



مطالعه‌ی عددی و تجربی فروریزش الماسی جاذب انرژی جدار نازک لوله‌ای دارای سرپوش تحت بار محوری دینامیکی

علیرضا ناداف اسکویی^{1*}، حسین خدارحمی²، مجتبی پاکیان بوشهری³

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران
 2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران
 3- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران
 * anadaf@ihu.ac.ir، 1698715861، صندوق پستی

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
 دریافت: 07 آبان 1393
 پذیرش: 06 آذر 1393
 ارائه در سایت: 06 دی 1393
 کلید واژگان:
 جذب انرژی
 لوله‌های دایروی
 کمناش پیشرونده‌ی دینامیکی
 فروریزش الماسی

چکیده

یکی از مهم‌ترین وسایل جذب انرژی ناشی از ضربه، لوله‌های دایروی هستند که در مدهای مختلف تغییرشکل پلاستیک، جذب انرژی می‌کنند. از مدهای تغییرشکلی که بیشترین جذب انرژی را دارد، مد کمناش پیشرونده‌ی دینامیکی است که تحت فروریزش محوری ایجاد می‌شود. در این مطالعه برخلاف اکثر تحقیقات قبلی که جاذب‌ها را به صورت شبه‌استاتیک بررسی می‌کنند، رفتار یک جاذب انرژی جدار نازک لوله‌ای که در نزدیکی دو انتها دارای فرورفتگی بوده و دو سر لوله نیز دارای سرپوش است تحت بار ضربه‌زن استوانه‌ای به صورت تجربی و عددی بررسی شده است. برای انجام تست‌های تجربی از یک دستگاه ضربه‌زن سقوط آزاد استفاده شده است و در بخش عددی از توانایی‌های نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که سرپوش باعث تقویت جاذب و در نتیجه جذب انرژی بیشتر در طول لهیدگی کمتر می‌شود و فرورفتگی بالا و پایین لوله باعث می‌شود نیروی ماکزیمم فروپاشی با تأخیر زمانی ایجاد شود. همچنین این جاذب‌ها دارای رفتار خطی در جذب انرژی نسبت به طول لهیدگی هستند و با افزایش وزن چکش تغییری در نیروی میانگین فروپاشی ایجاد نشده است. آزمایشی نیز جهت بررسی برخوردها با انرژی جنبشی مساوی انجام گرفت که با بررسی نرخ کرنش در چهار برخورد، مشاهده شد که به ازای کاهش 16/9% نرخ کرنش، 2/6% به طول لهیدگی اضافه شده است.

Numerical and Experimental Study of a Diamond Collapse of a Thin Wall Tube Energy-Absorber with Caps under Dynamic Axial Loading

Alireza Nadaf Oskouei^{1*}, Hossein Khodarahmi², Mojtaba Pakian Booshehri³

Department of Mechanical Engineering, Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran
 * P.O.B. 16535-187 Tehran, Iran, anadaf@ihu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
 Received 29 October 2014
 Accepted 27 November 2014
 Available Online 27 December 2014

Keywords:
 Absorbing energy
 Circular tubes
 Dynamic Progressive buckling
 Diamond Collapse

ABSTRACT

One of the most important devices for absorbing energy of the impact is circular tubes which absorb energy in different modes of plastic deformation. But one of the most important modes of deformation is dynamic progressive buckling caused by the axial collapse. This mode has the most energy absorption. In this study, the behavior of thin walled tubes (with caps) which have a fossa near the end edges of the tube has been investigated in a numerical and experimental way. This is contrary to the previous researches on energy absorption which used the quasi-static form. To carry out experimental tests, a drop hammer machine has been used. In the numerical part, capabilities of Abaqus have been employed. The results show that caps improve energy absorption, thus more energy is absorbed in less length crushing, and the up and down fossa of the tube causes the maximum collapse force to occur with a delay. Also, these absorbers have a linear behavior in absorbing energy with respect to the crushing length and the average collapse force has not been changed by increasing the hammer weight. An experiment was conducted to assess the collisions with the same kinetic energy to study strain rates in four collisions. It was seen that a reduction of 16.9 percent in strain rate increases 2.6 percent of the crushing length.

مستمر باشد. اولین تحقیقات روی لوله‌های دایروی توسط الکساندر صورت گرفت. او توانست با ارائه‌ی الگوی فروریزی که دارای سه لولای پلاستیک در یک چین‌خوردگی است نیروی میانگین فروپاشی را محاسبه کند [1]. پاگزلی و ماکولای اولین محققینی بودند که مد چین‌خوردگی نامتقارن را بررسی کردند. مطالعات آن‌ها تا حدود زیادی تجربی بود [2]. جانسون و سادن تلاش

1- مقدمه

لوله‌های دایروی یکی از بهترین وسایل جذب انرژی ناشی از ضربه هستند که در سال‌های اخیر مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. وزن و حجم کم، در دسترس بودن و صرفه اقتصادی مزیت‌هایی است که سبب گشته تحقیقات برای استفاده از این لوله‌ها و در جهت بهینه کردن ویژگی‌های جذب انرژی همچنان

Please cite this article using:

A. Nadaf Oskouei, H. Khodarahmi, M. Pakian Booshehri, Numerical and Experimental Study of a Diamond Collapse of a Thin Wall Tube Energy-Absorber with Caps under Dynamic Axial Loading, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 2, pp. 169-178, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

از لوله‌های بسیار نازک با قطر کم، مود فروریزش الماسی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

2- معرفی نمونه‌ها و آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی

2-1- معرفی نمونه‌ها

نمونه‌ها از قوطی‌های نوشیدنی که از جنس ورق حلبی هستند، در دو نوع دارای دو سرپوش و یک سرپوش انتخاب شدند، که نمونه‌ی آن در شکل 1 مشاهده می‌شود. در نمونه‌های دارای دو سرپوش، برای مشاهده‌ی شکل و تعداد چین‌خوردگی‌ها، در سرپوش بالایی برش دایره‌ای ایجاد گردید و برای مشاهده‌ی مرز چین‌خوردگی همگی نمونه‌ها رنگ شدند. شکل 2 جاذب لوله‌ای دارای دو سرپوش را نشان می‌دهد که یک برش دایره‌ای روی سرپوش بالای آن ایجاد گردیده است. ارتفاع لوله 13/2 cm، قطر 5/25 cm و ضخامت 0/21 mm است. نسبت قطر به ضخامت برای این لوله 250 است. همان‌طور که از شکل لوله‌ها پیداست، این لوله‌ها در نزدیکی دو لبه‌شان دارای فرورفتگی‌هایی هستند. فاصله‌ی این فرورفتگی‌ها از سرپوش بالایی و پایینی لوله مساوی و برابر 0/7 cm است. قطر لوله در قسمت فرورفتگی 5 cm است. ورق حلبی دارای مدول یانگ 200GPa، تنش تسلیم 380MPa است. شکل 3 نمودار تنش- کرنش مهندسی بدست آمده از آزمایش کشش را نشان می‌دهد.



