مجله مهندسی مکانیک مدرس، اردیبهشت 1394، دوره 15، شماره 2، ص‌ص 169-178

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

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

علیرضا نداف اسکویی[1*]، حسین خدارحمی[2]، مجتبی پاکیان بوشهری[3]

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
* تهران، صندوق پستی 1698715861، anadaf@ihu.ac.ir

**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
کمانش 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 کمانش 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 به‌صورت 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 Khodarahmi[2], Mojtaba Pakian Booshehri[3]

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.

## 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 مستمر باشد. اولین تحقیقات روی لوله‌های دایروی توسط الکساندر صورت گرفت. او توانست با ارائه‌ی الگوی فروریزشی 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

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

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)

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 تئوریی 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 دایروی، تحت فشردگی محوری، در مد شکاف پیش‌بینی می‌شد[7]. حسین‌پور و دانشی برای لوله‌های شیادار تحت بار محوری شبه استاتیکی 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]. خدارحمی و عباسی شبیه‌سازی عددی لهیدگی لوله‌های شیادار 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 لوله-های جدار نازک تحت بار دینامیکی شدید ناشی از برخورد پرتابه با سرعت بالای 100 متر بر ثانیه را به‌روش 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 سربسته 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 پیشرونده‌ی 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 از لوله‌های بسیار نازک با قطر کم، مود فروریزش الماسی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

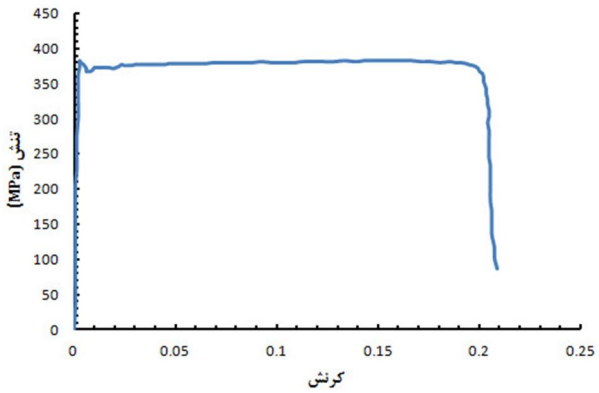
## 2- معرفی نمونه‌ها و آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی

### 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 همه‌ی 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 می-دهد.

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

**شکل 2** نمای جاذب لوله‌ای با برش دایره‌ای روی سرپوش




**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

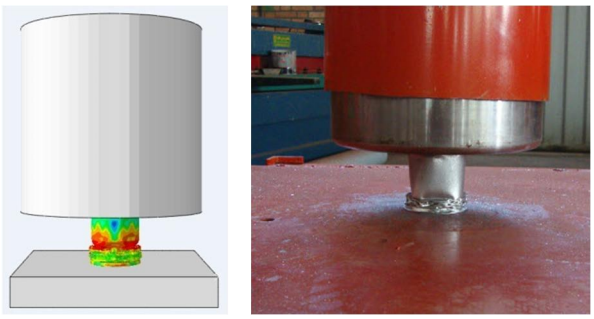
برای انجام آزمایش‌ها از دستگاه ضربه‌زن سقوط وزنه استفاده شده است که در آن یک ضربه‌زن استوانه‌ای از درون لوله راهنما می‌گذرد و روی نمونه‌ها سقوط می‌کند. شکل 4 نمای کلی این دستگاه را نشان می‌دهد. بدیهی است که برای تغییر در انرژی جنبشی اعمالی وارد بر جاذب می‌توان از دو پارامتر وزن ($w$) و ارتفاع ضربه‌زن ($h$) استفاده کرد. برای انجام تست‌ها، نمونه روی سکو قرار می‌گیرد و بعد از مشخص کردن وزن و ارتفاع چکش، چکش رها 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 انتهای چکش تا لبه‌ی بالایی لوله ثابت و مقدار 2/78 m در نظر گرفته شده است و جهت سهولت در اشاره به نمونه‌ها، هر نمونه با حرف S و اندیس، کدگذاری شده است. مثلا 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 $S_{3\text{-}n}$ 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 آباکوس[1] با نسخه‌ی 6.12 و روش حل صریح[2] 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 4** نمای کلی دستگاه ضربه‌زن سقوط آزاد



