و

$$\dot{r} = -\dot{\lambda} \frac{\partial f}{\partial R} \quad (8)$$

که S_{ij} بخش انحرافی تانسور تنش، $\dot{\lambda}$ ، ضریب پلاستیک و علامت • معرف مشتق نسبت به زمان هستند. به روش مشابه، نرخ آسیب با استفاده از پتانسیل اتلاف آسیب محاسبه شده و به صورت رابطه (۹) بیان می‌شود.

$$\dot{D} = -\dot{\lambda} \frac{\partial F_D}{\partial Y} \quad (9)$$

لمتق [۹] پتانسیل اتلاف آسیب را برحسب نیروی همراه آسیب، ثابت‌های مادی S ، s و متغیر آسیب به صورت رابطه (۱۰) بیان کرد.

$$F_D = \frac{S}{(s+1)(1-D)} \left(\frac{Y}{S} \right)^{s+1} \quad (10)$$

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

$$Y = \frac{1}{2} \varepsilon^e : E : \varepsilon^e \quad (11)$$

3- Operator split

4- Elastic predictor operator

5- Damage- plastic predictor operator

6- Return mapping

1- Hardening back stress

2- Kinematic back stress

$$\begin{aligned}
 MK = & \frac{\partial_D f_{n+1} \left(\partial_Y F_{n+1}^D - FS_{n+1}^D : (FS_{n+1}^p)^{-1} : \partial_\sigma f_{n+1} \right)}{FS_{n+1}^D : (FS_{n+1}^p)^{-1} : FD_{n+1}^p - FD_{n+1}^D} \\
 & + \partial_r R_{n+1} + \partial_\sigma f_{n+1} : \left(- (FS_{n+1}^p)^{-1} : FD_{n+1}^p \right) \\
 & \times \frac{\left(\partial_Y F_{n+1}^{D+1} - FS_{n+1}^D : (FS_{n+1}^p)^{-1} : \partial_\sigma f_{n+1} \right)}{FS_{n+1}^D : (FS_{n+1}^p)^{-1} : FD_{n+1}^p - FD_{n+1}^D} \\
 & - (FS_{n+1}^p)^{-1} : \partial_\sigma f_{n+1} \quad (31)
 \end{aligned}$$

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

$$FS_{n+1}^p = \left(\frac{C^{-1}}{1 - D_{n+1}} + \Delta\lambda_{n+1} \partial_{\sigma\sigma} f_{n+1} \right) \quad (32)$$

$$FD_{n+1}^p = \frac{C^{-1} : \sigma_{n+1}}{(1 - D_{n+1})^2} + \Delta\lambda_{n+1} \partial_{\sigma D} f_{n+1} \quad (33)$$

$$FS_{n+1}^D = \frac{1}{2} \Delta\lambda_{n+1} \partial_{YY} F_{n+1}^D \left(\frac{\sigma_{n+1} C^{-1}}{(1 - D_{n+1})^2} + \frac{\varepsilon_{n+1}^e}{1 - D_{n+1}} \right) \quad (34)$$

$$\begin{aligned}
 FD_{n+1}^D = & \frac{1}{2} \Delta\lambda_{n+1} \partial_{YY} F_{n+1}^D \left(\frac{\varepsilon_{n+1}^e : \sigma_{n+1}}{(1 - D_{n+1})^2} + \frac{\sigma_{n+1} : C^{-1} : \sigma_{n+1}}{(1 - D_{n+1})^3} \right) \\
 & + \Delta\lambda_{n+1} \partial_{YD} F_{n+1}^D - 1 \quad (35)
 \end{aligned}$$

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

$$(k+1)\Delta\lambda_{n+1} = (k)\Delta\lambda_{n+1} + (k)d\Delta\lambda_{n+1} \quad (36)$$

$$(k+1)\varepsilon_{n+1}^p = (k)\varepsilon_{n+1}^p + (k)d\varepsilon_{n+1}^p \quad (37)$$

$$(k+1)\sigma_{n+1} = (k)\sigma_{n+1} + (k)d\sigma_{n+1} \quad (38)$$

$$(k+1)r_{n+1} = (k)r_{n+1} + (k)dr_{n+1} \quad (39)$$

$$(k+1)D_{n+1} = (k)D_{n+1} + (k)dD_{n+1} \quad (40)$$

در انتهای هر زیر مرحله شرایط کان-تاکر باید بررسی شود. اگر این شرایط برقرار باشد، مقادیر به دست آمده، نهایی و قابل قبول 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 آسیب دیده ضروری هستند. مدول یانگ را می‌توان به روش‌های متفاوتی تعیین کرد. در روش‌های مکانیکی معمولاً این پارامتر به وسیله باربرداری و بارگذاری حین آزمون کشش و محاسبه شیب بارگذاری به دست می‌آید. روش‌های دیگری نیز مانند اندازه‌گیری 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 دو روش اخیر مشابه نتایج استخراج شده از باربرداری است [۲۶]. از آنجا که آسیب در مواد شکل‌پذیر 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

$$\begin{aligned}
 (k)Re_{n+1}^p + (k)dRe_{n+1}^p &= 0 \Rightarrow \\
 (k)Re_{n+1}^p - (k)d\varepsilon_{n+1}^p + (k)d(\Delta\lambda \partial_\sigma f)_{n+1} &= 0 \quad (22)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 (k)Re_{n+1}^h + (k)dRe_{n+1}^h &= 0 \Rightarrow \\
 (k)Re_{n+1}^h - (k)dr_{n+1} + (k)d(-\Delta\lambda \partial_R f)_{n+1} &= 0 \quad (23)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 (k)Re_{n+1}^D + (k)dRe_{n+1}^D &= 0 \Rightarrow \\
 (k)Re_{n+1}^D - (k)dD_{n+1} + (k)d(-\Delta\lambda \partial_Y F_D)_{n+1} &= 0 \quad (24)
 \end{aligned}$$