شکل 1 نمونه‌ی دارای دو سرپوش (چپ) و نمونه‌ی تک سرپوش



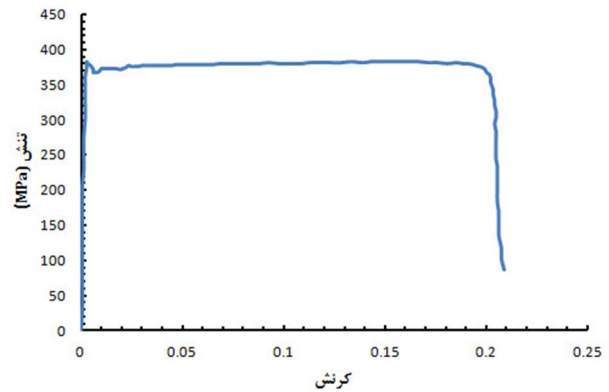
شکل 2 نمای جاذب لوله‌ای با برش دایره‌ای روی سرپوش

کردند تا یک تئوری را برای مد نامتقارن بر پایه‌ی هندسه‌ی واقعی چین- خوردگی گسترش دهند. بنابراین آنها قادر بودند معادلاتی را به دست آورند که نیروی میانگین محوری فروپاشی را پیش‌بینی کند [3]. صالح غفاری و همکاران دو مدل برای جاذب‌های لوله‌ای ارائه کردند که در آن لوله‌های جدار ضخیم تحت فشردگی محوری با کمانش پیشرونده فروریزش می‌کردند. آنها در یک مدل با استفاده از رینگ فلزی در بالای لوله و در مدلی دیگر از شیارهای پهن روی دیواره‌ی لوله استفاده کردند [4]. عابدی و همکاران ستون‌های خالی و پرشده از فوم با سطح مقطع مربعی و مستطیلی را تحت فشردگی محوری، مورد مطالعه‌ی تئوری و تجربی قرار دادند. آن‌ها روابط تئوریهی ارائه کردند که از آن می‌توان نمودار جذب انرژی و نیروی فشردگی نسبت به طول لهیدگی را پیش‌بینی کرد [5]. نیک‌نژاد و همکاران رابطه‌ای را برای محاسبه‌ی نیروی لحظه‌ای چین‌خوردگی در ستون‌های مربعی تک سلولی ارائه کردند. تطابق خوبی بین نتایج به دست آمده با نتایج تجربی مشاهده شد [6]. نیک‌نژاد و همکاران لوله‌های دایره‌ای فلزی را در مد شکاف مورد بررسی نظری و تجربی قرار دادند و روابطی را استخراج کردند که در آن نیروی محوری لوله‌های فلزی دایره‌ای، تحت فشردگی محوری، در مد شکاف پیش‌بینی می‌شد [7]. حسین‌پور و دانشی برای لوله‌های شیاردار تحت بار محوری شبه‌استاتیکی مدلی تحلیلی ارائه کرده و آزمایش‌های تجربی انجام دادند. آنها نشان دادند که به کمک شیارهای محیطی داخلی و خارجی روی دیواره‌ی لوله، روند فروریزش در یک شیوه‌ی کنترلی صورت می‌گیرد [8]. خداحمی و عباسی شبیه‌سازی عددی لهیدگی لوله‌های شیاردار را به کار حسین‌پور اضافه کردند. آنها با استفاده از این جاذب در شبیه‌سازی عددی، تصادف یک خودرو به وزن 2000 کیلوگرم و با سرعت 100 کیلومتر بر ساعت را با یک مانع صلب بررسی کردند [9]. نداف اسکویی و همکاران لهیدگی لوله‌های جدار نازک تحت بار دینامیکی شدید ناشی از برخورد پرتابه با سرعت بالای 100 متر بر ثانیه را به روش تحلیلی، عددی و تجربی مورد مطالعه قرار دادند. آنها مدلی تحلیلی ارائه کردند که نسبت به مدل تحلیلی قبلی نتایج بهتری را پیش‌بینی می‌نمود [10]. یامازاکی و هان توانستند به کمک روش اجزای محدود شیوه‌ی صحیح فروریزش متقارن محوری، الماسی و کمانش اولر را در لوله‌های استوانه‌ای شبیه‌سازی نمایند. نتایج این شبیه‌سازی با آزمایش افقی لوله استوانه‌ای مقایسه شد و تطابق خوبی بین این شبیه‌سازی و نتایج آزمایشگاهی مشاهده شد [11]. زمانی و مولوی سلول‌های استوانه‌ای و مربعی را که به‌صورت منفرد و دوتایی قرار داده شده بودند مورد آزمایش تجربی قرار دادند. آنها دریافتند که در سلول‌های دوتایی قابلیت جذب انرژی تا 30 درصد و مقدار انرژی جذب شده به حجم اشغال شده تا 96 درصد افزایش می‌یابد [12]. قمریان و عبادی فروریزش پوسته‌های استوانه‌ای سرپیسته تقویت شده با فوم را تحت بارگذاری محوری به‌صورت آزمایشگاهی و عددی بررسی کردند. آنها نشان دادند که پوسته‌های استوانه‌ای سرپوش‌دار، جاذب انرژی بهتری نسبت به پوسته‌های استوانه‌ای سرباز هستند [13].

در این مقاله برخلاف اغلب تحقیقات که جاذب‌ها را به‌صورت شبه‌استاتیک بررسی می‌کنند، یک جاذب انرژی لوله‌ای دارای سرپوش، تحت بار محوری دینامیکی ناشی از یک ضربه‌زن استوانه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. مدهای تغییرشکل پلاستیک در کمانش پیشرونده دینامیکی در سه نوع متقارن محوری، نامتقارن (الماسی) و مختلط تقسیم‌بندی می‌شود. در اغلب مقالات به بررسی مد کمانش پیشرونده متقارن محوری پرداخته و مد فروریزش الماسی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در این تحقیق با استفاده



شکل 4 نمای کلی دستگاه ضربه‌زن سقوط آزاد



شکل 3 نمودار تنش - کرنش مهندسی ورق حلبی

این آزمایش توسط دستگاه STM-20 دانشگاه جامع امام حسین (ع) صورت گرفته است که نمونه طبق استاندارد JANAF آماده شده و مورد آزمایش قرار گرفت. همان‌طور که از نمودار تنش - کرنش این ماده در شکل 3 مشاهده می‌شود به نظر می‌رسد که رفتار این نوع ماده به پلاستیک کامل نزدیک است.

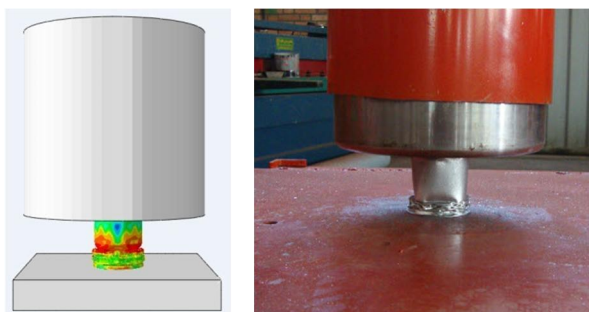
2-2- روش انجام آزمایش‌ها

برای انجام آزمایش‌ها از دستگاه ضربه‌زن سقوط وزنه استفاده شده است که در آن یک ضربه‌زن استوانه‌ای از درون لوله راهنما می‌گذرد و روی نمونه‌ها سقوط می‌کند. شکل 4 نمای کلی این دستگاه را نشان می‌دهد. بدیهی است که برای تغییر در انرژی جنبشی اعمالی وارد بر جاذب می‌توان از دو پارامتر وزن (w) و ارتفاع ضربه‌زن (h) استفاده کرد. برای انجام تست‌ها، نمونه روی سکو قرار می‌گیرد و بعد از مشخص کردن وزن و ارتفاع چکش، چکش‌ها شده تا روی نمونه سقوط کند. شکل 5 لحظه‌ی برخورد چکش با یک نمونه‌ی جاذب لوله‌ای را نشان می‌دهد.

روی جاذب لوله‌ای چهار آزمایش انجام شد و در این آزمایش‌ها چهار وزن مختلف با ارتفاع یکسان جهت فشردگی جاذب انتخاب شدند. در تمامی این آزمایش‌ها، ارتفاع انتهایی چکش تا لبه‌ی بالایی لوله ثابت و مقدار $2/78$ m نظر گرفته شده است و جهت سهولت در اشاره به نمونه‌ها، هر نمونه با حرف S و اندیس، کدگذاری شده است. مثلاً کد S_1 اشاره به جاذب آزمایش اول دارد و به همین ترتیب S_2 ، S_3 و S_4 اشاره به جاذب در آزمایش‌های دوم، سوم و چهارم دارد. نمونه بدون سرپوش نیز که مورد آزمایش ضربه قرار گرفته است، با کد S_{3-n} کدگذاری شد که تحت شرایط آزمایش S_3 انجام گرفت. یک آزمایش نیز جهت بررسی برخوردها با انرژی جنبشی مساوی انجام گرفت که با کد S_5 نام‌گذاری شد. این آزمایش تحت شرایط آزمایش S_3 انجام گردید (ارتفاع سقوط و اندازه وزنه طوری تغییر کرده‌اند که انرژی جنبشی اعمالی به هر دو برابر است) تا بتوانند با یکدیگر مقایسه شوند. جهت دقت و صحت نتایج، آزمایش‌ها تکرار گردیدند.

