ماهنامه علمى پژوهشى





mme.modares.ac.ir

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

عليرضا نداف اسكويى¹°، حسين خدارحمى²، مجتبى پاكيان بوشهرى³

حكنده

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

یکی از مهمترین وسایل جذب انرژی ناشی از ضربه، لولههای دایروی هستند که در مدهای مختلف تغییرشکل پلاستیک، جذب انرژی میکنند.	مقاله پژوهشی کامل 50 م
از مدهای تغییرشکلی که بیشترین جذب انرژی را دارد، مد کمانش پیشروندهی دینامیکی است که تحت فروریزش محوری ایجاد میشود. در این	دریافت: /0 ابان 1393 : ۱۵۰ آ: 1303
مطالعه برخلاف اکثر تحقیقات قبلی که جاذبها را به صورت شبهاستاتیک بررسی میکنند، رفتار یک جاذب انرژی جدار نازک لولهای که در	پدیرس. ۵۵ ادر ۱۵۶۶ ارائه در سایت: 06 دی 1393
نزدیکی دو انتها دارای فرورفتگی بوده و دو سر لوله نیز دارای سرپوش است تحت بار ضربهزن استوانهای بهصورت تجربی و عددی بررسی شده	کلید واژگان:
است. برای انجام تست.های تجربی از یک دستگاه ضربهزن سقوط آزاد استفاده شده است و در بخش عددی از توانایی.های نرمافزار اجزای	جذب انرژی
محدود آباکوس استفاده شده است. نتایج نشان میدهد که سرپوش باعث تقویت جاذب و در نتیجه جذب انرژی بیشتر در طول لهیدگی کمتر	لولەھاي دايروي
میشود و فرورفتگی بالا و پایین لوله باعث میشود نیروی ماکزیمم فروپاشی با تأخیر زمانی ایجاد شود. همچنین این جاذبها دارای رفتار خطی	كمانش پیشروندهی دینامیکی
در جذب انرژی نسبت به طول لهیدگی هستند و با افزایش وزن چکش تغییری در نیروی میانگین فروپاشی ایجاد نشده است. آزمایشی نیز جهت	فروريزش الماسي
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 Oskouei1*, 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.

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

کردند. مطالعات آنها تا حدود زیادی تجربی بود[2]. جانسون و سادن تلاش

مستمر باشد. اولين تحقيقات روى لولههاى دايروى توسط الكساندر 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

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 شيارهاي يهن روي ديوارهي لوله استفاده كردند[4]. عابدي و همكاران 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]. حسین پور و دانشی برای لولههای شیادار تحت بار محورى شبه استاتيكي مدلى تحليلي ارائه كرده و آزمايش هاى تجربي انجام دادند. آنها نشان دادند که به کمک شیارهای محیطی داخلی و خارجی روی ديوارهى لوله، روند فروريزش در يک شيوهى کنترلى صورت مى گيرد[8]. خدارحمی و عباسی شبیه سازی عددی لهیدگی لوله های شیادار را به کار حسین پور اضافه کردند. آنها با استفاده از این جاذب در شبیه سازی 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 مدلى تحليلى ارائه كردند كه نسبت به مدل تحليلى قبلى نتايج 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 می یابد [12]. قمریان و عبادی فروریزش پوسته های استوانه ای سربسته تقویت شده با فوم را تحت بار گذاری 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 به صورت شبه استاتیک بررسی می کنند، یک جاذب انرژی لوله ای دارای سرپوش، تحت بار محوری دینامیکی ناشی از یک ضربه زن استوانه ای مورد بررسی قرار گرفته است. مدهای تغییر شکل پلاستیک در کمانش پیشرونده ی دینامیکی در سه نوع متقارن محوری، نامتقارن (الماسی) و مختلط تقسیم بندی می شود. 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- معرفي 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 مشاهده 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 21/18، قطر 250 است. همان طور بالای آن ایجاد گردیده است. ارتفاع لوله cm بالای آن ایجاد گردیده است. این لولهها در نزدیکی دو لبهشان دارای 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 cm 7/0 است. قطر لوله در قسمت فرورفتگی S 10 دورق حلبی دارای مدول یانگ 2003م، تنش تسلیم 380MPa است. شکل 3 نمودار تنش– کرنش مهندسی بدست آمده از آزمایش کشش را نشان می-دهد.



شکل 1 نمونه ی دارای دو سرپوش (چپ) و نمونه ی تک سرپوش



شکل 2 نمای جاذب لولهای با برش دایرمای روی سرپوش



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. همان طور که از نمودار تنش - کرنش این ماده در شکل 3 مشاهده می شود به نظر میرسد که رفتار این نوع ماده به پلاستیک کامل نزدیک است.

