

# تحلیل کمانش پیش‌رونده دینامیکی لوله‌های دایروی

## تحت ضربه محوری با سرعت بالا

علیرضا نداف اسکویی<sup>۱</sup>، حسین خدارحمی<sup>۲</sup> و مسعود رضوانی<sup>۳</sup>

دانشگاه جامع امام حسین (ع)

(تاریخ دریافت: ۹۱/۱/۲۷؛ تاریخ پذیرش: ۹۲/۲/۱۴)

### چکیده

در این مقاله، مدل آبراموویچ و جونز برای تحلیل فرآیند فروریزش لوله‌های دایروی تحت بار ضربه‌ای بررسی و بر مبنای اثر اینرسی، مدل تحلیلی جدیدی ارائه شده است. برای این منظور، اتلاف انرژی ناشی از کوتاه‌شدگی اولیه دیواره لوله و اثرات اینرسی لایه‌های چین‌خورده قبلی بر لایه چین‌خورده جدید در نظر گرفته شده است. نیروی لهیدگی متوسط و جذب انرژی محاسبه شده با این روش نسبت به مدل تحلیلی قبلی نتایج بهتری را پیش‌بینی نموده است. بر اساس نتایج این مقاله، مشخص شده که سرعت و جرم ضربه زننده که در مدل تحلیلی قبلی برای محاسبه نیروی متوسط لهیدگی از آن صرف نظر شده، تأثیر بسزایی در نیروی فروریزش لوله و میزان جذب انرژی توسط آن دارد. همچنین در این تحقیق، در تست‌های تجربی مشاهده گردید که در سرعت‌های ضربه بالا در بیشتر نمونه‌های آلومینیومی کمانش پیش‌رونده دینامیکی و در بعضی نمونه‌ها که سرعت ضربه کمتر بود، کمانش پلاستیکی دینامیکی رخ می‌دهد. در این مقاله، نتایج کاهش نهایی طول لوله، جذب انرژی و نیروی لهیدگی متوسط دینامیکی در نمونه‌هایی که در آنها کمانش پیش‌رونده دینامیکی رخ داده است، در دو زمینه تئوری و تجربی مقایسه و بحث می‌شود. بر اساس نتایج این مقاله مشخص شده که نتایج تئوری و تجربی همخوانی مناسبی با هم دارند.

**واژه‌های کلیدی:** لوله‌های دایروی، ضربه محوری، فروریزش، لهیدگی محوری، کمانش پیش‌رونده

## Dynamic Progressive Buckling of Circular Tubes under High Speed Axial Impact Loadings

A. Naddaf Oskouei, H. Khodarahmi, and M. Rezvani

Imam Hossein Univ.

(Received: 15 April, 2012; Accepted: 14 May, 2013)

### ABSTRACT

In this paper, Abramowitc and Jones model for analyzing dynamic progressive buckling of circular tubes under axial loading have been modified. In the improved model, the dissipated energy due to shortening of tube wall and the effects of inertia of previous folding layers on new one is considered. The mean crushing force and energy absorption, which is predicted by the theoretical model, has higher accuracy than the previous theoretical model. Based on the results of this paper, it is observed that the impact velocity and the mass of striker (neglected in pervious analytical models) are important in mean crush force and absorb energy of circular tube. Also in this research, it has been observed in the experiential tests that in most of the aluminum specimens, the high impact speeds, dynamic progressive buckling and in some samples in which the speed of impact was lower, dynamic plastic buckling happened. In this paper, final reduction in axial length, energy absorption and dynamic average crushing force in specimens in which dynamic progressive buckling has been occurred, is compared and discussed. Based on the results extracted in this thesis, it has been specified that theoretical results have acceptable consistency with experimental results.