2-3- شبیه‌سازی عددی فروریزش لوله‌ها

نرم‌افزار غیرخطی آباکوس¹ با نسخه‌ی 6.12 و روش حل صریح² برای شبیه‌سازی انتخاب شده است. برای مدل‌سازی دستگاه ضربه‌زن سقوط آزاد، فقط چکش و صفحه‌ی میز دستگاه مدل شدند و نمونه نیز پس از مدل شدن



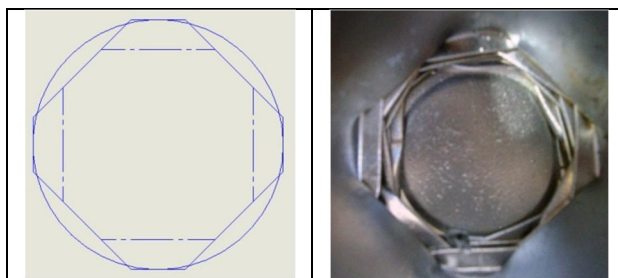
شکل 5 برخورد چکش با نمونه در آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی

در ماژول چیدمان قطعات، بین آنها قرار گرفته است. چکش استوانه‌ای و صفحه‌ی میز به صورت صلب و از تکنیک اکستروژن و لوله‌ها به صورت پوسته و از تکنیک دوران در ماژول قطعات ایجاد شدند. برای تعریف جنس لوله‌ها در ماژول خصوصیات مواد، مدول یانگ $E=200$ GPa و ضریب پواسون $\nu = 0.29$ برای خواص الاستیک، و نمودار تنش - کرنش مهندسی برای خواص پلاستیک و مدل آسیب برشی برای خواص آسیب در نرم‌افزار تعریف شده است.

1- Abaqus
2- Explicit



شکل 7 شکل چین‌خوردگی پایینی لوله



شکل 8 مد فروریزشی هشت ضلعی انتهایی لوله



شکل 9 نمای کلی از جاذب‌ها بعد از آزمایش ضربه

هنگامی که چکش دستگاه پس از رها شدن با نمونه برخورد می‌کند، ابتدا فرورفتگی‌های بالا و پایین لوله جمع می‌شوند و با جمع شدن فرورفتگی‌ها، سرپوش‌های بالا و پایین به داخل لوله نفوذ می‌کنند. پس از آن لوله از بالا و یا از پایین شروع به چین خوردن می‌کند. فرآیند چین‌خوردگی بصورت پیش‌رونده و تا جذب کامل انرژی ادامه دارد. جهت اطمینان از محل چین‌خوردگی آزمایش‌های S₃ و S₄ چندین بار تکرار شدند و در همه‌ی آزمایش‌ها محل چین‌خوردگی در پایین لوله ایجاد گردید.

برای محاسبه‌ی انرژی جذب شده‌ی جاذب از مدل تئوری ارائه شده توسط سینگس روی چهار جاذب S₁، S₂، S₃ و S₄ استفاده شده است [14]. سینگس، نیروی میانگین فروپاشی برای این لوله‌ها را در مد فروریزش الماسی طبق رابطه‌ی (1) ارائه کرده است.

$$\frac{P_{\text{mean}}}{M_p} = \frac{\pi}{3} n + \frac{2\pi^2}{n} \tan\left(\frac{\pi}{2n}\right) \frac{D}{t} \quad (1)$$

که M_p طبق رابطه‌ی (2) محاسبه می‌گردد.

$$M_p = \sigma_0 \left(\frac{t^2}{4} \right) \quad (2)$$

در روابط بالا n برابر تعداد گوشه‌های به‌وجود آمده در یک لایه چین‌خوردگی است که در این تحقیق با مد هشت ضلعی به‌وجود آمده در

با انجام چندین شبیه‌سازی بهترین سرعت در لحظه‌ی برخورد که در آن طول لهیدگی بطور متوسط برای چهار جاذب S₁، S₂، S₃ و S₄ با آزمایش‌های تجربی مطابقت کند محاسبه گردیده است که شرط مرزی اولیه‌ی سرعت 5 m/s در نقطه‌ی مرجع روی چکش استفاده شده است. شکل 5 برخورد چکش با یک نمونه جاذب لوله‌ای را در آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی نشان می‌دهد. جهت استقلال حل مسئله از مش‌بندی، اندازه مش در المان‌بندی از 0/0050 تا 0/0014 ریز شد که از بازه‌ی 0/0024 تا 0/0018 همگرایی در جواب برای طول لهیدگی و نیروی میانگین مشاهده شد و المان‌بندی 0/0018 برای همه‌ی لوله‌ها در نظر گرفته شده است. نوع المان بکار رفته در لوله‌ها از نوع المان پوسته با کد S4R است که دارای چهار گره روی چهار رأس المان مربعی است و روش انتگرال‌گیری روی نقاط گوسی آن از نوع کاهش یافته است.

3- نتایج و بحث

3-1- نتایج آزمایش تجربی

مشخصات و نتایج 6 آزمایش انجام شده روی جاذب در جدول 1 ارائه شده است. مطابق آنچه که از نسبت قطر به ضخامت این لوله‌ها انتظار می‌رفت (مشاهدات تجربی نشان می‌دهد که لوله‌های با D/t بیشتر از 80 الی 90 در مد نامتقارن فروریزش می‌کنند)، در همه‌ی نمونه‌ها چین‌خوردگی‌ها به صورت نامتقارن ایجاد شدند و مدهای فروریزشی الماسی در تمامی نمونه‌ها ایجاد گردید. در آزمایش‌های مختلف چین‌خوردگی در بالا و یا در پایین لوله‌ها ایجاد شدند و لوله‌ها بصورت هشت ضلعی چین خوردند. شکل‌های 6، 7، 8 و 9 به ترتیب نمونه‌ای از چین‌خوردگی بالا، چین‌خوردگی پایین، مد هشت ضلعی بوجود آمده بر اثر تغییر سطح مقطع عرضی لوله و نمای لوله‌ها بعد از آزمایش ضربه را نشان می‌دهند.

جدول 1 مشخصات و نتایج بدست آمده از آزمایش‌های انجام شده روی جاذب‌ها

ردیف	نوع جاذب	وزن (kg)	ارتفاع چکش (m)	طول لهیدگی (cm)	تعداد چین‌ها	محل چین‌ها
1	S ₁	6/2	2/78	3/3	1	بالا
2	S ₂	9	2/78	6/2	5	بالا
3	S ₃	10/7	2/78	7/3	6	پایین
4	S ₄	12/2	2/78	9/4	11	پایین
5	S _{3-n}	10/7	2/78	8/37	10	بالا
6	S ₅	17	1/75	8/15	8	بالا



شکل 6 شکل چین‌خوردگی بالایی لوله

گرفت. شکل 10 این جاذب را بعد از آزمایش ضربه در کنار جاذب S_3 نشان می‌دهد. میزان لهیدگی این نمونه $8/37$ cm است که $1/07$ cm بیشتر از نمونه‌ی با سرپوش لهیده شده است و تعداد چین‌خوردگی‌ها، 10 چین است. در این نمونه چین‌خوردگی از محلی که سرپوش ندارد شروع می‌شود. این آزمایش نشان می‌دهد که سرپوش باعث تقویت لوله شده و طول لهیدگی را کاهش می‌دهد. همچنین سرپوش در بالا و پایین باعث افزایش استحکام سازه‌ی لوله شده و انرژی بیشتری را در طول لهیدگی کمتر جذب می‌کند.

