

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

علیرضا نداد اسکوئی<sup>۱\*</sup>، حسین خدارحمی<sup>۲</sup>، مجتبی پاکیان بوشهري<sup>۳</sup>

۱- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران

۲- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران

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

### 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 پیشرونده دینامیکی است که تحت فروریزش محوری ایجاد می‌شود. در این مطالعه برخلاف اکثر تحقیقات قبلی که جاذبهای را به صورت شباهستایی برسی می‌کنند، رفتار یک جاذب انرژی جدار نازک لوله‌ای که در نزدیکی دو انتهای دارای فرورفتگی بوده و دو سر لوله نیز دارای سرپوش است تحت بار ضربه‌زن سقوط آزاد استفاده شده است و در بخش عددی از توانایی‌های نرم‌افزار اجزای است. برای انجام تست‌های تجربی از یک دستگاه ضربه‌زن سقوط آزاد استفاده شده است و در نتیجه جذب انرژی بیشتر در طول لهیدگی کمتر 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 مکریم فرپوشی با تأخیر زمانی ایجاد شود. همچنین این جاذبهای دارای رفتار خطی در جذب انرژی نسبت به طول لهیدگی هستند و با افزایش وزن چکش تغییری در نیروی میانگین فرپوشی ایجاد نشده است. آزمایشی نیز جهت بررسی برخوردهای با انرژی جنبشی مساوی انجام گرفت که با بررسی نزدیکی این جاذبهای دارای برخورد، مشاهده شد که به ازای کاهش ۱۶/۹٪ نزدیکی از جذب انرژی دارای سرپوش بود.

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۰۷ آبان ۱۳۹۳

پذیرش: ۰۶ اذر ۱۳۹۳

ارائه در سایت: ۰۶ دی ۱۳۹۳

کلید واژگان:

جذب انرژی

لوله‌های دایروی

کمانش پیشرونده دینامیکی

فروریزش الماسی

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

Alireza Nadaf Oskouei<sup>1\*</sup>, Hossein Khodarahmi<sup>2</sup>, Mojtaba Pakian Booshehri<sup>3</sup>

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

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 فروریختن 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 حلی 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 چین خوردگی‌ها، در سرپوش بالایی برش دایره‌ای ایجاد گردید و برای مشاهده‌ی مز چین خوردگی همه‌ی نمونه‌ها رنگ شدند. شکل 2 جاذب 0/21 mm نمونه‌ی 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 حلی 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



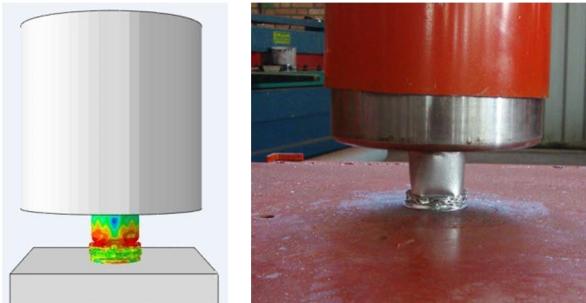
شکل 2 نمای جاذب لوله‌ای با برش دایره‌ای روی سرپوش

کردن تا یک تغییر را برای مد نامتناصرن بر پایه‌ی هندسه‌ی واقعی چین- خوردگی گسترش دهنده. بنابراین آنها قادر بودند معادلاتی را به دست آورند که نیروی میانگین محوری فروپاشی را پیش‌بینی کنند [3]. صالح غفاری و همکاران دو مدل برای جاذب‌های لوله‌ای ارائه کردند که در آن لوله‌های جدار ضخیم تحت فشردگی محوری با کمانش پیش‌رونده فروریختن 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 تغیری و تجربی قرار دادند. آن‌ها روابط تئوری 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 چین خوردگی در ستون‌های مربعی تک مشاهده شد [6]. نیکنژاد و همکاران لوله‌های دایره‌ای فلزی را در مد شکاف مشاهده شد. نیکنژاد و همکاران لوله‌های دایره‌ای فلزی 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 شیادار تحت بار محوری شبه استاتیکی مدلی تحلیلی ارائه کردند و روابطی را استخراج کردند که در آن دادند. آنها نشان دادند که به کمک شیارهای محیطی داخلی و خارجی روی دیواره‌ی لوله، روند فروریختن در یک شیوه‌ی کنترلی صورت می‌گیرد [8]. خدارحمی و عیاضی شبیه‌سازی عددی لهیدگی لوله‌های شیادار را به کار گرفتند. 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 اسکوپی 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 شبیه‌ی صحیح فروریختن 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 مرتعی را که به صورت 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 می‌باید [12]. قمریان و عبادی فروریختن پوسته‌های استوانه‌ای سرسیسته تقویت شده با فوم را تحت بارگذاری محوری به صورت آزمایشگاهی و عددی بررسی کردند. آنها نشان دادند که پوسته‌های استوانه‌ای سرپوش دار، جاذب انرژی بهتری نسبت به پوسته‌های استوانه‌ای سرباز هستند [13].