**Keywords:** Circular Tubes, Axial Impact, Axial Crushing, Progressive Buckling

✉✉✉ استادیار (نویسنده پاسخگو): anadaf@ihu.ac.ir

✉✉✉ دانشیار: hossein\_khodarahmi@yahoo.com

✉✉✉ دانشجوی کارشناسی ارشد: rezvani\_masuod@yahoo.com

## فهرست علائم

$R$	شعاع متوسط لوله دایروی
$D_T$	انرژی جذب شده
$D_C$	انرژی جذب شده از فشار محوری
$G$	جرم ضربه زننده
$H$	ضخامت دیواره
$m^*$	جرم متمرکز در لبه بالایی یک لایه چین خوردگی
$M_R$	نسبت جرم متمرکز به جرم ضربه زننده
$M_0$	گشتاور خمیری کامل سطح مقطع
$N_0$	نیروی محوری خمیری کامل سطح مقطع
$P_m$	نیروی لهیدگی متوسط
$t$	متغیر زمان
$V_0$	سرعت اولیه برخورد
$V_A$	سرعت لبه بالایی المان گوشه
$V_G$	سرعت ضربه زننده
$X, Y$	جهت‌های محورهای مختصات
$\phi$	زاویه چین خوردگی (زاویه انحراف از صفحه عمودی)
$l$	نیم طول موج لهیدگی
$\rho$	چگالی
$\sigma_0$	تنش جریان
$k_e$	انرژی جنبشی اولیه پرتابه و بافر در آزمون تجربی
$\delta f_e$	کاهش نهایی طول لوله در آزمون تجربی
$D^d$	انرژی جذب شده در لوله در تئوری
$Pm^d$	نیروی لهیدگی متوسط دینامیکی در تئوری
$Pm_e^d$	نیروی لهیدگی متوسط دینامیکی در آزمون تجربی
$\sigma_y$	تنش تسلیم
$E$	مدول الاستیسیته
$\nu$	ضریب پواسون
$M_p$	جرم پرتابه و بافر در آزمون تجربی
$M_b$	جرم بافر
$M'$	جرم معادل
$V'$	سرعت معادل
$k'$	انرژی جنبشی معادل

## ۱- مقدمه

یکی از کاربردی‌ترین جذب‌های انرژی ناشی از ضربه، لوله‌های دایروی هستند. این نوع جذب‌ها بسته به هندسه و شرایط بارگذاری رفتارهای متفاوتی را از خود نشان می‌دهند، اما در همه آنها تغییر شکل‌های پلاستیک باعث استهلاک انرژی جنبشی ناشی از ضربه می‌شود. کماتش پیش‌رونده دینامیکی و

کمانش پلاستیک دینامیکی از متداول‌ترین روش‌های جذب انرژی در جذب‌های لوله‌ای تحت ضربه محوری می‌باشند. پدیده کماتش پیش‌رونده دینامیکی برای لوله‌ای استوانه‌ای تحت بار محوری در شکل ۱ نشان داده شده است. معمولاً چین‌خوردگی‌ها (لهیدگی) از یک انتهای لوله شروع شده و پیشروی می‌نمایند. به همین علت این پدیده، کماتش پیش‌رونده نامیده می‌شود [۱].



شکل (۱): لهیدگی پیش‌رونده دینامیکی یک لوله استوانه‌ای جدار نازک از جنس آلومینیوم 6060 T5 [۲].

الکساندر<sup>۱</sup> [۳] نخستین بار نظریه‌ای برای لهیدگی پوسته‌های استوانه‌ای جدار نازک تحت بار محوری به صورت متقارن، ارائه کرد. او فرض کرد که تغییر شکل لوله به صورت شکل ۲ می‌باشد و یک فرمول تقریبی را به صورت  $P = CH^{1.5} \sqrt{2R}$  به دست آورد که  $P$  بار فروریزش (نیروی متوسط لهیدگی)،  $t$  ضخامت پوسته،  $R$  شعاع متوسط پوسته و  $C$  یک ثابت برای هر ماده داده شده می‌باشند. تطابق خوبی بین این رابطه و نتایج تجربی نشان داده شده است.