**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

با انجام چندین شبیه‌سازی بهترین سرعت در لحظه‌ی برخورد که در آن طول لهیدگی بطور متوسط برای چهار جاذب $S_1$، $S_2$، $S_3$ و $S_4$ 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

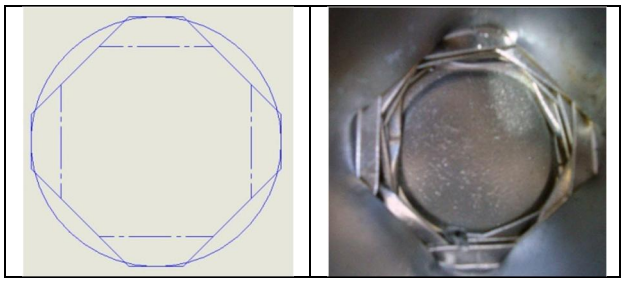
مشخصات و نتایج 6 آزمایش انجام شده روی جاذب در جدول 1 ارائه شده است. مطابق آنچه که از نسبت قطر به ضخامت این لوله‌ها انتظار می‌رفت (مشاهدات تجربی نشان می‌دهد که لوله‌های با $D/t$ بیشتر از 80 الی 90 در مد نامتقارن فروریزش می‌کنند)، در همه‌ی نمونه‌ها چین‌خوردگی‌ها به صورت نامتقارن ایجاد شدند و مدهای فروریزشی 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

**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 چین‌خوردن می‌کند. فرآیند چین‌خوردگی بصورت پیش‌رونده و تا جذب کامل انرژی ادامه دارد. جهت اطمینان از محل چین‌خوردگی آزمایش‌های $S_3$ و $S_4$ 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 $S_1$، $S_2$، $S_3$ و $S_4$ استفاده شده است[14]. سینگس، نیروی میانگین فروپاشی برای این لوله‌ها را در مد فروریزش الماسی طبق رابطه‌ی (1) ارائه کرده است.

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

که $M_p$ طبق رابطه‌ی (2) محاسبه می‌گردد.

$$M_p = \sigma_0\left(t^2/4\right) \quad (2)$$

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

مقطع عرضی لوله برابر 4 است. همچنین $D$، $t$ و $\sigma_0$ 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 $g$ و $h$ به ترتیب شتاب ثقل و ارتفاع چکش تا نمونه است.

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

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 جذب 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 گاهاً 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 $S_{3\text{-}n}$ 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 |

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 سازه‌ای 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.

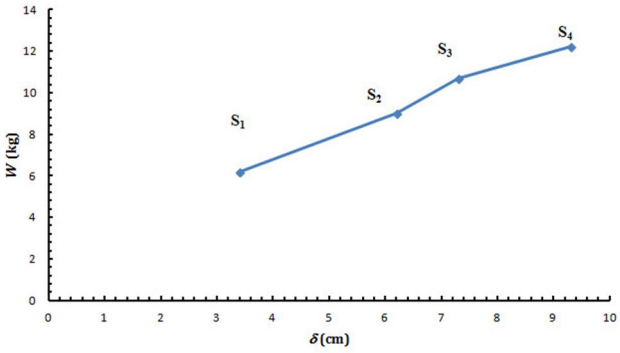
### 3-2- نتایج عددی

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 می-شود و در بارهای دینامیکی از محل اعمال ضربه که بالای لوله است ایجاد می‌گردد.