با بسط و ساده‌سازی دیفرانسیل‌های روابط (۲۲)، (۲۳) و (۲۴) مقادیر نمو تغییرات سخت شوندگی ایزوتروپیک، آسیب، تنش و کرنش پلاستیک به صورت روابط (۲۵) تا (۲۸) به دست می‌آیند:

$$(k)dr_{n+1} = Re_{n+1}^h - d\Delta\lambda_{n+1} \quad (25)$$

$$\begin{aligned}
 (k)d\Delta D_{n+1} = & \frac{\left(Re_{n+1}^D - FS_{n+1}^D : (FS_{n+1}^p)^{-1} : Re_{n+1}^p \right)}{FS_{n+1}^D : (FS_{n+1}^p)^{-1} : FD_{n+1}^p - FD_{n+1}^D} \\
 & + \frac{\left(\partial_Y F_{n+1}^D - FS_{n+1}^D : (FS_{n+1}^p)^{-1} : \partial_\sigma f_{n+1} \right) d\Delta\lambda_{n+1}}{FS_{n+1}^D : (FS_{n+1}^p)^{-1} : FD_{n+1}^p - FD_{n+1}^D} \\
 & + \frac{\left(- (FS_{n+1}^p)^{-1} : FD_{n+1}^p \right) Re_{n+1}^D}{FS_{n+1}^D : (FS_{n+1}^p)^{-1} : FD_{n+1}^p - FD_{n+1}^D} \quad (26)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 (k)d\Delta\sigma_{n+1} = & \frac{\left(- (FS_{n+1}^p)^{-1} : FD_{n+1}^p \right) Re_{n+1}^D}{FS_{n+1}^D : (FS_{n+1}^p)^{-1} : FD_{n+1}^p - FD_{n+1}^D} \\
 & - \left(FS_{n+1}^p \right)^{-1} : Re_{n+1}^p \\
 & + \frac{\left(\left(FS_{n+1}^p \right)^{-1} : FD_{n+1}^p \right) \left(FS_{n+1}^D : (FS_{n+1}^p)^{-1} : Re_{n+1}^p \right)}{FS_{n+1}^D : (FS_{n+1}^p)^{-1} : FD_{n+1}^p - FD_{n+1}^D} \\
 & + \frac{\left(\partial_Y F_{n+1}^D - FS_{n+1}^D : (FS_{n+1}^p)^{-1} : \partial_\sigma f_{n+1} \right)}{FS_{n+1}^D : (FS_{n+1}^p)^{-1} : FD_{n+1}^p - FD_{n+1}^D} \\
 & \times \left(- \left(FS_{n+1}^p \right)^{-1} : FD_{n+1}^p \right) - \left(FS_{n+1}^p \right)^{-1} : \partial_\sigma f_{n+1} \quad (27)
 \end{aligned}$$

$$(k)d\varepsilon_{n+1}^p = -C^{-1} d\Delta\sigma_{n+1} \quad (28)$$

با جایگذاری روابط (۲۵) تا (۲۷) در شرایط سازگاری $f = 0$ و $\dot{f} = 0$ مقدار $d\Delta\lambda_{n+1}^{(k)}$ طبق رابطه (۲۹) به دست می‌آید:

$$(k)d\Delta\lambda_{n+1} = -\frac{ST}{MK} \quad (29)$$

طبق روابط (۳۰) و (۳۱) داریم:

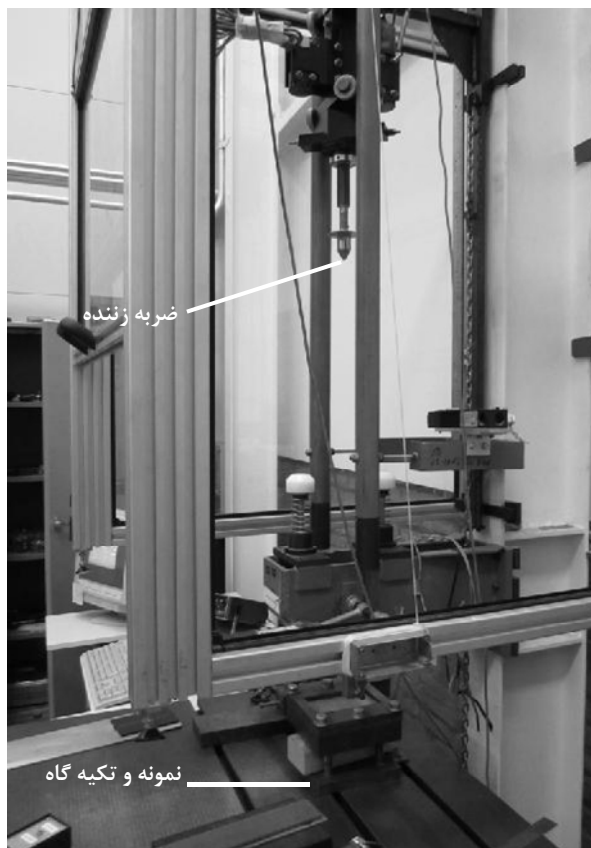
$$\begin{aligned}
 ST = f_{n+1} + & \frac{\partial_D f_{n+1} \left(Re_{n+1}^D - FS_{n+1}^D : (FS_{n+1}^p)^{-1} : Re_{n+1}^p \right)}{FS_{n+1}^D : (FS_{n+1}^p)^{-1} : FD_{n+1}^p - FD_{n+1}^D} \\
 & - \partial_r R_{n+1} Re_{n+1}^h + \frac{\partial_\sigma f_{n+1} : \left(- (FS_{n+1}^p)^{-1} : FD_{n+1}^p \right) Re_{n+1}^D}{FS_{n+1}^D : (FS_{n+1}^p)^{-1} : FD_{n+1}^p - FD_{n+1}^D} \\
 & + \frac{\left(\left(FS_{n+1}^p \right)^{-1} : FD_{n+1}^p \right) \partial_\sigma f_{n+1} : \left(FS_{n+1}^D : (FS_{n+1}^p)^{-1} : Re_{n+1}^p \right)}{FS_{n+1}^D : (FS_{n+1}^p)^{-1} : FD_{n+1}^p - FD_{n+1}^D} \\
 & - \partial_\sigma f_{n+1} : \left(FS_{n+1}^p \right)^{-1} : Re_{n+1}^p \quad (30)
 \end{aligned}$$