در این مقاله برخلاف اغلب تحقیقات که جاذب‌ها را به صورت شبیه‌استاتیک 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 فروریختن الماسی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در این تحقیق با استفاده

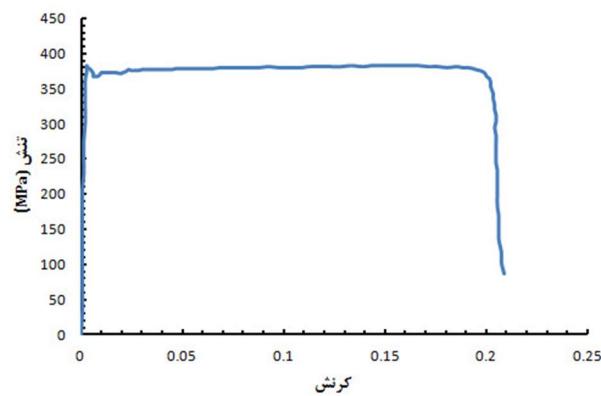


شکل 4 نمای کلی دستگاه ضربهزن سقوط آزاد



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

در مژول 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 مژول قطعات ایجاد شدند. برای تعریف جنس لوله‌ها در مژول خصوصیات مواد، مدول یانگ  $E=200 \text{ GPa}$  و ضریب پواسون  $\nu = 0.29$  برای خواص الاستیک، و نمودار تنش - گرنش مهندسی برای خواص پلاستیک و مدل آسیب برشی برای خواص آسیب در نرم‌افزار تعریف شده است.



شکل 3 نمودار تنش - گرنش مهندسی ورق حلبي

این آزمایش توسط دستگاه STM-20 دانشگاه جامع امام حسین (ع) صورت گرفته است که نمونه طبق استاندارد JIS A 5201 آماده شده و مورد آزمایش قرار گرفت. همان‌طور که از نمودار تنش - گرنش این ماده در شکل 3 مشاهده می‌شود به نظر می‌رسد که رفتار این نوع ماده به پلاستیک کامل نزدیک است.

## 2-2- روشن آزمایش‌ها

برای انجام آزمایش‌ها از دستگاه ضربهزن سقوط وزنه استفاده شده است که در آن یک ضربهزن استوانه‌ای از درون لوله راهنمایی می‌گذرد و روی نمونه‌ها سقوط می‌کند. شکل 4 نمای کلی این دستگاه را نشان می‌داند. بدیهی است که برای تعییر 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. 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 سریوش نیز که مورد آزمایش ضربه قرار گرفته است، با کد  $S_{3-n}$  کدگذاری شد که تحت شرایط آزمایش  $S_3$  انجام گردید. 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 سقط و اندازه وزنه طوری تغییر کردند که انرژی جنبشی اعمالی به هر دو برابر است) تا بتوانند با یکدیگر مقایسه شوند. جهت دقت و صحت نتایج، آزمایش‌ها تکرار گردیدند.

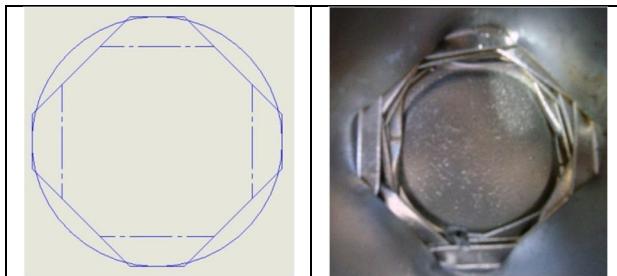
## 2-3- شبیه‌سازی عددی فروزش لوله‌ها

نرم‌افزار غیرخطی آباکوس<sup>1</sup> با نسخه‌ی 6.12 و روش حل صریح<sup>2</sup> 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

1- Abaqus  
2- Explicit



شکل 7 شکل چین خوردگی 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 فروفتگی‌های بالا و پایین لوله جمع می‌شوند و با جمع شدن فروفتگی‌ها، 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 چین خوردگی بصورت پیشرونده و تا جذب کامل انرژی ادامه دارد. جهت اطمینان از محل چین خوردگی آزمایش‌های S<sub>3</sub> و S<sub>4</sub> چندین بار تکرار شدند و در همهٔ آزمایش‌ها محل چین خوردگی در پایین لوله ایجاد گردید.