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

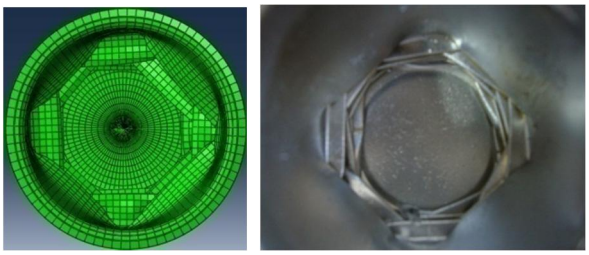
**شکل 11** نمای جاذب $S_5$ بعد از آزمایش ضربه



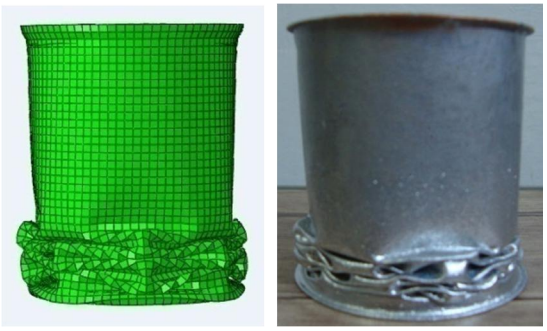

**شکل 12** نمودار وزن چکش - طول لهیدگی جاذب‌ها در آزمایش تجربی

اما با بررسی فرآیند فروریزش در شبیه‌سازی، مشاهده شد که چین‌خوردگی در این لوله‌ها بعد از نفوذ سرپوش‌ها به داخل لوله شروع می‌شوند و در چین‌خوردگی‌های بالایی لوله، زمان نفوذ سرپوش پایین، کمتر از سرپوش بالا بوده است و در چین‌خوردگی‌های 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 چین‌خوردگی‌ها از پایین لوله ایجاد شده‌اند که در جاذب $S_3$ و $S_4$ این موضوع مشهود می‌باشد. قبل از شروع چین‌خوردگی‌ها، محل چین‌خوردگی در لوله به یک هشت ضلعی با چهار ضلع بزرگ و چهار ضلع کوچک تقسیم می‌شود و با ادامه‌ی فشردگی، ضلع‌های بزرگ به سمت داخل لوله و ضلع‌های کوچک به سمت بیرون تا می‌خورند و یک لایه چین‌خوردگی را تشکیل می‌دهد. در لایه بعدی چین‌خوردگی، جای اضلاع بزرگ و کوچک هشت ضلعی عوض می‌شود. شکل‌های 13، 14 و 15 مقایسه‌ی شبیه‌سازی عددی با آزمایش تجربی را برای چین‌خوردگی‌ها 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.

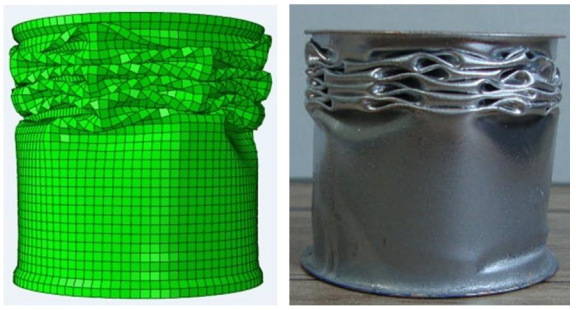
کانتور جابجایی برای نشان دادن طول لهیدگی و کانتور تنش، برای مشخص کردن میزان تنش روی دیواره‌ی لوله و بخصوص در محل چین‌خوردگی‌ها ارائه شده است. شکل 16 هر چهار جاذب را بعد از شبیه‌سازی ضربه نشان می‌دهد و شکل 17 مقایسه نمودار وزن چکش - طول لهیدگی حاصل از شبیه‌سازی عددی و آزمایش تجربی را نشان می‌دهد. در این نمودار، رفتار خطی این گروه از جاذب‌ها در شبیه‌سازی عددی برای جذب انرژی نسبت به طول لهیدگی به‌خوبی مشخص شده است و انحراف آن از مقدار خطی در تست تجربی برای جاذب $S_1$ و $S_4$ است.