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 K و S برای نمونه‌های مختلف به دست می‌آیند. با متوسط گیری از نتایج حاصل مقادیر K و S به ترتیب برابر $0/8899$ مگاپاسکال و $0/6208$ به دست می‌آیند.

۵- آزمایش‌ها

آزمایش‌های ضربه با دستگاه ضربه افتان در دانشگاه هوافضا پلی تکنیک دلفت آکسور 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 لبه‌های نمونه دو قاب سوراخ دار گذاشته و قاب‌ها توسط شش پیچ به یکدیگر متصل می‌شوند. با گشتاورمتر به هر پیچ گشتاور ۳۰ نیوتن متر اعمال و باعث می‌شود نمونه آلومینیومی تحت شرایط مرزی گیردار- گیردار قرار گیرد و ناحیه آزاد تحت ضربه دارای طول $12/5$ سانتیمتر و عرض $7/5$ سانتیمتر باشد به طوری که از ضربه زننده مخروطی با جرم $1/058$ کیلوگرم استفاده می‌شود. دستگاه ضربه افتان همراه با نمونه، تکیه‌گاه‌ها و ضربه زننده در شکل ۴ نشان داده شده است. ضربات مختلف از ارتفاع 125 سانتیمتر (با انرژی ضربه $11/5$ ژول) بر روی نمونه اصاب می‌کنند. برای تکرارپذیری در هر ضربه، آزمایش روی ۵ تا ۶ نمونه انجام و بعد از هر ضربه با استفاده از یک تکه فلزی از ضربه‌های بعدی جلوگیری می‌شود.

ضربه‌های تکراری با انرژی ضربه یکسان به مقدار $11/5$ ژول در وسط ورق اعمال می‌شود.

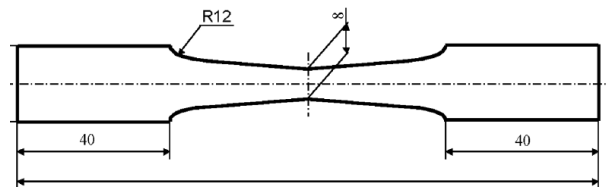


شکل ۴ دستگاه ضربه افتان همراه با نمونه، تکیه‌گاه‌ها و ضربه زننده

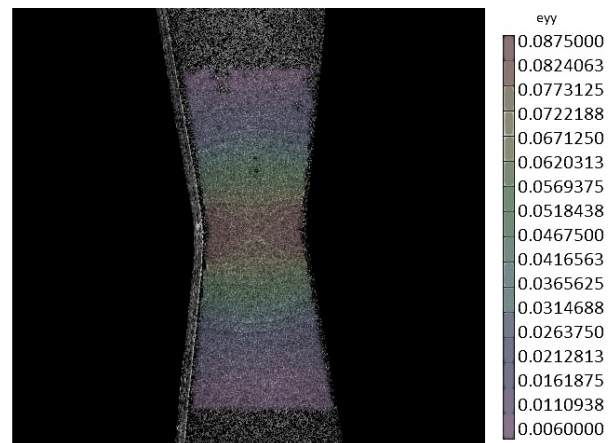
محاسبه و از آن تغییرات مدول یانگ را استخراج کرد.

به این منظور، مطابق مرجع [۲۷] نمونه‌هایی از جنس آلومینیوم 2024-T3 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 اندازه‌گیری 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.