پس از الکساندر افراد مختلفی مکانیزم‌های تغییر شکل دیگری ارائه نموده و روابط جدیدی برای متوسط نیروی لهیدگی به دست آوردند. از جمله اصلاحات مهم توسط آبراموویچ<sup>۲</sup> و جونز<sup>۳</sup> صورت گرفت. آبراموویچ [۴] و آبراموویچ و جونز [۵] فرض نمودند که چین‌خوردگی‌ها به جای آن که مطابق فرض الکساندر به صورت خط صاف باشد، حالت دایروی داشته باشند به صورتی که دو کمان به شکلی با هم لولا می‌شوند که بیانگر یک چین خوردگی در دیواره است. در این حالت از متغیری

1- Alexander  
2- Abramowicz  
3- Jones

همان‌طور که در شکل ۳ برای لوله استوانه‌ای نشان داده شده است، متفاوت باشد. به طوری که از شکل‌های ۱ و ۳ پیدا است، در حالت کمانش پیش‌رونده، چین‌ها در یک انتها رخ می‌دهند و حال آنکه در کمانش پلاستیکی دینامیکی، چین در همه طول لوله اتفاق می‌افتد. به طور کلی، اثر نیروهای اینرسی جانبی روی کمانش پلاستیکی - دینامیکی پوسته‌ها، ورق‌ها، میله‌ها، تیرها و حلقه‌ها باعث یک میدان تغییر شکل عرضی می‌شود. این اثر در شکل ۳ دیده می‌شود [۱].

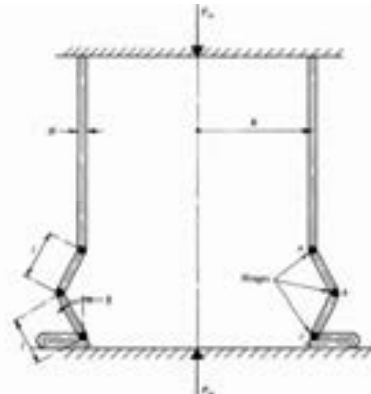


شکل (۳): کمانش پلاستیکی دینامیکی یک لوله دایروی از جنس آلومینیوم 6061 T6 تحت بار ضربه‌ای محوری [۱].

رن<sup>۱</sup> و همکارانش [۶] رفتار پس‌کمانش یک پوسته استوانه‌ای آلومینیوم آلیاژی ۲ AMP را تحت ضربه محوری، مورد مطالعه تجربی قرار دادند. مطابق تئوری آنها، در یک محدوده سرعت معین، پوسته به یک شکل سینوسی با تقارن محوری، کمانش خواهد کرد.

تحلیل لهیدگی پلاستیکی دینامیکی سازه‌های جاذب انرژی به دلیل تأثیر دو فاکتور نرخ کرنش و اینرسی، مشکل‌تر از لهیدگی شبه استاتیکی متناظر است. فاکتور اولی یک خاصیت ماده است که به موجب آن، تنش تسلیم افزایش می‌یابد، حال آنکه فاکتور دومی می‌تواند بر حالت فروریزش تأثیرگذار باشد. به تازگی معلوم شده است سازه‌هایی که منحنی بار-تغییر مکان آنها بعد از یک صعود اولیه، افت تندی می‌کند<sup>۳</sup>، نسبت به سازه‌هایی که منحنی بار-تغییر مکان آنها در نقطه حداکثر هموار است<sup>۴</sup>، به سرعت بارگذاری بیشتر حساس هستند. به عبارت دیگر، وقتی که یک مقدار معینی از انرژی را توسط یک جرم متحرک دریافت می‌کنند، تغییر مکان نهایی آنها به شدت به سرعت ضربه بستگی دارد. کالاداین<sup>۵</sup> و انگلیس<sup>۶</sup> [۷] اثرات نرخ کرنش و اینرسی را در این دو نوع سازه به وسیله تعدادی

به نام طول مؤثر لهیدگی  $\delta_e$  (شکل ۴)، که کمتر از  $2l$  (شکل ۲)، می‌باشد، استفاده می‌شود.



شکل (۲): شیوه لهیدگی متقارن یا چین‌دار شدن برای پوسته استوانه‌ای تحت بار محوری [۱].