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



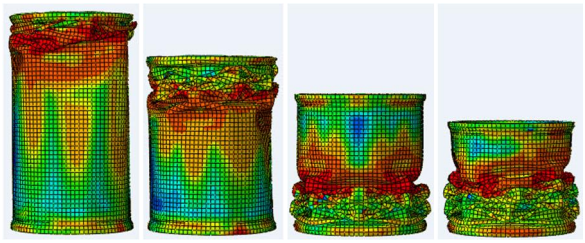
**شکل 14** چین‌خوردگی انتهایی جاذب لوله‌ای در آزمایش تجربی و شبیه‌سازی



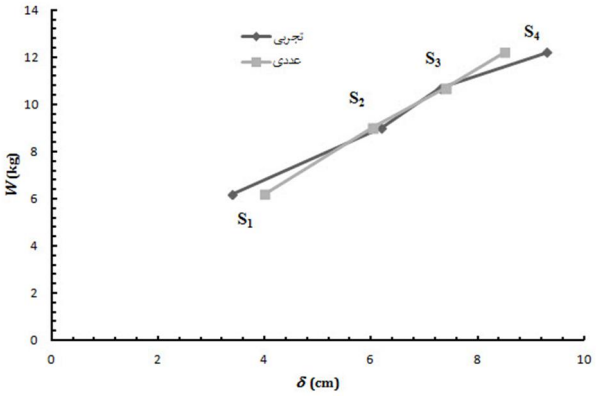
**شکل 15** چین‌خوردگی بالایی جاذب لوله‌ای در آزمایش تجربی و شبیه‌سازی

**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 |

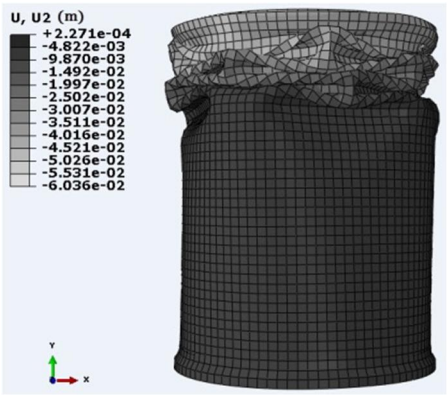


**شکل 16** نمای کلی از جاذب‌ها بعد از تست ضربه در شبیه‌سازی عددی

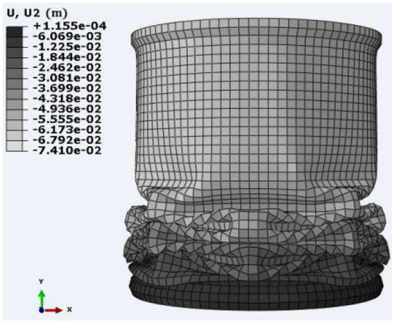



**شکل 17** نمودار وزن چکش – طول لهیدگی جاذب لوله‌ای از آزمایش تجربی و شبیه‌سازی عددی

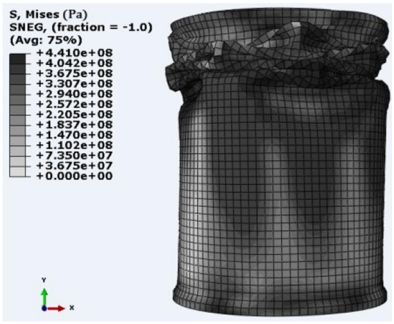
شکل‌های 18، 19، 20 و 21 کانتور جابجایی و تنش فون میسز در جاذب‌های $S_2$ و $S_3$را نشان می‌دهد. بیشترین جابجایی مربوط به لبه‌ی بالایی لوله است که همان طول لهیدگی را بعد از آزمایش ضربه نشان می‌دهد. برای جاذب $S_2$ طول لهیدگی6/03 سانتی‌متر است. جابجایی‌ها در خلاف جهت محور y است و به همین دلیل نیز دارای مقدار منفی هستند. با دقت در کانتور تنش مشاهده می‌شود که تنش در آخرین چین‌خوردگی به نزدیکی تنش نهایی رسیده است. اما با بررسی تنش در فرآیند چین‌خوردگی، مشاهده می‌شود که در شروع هر چین‌خوردگی تنش به نزدیکی تنش نهایی رسیده و سپس با اتمام آن چین‌خوردگی، سطح تنش کاهش می‌یابد و تنش به لایه‌ی بعدی چین‌خوردگی منتقل می‌شود و این فرآیند تا اتمام کامل چین-خوردگی‌ها ادامه دارد و به عبارتی تنش‌ها در هر چین‌خوردگی، 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 چین‌خوردگی در جاذب $S_4$ 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 چین‌خوردگی سطح تنش کاهش می‌یابد.