2-2- روش انجام آزمایشها

برای انجام آزمایش ها از دستگاه ضربهزن سقوط وزنه استفاده شده است که در آن یک ضربهزن استوانهای از درون لوله راهنما می گذرد 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 m 2/78 در نظر گرفته شده است و جهت سهولت در اشاره به نمونهها، هر نمونه با حرف S و اندیس، کدگذاری شده است. مثلا کد S1، اشاره به جاذب آزمایش اول دارد و به همین ترتیب S3 ،S2 و S4 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 S₃ انجام گرفت. یک آزمایش نیز جهت بررسی برخوردها با انرژی جنبشی مساوی انجام گرفت که با کد S5 نامگذاری شد. این آزمایش تحت شرایط آزمایش S3 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- شبيهسازي عددي فروريزش 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 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 v = 0.29 ماژول خصوصیات مواد، مدول یانگ E=200 GPa و ضریب پواسون v = 0.29برای خواص الاستیک، و نمودار تنش - کرنش مهندسی برای خواص پلاستیک و مدل آسیب برشی برای خواص آسیب در نرمافزار تعریف شده است.

با انجام چندین شبیسازی بهترین سرعت در لحظه یبرخورد که در آن طول لهیدگی بطور متوسط برای چهار جاذب ۶۱، ۵۶ د۶ و ۶۹ با آزمایش های 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 مش بندی، اندازه مش در المان بندی از 0/0020 تا 0/0014 ریز شد که از بازهی 20/004 تا 0/0018 المان بندی از 0/0050 تا 0/0014 ریز شد که از بازهی 20/004 تا 0/0018 المان بندی از 0/0050 تا 1/0/0050 ریز شد که از بازهی 20/004 تا 0/0018 بمگرایی در جواب برای طول لهیدگی و نیروی میانگین مشاهده شد و المان بندی 8/0018 برای همه یلوله ها در نظر گرفته شده است. نوع المان بکار رفته در لوله ها از نوع المان پوسته با کد 342 است که دارای چهار گره روی چهار رأس المان مربعی است و روش انتگرال گیری روی نقاط گوسی آن از نوع کاهش یافته است.

3-نتايج و بحث

3-1- نتايج آزمايش تجربى

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 می فت (مشاهدات تجربی نشان می دهد که لولههای با *D*/t بیشتر از 80 الی 90 در مد نامتقارن فروریزش می کنند)، در همهی 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 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 می دهند.

ی جاذبھ	شده روې	های انجام	از آزمایش	بدست آمده	و نتايج	1 مشخصات	جدول
---------	---------	-----------	-----------	-----------	---------	----------	------

محل چینھا	تعداد چینھا	طول لھیدگی (cm)	ارتفاع چکش (m)	وزن (kg)	نوع جاذب	رديف
بالا	1	3/3	2/78	6/2	S_1	1
بالا	5	6/2	2/78	9	S ₂	2
پايين	6	7/3	2/78	10/7	S_3	3
پايين	11	9/4	2/78	12/2	S ₄	4
بالا	10	8/37	2/78	10/7	S _{3-n}	5
بالا	8	8/15	1/75	17	S_5	6



شكل 6 شكل چينخوردگى بالايى لوله



شكل 7 شكل چينخوردگى پايينى 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 33 و 54 چندین بار تکرار شدند و در همهی آزمایشها محل چینخوردگی در پایین لوله ایجاد گردید.

برای محاسبه یانرژی جذب شده ی جاذب از مدل تئوری ارائه شده توسط سینگس روی چهار جاذب ۵۱، ۵۵ و ۶۵ ها استفاده شده است [14]. سینگس، نیروی میانگین فروپاشی برای این لوله ها را در مد فروریزش الماسی طبق رابطه ی (1) ارائه کرده است.

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

که
$$M_{p}$$
 طبق رابطهی (2) محاسبه می گردد.
 $M_{p} = \sigma_{0}(t^{2}/_{4})$ (2)

در روابط بـالا n برابـر تعـداد گوشـههـای بـهوجـود آمـده در يـک لايـه چينخوردگی است که در اين تحقيق با مـد هشـت ضـلعی بوجـود آمـده در

مقطع عرضی لوله برابر 4 است. همچنین D، t o = 0 به ترتیب قطر، ضخامت و تنش تسلیم لوله هستند. طبق رابطهی 1 نیروی میانگین فروپاشی برای این لولهها برابر 2123/1 است. حال با ضرب نیروی میانگین فروپاشی در طول لهیدگی انرژی جذب شده محاسبه می گردد. با معادل قرار دادن انرژی جذب شده با انرژی جنبشی اعمالی به جاذب، سرعت تقریبی چکش در هنگام برخورد نیز محاسبه می گردد. 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 کـه در آن و h به ترتیب شتاب ثقل و ارتفاع چکش تا نمونه است.