ضربه محوری لوله‌ها با سرعت کم (تا ده متر بر ثانیه برای لوله‌های فلزی) به صورت شبه استاتیکی در نظر گرفته شده و در نتیجه، در تحلیل از اثر اینرسی صرف نظر می‌شود. در این حالت بار ضربه‌ای به قدری آرام وارد می‌آید که اینرسی محوری و اینرسی عرضی لوله در رفتار آن اثر قابل توجهی ندارد. لازم به ذکر است که زمان اعمال بار نسبت به زمان انتقال موج تنش انتشاری در لوله بسیار طولانی است. بدین ترتیب، لوله قادر به حمل بار متوسط دینامیکی بزرگ‌تر از بار فروریزش استاتیکی نمی‌باشد. در حالتی که جرم ضربه‌زن  $M$  خیلی بزرگ‌تر از جرم لوله  $m$  است این برداشت منطقی به نظر می‌رسد. نیروی اینرسی ضربه‌زن در این حالت  $M \gg m$  است که در آن  $\ddot{u}$  شتاب کند شونده ضمن ضربه می‌باشد. اگر گستره سرعت  $\dot{u}$  زمان در محل برخورد ضربه‌زن و لوله خطی باشد، نیروی اینرسی لوله ضریبی از  $m \dot{u}$  است و با توجه به اینکه  $m \ll M$  است، این نیروی اینرسی در مقابل  $M \ddot{u}$  قابل صرف نظر کردن می‌باشد.

با این بیان شکل فروریزش لوله در این شرایط با کمانش پیش‌رونده استاتیکی یکسان بوده و در تحلیل تئوری از روابط استاتیکی استفاده می‌شود که هماهنگی خوبی با نتایج تجربی دارد [۱]. با وجود این، برای اجسامی که نسبت به نرخ کرنش حساسیت دارند اثر نرخ کرنش قابل توجه بوده و در روابط این اثر لحاظ می‌شود.

اگر لوله جدار نازک یا عضو دیگری از یک سازه، تحت بار دینامیکی محوری با شدت قابل توجه قرار گیرد، در اثر اینرسی سازه، کمانش پلاستیکی دینامیکی رخ می‌دهد. در این حالت ممکن است نحوه تغییر شکل با کمانش پیش‌رونده،

1- Ren  
2- Alcoa Mill Products Proprietary Alloys  
3- Steeply Falling Curve  
4- Flat-Topped Curve  
5- Calladine  
6- English

اکسو<sup>۷</sup> و همکارانش [۱۶] کمانش کلی و محلی پوسته‌های استوانه‌ای تحت بارهای ضربه‌ای فشاری محوری را مطالعه کردند.

در این مقاله، علاوه بر مطالعه کمانش پیش‌رونده استاتیکی، مدل ارائه شده آبرامویچ و جونز جهت تحلیل فرآیند کمانش پیش‌رونده لوله‌های دایروی برای بارهای ضربه‌ای (دینامیکی) اصلاح شده است. برای این منظور، انرژی جذب شده طی فروریزش لوله‌های دایروی اصلاح شده و اتلاف انرژی ناشی از کوتاه‌شدگی اولیه دیواره لوله و اثرات اینرسی لایه‌های چین‌خورده قبلی بر لایه چین‌خورده جدید در نظر گرفته شده است. بنابراین فرآیند فروریزش لوله شامل دو مرحله کاهش طول دیواره و خمش در دیواره است. با محاسبه انرژی جذب شده در هر مرحله برای هر یک از لایه‌های چین‌خورده و جمع انرژی جذب شده در هر دو مرحله، انرژی کلی جذب شده در هر لایه محاسبه شده است.

در این تحقیق، به صورت تجربی بررسی می‌شود که در سرعت‌های بالا کدام یک از دو کمانش پیش‌رونده دینامیکی و کمانش پلاستیکی دینامیکی در لوله‌های آلومینیومی ایجاد می‌شود.