شکل 11 نمای جاذب S_5 را بعد از ضربه نشان می‌دهد. در آزمایش S_5 وزن چکش و ارتفاع آن به گونه‌ای انتخاب شده است که انرژی جنبشی اعمالی برابر آزمایش S_3 گردد. بر خلاف انتظار، طول لهیدگی در جاذب S_5 بیشتر از S_3 شده است. علت این موضوع را می‌توان در کم شدن طول مسیر پیموده شده توسط چکش در محفظه‌ی نگهدارنده دستگاه دانست که در نتیجه نیروی اصطکاک کمتری نسبت به آزمایش قبل به چکش وارد شده است و بنابراین امکان دارد انرژی جنبشی در هنگام برخورد برای هر دو حالت برابر نباشد. بنابراین این موضوع در بخش عددی که انرژی جنبشی هر دو برخورد دقیقاً برابر باشد، به خوبی بررسی می‌شود.

نمودار وزن چکش - طول لهیدگی برای جاذب‌های S_1 تا S_4 در شکل 12 نمایش داده شده است. رفتار این جاذب‌های لوله‌ای در برابر افزایش انرژی بصورت تقریباً خطی است و اگر چه با کمتر شدن طول لهیدگی جاذب S_3 ، انتهای نمودار به سمت بالا منحرف شده است، اما این انحراف در آزمایش S_4 اصلاح شده و منحنی مسیر خطی خود را طی می‌کند.

3-2- نتایج عددی

شبیه‌سازی عددی فروریزش این جاذب‌ها نشان می‌دهد چین‌خوردگی‌ها مانند آزمایش‌های تجربی بصورت الماسی و نامتقارن بوده و در اغلب نمونه‌ها مدهای تغییرشکل هشت ضلعی ایجاد شده است.

فروریزش در تمامی لوله‌ها بدین صورت رخ داده است که در هنگام فشردگی ابتدا دو فرورفتگی بالا و پایین لوله جمع شده و سپس سرپوش‌ها به داخل لوله نفوذ می‌کنند و سپس با ادامه‌ی فرآیند اعمال فشردگی ناشی از ضربه، لوله از بالا و یا از پایین شروع به جمع شدن و چین‌خوردگی می‌کند. روند چین‌خوردگی در لوله‌های معمولی بدین گونه است که در آزمایش‌های شبه‌استاتیک، چین‌خوردگی از پایین لوله که محل تکیه‌گاه است شروع می‌شود و در بارهای دینامیکی از محل اعمال ضربه که بالای لوله است ایجاد می‌گردد.



شکل 10 جاذب S_{3-n} بعد از آزمایش ضربه در کنار جاذب S_3

مقطع عرضی لوله برابر 4 است. همچنین D ، t و σ_0 به ترتیب قطر، ضخامت و تنش تسلیم لوله هستند. طبق رابطه‌ی 1 نیروی میانگین فروپاشی برای این لوله‌ها برابر $2123/1$ N است. حال با ضرب نیروی میانگین فروپاشی در طول لهیدگی انرژی جذب شده محاسبه می‌گردد. با معادل قرار دادن انرژی جذب شده با انرژی جنبشی اعمالی به جاذب، سرعت تقریبی چکش در هنگام برخورد نیز محاسبه می‌گردد. انرژی جذب شده در هر چهار جاذب به همراه سرعت در هنگام برخورد در جدول 2 ارائه شده است.

سرعت در آزمایش سقوط آزاد از رابطه‌ی (3) محاسبه می‌گردد که در آن h و g به ترتیب شتاب ثقل و ارتفاع چکش تا نمونه است.

$$v = \sqrt{2gh} \quad (3)$$

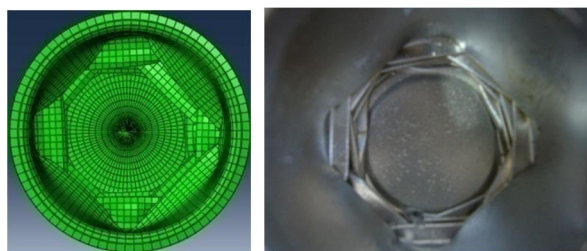
با توجه به ارتفاع ثابت 2/78 m برای هر چهار آزمایش انتظار می‌رفت که سرعت برابر 7/4 m/s باشد. سرعت‌های نشان داده شده در جدول 2 بیانگر وجود اصطکاک در دستگاه ضربه‌زن سقوط آزاد است. این اصطکاک که ناشی از تماس چکش با محفظه‌ی نگهدارنده، طناب با سه قرقره‌ی دستگاه و مقاومت نسبتاً زیاد هوا به دلیل تونلی بودن محفظه‌ی هدایت چکش است، حدود 30% از سرعت را کم کرده است. بنابراین سرعت بطور میانگین برابر 5/1 m/s است.

در نمونه‌ی S_1 با جاذب انرژی وزنه 6/2 kg، فقط یک چین‌خوردگی ایجاد شده است و وقتی که وزنه 9 kg به جاذب S_2 برخورد می‌کند، تعداد چین‌خوردگی‌ها به 5 می‌رسد؛ یعنی به ازای افزایش 2/8 kg، تعداد 4 چین - خوردگی جهت جذب انرژی اضافه شده است. البته چین‌خوردگی‌ها در بعضی از نمونه‌ها تا آخر بصورت کامل نبوده و گاهی دارای نیم‌چین‌هایی است. در این جاذب هر لایه چین‌خوردگی حدود 700 g از وزن چکش را جذب کرده است که با احتساب سرعت مانگین 5/1 m/s برابر 9/1 ژول انرژی است. در نمونه‌ی S_3 شش چین‌خوردگی در پایین لوله ایجاد گردیده است. یعنی به ازای اضافه شدن وزنه به میزان 4/5 kg، تعداد 5 چین برای جذب انرژی اضافه شده است.

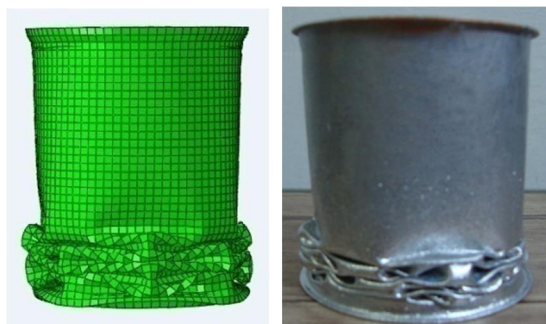
در این جاذب هر لایه چین‌خوردگی حدود 900 g از وزن چکش را جذب کرده است که برابر 11/7 ژول انرژی می‌باشد. در جاذب S_4 به ازای اضافه شدن 6 kg به وزنه نسبت به آزمایش اول، تعداد 10 چین به چین‌خوردگی‌ها اضافه شده است. یعنی هر لایه چین‌خوردگی 600 g وزن چکش را جذب کرده است که برابر 7/8 ژول انرژی می‌باشد. بنابراین هر لایه چین‌خوردگی به طور متوسط 733 g از وزن چکش را جذب کرده است که با سرعت میانگین 5/1 m/s در لحظه‌ی برخورد، برابر 9/5 ژول انرژی است. نکته‌ی قابل توجه این است که در هر جاذب وزن 5/46 kg که با سرعت میانگین محاسبه شده معادل 71 ژول انرژی است، صرف جمع شدن فرورفتگی‌ها، نفوذ سرپوش به داخل لوله و غلبه بر مقاومت لوله در برابر فروریزش (نیروی ماکزیمم فروپاشی) شده است. همچنین نمونه‌ی بدون سرپوش S_{3-n} مورد آزمایش قرار