برای محاسبهٔ انرژی جذب شدهٔ جاذب از مدل ثوری ارائه شده توسط سینگس روی چهار جاذب جاذب S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub> و S<sub>4</sub> استفاده شده است [14]. سینگس، نیروی میانگین فروپاشی برای این لوله‌ها را در مد فروریزش الماسی طبق رابطهٔ (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<sub>p</sub> طبق رابطهٔ (2) محاسبه می‌گردد.

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

در روابط بالا 7 برابر تعداد گوشش‌های به وجود آمده در یک لایه چین خوردگی است که در این تحقیق با مد هشت ضلعی بوجود آمده در

با انجام چندین شبیه‌سازی بهترین سرعت در لحظهٔ برخورد که در آن طول لهیلدگی بطور متوسط برای چهار جاذب S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, S<sub>3</sub> و S<sub>4</sub> با آزمایش‌های تجربی مطابقت کند محاسبه گردیده است که شرط مرزی اولیهٔ سرعت 5 m/s در نقطهٔ 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، اندازهٔ مش در المان‌بندی از 0/0014 تا 0/0050 ریز شد که از بازهٔ 0/0024 تا 0/0018 همگرایی در جواب برای طول لهیلدگی و نیروی میانگین مشاهده شد و المان‌بندی 0/0018 برای همهٔ 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 انتگرال گیری روی نقاط گوسی آن از نوع کاهاش 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 الى 90 در مد نامتقارن فروریزش می‌کنند)، در همهٔ نمونه‌ها چین خوردگی‌ها به صورت نامتقارن ایجاد شدند و مدهای فروریزشی الماسی در تمامی نمونه‌ها ایجاد گردید. در آزمایش‌های مختلف چین خوردگی 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 چین خوردگی بالا، چین خوردگی 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 جاذب

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



شکل 6 شکل چین خوردگی بالایی لوله

گرفت. شکل 10 این جاذب را بعد از آزمایش ضربه در کنار جاذب  $S_3$  نشان می‌دهد. میزان لهیدگی این نمونه  $8/37 \text{ cm}$  است که  $1/07 \text{ cm}$  بیشتر از نمونه‌ی با سرپوش لهیده شده است و تعداد چین خوردگی‌ها، 10 چین است. در این نمونه چین خوردگی 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. برخلاف 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  $S_5$ ، 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 فروریختن این جاذب‌ها نشان می‌دهد چین خوردگی‌ها مانند آزمایش‌های تجربی بصورت الماسی و نامتقارن بوده و در اغلب نمونه‌ها مدهای تغییرشکل هشت ضلعی ایجاد شده است.

فروریختش 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 چین خوردگی می‌کند. روند چین خوردگی در لوله‌های معمولی بدین گونه است که در آزمایش‌های شباهستاتیک، چین خوردگی 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  $S_3$

قطع عرضی لوله برابر 4 است. همچنین  $D$  و  $50$  به ترتیب قطر، ضخامت و تنش تسليم لوله هستند. طبق رابطه‌ی 1 نیروی میانگین فروپاشی برای این لوله‌ها برابر  $N = 2123/1$  است. حال با ضرب نیروی میانگین فروپاشی در طول لهیدگی 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 آرائه 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.

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

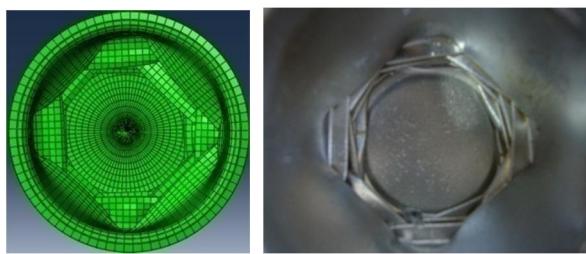
با توجه به ارتفاع ثابت  $2/78 \text{ m}$  برای هر چهار آزمایش انتظار می‌رفت که سرعت برابر  $7/4 \text{ m/s}$  باشد. سرعت‌های نشان داده شده در جدول 2 بیانگر وجود اصطکاک در دستگاه ضربه‌زن سقوط آزاد است. این اصطکاک که ناشی از تماس چکش با محفظه‌ی نگهدارنده، طناب با سه قرقره‌ی دستگاه و مقاومت نسبتاً زیاد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