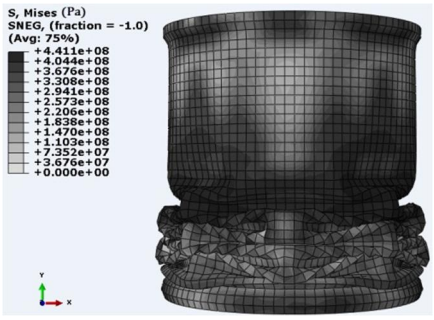

**شکل 18** کانتور جابجایی جاذب $S_2$



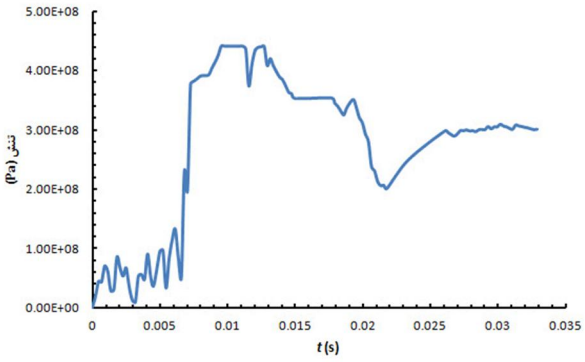

**شکل 19** کانتور جابجایی جاذب $S_3$




**شکل 20** کانتور تنش جاذب $S_2$




**شکل 21** کانتور تنش جاذب $S_3$

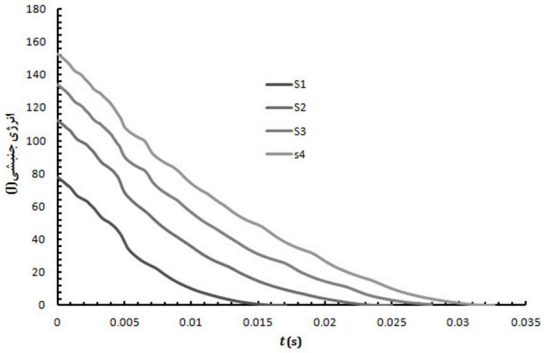



**شکل 22** نمودار تنش – زمان یک المان در لایه دوم چین‌خوردگی جاذب $S_4$

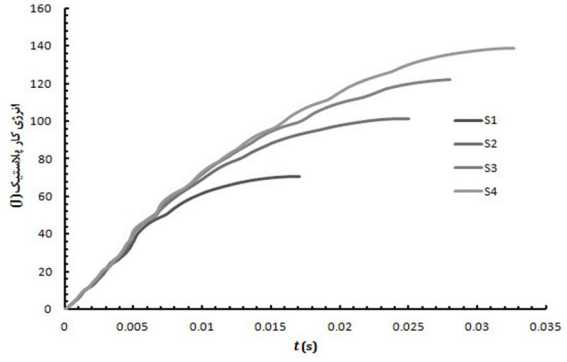
هنگامی که چکش با نمونه برخورد می‌کند انرژی جنبشی در چکش شروع به کم شدن می‌کند و مقدار آن تا اتمام زمان برخورد به صفر می‌رسد. شکل 23 نمودار تغییرات انرژی جنبشی چکش را حین برخورد برای هر چهار جاذب نشان می‌دهد. برای نمونه‌ی $S_1$ در لحظه‌ی برخورد، چکش دارای انرژی جنبشی 77/59 ژول است که با گذشت زمان 17 ms و با توقف حرکت چکش این مقدار به صفر رسیده است و برای جاذب $S_2$ نیز انرژی جنبشی 112/43 ژول است که با گذشت 25 ms صفر شده است برای جاذب $S_3$ و $S_4$ 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 تغییرشکل پلاستیک در جاذب است و سایر اتلاف‌های ناشی از اصطکاک، صوت و ... نسبتاً ناچیزند. برای جاذب $S_1$ 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 $S_2$، $S_3$ و $S_4$ 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.