## ۲- مروری بر مدل تحلیلی استاتیکی

در مدل‌های تحلیلی که برای محاسبه نیروی لازم برای لهیدگی لوله‌های دایروی توسط محققین انجام شده است، معمولاً از این روش استفاده می‌کنند که با مساوی قرار دادن کل اتلاف انرژی (میزان جذب انرژی) با کار نیروی خارجی، نیروی متوسط لهیدگی (فروریزش) و طول چین‌خوردگی محاسبه می‌شوند. در بررسی پدیده کمانش پیش‌رونده در یک لوله دایروی جدار نازک، رفتار ماده به صورت صلب - کاملاً پلاستیک با مقداری ثابت برای تنش جریان  $\sigma_0$ ، در نظر گرفته می‌شود [۵-۳]. انرژی جذب شده در اثر ایجاد یک چین‌خوردگی کامل مطابق شکل ۲ در مدل تحلیلی الکساندر و همین‌طور در مدل آبرامویچ و جونز برابر است با:

$$D_T = 2\pi\sigma_0 H \left[ H(\pi R + l) / \sqrt{3 + l^2} \right]. \quad (1)$$

این مقدار جذب انرژی از مجموع انرژی جذب شده در لولاهای  $a$ ،  $b$  و  $c$  در شکل ۲ که معادل کار انجام شده به وسیله ممان پلاستیک مقطع  $M_0$ ، می‌باشند به اضافه انرژی جذب شده به واسطه کشیدگی محیطی، به دست آمده است.

در الگوی لهیدگی الکساندر (شکل ۲)، با برابر قرار دادن  $D_T$  (انرژی جذب شده) و  $P_m \times 2l$  (کار خارجی مورد نیاز

آزمایش ساده انجام شده در یک ماشین آزمون چکش سقوطی<sup>۱</sup> بررسی کردند.

ژانگ<sup>۲</sup> و یو<sup>۳</sup> [۸]، تام و کالاداین<sup>۴</sup> [۹] و کاراجیوزووا و جونز<sup>۵</sup> [۱۰] اثرات نرخ کرنش و اینرسی را در یک نمونه از سازه نوع دوم در مطالعات کالاداین و انگلیس [۷] تحلیل کردند. سو<sup>۶</sup> و همکارانش در بخش اول مقاله خود [۱۱] رفتار دینامیکی یک سازه جاذب انرژی ضربه که حساس به اینرسی است (قبلاً سازه نوع دوم نامیده شد) را تحت ضربه و در بخش دوم مقاله خود [۱۲] با اثرات نرخ کرنش مفصلاً تحلیل کردند. کاراجیوزووا و جونز [۱۳] کمانش متقارن محوری دینامیکی پوسته‌های استوانه‌ای را تحت ضربه محوری توسط یک جرم به منظور شفاف‌سازی شروع کمانش و بینش پیدا کردن نسبت به مکانیزم کمانش به عنوان فرآیند گذرا مطالعه کردند.

کاراجیوزووا و همکارانش [۱۴] کمانش با تقارن محوری پوسته‌های استوانه‌ای الاستیک-پلاستیک را تحت ضربه محوری با استفاده از تحلیل اجزای محدود مطالعه کردند. این مطالعه آشکار می‌کند که پوسته‌ها تحت ضربه محوری، حساس به سرعت و جرم هستند طوری که انرژی‌های بزرگ‌تر حاصل از ضربه‌های سرعت بالای ضربه‌زن می‌توانند وقتی که جرم آن کاهش می‌یابد، توسط پوسته‌ها جذب شوند. این موضوع نشان می‌دهد که مشخصات اینرسی پوسته به اضافه خواص ماده، الگوهای خاص انتشار موج تنش محوری را تعیین می‌کنند، و بنابراین سبب رخداد یکی از دو کمانش پیش‌رونده دینامیکی یا کمانش پلاستیکی دینامیکی طی فاز اولیه پاسخ پوسته می‌شوند.