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

در این جاذب هر لایه چین خوردگی حدود  $900 \text{ g}$  از وزن چکش را جذب کرده است که برابر  $11/7 \text{ ژول انرژی}$  می‌باشد. در جاذب  $S_4$  به ازای اضافه شدن  $6 \text{ kg}$  به وزنه نسبت به آزمایش اول، تعداد 10 چین به چین خوردگی‌ها اضافه شده است. یعنی هر لایه چین خوردگی  $600 \text{ g}$  وزن چکش را جذب کرده است که برابر  $7/8 \text{ ژول انرژی}$  می‌باشد. بنابراین هر لایه چین خوردگی به طور متوسط  $600 \text{ g}$  از وزن چکش را جذب کرده است که با سرعت میانگین  $5/1 \text{ m/s}$  در لحظه‌ی برخورد، برابر  $9/5 \text{ ژول انرژی}$  است. نکته‌ی قابل توجه این است که در هر جاذب وزن  $5/46 \text{ kg}$  که با سرعت میانگین محاسبه شده معادل  $71 \text{ ژول انرژی}$  است، صرف جمع شدن فرورفتگی‌ها، نفوذ سرپوش به داخل لوله و غلبه بر مقاومت لوله در برابر فروریختش (نیروی مکریم 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

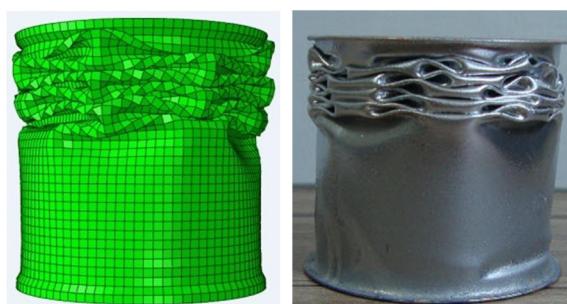
ردیف	نوع جاذب	انرژی جذب شده بر اساس رابطه سینگس (1)	سرعت چکش در هنگام برخورد (m/s)
4/7		70	$S_1$ 1
5/3		128/02	$S_2$ 2
5/3		154/98	$S_3$ 3
5/4		180/46	$S_4$ 4



شکل ۱۳ مد هشت ضلعی به دست آمده از آزمایش تجربی و شبیه‌سازی



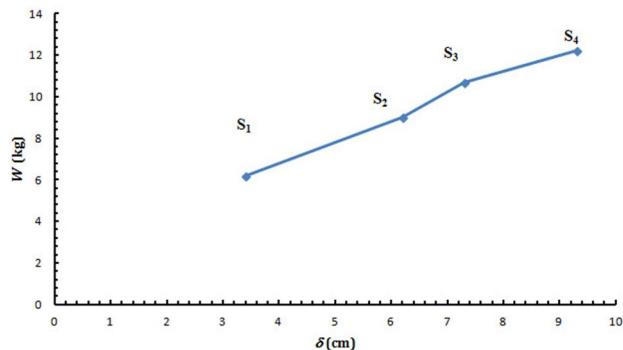
شکل ۱۴ چین خوردگی انتهایی جاذب لوله‌ای در آزمایش تجربی و شبیه‌سازی



شکل ۱۵ چین خوردگی بالایی جاذب لوله‌ای در آزمایش تجربی و شبیه‌سازی

جدول ۳ نتایج عددی برای چهار آزمایش انجام شده روی جاذب‌ها

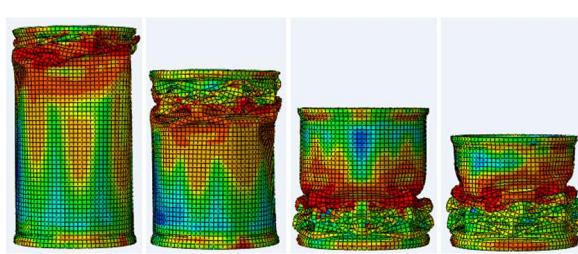
ردیف	نوع جاذب	وزن (kg)	طول لهیدگی (cm)	تعداد چین‌ها	محل چین‌ها
1	S <sub>1</sub>	6/2	4	2	بالا
2	S <sub>2</sub>	9	6/03	3	بالا
3	S <sub>3</sub>	10/7	7/4	5	پایین
4	S <sub>4</sub>	12/2	8/5	7	پایین
5	S <sub>5</sub>	17	7/69	5	بالا