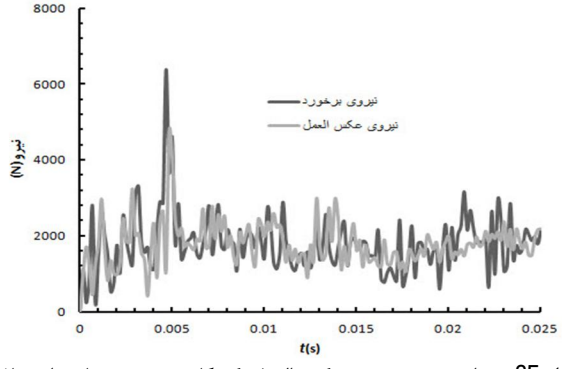
شکل‌های 25 و 26 نمودارهای نیروی برخورد و عکس‌العمل تکیه‌گاهی برحسب زمان را برای جاذب‌های $S_2$ و $S_4$ نشان می‌دهد. نیروی برخورد مربوط به محل تماس چکش به نمونه و نیروی عکس‌العمل مربوط به محل تماس نمونه با میز دستگاه است. در تمامی نمودارها نیروی ماکزیمم فروپاشی با یک تأخیر زمانی تقریبا 5 ms شروع می‌شود و این زمانی است که در آن فرورفتگی‌های بالا و پایین لوله جمع شده و سرپوش‌ها به داخل لوله نفوذ می‌کنند.



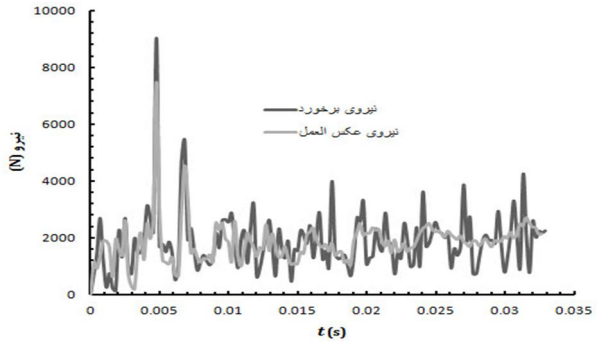

**شکل 23** نمودار تغییرات انرژی جنبشی چکش برای چهار جاذب برحسب زمان




**شکل 24** نمودار جذب انرژی ناشی از کار پلاستیک برای چهار جاذب برحسب زمان




**شکل 25** نمودار نیروی برخورد و عکس العمل تکیه‌گاهی برحسب زمان برای جاذب $S_2$




**شکل 26** نمودار نیروی برخورد و عکس العمل تکیه‌گاهی برحسب زمان برای جاذب $S_4$

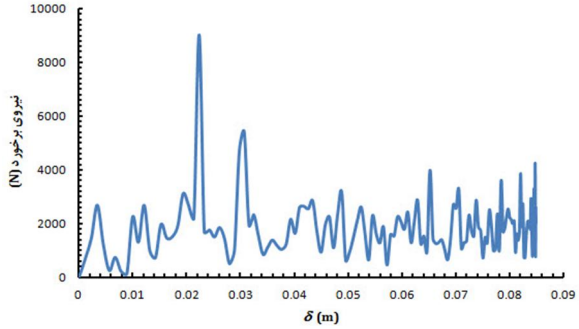
پس از این مرحله اولین چین‌خوردگی در لوله ایجاد می‌شود و همان‌طور که در نمودار مشخص است ماکزیمم نیرو برای ایجاد اولین چین‌خوردگی صرف شده است. بقیه چین‌خوردگی‌ها با سطح نیرو تقریباً ثابتی تشکیل می‌شوند که نیرو میانگین فروپاشی در آن جاذب است. این نمودارها بر خلاف نمودار نیرو در فروریزش‌های متقارن دارای 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 $P_{\text{mean}}$ طبق رابطه‌ی (4) برابر است:

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

که $P$ نیرو و $\delta$ 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 $\delta t$ کل طول لهیدگی است. به عبارت دیگر نیروی میانگین فروپاشی عبارت است از انرژی جذب شده بر واحد طول. برای مثال در جاذب $S_3$ 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 $S_4$ که سطح



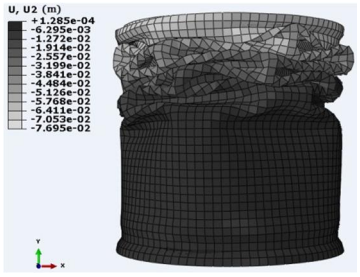

**شکل 27** نمودار نیروی برخورد – جابجایی جاذب $S_4$

| مساحت کل : انرژی جذب شده | مساحت جزیی | نیروی برخورد (N) | جابجایی (m) |
|---|---|---|---|
| | | 0 | 0 |
| 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 |

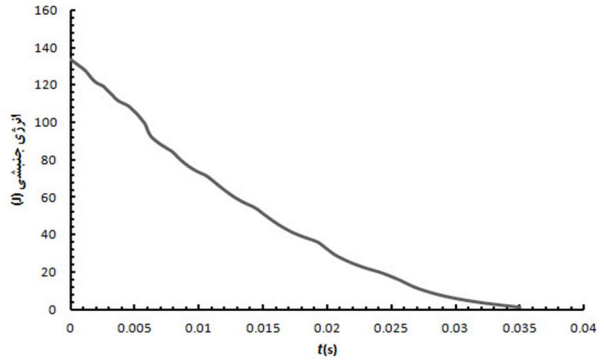
**شکل 28** مساحت زیر نمودار نیروی برخورد – جابجایی جاذب $S_4$

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 $S_5$ برابر 3/966 m/s انتخاب گردیده است تا شرایط برابری انرژی جنبشی برای وزن 17 kg با آزمایش $S_3$ برقرار باشد. شکل 29 کانتور جابجایی جاذب $S_5$ 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 $S_3$ 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 $S_5$ 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 $S_5$ بیشتر است. با دقت در نمودار شکل 30 مشاهده می‌شود که زمان فروریزش در جاذب $S_5$ حدود 7 ms نسبت به جاذب $S_3$ 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 $S_3$ و $S_5$ 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 $S_5$




**شکل 30** نمودار تغییرات انرژی جنبشی چکش در جاذب $S_5$

**جدول 4** نتایج شبیه‌سازی چهار آزمایش برابری انرژی

| ردیف | 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 m/s حدود 70 ژول بوده است و هر لایه چین‌خوردگی در این لوله‌ها به طور میانگین حدود 9/5 ژول انرژی جذب می‌کنند.

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.

در برخوردها با انرژی جنبشی مساوی، برخوردی کـه در آن نـرخ کـرنش کمتر می‌باشد طول لهیدگی بیشتری دارد و این اختلاف طـول لهیـدگی بـه 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 لبه‌ها 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)

$\Delta t$ زمان برخورد (ms)

$\delta$ طول لهیدگی (cm)

$\nu$ 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.

[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. Mokhtarnezhad, 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. Behravesh, 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, Empety circular metal tube in the splitting proces- theoretical and experimental studies, *Thin-Walled Structures*, Vol. 72, pp. 48-60, 2013.

[8] S.J. Hosseinipour, G.H. Daneshi, Energy absorbtion and mean crushing load of thin-walled grooved tubes under axial compresstion, *Thin-Walled Structures,* Vol. 41, No. 1, pp. 31-46, 2003.

[9] H. Khodarahmi, M. Abasi, Analitical and numrical 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 Mechnics,* 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.