کاراجیوزووا و جونز [۱۵] رفتار لهیدگی پوسته‌های استوانه‌ای آلومینیومی و فولادی را هنگامی که تحت یک ضربه محوری قرار می‌گیرند با استفاده از یک شبیه‌سازی عددی بررسی کردند. تأثیر خواص ماده، هندسه پوسته، شرایط مرزی و شیوه‌های بارگذاری بر انرژی جذب شده و موده‌های کمانش مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین مشخصات گوناگون پاسخ پوسته، از قبیل بار بیشینه، طول‌های چین‌خوردگی، فشردگی محوری و جذب انرژی مطالعه شده است.

1- Drop Hammer Testing Machine

2- Zhang

3- Yu

4- Tam and Calladine

5- Karagiozova and Jones

6- Su

بدین ترتیب برای چین‌های بینابین از روابط (۵ و ۶) نتیجه می‌شود:

$$\frac{P_m}{M_0} = \frac{29.31(R/H)^{1/2}}{0.86 - 0.371(H/R)^{1/2}} \quad (7)$$

این رابطه یک تقریب مناسب برای بار لهیدگی محوری یک استوانه را به دست می‌دهد. اگر در محاسبه انرژی جذب شده به واسطه کشیدگی محیطی در شکل ۲ به جای مقدار متوسط کرنش از تغییرات کرنش محیطی واقعی استفاده می‌شود، رابطه (۱) (انرژی کلی جذب شده برای تشکیل یک چین کامل) به صورت زیر در می‌آید:

$$D_T = 2\pi\sigma_0 H \left[ H(\pi R + l) / \sqrt{3} + l^2 (1 + l/3R) \right] \quad (8)$$

آنگاه نیروی لهیدگی متوسط به شکل زیر در می‌آید:

$$\frac{P_m}{M_0} = 29.4 \left( \frac{R}{H} \right)^{1/2} + 11.9 \quad (9)$$

این رابطه را می‌توان بر مبنای طول مؤثر لهیدگی بیان کرد. با توجه به رابطه (۸) طول مؤثر لهیدگی به صورت زیر در می‌آید:

$$\frac{\delta_e}{2l} = 0.86 - 0.402 \left( \frac{H}{R} \right)^{1/2} \quad (10)$$

آنگاه نیروی لهیدگی متوسط برابر می‌شود با:

$$\frac{P_m}{M_0} = \frac{29.4(R/H)^{1/2} + 11.9}{0.86 - 0.402(H/R)^{1/2}} \quad (11)$$

### ۳- اثر نرخ کرنش

در بارگذاری لوله به صورت ضربه‌ای با سرعت کم (شبه‌استاتیکی) نرخ کرنش در میزان نیروی لهیدگی و تغییر شکل لوله مؤثر است و رابطه نیروی لهیدگی دینامیکی و نیروی لهیدگی استاتیکی به صورت زیر است:

$$\frac{P_m^{d_1}}{P_m} = 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}}{D} \right)^q \quad (12)$$

که در آن،  $\dot{\epsilon}$  نرخ کرنش،  $q$  و  $D$  ثابت‌های رابطه کاپر-سیموندز<sup>۱</sup> و  $P_m^{d_1}$  بار دینامیکی حاصل از اثر نرخ کرنش است. نرخ کرنشی که در رابطه بالا محاسبه می‌شود برای الگوی لهیدگی متقارن به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$\dot{\epsilon} = 0.25V / \left[ R \left\{ 0.86 - 0.402(H/R)^{1/2} \right\} \right]$$

سرعت ضربه زننده برای هر لایه چین‌خوردگی و  $R$  شعاع متوسط لوله دایروی است [۵]. به این ترتیب با استفاده از مقدار نرخ کرنش و رابطه (۱۲) نیروی متوسط دینامیکی لهیدگی