شکل ۱۱ نمای جاذب S<sub>5</sub> بعد از آزمایش ضربه

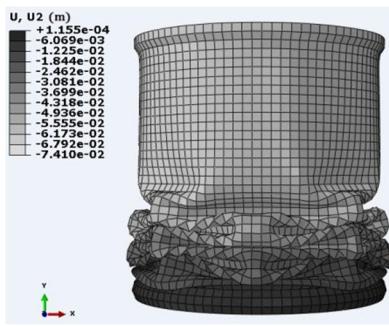
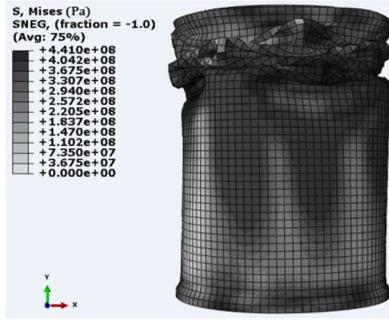
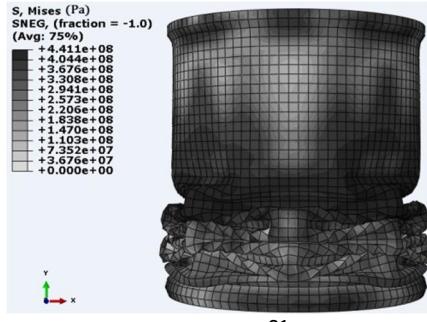
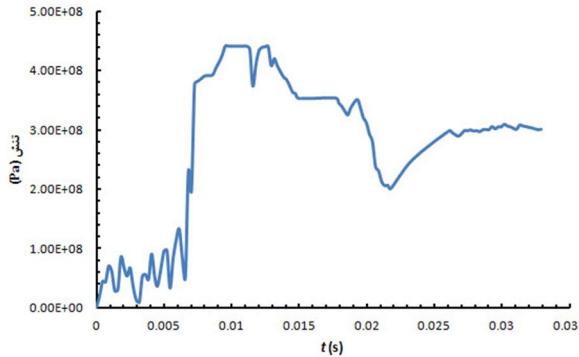
شکل ۱۲ نمودار وزن چکش - طول لهیدگی جاذب‌ها در آزمایش تجربی

اما با بررسی فرآیند فروریختش 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 S<sub>3</sub> و S<sub>4</sub> 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 فشردنگی، 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 اصلاح بزرگ و کوچک هشت ضلعی عوض می‌شود. شکل‌های 13، 14، 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 ۳ نشان داده شده است.

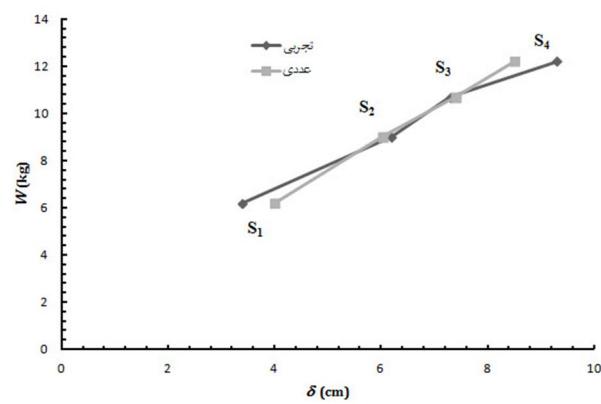
کانتور جابجایی برای نشان دادن طول لهیدگی و کانتور تنش، برای مشخص کردن میزان تنش روی دیواره‌ی لوله و بخصوص در محل چین خوردگی‌ها ارائه شده است. شکل ۱۶ هر چهار جاذب را بعد از شبیه‌سازی ضربه نشان می‌دهد و شکل ۱۷ مقایسه نمودار وزن چکش - طول لهیدگی حاصل از شبیه‌سازی عددی و آزمایش تجربی را نشان می‌دهد. در این نمودار، رفتار خطی این گروه از جاذب‌ها در شبیه‌سازی عددی برابر جذب انرژی نسبت به طول لهیدگی به خوبی مشخص شده است و انحراف آن از مقدار خطی در تست تجربی برای جاذب S<sub>1</sub> و S<sub>5</sub> است.