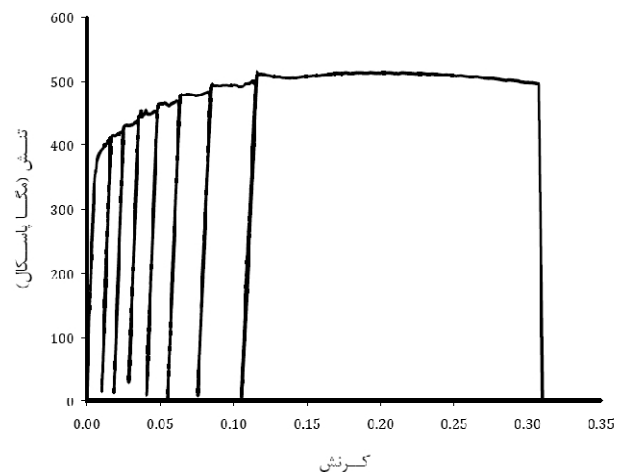
با استفاده از دو دوربین سه بعدی از تمامی مراحل باربرداری و بارگذاری عکس گرفته شد. پس از اتمام آزمایش‌ها تمامی عکس‌ها به نرم‌افزار مرتبط با دوربین سه بعدی^۱ وارد و برای ناحیه انتخاب شده تمامی تغییرمکان‌ها و کرنش‌های صفحه‌ای محاسبه شدند. شکل ۲ مقدار کرنش در راستای بارگذاری برای نقاط ناحیه مشخص شده در بار $3/1$ نیوتن را نشان می‌دهد.



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



شکل ۲ نمودار کرنش در راستای بارگذاری در بار $3/1$ نیوتن با استفاده از دوربین سه بعدی



شکل ۳ نمودار تنش - کرنش آلومینیوم برای بارگذاری و باربرداری‌های مختلف

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

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.

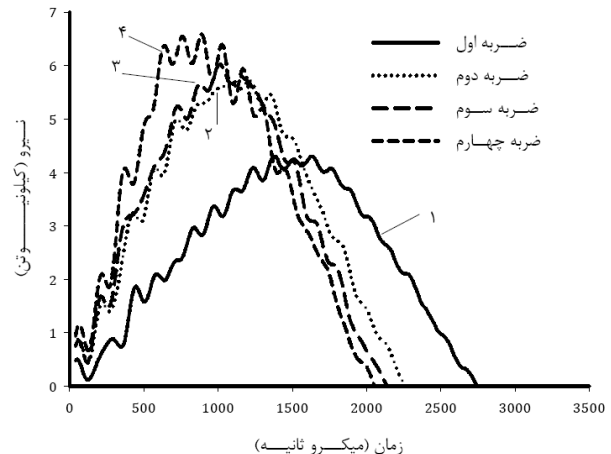
تاریخچه نیرو- زمان ضربه سوم تقریباً بر تاریخچه نیرو- زمان ضربه دوم منطبق است. در ضربه چهارم بر خلاف ضربه سوم، پاسخ ورق بر ضربه قبلی منطبق نیست ولی همانند ضربات قبلی، سفتی ورق افزایش می‌یابد. به طور کلی در ضربه‌های دوم، سوم و چهارم سفتی سازه نسبت به ضربه اول افزایش یافته است. این افزایش سفتی به اثر کرنش سختی برمی‌گردد. 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 می‌شود. 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 می‌شود. در ضربه ششم، ترک‌های مذکور گسترش یافته‌اند. در ضربه هفتم پدیده فرو رفتن^۱ و در ضربه هشتم پدیده سوراخ شدن^۲ به وقوع پیوسته است. فرو رفتن حالتی در نظر گرفته می‌شود که سیمی به قطر ۰/۳ 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 می‌شود 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 فرو رفتن اتفاق افتاده، کمترین نیروی تماس و بیشترین زمان تماس مشاهده می‌شود.

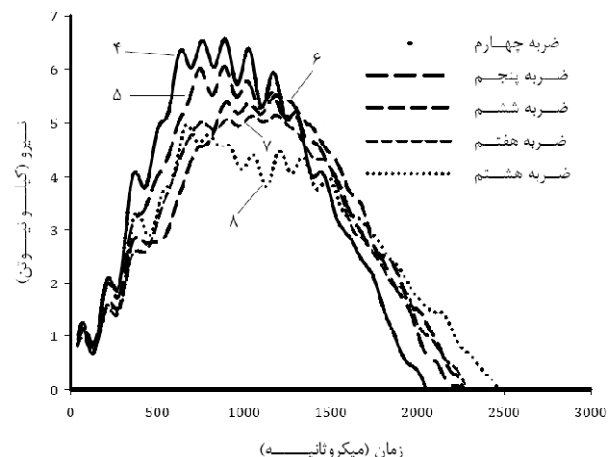
در شکل ۸ نمودار نیرو- جابجایی برای ضربه‌های مختلف رسم شده است. در هر ضربه مقدار تغییر مکان نسبی ضربه محاسبه و توسط دستگاه خوانده می‌شود. لیکن با توجه به رسم این نمودارها و انطباق تمامی آن‌ها لازم است تا جهت خواندن و تفسیر نمودارها، آن‌ها بر روی هم قرار نگیرند.

در نتیجه از روش جابجایی مبدأ^۳ استفاده شده 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 می‌شود، لیکن جابجایی کلی، همان جابجایی کل ورق بعد از هشت ضربه است.