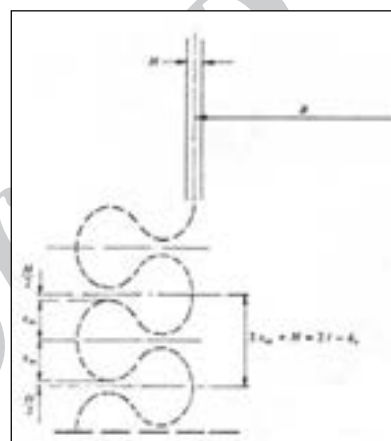
برای ایجاد یک چین کامل، نیروی لهیدگی متوسط محاسبه می‌شود:

$$\frac{P_m}{M_0} = 29.31 \left( \frac{R}{H} \right)^{1/2} + 6.28 \quad (2)$$

که در آن  $M_0$ ، ممان پلاستیک مقطع بر واحد طول بوده و بر مبنای معیار تسلیم فون میسز برابر است با:

$$M_0 = \left( \frac{2\sigma_0}{\sqrt{3}} \right) \frac{H^2}{4} \quad (3)$$

آبرامویچ در سال ۱۹۸۳ [۴] الگوی لهیدگی را مطابق شکل ۴ که به واقعیت نزدیک‌تر است، در نظر گرفت:



شکل (۴): نمایش شماتیک فاصله لهیدگی مؤثر [۱].

مطابق شکل ۴ فاصله لهیدگی مؤثر به صورت زیر تعریف

می‌شود:

$$\frac{\delta_e}{2l} = 0.86 - 0.37 \left( \frac{H}{R} \right)^{1/2} \quad (4)$$

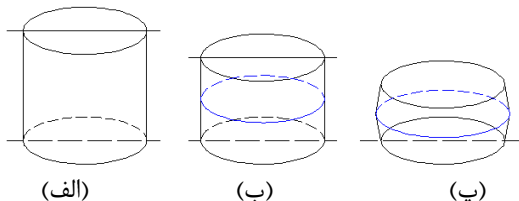
با توجه به شکل ۴، آبرامویچ و جونز با برابر قرار دادن  $D_T$  (انرژی جذب شده) و  $P_m \times \delta_e$  (کار خارجی مورد نیاز برای ایجاد یک چین خوردگی کامل)، نیروی لهیدگی متوسط اصلاح شده را به دست آوردند:

$$\frac{P_m}{M_0} = \frac{29.31 \left( \frac{R}{H} \right)^{1/2} + 6.28}{0.86 - 0.371(H/R)^{1/2}} \quad (5)$$

رابطه (۵) برای فروریزش استوانه به گونه شکل ۴، یا تشکیل چین به طرف خارج، به دست آمده است. با تکرار تحلیل برای چین به طرف داخل رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\frac{P_m}{M_0} = \frac{29.31(R/H)^{1/2} - 6.28}{0.86 - 0.371(H/R)^{1/2}} \quad (6)$$

شده در لایه‌های چین‌خوردگی قبلی خواهد بود. در شکل ۵ وضعیت پیش از لهیدگی، پس از مرحله اول و پس از مرحله دوم لهیدگی در المان مربوط به یکی از لایه‌های چین‌خوردگی نشان داده شده است [۹].



شکل ۵: (الف) وضعیت پیش از لهیدگی، (ب) پس از مرحله اول و (پ) پس از مرحله دوم لهیدگی در المان مربوط به یکی از لایه‌های چین‌خوردگی [۱۷].

#### ۴-۱- محاسبات مرحله اول لهیدگی برای اصلاح مدل جذب انرژی

به منظور تعیین جذب انرژی در مرحله اول، یک مرحله چین‌خوردگی در دیواره لوله دایروی، شکل ۲، مانند یک ورق مطابق شکل ۶ در نظر گرفته می‌شود که در آن، نیم طول ورق، ضخامت و عرض آن به ترتیب  $l$ ،  $H$  و  $2\pi R$  است.

در مرحله اول جذب انرژی مقادیر  $\phi$  و  $M$  که به ترتیب زاویه انحراف از صفحه عمودی و ممان خمشی هستند، برابر با صفر می‌باشند [۹ و ۱۱].  $N$  در مرحله اول لهیدگی با توجه به فرض صلب-پلاستیک کامل بودن رفتار ماده برابر با نیروی محوری کاملاً پلاستیک سطح مقطع،  $N_0 = \sigma_0 H (2\pi R)$  و  $M$  که در مرحله دوم لهیدگی سبب خمش دیواره می‌شود، مقداری برابر با ممان پلاستیک کامل سطح مقطع،  $M_0 = \sigma_0 H^2 / 4$  دارد. به منظور بررسی اثر اینرسی، فرض شده است که یک نیمه از دیواره (ضلع  $ab$  در شکل ۲ یا عضو  $AD$  در شکل ۶ جرمی معادل  $2m^* = 2\pi RH \lambda \rho$ ) دارد که در دو انتهای آن متمرکز شده است.