 $v = \sqrt{2gh} \tag{3}$

با توجه به ارتفاع ثابت m 2/78 برای هر چهار آزمایش انتظار می رفت که سرعت برابر 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 محفظ می 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

در نمونهی S1 با جذب انرژی وزنه gk 2/6، فقط یک چینخوردگی ایجاد شده است و وقتی که وزنه kg 9 به جاذب S2 برخورد می کند، تعداد چینخوردگیها به 5 می رسد؛ یعنی به ازای افزایش gk 2/8، تعداد 4 چین-خوردگی جهت جذب انرژی اضافه شده است. البته چینخوردگیها در بعضی از نمونهها تا آخر بصورت کامل نبوده و گاها دارای نیم چینهایی است. در این جاذب هر لایه چینخوردگی حدود g 700 از وزن چکش را جذب کرده است که با احتساب سرعت مانگین 5/1 m/s برابر 1/9 ژول انرژی است. در نمونهی S3 شش چینخوردگی در پایین لوله ایجاد گردیده است. یعنی به ازای اضافه شدن وزنه به میزان kg 4/5، تعداد 5 چین برای جذب انرژی اضافه شده است.

در این جاذب هر لایه چینخوردگی حدود g 900 از وزن چکش را جـذب کرده است که برابر 11/7 ژول انرژی میباشـد. در جـاذب ۶4 بـه ازای اضـافه شدن g k b به وزنه نسبت به آزمایش اول، تعداد 10 چین به چینخوردگیها اضافه شده است. یعنی هر لایه چـینخـوردگی g 600 وزن چکـش را جـذب کرده است که برابر 7/8 ژول انرژی میباشد. بنابراین هر لایه چینخوردگی به طور متوسط g 733 از وزن چکش را جذب کرده است که با سرعت میانگین 5/1 m/s در لحظه ی برخورد، برابر 5/9 ژول انرژی است. نکته ی قابـل توجـه این است که در هر جاذب وزن k/3 کول انرژی است. نکته ی قابـل توجـه معادل 71 ژول انرژی است، صرف جمع شدن فرورفتگیها، نفوذ سرپوش بـه داخل لوله و غلبـه بـر مقاومـت لولـه در برابـر فروریـزش (نیـروی مـاکزیمم فروپاشی) شده است. همچنین نمونه ی بدون سرپوش مـه ۲ مورد آزمایش قرار

جدول 2 انرژی جذب شده و سرعت برخورد چکش در چهار آزمایش				
سرعت چکش در هنگام برخورد (m/s)	انرژی جذب شده بر اساس رابطه سینگس (ل)	نوع جاذب	رديف	
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	

 S_3 گرفت. شکل 10 این جاذب را بعد از آزمایش ضربه در کنار جاذب S_3 نشان میدهد. میزان لهیدگی این نمونه m107 cm است که 100 بیشتر از نمونهی با سرپوش لهیده شده است و تعداد چینخوردگیها، 10 چین است. در این نمونه چینخوردگی از محلی که سرپوش ندارد شروع می شود. 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 میکرد.

شکل 11 نمای جاذب 5₅را بعد از ضربه نشان میدهد. در آزمایش 5₅ وزن چکش و ارتفاع آن به گونهای انتخاب شده است که انرژی جنبشی اعمالی برابر آزمایش 5³گردد. بر خلاف انتظار، طول لهیدگی در جاذب 5₅ بیشتر از 5 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 S₁ تا S₄ 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 S₃ انتهای نمودار به سمت بالا منحرف شده است، اما این انحراف در آزمایش S₄ اصلاح شده و منحنی مسیر خطی خود را طی میکند.

3-2- نتايج عددى

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 لوله ها بدین صورت رخ داده است که در هنگام فشردگی ابتدا دو فرورفتگی بالا و پایین لوله جمع شده و سپس سرپوش ها به داخل لوله نفوذ میکنند و سپس با ادامه ی فرآیند اعمال فشردگی ناشی از ضربه، لوله از بالا و یا از پایین شروع به جمع شدن و چینخوردگی میکند. روند چینخوردگی در لوله های معمولی بدین گونه است که در آزمایش های شبه استاتیک، چینخوردگی از پایین لوله که محل تکیه گاه است شروع می-شود و در بارهای دینامیکی از محل اعمال ضربه که بالای لوله است ایجاد می گردد.