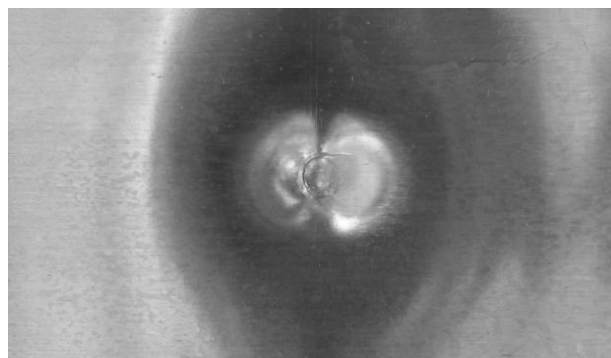
همان طور که در شکل ۸ مشخص است مقدار تغییر مکان دائمی ورق با افزایش تعداد ضربه افزایش می‌یابد. در ضربه اول به خاطر اثر پلاستیسیته تا قبل از رسیدن به نیروی بیشینه، تغییر مکان زیادی در ورق ایجاد ولی پس از رسیدن به نیروی بیشینه در جابجایی کمتری به نیروی صفر می‌رسد به طوری که شیب بارگذاری و باربرداری متفاوت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



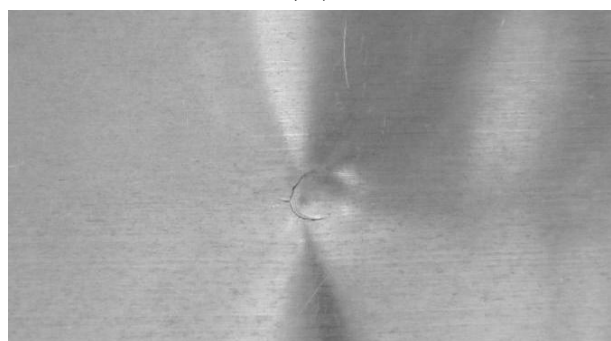
شکل ۵ تاریخچه نیروی تماس- زمان برای ضربه‌های اول تا چهارم



شکل ۶ تاریخچه نیروی تماس- زمان برای ضربه‌های چهارم تا هشتم



(الف)



(ب)

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

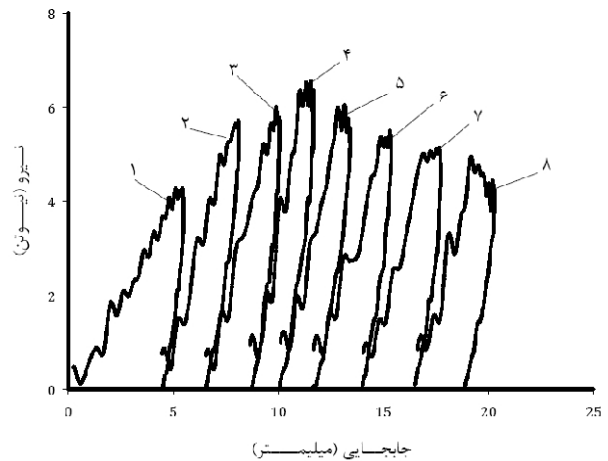
1- Perforation
2- Penetration
3- Offset

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 ایجاد شده در ورق در حال پیشروی است باعث می‌شود 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.

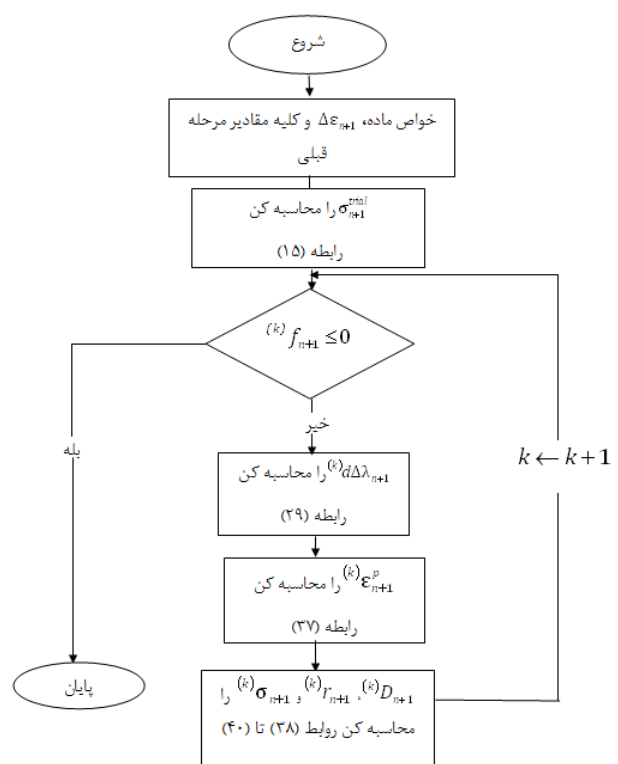
در جدول ۱ مقادیر جابجایی بیشینه، جابجایی دائمی، نیروی بیشینه، انرژی جذب شده، زمان تماس، زمان نیروی بیشینه و زمان جابجایی بیشینه برای ضربه‌های مختلف ارائه شده است. در ضربه اول که اثر پلاستیسیته در آن مشاهده شد، مقادیر جابجایی بیشینه، جابجایی دائمی، انرژی جذب شده و زمان تماس نسبت به ضربه دوم بیشتر است. با اعمال ضربه‌های بعدی (ضربه دوم، سوم و چهارم) مقادیر جابجایی بیشینه، جابجایی دائمی، انرژی جذب شده و زمان تماس کاهش می‌یابد. 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 ضربه‌ها، 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 است.