شکل ۱۶ نمای کلی از جاذب‌ها بعد از تست ضربه در شبیه‌سازی عددی

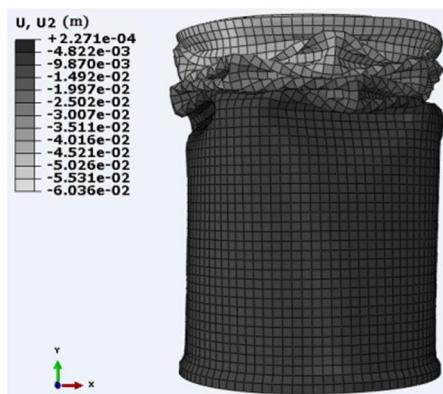
شکل 19 کانتور جابجایی جاذب  $S_3$ شکل 20 کانتور تنش جاذب  $S_2$ شکل 21 کانتور تنش جاذب  $S_3$ شکل 22 نمودار تنش - زمان یک المان در لایه دوم چین خوردگی جاذب  $S_4$ 

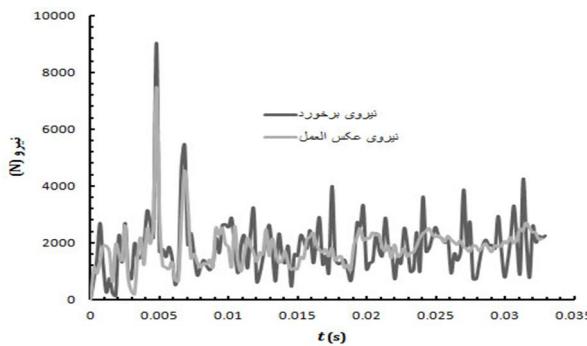
هنگامی که چکش با نمونه برخورد می‌کند انرژی جنبشی در چکش شروع به کم شدن می‌کند و مقدار آن تا اتمام زمان برخورد به صفر می‌رسد. شکل 23 نمودار تغییرات انرژی جنبشی چکش را حین برخورد برای هر چهار جاذب نشان می‌دهد. برای نمونه  $S_1$  در لحظه‌ی برخورد، چکش دارای انرژی جنبشی 77/59 ژول است که با گذشت زمان 15 ms 17 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  $S_4$  152/42 و 133/72 ژول است که به ترتیب با گذشت زمان 28 و 32 ms این مقدار به صفر رسیده است.



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 لهیدگی 6/03 سانتی‌متر است. جابجایی‌ها در خلاف جهت محور  $z$  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 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  $S_4$  نشان می‌دهد. همان‌طور که از نمودار مشخص است این المان در زمان 7 تا 15 ms تجربه‌ی ماکریم تنش در محدوده‌ی پلاستیک را دارد و بعد از اتمام چین خوردگی سطح تنش کاهش می‌یابد.

شکل 18 کانتور جابجایی جاذب  $S_2$



شکل 26 نمودار نیروی برخورد و عکس العمل تکیه‌گاهی بر حسب زمان برای جاذب  $S_4$

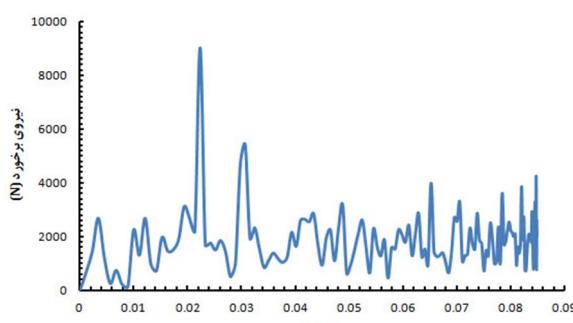
پس از این مرحله اولین چین خوردگی در لوله ایجاد می‌شود و همان‌طور که در نمودار مشخص است ماکزیمم نیرو برای ایجاد اولین چین خوردگی صرف شده است. بقیه چین خوردگی‌ها با سطح نیرو تقریباً ثابتی تشکیل می‌شوند که نیرو میانگین فروپاشی در آن جاذب است. این نمودارها برخلاف نمودار نیرو در فروریزش‌های مقاینه دارای نوسانات زیادی در طول فروریزش هستند، که علت آن است که در چین خوردگی‌های نامتقارن در هر لایه‌ی چین خوردگی 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 عکس العمل 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:

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

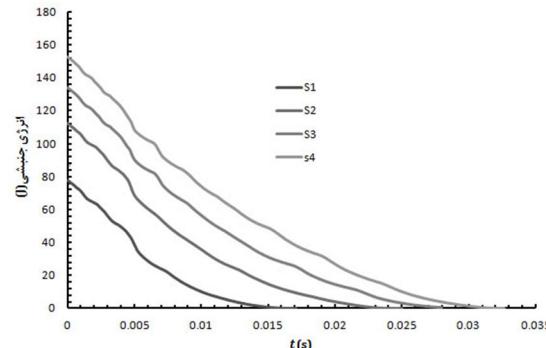
که  $P$  نیرو و  $\delta$  طول لهیدگی است. در نمودار هر چهار جاذب مشاهده می‌شود که نیروی میانگین فروپاشی زیر  $N = 2000$  است. انتگرال در این فرمول برابر سطح زیر نمودار نیرو- جابجایی و برابر انرژی جذب شده است و کل طول لهیدگی است. به عبارت دیگر نیروی میانگین فروپاشی عبارت است از انرژی جذب شده بر واحد طول. برای مثال در جاذب  $S_3$  سطح زیر نمودار نیروی عکس‌العمل - جابجایی تقریباً برابر  $133/69$  ژول، طول لهیدگی برابر  $7/4 \text{ cm}$  و نیروی میانگین برابر  $N = 1806$  است. و در جاذب  $S_4$  که سطح