شکل 10 جاذب S_{3-n} بعد از آزمایش ضربه در کنار جاذب S₃



شکل 11 نمای جاذب S₅ بعد از آزمایش ضربه



اما با بررسی فرآیند فروریزش در شبیهسازی، مشاهده شد که چینخوردگی در این لولهها بعد از نفوذ سرپوشها به داخل لوله شروع می-شوند 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 33 و 24 این موضوع مشهود می باشد. قبل از شروع چینخوردگیها، محل چینخوردگی در لوله به یک هشت ضلعی با چهار ضلع بزرگ و چهار ضلع کوچک تقسیم می شود و با ادامهی فشردگی، ضلعهای بزرگ به سمت خوردگی را تشکیل می دهد. در لایه بعدی چینخوردگی، جای اضلاع بزرگ و نظری کوچک هشت ضلعی با و مالاع بزرگ و نشای می دود با آزمایش تجربی را برای چینخوردگی ها و مدهای تغییر شکل نشان می دهد و دقت و اعتبار شبیه سازی عددی نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد و در جدول 3 نشان داده شده است. نتایج

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 شبیه سازی ضربه نشان میدهد و شکل 17 مقایسه نمودار وزن چکش - طول لهیدگی حاصل از شبیه سازی عددی و آزمایش تجربی را نشان میدهد. در این نمودار، رفتار خطی این گروه از جاذب ها در شبیه سازی عددی برای جذب انرژی نسبت به طول لهیدگی به خوبی مشخص شده است و انحراف آن از مقدار خطی در تست تجربی برای جاذب اکو اکاست.



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					
محل چینھا	تعداد چینھا	طول لھیدگی (cm)	وزن (kg)	نوع جاذب	رديف
بالا	2	4	6/2	S ₁	1
بالا	3	6/03	9	S_2	2
پايين	5	7/4	10/7	S_3	3
پايين	7	8/5	12/2	S_4	4
بالا	5	7/69	17	S5	5



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





شکلهای 18، 19، 20 و 21 کانتور جابجایی و تنش فون میسز در جاذبهای S2 و S3را 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 لهیدگی6/03 سانتیمتر است. جابجایی ها در خلاف جهت محور y است و به همین دلیل نیز دارای مقدار منفی هستند. با دقت در کانتور تنش مشاهده می شود که تنش در آخرین چین خوردگی به نزدیکی تنش نهایی رسیده است. اما با بررسی تنش در فرآیند چینخوردگی، مشاهده می شود که در شروع هر چین خوردگی تنش به نزدیکی تنش نهایی رسیده و سپس با اتمام آن چینخوردگی، سطح تنش کاهش مییابد و تنش به لایهی بعدى چينخوردگي منتقل مي شود و ايـن فرآينـد تـا اتمام كامـل چـين-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 می کند. شکل 22 نمودار تنش - زمان را برای یک المان در لایهی دوم چینخوردگی در جاذب S4 نشان میدهد. همانطور که از نمودار مشخص است این المان در زمان 7 تا ms 15 تجرب است این المان در محدودهی پلاستیک را دارد و بعد از اتمام چین خوردگی سطح تنش کاهش مى يابد.



شکل 18 کانتور جابجایی جاذب S₂



شکل 22 نمودار تنش – زمان یک المان در لایه دوم چینخوردگی جاذب ۶₄

هنگامی که چکش با نمونه برخورد می کند انرژی جنبشی در چکش شروع به کم شدن می کند و مقدار آن تا اتمام زمان برخورد به صفر می سد. شکل 23 نمودار تغییرات انرژی جنبشی چکش را حین برخورد برای هر چهار جاذب نشان می دهد. برای نمونه ی ۶۱ در لحظه ی برخورد، چکش دارای انرژی جاذب نشان می دهد. برای نمونه ی ۶۱ در لحظه ی برخورد، چکش دارای انرژی جنبشی 77/59 ژول است که با گذشت زمان ۲۳ و با توقف حرکت چکش این مقدار به صفر رسیده است و برای جاذب 22 نیز انرژی جنبشی 12/43 ژول است که با گذشت 25 صفر شده است برای جاذب 32 و ۶4 نیز انرژی جنبشی به تر تیب 133/72 و 152/42 ژول است که به تر تیب با گذشت زمان 28 و 51 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 ا^S 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 در ای S جذب انرژی ناشی از کار پلاستیک به ترتیب برابر 101/32 و 138/9 ژول است که به ترتیب 20/11 (100%، 13/12% و 91/12 انرژی جذب شده است.