۶- شبیه‌سازی عددی و صحنه‌گذاری

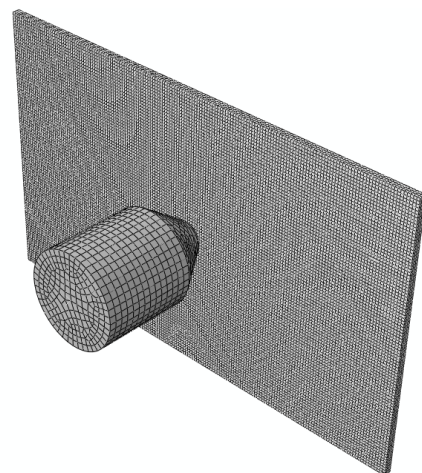
ضربه سرعت پایین بر روی آلومینیوم با نرم‌افزار آباکوس 6.12-1 شبیه‌سازی و آنالیز مسئله به روش دینامیکی صریح انجام می‌گیرد. کدنویسی آسیب با استفاده از زیر برنامه وی.یومت انجام گرفته که به نرم‌افزار آلمان محدود آباکوس مرتبط است. برای حل مسئله در این زیر برنامه، در هر نقطه انتگرال-گیری با داشتن نمو کرنش، محاسبه تنش انجام می‌گیرد. ورودی‌های 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 می‌گیرند. نمودار گردشی شکل ۹ نشان‌دهنده عملیاتی است که در زیر برنامه انجام می‌شود. در شبیه‌سازی ضربه سرعت پایین، ورق آلومینیومی مستطیلی به ابعاد ۱۲/۵ در ۷/۵ سانتیمتر تحت شرایط مرزی گیردار-گیردار مورد بررسی قرار می‌گیرد. از آلمان C3D8R و R3D4 به ترتیب برای مش‌بندی هدف و ضربه‌زننده استفاده می‌شود. 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.



شکل ۸ نمودار نیرو-جابجایی برای ضربه‌های اول تا هشتم



شکل ۹ روند نمای زیر برنامه وی.یومت



شکل ۱۰ مش‌بندی ورق و ضربه زننده

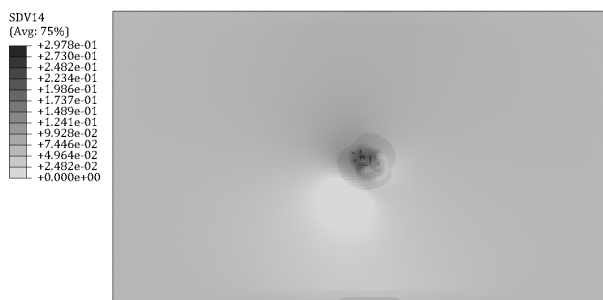
1- General Contact

جدول ۱ جابجایی، انرژی جذب شده، زمان و نیروی بیشینه در ضربه های مختلف

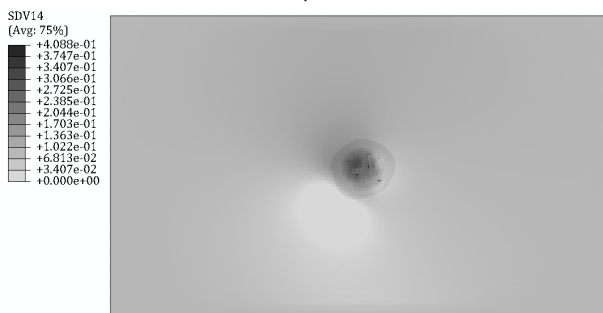
تعداد ضربه	زمان جابجایی بیشینه (μs)	زمان نیروی بیشینه (μs)	زمان تماس (μs)	انرژی جذب شده (J)	جابجایی دایمی (mm)	جابجایی بیشینه (mm)	نیروی بیشینه (kN)
۱	۱۸۳۴	۱۳۷۳	۲۷۳۵	۱۰/۱۱	۴/۵۰	۵/۴۹	۴/۳۰
۲	۱۳۱۰	۱۲۲۶	۲۲۳۵	۸/۱۸	۲/۳۳	۳/۸۶	۵/۷۳
۳	۱۲۶۲	۱۰۱۱	۲۱۱۹	۸/۰۸	۲/۳۰	۳/۶۹	۶/۰۲
۴	۱۱۲۳	۸۹۰	۲۰۴۳	۷/۷۴	۱/۶۲	۳/۲۳	۶/۵۷
۵	۱۲۲۲	۸۹۵	۲۱۷۷	۸/۰۳	۱/۸۹	۳/۵۲	۶/۰۴
۶	۱۳۴۶	۱۱۷۵	۲۲۶۸	۸/۵۹	۲/۴۹	۳/۷۹	۵/۵۱
۷	۱۳۵۶	۱۱۶۲	۲۲۸۰	۹/۲۶	۲/۶۶	۳/۸۸	۵/۱۴
۸	۱۴۱۶	۶۷۷	۲۴۷۱	۹/۰۹	۲/۴۲	۳/۸۴	۴/۹۶



(الف)



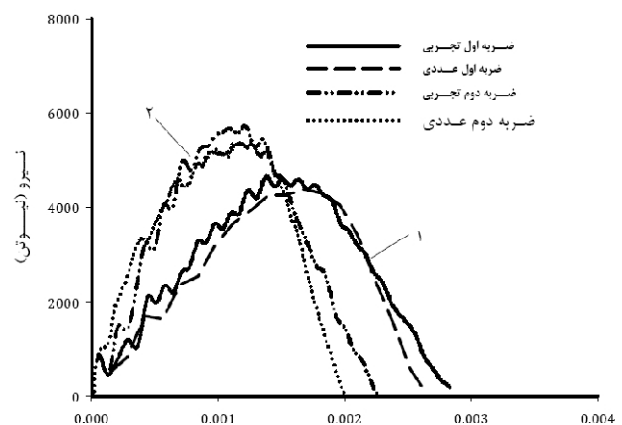
(ب)



(ج)

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

در شکل های ۱۳ و ۱۴ مقایسه نتایج عددی و تجربی نیرو- زمان ضربه های سوم، چهارم، پنجم و ششم نشان داده شده است. در ضربه سوم مدل تغییر شکل یافته ای که از ضربه دوم حاصل شده را به همراه متغیرهای حالت مانند آسیب، فراخوانی کرده و ورق تحت ضربه قرار داده می شود و برای ضربات بعدی نیز این روند تکرار می شود. از مقایسه نتایج تجربی و عددی در شکل ۱۳، تطابق خوبی برای ضربه سوم ملاحظه می شود. 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 می شود.