جدول 2 انرژی جذب شده و سرعت برخورد چکش در چهار آزمایش

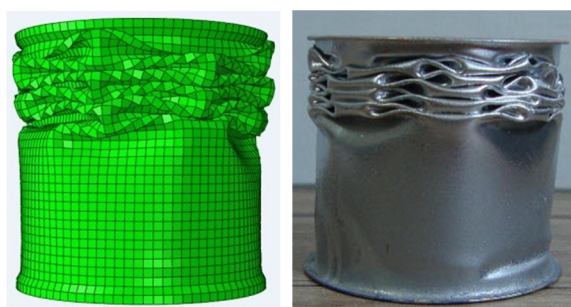
ردیف	نوع جاذب	انرژی جذب شده بر اساس رابطه سینگس (J)	سرعت چکش در هنگام برخورد (m/s)
1	S_1	70	4/7
2	S_2	128/02	5/3
3	S_3	154/98	5/3
4	S_4	180/46	5/4



شکل 13 مد هشت ضلعی به دست آمده از آزمایش تجربی و شبیه‌سازی



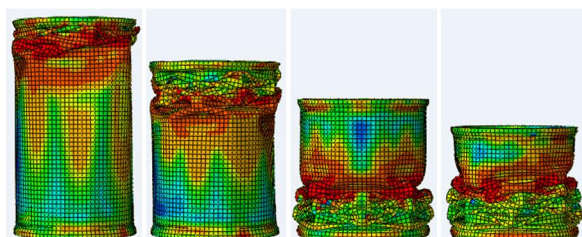
شکل 14 چین خوردگی انتهایی جاذب لوله‌ای در آزمایش تجربی و شبیه‌سازی



شکل 15 چین خوردگی بالایی جاذب لوله‌ای در آزمایش تجربی و شبیه‌سازی

جدول 3 نتایج عددی برای چهار آزمایش انجام شده روی جاذب‌ها

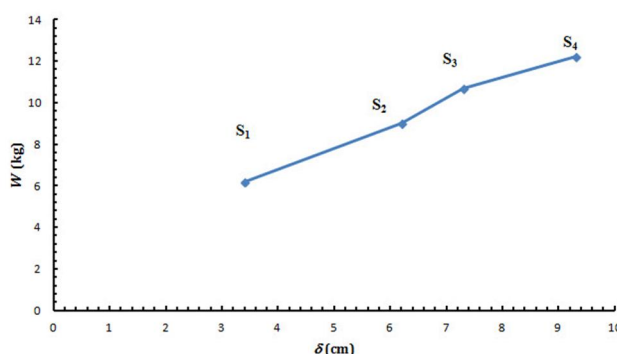
ردیف	نوع جاذب	وزن (kg)	طول لهیدگی (cm)	تعداد چین‌ها	محل چین‌ها
1	S ₁	6/2	4	2	بالا
2	S ₂	9	6/03	3	بالا
3	S ₃	10/7	7/4	5	پایین
4	S ₄	12/2	8/5	7	پایین
5	S ₅	17	7/69	5	بالا



شکل 16 نمای کلی از جاذب‌ها بعد از تست ضربه در شبیه‌سازی عددی



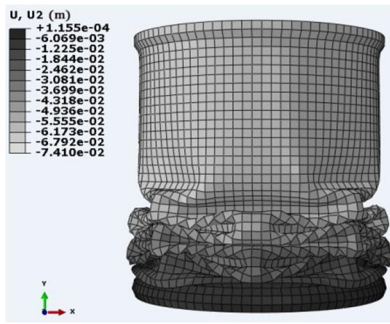
شکل 11 نمای جاذب S₅ بعد از آزمایش ضربه



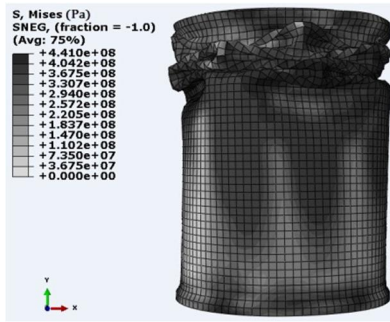
شکل 12 نمودار وزن چکش - طول لهیدگی جاذب‌ها در آزمایش تجربی

اما با بررسی فرآیند فروریزش در شبیه‌سازی، مشاهده شد که چین خوردگی در این لوله‌ها بعد از نفوذ سرپوش‌ها به داخل لوله شروع می‌شوند و در چین خوردگی‌های بالایی لوله، زمان نفوذ سرپوش پایین، کمتر از سرپوش بالا بوده است و در چین خوردگی‌های پایینی، این زمان عکس شده است و باعث شده که محل اعمال ضربه از بالای لوله به پایین (محل تکیه‌گاه) منتقل شود و به همین علت چین خوردگی‌ها از پایین لوله ایجاد شده‌اند که در جاذب S₃ و S₄ این موضوع مشهود می‌باشد. قبل از شروع چین خوردگی‌ها، محل چین خوردگی در لوله به یک هشت ضلعی با چهار ضلع بزرگ و چهار ضلع کوچک تقسیم می‌شود و با ادامه‌ی فشرده‌گی، ضلع‌های بزرگ به سمت داخل لوله و ضلع‌های کوچک به سمت بیرون تا می‌خورند و یک لایه چین خوردگی را تشکیل می‌دهد. در لایه بعدی چین خوردگی، جای اضلاع بزرگ و کوچک هشت ضلعی عوض می‌شود. شکل‌های 13، 14 و 15 مقایسه‌ی شبیه‌سازی عددی با آزمایش تجربی را برای چین خوردگی‌ها و مدهای تغییرشکل نشان می‌دهد و دقت و اعتبار شبیه‌سازی عددی نشان داده شده است. نتایج عددی به دست آمده، در جدول 3 نشان داده شده است.

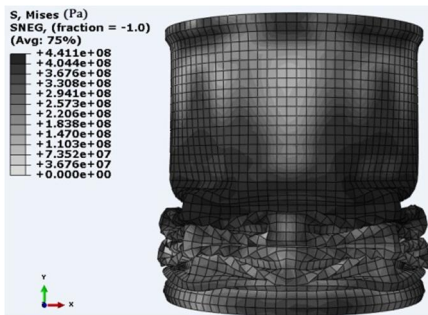
کانتور جابجایی برای نشان دادن طول لهیدگی و کانتور تنش، برای مشخص کردن میزان تنش روی دیواره‌ی لوله و بخصوص در محل چین خوردگی‌ها ارائه شده است. شکل 16 هر چهار جاذب را بعد از شبیه‌سازی ضربه نشان می‌دهد و شکل 17 مقایسه نمودار وزن چکش - طول لهیدگی حاصل از شبیه‌سازی عددی و آزمایش تجربی را نشان می‌دهد. در این نمودار، رفتار خطی این گروه از جاذب‌ها در شبیه‌سازی عددی برای جذب انرژی نسبت به طول لهیدگی به خوبی مشخص شده است و انحراف آن از مقدار خطی در تست تجربی برای جاذب S₁ و S₄ است.