شکلهای 25 و 26 نمودارهای نیروی برخورد و عکسالعمل تکیه گاهی برحسب زمان را برای جاذبهای 22 و ۶۹ نشان می دهد. 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 m5 شروع می شود و این زمانی است که در آن فرورفتگیهای بالا و پایین لوله جمع شده و سرپوش ها به داخل لوله نفوذ می کنند.



شکل 25 نمودار نیروی برخورد و عکس العمل تکیه گاهی برحسب زمان برای جاذب S2



شکل 26 نمودار نیروی برخورد و عکس العمل 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 می-شوند 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 چهار لبه تشکیل میشود) و باعث ایجاد نوسانات زیاد در این نمودار میشود. مهان طور که مشاهده میشود نیروهای برخورد و عکس العمل تطابق کیفی مانند یک دمیر نوسانات نیروی برخورد بیشتر است. به نظر می رسد که جاذب مانند یک دمیر نوسانات نیروی برخورد را کم کرده و سطح نیروهای ماکزیمم را کاهش داده است. همانطور که مشاهده می شود مطابقت نسبتاً خوبی بین نیرویهای میانگین بدست آمده از رابطهی سینگس و نمودار نرمافزار وجود درد 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:

(4)

$$P_{\text{mean}} = \frac{1}{\delta t} \int P d$$

که P نیرو و δ طول لهیدگی است. در نمودار هر چهار جاذب مشاهده می شود 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 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 T/4 ۳ و نیروی میانگین برابر N 1806 است. و در جاذب S³ که سطح



مهندسی مکانیک مدرس، اردیبهشت 1394، دوره 15، شماره 2

جابجایی (m)	نیروی <u>بر</u> حورد (۱۱)	مساحت جزيي	مساحت کل : انرژی جدب شده
0	0		
0.0011304	682.687	0.385841039	153.4346
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 – جابجایی جاذب ۶4 زیر نمودار نیروی برخورد – جابجایی جاذب ۶4 است، زیر نمودار نیرو–جابجایی برابر 153/43 ژول و طول لهیدگی 8/5 cm است، نیروی میانگین برابر N 1805 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 5₅ 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 m 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 است و انرژی جنبشی برابر 133/75 ژول است و در آزمایش جاذب S₅ که با وزن kg و سرعت 3/966 m/s صورت گرفت مقدار مومنتم N.s و انرژی جنبشی آن 133/69 ژول است. همانطور که مشاهده می شود در حالی که انرژی جنبشی اعمالی در هر دو تقریباً برابر است اما مقدار مومنتم در جاذب S₅ بیشتر است. S5 با دقت در نمودار شکل 30 مشاهده می شود که زمان فروریزش در جاذب S5 با 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 نمونه های S₃ و S₅ به ترتیب برابر **2/64 و 2/19** است. جهت صحت و دقت نتایج، دو شبیه سازی دیگر نیز انجام گرفت که در آن از وزن های 5 و kg 14 استفاده شده است. جدول 4، نتایج هر چهار شبیهسازی برابری انرژی را نشان میدهد. مشاهده می شود که به طور میانگین به ازای کاهش 16/9% نرخ كرنش، 2/3% به طول لهيدكي اضافه شده است.



شکل 29 کانتور جابجایی جاذب S₅



4- نتیجه گیری

در این تحقیق با توجه به استفاده از لولههای جدار نازک دارای دو سرپوش و تک سرپوش و مقایسهی آنها با یک دیگر، 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 می کنند.

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

با افزایش وزن چکش از **9** به **10/7** محل چینخوردگی از بالای لولـه 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 می شود و انتشار موج تنش پلاستیک، تا جذب کامل انرژی در طول لوله ادامه می یابد.

نیروی میانگین فروپاشی با افزایش وزن چکش تغییری نمیکند که مؤید این مطلب است که نیروی میانگین فروپاشی به جنس و ابعاد لولـه بسـتگی دارد و نه به میزان جذب انـرژی. بـا افـزایش وزن چکـش نمودارهـای نیـرو منظمتر میشوند.

- [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 compressition, *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
- [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 نـرخ کـرنش کمتر می باشد 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) A مدول یانگ (GPa) KE انرژی جنبشی چکش (l) n تعداد لبهها در یک لایه چینخوردگی PE انرژی کار پلاستیک (l) Pman نیروی میانگین فروپاشی (N) Pmax نیروی ماکزیمم فروپاشی (N) M وزن چکش (kg) V وزن چکش (kg) A زمان برخورد (ms) δ طول لهیدگی (ms)
 - v ضريب يواسون

6- منابع

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