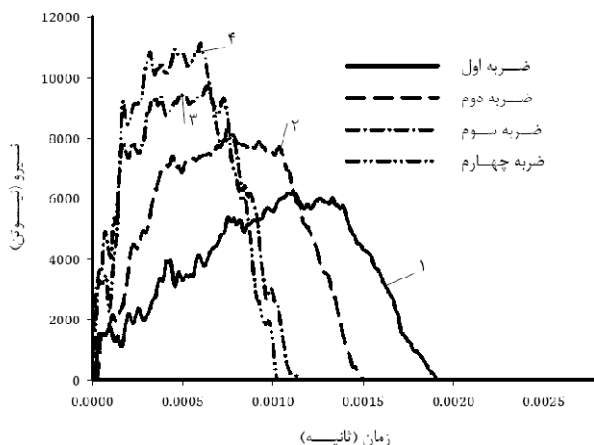
زمان (ثانیه)

شکل ۱۱ مقایسه نتایج عددی و تجربی نیرو-زمان برای ضربه اول و دوم

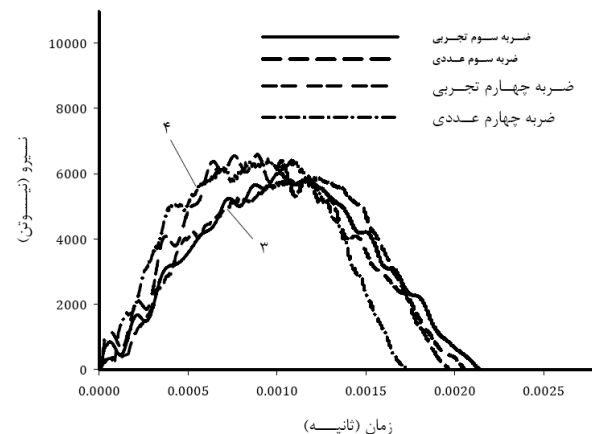
لازم به ذکر است که در تمامی نتایج عددی که در ادامه ارائه می شوند، اثر پلاستیسته و آسیب در شبیه سازی لحاظ شده و تاریخچه نیرو-زمان و نیرو-جابجایی با در نظر گرفتن آن ها به دست می آیند. مقایسه نتایج تجربی و عددی برای ضربه های اول و دوم در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همان طور که مشهود است، در ضربه اول تطابق خوبی بین روند نمودار و مقادیر عددی و تجربی برقرار است. بیشینه اختلاف بین نتایج تجربی و عددی ۷/۰۳ درصد است. برای مدل سازی ضربه دوم، شکل ورق تغییر یافته در اثر ضربه اول و همچنین نتایج تنش، کرنش و متغیرهای حالت مرحله آخر ضربه اول، در ابتدای ضربه دوم فراخوانی می شود. از مقایسه نتایج عددی و تجربی ضربه دوم ملاحظه می شود که روند مشابهی بین آن ها 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 نوشته شده، می توان تغییرات متغیر حالت آسیب ارائه شده 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 می شود. 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 می یابد به طوری که در ضربه سوم ناحیه آسیب و مقدار آن نسبت به ضربه اول و دوم بیشتر است.

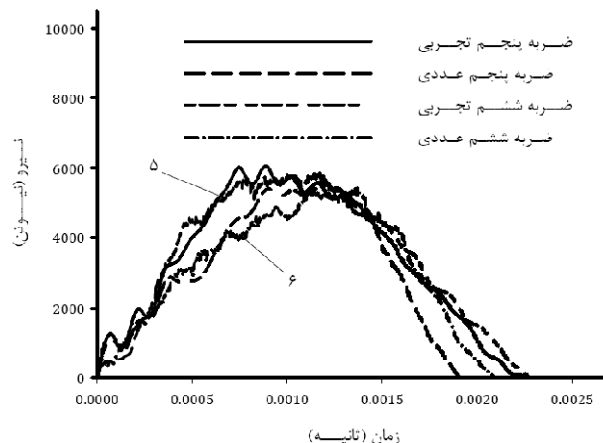
همان طور که ذکر شد، از ضربه دوم تا چهارم اثر کرنش سختی در ورق به وجود می آید که موجب افزایش نیروی تماس و کاهش زمان تماس می شود. از ضربه چهارم به بعد پیشروی و رشد ترک در ورق نمایان می شود لذا در این قسمت به شبیه سازی عددی اثر کرنش سختی و پیشروی ترک پرداخته می شود.