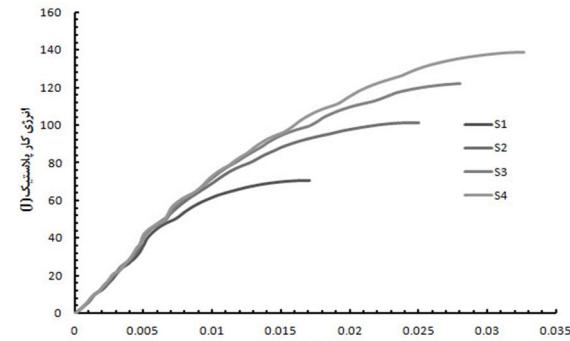
شکل 27 نمودار نیروی برخورد - جابجایی جاذب  $S_4$

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 اتفاق‌های ناشی از اصطکاک، صوت و ... نسبتاً ناچیزند. برای جاذب  $S_1$  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  $138/9$  و  $122/41$  و  $101/32$  ژول است که به ترتیب  $91/54$ ،  $90/11$  و  $91/12$ ٪ از کل انرژی جذب شده است.

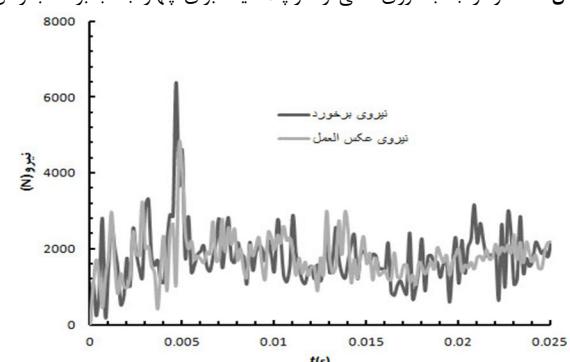
شکل‌های 25 و 26 نمودارهای نیروی برخورد و عکس‌العمل تکیه‌گاهی بر حسب زمان را برای جاذب‌های  $S_2$  و  $S_4$  نشان می‌دهد. نیروی برخورد مربوط به محل تماس چکش به نمونه و نیروی عکس‌العمل مربوط به محل تماس نمونه با میز دستگاه است. در تمامی نمودارها نیروی ماکزیمم فروپاشی با یک تأخیر زمانی تقریباً  $5 \text{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



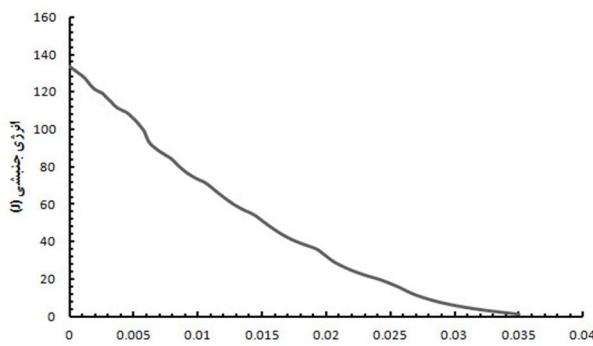
شکل 23 نمودار تغییرات انرژی جنبشی چکش برای چهار جاذب بر حسب زمان



شکل 24 نمودار جذب انرژی ناشی از کار پلاستیک برای چهار جاذب بر حسب زمان



شکل 25 نمودار نیروی برخورد و عکس‌العمل تکیه‌گاهی بر حسب زمان برای جاذب  $S_2$

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

جدول 4 نتایج شبیه‌سازی چهار آزمایش برای انرژی

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

#### 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 فروریختش 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 فروریختش شده است که در این لوله‌ها، این انرژی با اختساب سرعت میانگین برخورد  $5/1 \text{ m/s}$  حدود 70 ژول بوده است و هر لایه چین خوردگی 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.