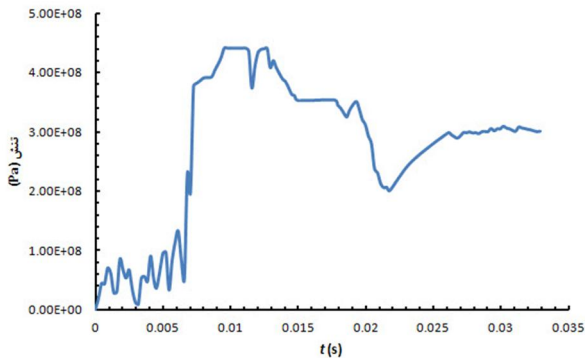
شکل 19 کانتور جابجایی جاذب S₃



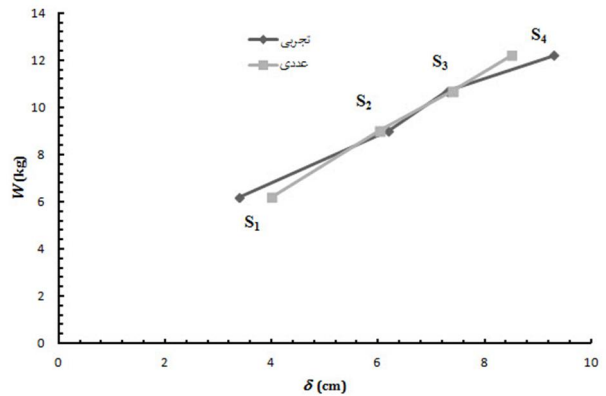
شکل 20 کانتور تنش جاذب S₂



شکل 21 کانتور تنش جاذب S₃

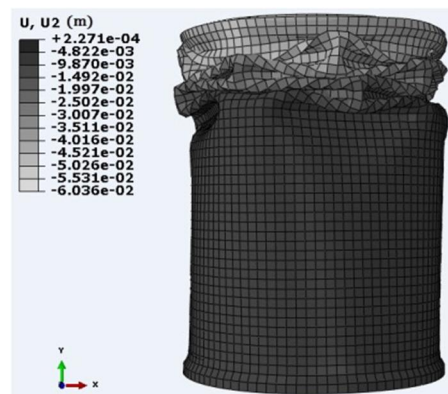


شکل 22 نمودار تنش - زمان یک المان در لایه دوم چین خوردگی جاذب S₄



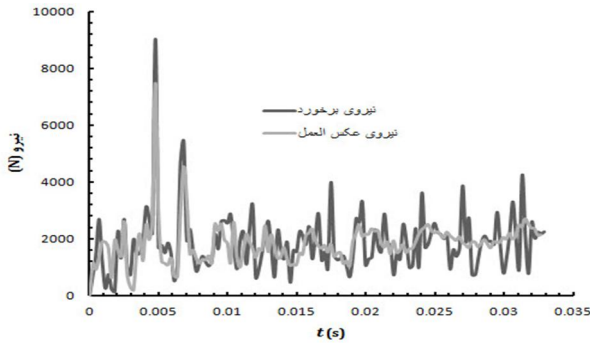
شکل 17 نمودار وزن چکش - طول لهیدگی جاذب لوله‌ای از آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی

شکل‌های 18، 19، 20 و 21 کانتور جابجایی و تنش فون میسز در جاذب‌های S₂ و S₃ را نشان می‌دهد. بیشترین جابجایی مربوط به لبه‌ی بالایی لوله است که همان طول لهیدگی را بعد از آزمایش ضربه نشان می‌دهد. برای جاذب S₂ طول لهیدگی 6/03 سانتی‌متر است. جابجایی‌ها در خلاف جهت محور λ است و به همین دلیل نیز دارای مقدار منفی هستند. با دقت در کانتور تنش مشاهده می‌شود که تنش در آخرین چین خوردگی به نزدیکی تنش نهایی رسیده است. اما با بررسی تنش در فرآیند چین خوردگی، مشاهده می‌شود که در شروع هر چین خوردگی تنش به نزدیکی تنش نهایی رسیده و سپس با اتمام آن چین خوردگی، سطح تنش کاهش می‌یابد و تنش به لایه‌ی بعدی چین خوردگی منتقل می‌شود و این فرآیند تا اتمام کامل چین خوردگی‌ها ادامه دارد و به عبارتی تنش‌ها در هر چین خوردگی، لایه به لایه منتقل می‌شوند. این موضوع نشان دهنده‌ی موج پلاستیکی است که در طول لوله به راه افتاده و ایجاد تغییرشکل‌های پلاستیک می‌کند. وقتی تنش در جسم بیشتر از تنش تسلیم باشد، موج‌های تنش الاستیک و پلاستیک در جسم انتشار خواهد یافت. از آنجایی که سرعت موج الاستیک بیشتر از موج پلاستیک است، این موج سریعتر از موج پلاستیک در طول لوله حرکت رفت و برگشت می‌کند. شکل 22 نمودار تنش - زمان را برای یک المان در لایه‌ی دوم چین خوردگی در جاذب S₄ نشان می‌دهد. همان‌طور که از نمودار مشخص است این المان در زمان 7 تا 15 ms تجربه‌ی ماکزیمم تنش در محدوده‌ی پلاستیک را دارد و بعد از اتمام چین خوردگی سطح تنش کاهش می‌یابد.



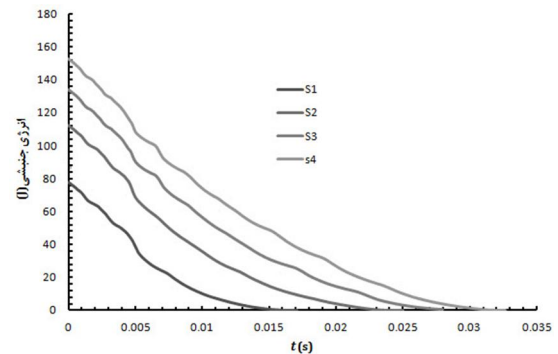
شکل 18 کانتور جابجایی جاذب S₂

هنگامی که چکش با نمونه برخورد می‌کند انرژی جنبشی در چکش شروع به کم شدن می‌کند و مقدار آن تا اتمام زمان برخورد به صفر می‌رسد. شکل 23 نمودار تغییرات انرژی جنبشی چکش را حین برخورد برای هر چهار جاذب نشان می‌دهد. برای نمونه‌ی S₁ در لحظه‌ی برخورد، چکش دارای انرژی جنبشی 77/59 ژول است که با گذشت زمان 17 ms و با توقف حرکت چکش این مقدار به صفر رسیده است و برای جاذب S₂ نیز انرژی جنبشی 112/43 ژول است که با گذشت 25 ms صفر شده است برای جاذب S₃ و S₄ نیز انرژی جنبشی به ترتیب 133/72 و 152/42 ژول است که به ترتیب با گذشت زمان 28 و 32 ms این مقدار به صفر رسیده است.

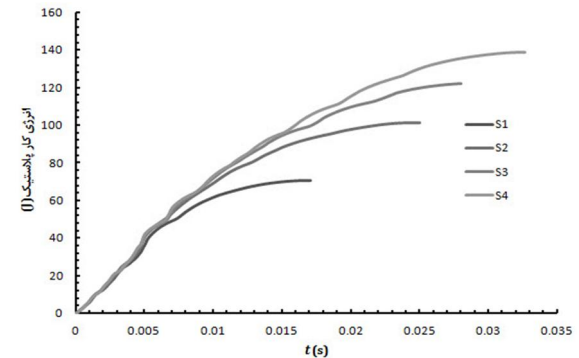


شکل 24 نمودار جذب انرژی ناشی از کار پلاستیک را برای چهار جاذب نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشترین جذب انرژی مربوط به تغییر شکل پلاستیک در جاذب است و سایر اتلاف‌های ناشی از اصطکاک، صوت و ... نسبتاً ناچیزند. برای جاذب S₁ از مجموع 77/59 ژول انرژی جنبشی، مقدار 70/81 ژول آن توسط کار پلاستیک جذب شده است و مقدار 91/26% از کل انرژی جذب شده را به خود اختصاص داده است و برای جاذب‌های S₂، S₃ و S₄ جذب انرژی ناشی از کار پلاستیک به ترتیب برابر 101/32، 122/41 و 138/9 ژول است که به ترتیب 90/11%، 91/54% و 91/12% از کل انرژی جذب شده است.

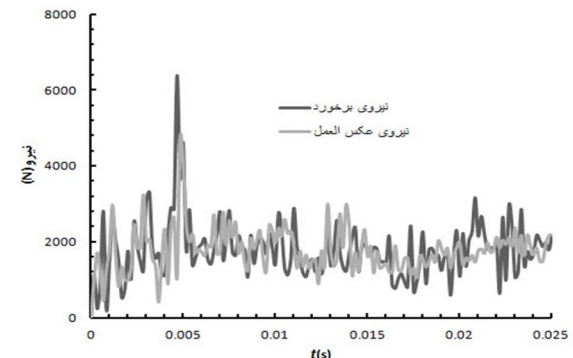
شکل‌های 25 و 26 نمودارهای نیروی برخورد و عکس‌العمل تکیه‌گاهی برحسب زمان را برای جاذب‌های S₂ و S₄ نشان می‌دهد. نیروی برخورد مربوط به محل تماس چکش به نمونه و نیروی عکس‌العمل مربوط به محل تماس نمونه با میز دستگاه است. در تمامی نمودارها نیروی ماکزیمم فروپاشی با یک تأخیر زمانی تقریباً 5 ms شروع می‌شود و این زمانی است که در آن فرورفتگی‌های بالا و پایین لوله جمع شده و سرپوش‌ها به داخل لوله نفوذ می‌کنند.