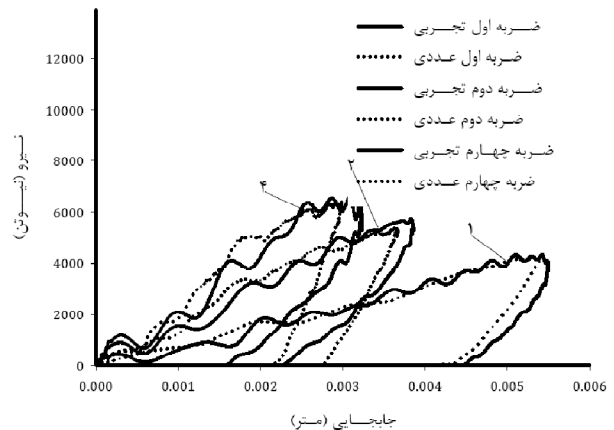
شکل ۱۳ مقایسه نتایج عددی و تجربی نیرو-زمان برای ضربه اول تا چهارم برای فولاد X-100



شکل ۱۴ مقایسه نتایج عددی و تجربی نیرو-زمان برای ضربه پنجم و ششم



شکل ۱۵ مقایسه نتایج عددی و تجربی نیرو-زمان برای ضربه هفتم و هشتم



شکل ۱۶ مقایسه نتایج عددی و تجربی نیرو-زمان برای ضربه اول تا 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.

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 ایجاد شده که به صورت گودی بروز می‌کند. ضربات بعدی موجب افزایش عمق گودی می‌شوند.

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 شبیه‌سازی 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 می‌شود.

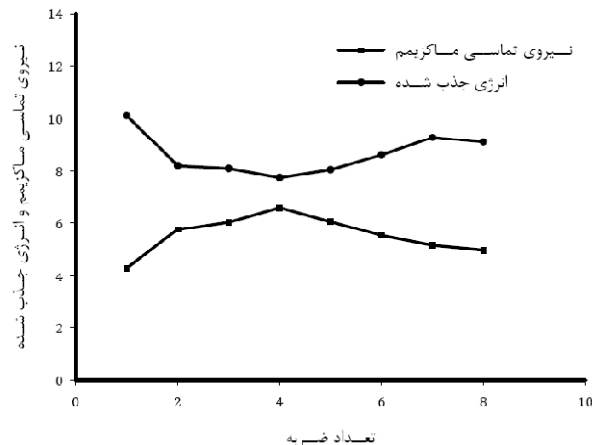
۸- نتیجه‌گیری

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 استفاده شده و شبیه‌سازی عددی توسط نرم‌افزار آباکوس و کدنویسی آسیب به کمک زیر برنامه وی.یوم.تاجام شده است. ضربه‌های تکراری با انرژی ضربه یکسان بر روی ورق 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.

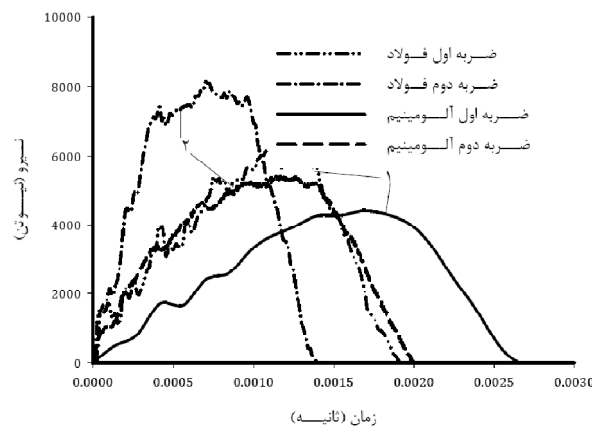
با انجام ضربه‌های مختلف بر روی سازه، نیروی تماسی بیشینه تا قبل از ایجاد ترک در سازه ۵۲/۷۹٪ افزایش یافت؛ ولی پس از ایجاد ترک و رشد آن، کاهش در نیروی تماسی بیشینه دیده شد؛ به طوری که در ضربه آخر نیروی تماسی بیشینه ۲۴/۵۱٪ نسبت به بیش‌ترین نیروی تماسی بیشینه کاهش یافت. با اعمال ضربه مقدار جذب انرژی تا قبل از ایجاد ترک کاهش و پس از شروع و گسترش ترک، انرژی جذب شده افزایش یافت. با استفاده از شبیه‌سازی، 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

- [1] N. Bonora, D. Gentile, A. Pironi, G. Newaz, Ductile damage evolution under triaxial state of stress: theory and experiments, *International Journal of 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. Nauk*, 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.



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 جذب شده 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 جذب شده از ضربه اول تا چهارم روند نزولی داشته و در ضربه چهارم به کمترین مقدار خود می‌رسد. افزایش نیروی تماسی بیشینه و کاهش انرژی جذب شده از ضربه دوم تا چهارم، به خاطر اثر کرنش سختی آلومینیوم است.

پس از ضربه چهارم نیروی تماسی کاهش یافته و در ضربه هشتم به ۴/۹۶ کیلو نیوتن یعنی ۱۵/۳۵ درصد بیشتر از نیروی ضربه اول می‌رسد. انرژی جذب شده به خاطر افت سفتی و مقاومت در اثر رشد ترک گسترش می‌یابد. در ضربه‌هایی که فرورفتن و سوراخ شدن رخ داده انرژی جذب شده بیش‌ترین مقدار را دارد. شبیه‌سازی جهت صحت‌سنجی 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 شبیه‌سازی ضربه تکراری بر روی آلومینیوم، شبیه‌سازی بر روی فولاد X-100 نیز انجام شد. شکل ۱۸ تاریخچه نیرو-زمان ضربات اول و دوم را برای فولاد و آلومینیوم نشان می‌دهد که در هر دو ضربه نیروی تماسی فولاد

- [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.