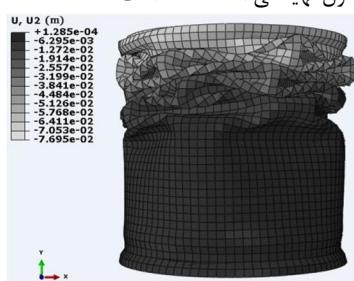
با افزایش وزن چکش از 9 به 10/7 kg محل چین خوردگی از بالای لوله به پایین منتقل می‌شود که با بررسی فرآیند چین خوردگی‌ها در شبیه‌سازی مشاهده شد که علت این امر در بیشتر شدن زمان نفوذ سرپوش پایین نسبت به بالای لوله است و محل اعمال ضربه را از بالا به پایین لوله تغییر می‌دهد. تنش در هنگام تشکیل چین خوردگی از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

نیروی میانگین فرودپاشی با افزایش وزن چکش تغییری نمی‌کند که مؤبد این مطلب است که نیروی میانگین فرودپاشی 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	نیروی برخورد (N)	جایجایی (m)	مساحت جزئی (m)
0	0	0	153.4346
0.0011304	682.687	0.385841039	
0.0022556	1443.62	1.196313476	
0.0033749	2682.59	2.309130271	
0.0044863	1216.52	2.166715931	
0.00559	247.16	0.8077684	
0.0066842	736.597	0.538228211	
0.0077736	215.104	0.518353467	
0.0088589	127.51	0.185919487	
0.0099356	2246.92	1.278298135	
0.011004	1303.89	1.896895964	
0.0120649	2680.43	2.113482544	
0.0131171	977.639	1.924510101	
0.0141623	722.754	0.888625382	
0.0152033	1966.14	1.399569327	
0.016239	1459.38	1.773905532	
0.0172672	1499.12	1.52096485	
0.0182884	1888.57	1.729754514	
0.0193019	3108.37	2.532199345	
0.020305	2680.08	2.903197098	
0.0212953	2208.68	2.420669514	
0.0222748	9026.47	5.502414713	
0.0232346	1676.71	5.136456082	
0.0241819	1760.92	1.62823345	
0.0251226	1494.71	1.531285571	
0.0260549	1847.24	1.557849993	

شکل 28 مساحت زیر نمودار نیروی برخورد - جایجایی جاذب  $S_4$  زیر نمودار نیرو-جایجایی برابر  $153/43$  ژول و طول لهیدگی  $8/5 \text{ cm}$  است. نکته‌ی قابل توجه این است که در تمامی جاذب‌های لوله‌ای یکسان، نیروی میانگین فرودپاشی تقریباً برابر بوده و ربطی به میزان انرژی جذب شده ندارد.

سرعت برخورد در آزمایش  $S_5$  برابر  $3/966 \text{ m/s}$  است تا شرایط برابر انرژی جنبشی برای وزن  $kg$  17 با آزمایش  $S_3$  برقار باشد. شکل 29 کانتور جایجایی جاذب  $S_5$  را نشان می‌دهد. طول لهیدگی در این جاذب برابر  $7/69 \text{ cm}$  است. شکل 30 نمودار تغییرات انرژی جنبشی چکش را برای این جاذب نشان می‌دهد. در آزمایش جاذب  $S_5$  که با وزن  $kg$  10/7 و سرعت  $5 \text{ m/s}$  صورت گرفت مقدار مومنت  $53/5 \text{ N.s}$  است و انرژی جنبشی برابر  $133/75$  ژول است و در آزمایش جاذب  $S_5$  که با وزن  $kg$  17 و سرعت  $3/966 \text{ m/s}$  صورت گرفت مقدار مومنت  $67/42 \text{ N.s}$  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 مومنت در جاذب  $S_5$  بیشتر است. با دقت در نمودار شکل 30 مشاهده می‌شود که زمان فرودپاشی در جاذب  $S_5$  7 ms نسبت به جاذب  $S_3$  افزایش یافته است و به عبارتی بیشتر شدن زمان فرودپاشی، 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  $2/19 \text{ s}$  و  $2/64 \text{ s}$  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 برابر انرژی را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که به طور میانگین به ازای کاهش  $2/3$ % به طول لهیدگی اضافه شده است.

شکل 29 کانتور جایجایی جاذب  $S_5$

- [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, Empty circular metal tube in the splitting process- theoretical and experimental studies, *Thin-Walled Structures*, Vol. 72, pp. 48-60, 2013.
- [8] S.J. Hosseinpour, 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 برخوردها 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 لبه‌ها در یک لایه چین خوردگی
$PE$	انرژی کار پلاستیک (J)
$P_{mean}$	نیروی میانگین فروپاشی (N)
$P_{max}$	نیروی ماکزیمم فروپاشی (N)
$S_{1,2,3,4,5}$	جادب 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)
$v$	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.