شکل 25 نمودار تغییرات انرژی جنبشی چکش برای چهار جاذب برحسب زمان



شکل 26 نمودار جذب انرژی ناشی از کار پلاستیک برای چهار جاذب برحسب زمان



شکل 27 نمودار نیروی برخورد و عکس‌العمل تکیه‌گاهی برحسب زمان برای جاذب S₂

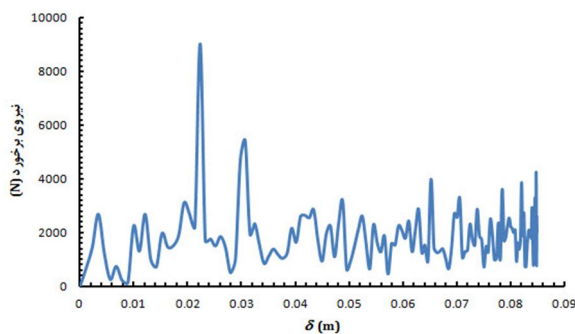
شکل 26 نمودار نیروی برخورد و عکس‌العمل تکیه‌گاهی برحسب زمان برای جاذب S₄ پس از این مرحله اولین چین‌خوردگی در لوله ایجاد می‌شود و همان‌طور که در نمودار مشخص است ماکزیمم نیرو برای ایجاد اولین چین‌خوردگی صرف شده است. بقیه چین‌خوردگی‌ها با سطح نیرو تقریباً ثابتی تشکیل می‌شوند که نیرو میانگین فروپاشی در آن جاذب است. این نمودارها بر خلاف نمودار نیرو در فروریزش‌های متقارن دارای نوسانات زیادی در طول فروریزش هستند، که علت آن این است که در چین‌خوردگی‌های نامتقارن در هر لایه‌ی چین‌خوردگی چندین لبه تشکیل می‌شود (برای مثال در مد هشت ضلعی چهار لبه تشکیل می‌شود) و باعث ایجاد نوسانات زیاد در این نمودار می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود نیروهای برخورد و عکس‌العمل تطابق کیفی دارند، و دامنه نوسانات نیروی برخورد بیشتر است. به نظر می‌رسد که جاذب مانند یک دمپر نوسانات نیروی برخورد را کم کرده و سطح نیروهای ماکزیمم را کاهش داده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مطابقت نسبتاً خوبی بین نیروی‌های میانگین بدست آمده از رابطه‌ی سینگس و نمودار نرم‌افزار وجود دارد و نشان‌دهنده‌ی صحت نمودار ارائه شده است

شکل 27 نمودار نیرو-جابجایی را نشان می‌دهد. مساحت زیر این منحنی‌ها برابر انرژی جذب شده است. سطح زیر این نمودار در نرم‌افزار اکسل محاسبه شده است که از مجموع 150 نقطه نمودار، فقط 26 نقطه اول آن در شکل 28 ارائه گردیده است.

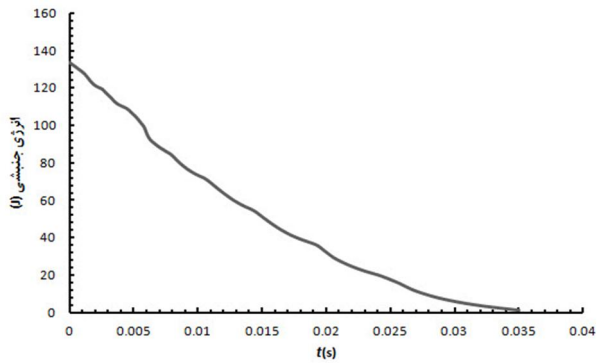
نیروی میانگین فروپاشی P_{mean} طبق رابطه‌ی (4) برابر است:

$$P_{mean} = \frac{1}{\delta t} \int P d\delta \quad (4)$$

که P نیرو و δ طول لهیدگی است. در نمودار هر چهار جاذب مشاهده می‌شود که نیروی میانگین فروپاشی زیر 2000 N است. انتگرال در این فرمول برابر سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی و برابر انرژی جذب شده است و δt کل طول لهیدگی است. به عبارت دیگر نیروی میانگین فروپاشی عبارت است از انرژی جذب شده بر واحد طول. برای مثال در جاذب S₃ سطح زیر نمودار نیروی عکس‌العمل - جابجایی تقریباً برابر 133/69 ژول، طول لهیدگی برابر 7/4 cm و نیروی میانگین برابر 1806 N است. و در جاذب S₄ که سطح



شکل 28 نمودار نیروی برخورد - جابجایی جاذب S₄



شکل 30 نمودار تغییرات انرژی جنبشی چکش در جاذب S₅

جدول 4 نتایج شبیه‌سازی چهار آزمایش برابری انرژی

ردیف	چکش	وزن چکش (kg)	سرعت چکش در برخورد (m/s)	مقدار مومنتم (k.s)	زمان فروریزش (ms)	طول لهیدگی (cm)	نرخ کرنش (s ⁻¹)
1	5	7/31	36/55	18	7/18	3/98	
2	10/7	5	53/5	28	7/41	2/64	
3	14	4/37	61/18	31	7/66	2/47	
4	17	3/966	67/42	35	7/69	2/19	

4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق با توجه به استفاده از لوله‌های جدار نازک دارای دو سرپوش و تک سرپوش و مقایسه‌ی آنها با یکدیگر، مشاهده شد که سرپوش باعث تقویت لبه‌های لوله شده و این لوله‌ها دارای جذب انرژی بیشتر در طول لهیدگی کمتر هستند.

با بررسی فرآیند فروریزش مشاهده شد که بیشترین انرژی جنبشی اعمالی صرف جمع شدن فرورفتگی‌های بالا و پایین، نفوذ سرپوش به داخل لوله و غلبه بر مقاومت لوله در برابر فروریزش شده است که در این لوله‌ها، این انرژی با احتساب سرعت میانگین برخورد $5/1 \text{ m/s}$ حدود 70 ژول بوده است و هر لایه چین‌خوردگی در این لوله‌ها به طور میانگین حدود 9/5 ژول انرژی جذب می‌کند.

با بررسی هر چهار جاذب مشاهده شد که این جاذب‌ها دارای رفتار خطی در جذب انرژی نسبت به افزایش طول لهیدگی لوله هستند.

با افزایش وزن چکش از 9 به 10/7 kg محل چین‌خوردگی از بالای لوله به پایین منتقل می‌شود که با بررسی فرآیند چین‌خوردگی‌ها در شبیه‌سازی مشاهده شد که علت این امر در بیشتر شدن زمان نفوذ سرپوش پایین نسبت به بالای لوله است و محل اعمال ضربه را از بالا به پایین لوله تغییر می‌دهد. تنش در هنگام تشکیل چین‌خوردگی از مرز تسلیم گذشته و تا نزدیکی تنش نهایی رسیده و سپس این تنش به لایه‌ی بعدی چین‌خوردگی منتقل می‌شود و انتشار موج تنش پلاستیک، تا جذب کامل انرژی در طول لوله ادامه می‌یابد.

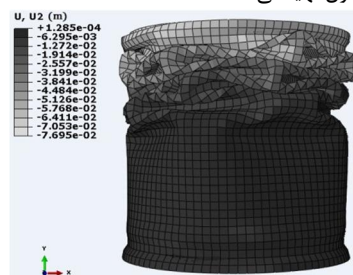
نیروی میانگین فروپاشی با افزایش وزن چکش تغییری نمی‌کند که مؤید این مطلب است که نیروی میانگین فروپاشی به جنس و ابعاد لوله بستگی دارد و نه به میزان جذب انرژی. با افزایش وزن چکش نمودارهای نیرو منظم‌تر می‌شوند.

مساحت کل : انرژی جذب شده	مساحت جزئی	نیروی برخورد (N)	جابجایی (m)
153.4346	0.385841039	682.687	0.0011304
	1.196313476	1443.62	0.0022556
	2.309130271	2682.59	0.0033749
	2.166715931	1216.52	0.0044863
	0.8077684	247.16	0.00559
	0.538228211	736.597	0.0066842
	0.518353467	215.104	0.0077736
	0.185919487	127.51	0.0088589
	1.278298135	2246.92	0.0099356
	1.896895964	1303.89	0.011004
	2.113482544	2680.43	0.0120649
	1.924510101	977.639	0.0131171
	0.888625382	722.754	0.0141623
	1.399569327	1966.14	0.0152033
	1.773905532	1459.38	0.016239
	1.52096485	1499.12	0.0172672
	1.729754514	1888.57	0.0182884
	2.532199345	3108.37	0.0193019
	2.903197098	2680.08	0.020305
	2.420669514	2208.68	0.0212953
	5.502414713	9026.47	0.0222748
	5.136456082	1676.71	0.0232346
	1.62823345	1760.92	0.0241819
	1.531285571	1494.71	0.0251226
	1.557849993	1847.24	0.0260549

شکل 28 مساحت زیر نمودار نیروی برخورد - جابجایی جاذب S₄

زیر نمودار نیرو-جابجایی برابر 153/43 ژول و طول لهیدگی 8/5 cm است، نیروی میانگین برابر 1805 N است. نکته‌ی قابل توجه این است که در تمامی جاذب‌های لوله‌ای یکسان، نیروی میانگین فروپاشی تقریباً برابر بوده و ربطی به میزان انرژی جذب شده ندارد.

سرعت برخورد در آزمایش S₅ برابر 3/966 m/s انتخاب گردیده است تا شرایط برابری انرژی جنبشی برای وزن 17 kg با آزمایش S₃ برقرار باشد. شکل 29 کانتور جابجایی جاذب S₅ را نشان می‌دهد. طول لهیدگی در این جاذب برابر 7/69 cm است. شکل 30 نمودار تغییرات انرژی جنبشی چکش را برای این جاذب نشان می‌دهد. در آزمایش جاذب S₃ که با وزن 10/7 kg و سرعت 5 m/s صورت گرفت مقدار مومنتم 53/5 N.s است و انرژی جنبشی برابر 133/75 ژول است و در آزمایش جاذب S₅ که با وزن 17 kg و سرعت 3/966 m/s صورت گرفت مقدار مومنتم 67/42 N.s و انرژی جنبشی آن 133/69 ژول است. همانطور که مشاهده می‌شود در حالی که انرژی جنبشی اعمالی در هر دو تقریباً برابر است اما مقدار مومنتم در جاذب S₅ بیشتر است. با دقت در نمودار شکل 30 مشاهده می‌شود که زمان فروریزش در جاذب S₅ حدود 7 ms نسبت به جاذب S₃ افزایش یافته است و به عبارتی بیشتر شدن زمان فروریزش، نرخ کرنش را کم کرده و طول لهیدگی را افزایش داده است هر چند که این مقدار تغییر نرخ کرنش کم می‌باشد. نرخ کرنش متوسط در نمونه‌های S₃ و S₅ به ترتیب برابر 2/64 و 2/19 s⁻¹ است. جهت صحت و دقت نتایج، دو شبیه‌سازی دیگر نیز انجام گرفت که در آن از وزن‌های 5 و 14 kg استفاده شده است. جدول 4، نتایج هر چهار شبیه‌سازی برابری انرژی را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که به طور میانگین به ازای کاهش 16/9% نرخ کرنش، 2/3% به طول لهیدگی اضافه شده است.



شکل 29 کانتور جابجایی جاذب S₅

- [2] AG. Pugsley, M. Macaulay, The large-scale crumpling of thin cylindrical columns, *Mechanical and Applied Mathematics*, Vol. 12, pp. 1-9, 1960.
- [3] W. Johnson, PD. Soden, In extensional collapse of thin-walled tubes under axial compression, *Strain Analysis*, Vol. 12, pp. 317-330, 1977.
- [4] S. Salehghaffari, M. Tajdari, M. Panahi, F. Mokhtarneshad, Attempts to improve energy absorption characteristics of circular metal tubes subjected to axial loading, *Thin-Walled Structures*, Vol. 48, No. 6, pp. 379-390, 2010.
- [5] MM. Abedi, A. Niknejad, GH. Liaghat, M. ZamaniNejad, Theoretical and experimental study on empty and foam-filled columns with square and rectangular cross section under axial compression, *Mechanical Sciences*, Vol. 65, No. 1, pp. 134-146, 2012.
- [6] A. Niknejad, G.H. Liaghat, H. Moslemi Naeini, A.H. Behraves, Theoretical Calculation of the Instantaneous Folding Force in a Single-Cell Square Column under Axial Loading, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 10, No. 3, pp. 21-30, 2010. (In Persian).
- [7] A. Niknejad, B. Rezaei, GH. Liaghat, Empty circular metal tube in the splitting process- theoretical and experimental studies, *Thin-Walled Structures*, Vol. 72, pp. 48-60, 2013.
- [8] S.J. Hosseinipour, G.H. Daneshi, Energy absorption and mean crushing load of thin-walled grooved tubes under axial compression, *Thin-Walled Structures*, Vol. 41, No. 1, pp. 31-46, 2003.
- [9] H. Khodarahmi, M. Abasi, Analytical and numerical methods of design of grooved cylindrical shock absorber, in *The 13th International Conference on Mechanical Engineering*, Esfahan, Iran, 2006. (In Persian).
- [10] A. Naddaf Oskouei, H. Khodarahmi, M. Rezvani, Dynamic progressive buckling of circular tubes under high speed axial impact loadings, *Aerospace Mechanics*, Vol. 9, No. 4, pp. 17-35, 2013. (In Persian).
- [11] K. Yamasaki, J. Han, Maximisation of Crushing Energy Absorption of Cylindrical Shells, *Adva. Eng. Soft.*, Vol. 31, No. 6, pp. 425-423, 2000.
- [12] J. Zamani, B. Baran, A. Rafahi, An experimental analysis of single and double thin-walled structure under static load, in *The 22th International Conference on Mechanical Engineering*, Ahvaz, Iran, 2014. (In Persian).
- [13] A. Ghamarian, M.T. Abadi, Axial Crushing Analysis of End-capped Circular Tubes, *Adva. Thin walled structure*, Vol. 49, No. 6, pp. 743-752, 2011.
- [14] A.A. Singace, Axial Crushing Analysis of tube deforming in the multi-lobe mode, *Mechanical Sciences*, Vol. 41, No. 7, pp. 865-890, 1999.

در برخورد با انرژی جنبشی مساوی، برخوردی که در آن نرخ کرنش کمتر می‌باشد طول لهیدگی بیشتری دارد و این اختلاف طول لهیدگی به مقدار تغییر نرخ کرنش بستگی دارد.

5- فهرست علائم

CF نیروی برخورد (N)

D قطر لوله (m)

E مدول یانگ (GPa)

KE انرژی جنبشی چکش (J)

n تعداد لوله‌ها در یک لایه چین‌خوردگی

PE انرژی کار پلاستیک (J)

P_{mean} نیروی میانگین فروپاشی (N)

P_{max} نیروی ماکزیمم فروپاشی (N)

$S_{1,2,3,4,5}$ جاذب لوله‌ای در آزمایش اول، دوم، سوم، چهارم و پنجم

W وزن چکش (kg)

t زمان (s)

Δt زمان برخورد (ms)

δ طول لهیدگی (cm)

ν ضریب پواسون

6- منابع

- [1] JM. Alexander, An approximate analysis of collapse of thin-walled cylindricalshells under axial load, *Mechanical and Applied Mathematics*, Vol. 13, pp. 5-10, 1960.