#### معادلات حرکت: نمودار جسم آزاد لبه بالایی یک لایه

چین‌خوردگی و ضربه زننده مطابق شکل ۷ است. معادله‌ی حرکت برای جرم متمرکز در لبه بالایی یک لایه چین‌خوردگی در جهت محور  $Y$  و با توجه به نیروی محوری وارده بر این جرم متمرکز  $N_0$ ، به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$-m^* \frac{d^2 Y}{dt^2} = N_0 - Gg, \quad (14)$$

که در آن،  $g$  شتاب جاذبه‌ی زمین و  $G$  جرم ضربه زننده است.

حاصل از اثر نرخ کرنش در الگوی فروریزش متقارن به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$P_m^{d_1} = \left[ 1 + \left( \frac{0.25V}{DR \{0.86 - 0.402(H/R)^{1/2}\}} \right)^{1/q} \right] P_m. \quad (13)$$

#### ۴- اصلاح مدل آبرامویچ و جونز با لحاظ کردن اثر اینرسی

رابطه (۱) یا (۸) مربوط به مرحله‌ای از لهیدگی است که در آن انرژی جنبشی ضربه زننده توسط خمش‌های بزرگ خمیری در محلی که خطوط (مدور) لولای خمیری نامیده می‌شوند جذب می‌شود. با این حال در تمامی جاذب‌های انرژی که از صفحات در ابتدا صاف تشکیل شده‌اند مرحله‌ای در جذب انرژی وجود دارد که در آن صفحات سازنده جاذب در لایه‌های مختلف چین‌خوردگی پیش از خمش دچار کوتاه‌شدگی می‌شوند. به این ترتیب در لهیدگی محوری لوله‌های دایروی جدار نازک در خلال تشکیل هر یک از لایه‌های چین‌خوردگی، جذب انرژی در دو مرحله، در کوتاه‌شدگی دیواره هر لایه و خمش دیواره از محل خطوط (مدور) لولای خمیری صورت می‌گیرد.

در فرآیند جذب انرژی در تشکیل اولین لایه از چین‌خوردگی‌ها ابتدا ضربه زننده به لبه بالای دیواره لوله دایروی برخورد می‌کند و سبب کاهش طول این دیواره می‌شود، در این مرحله، به علت جذب انرژی در اثر کوتاه شدن دیواره، سرعت و انرژی جنبشی ضربه زننده کاهش می‌یابد سپس دیواره کوتاه شده از محل لولای افقی دچار خمش می‌شود. سرعت و انرژی جنبشی اولیه در مرحله دوم جذب انرژی از مقدار نهایی آنها در پایان مرحله اول جذب انرژی به دست می‌آید. در مرحله دوم، از انرژی جنبشی و سرعت ضربه زننده کاسته شده و سرعت و انرژی جنبشی نهایی در پایان این مرحله به عنوان مقادیر اولیه برای تشکیل لایه بعدی چین‌خوردگی استفاده می‌شود. جرم ضربه زننده در تشکیل دومین لایه چین‌خوردگی نیز برابر با جرم اولیه ضربه زننده پیش از برخورد به علاوه جرم اولین لایه چین‌خوردگی خواهد بود. این روند برای تمام لایه‌های چین‌خوردگی استفاده می‌شود، یعنی جرم ضربه زننده واقعی در تشکیل هر لایه از چین‌خوردگی‌ها برابر با جرم اولیه ضربه زننده به علاوه جرم لایه‌های چین‌خوردگی قبلی در نظر گرفته شده است. همچنین انرژی جنبشی در تشکیل هر لایه چین‌خوردگی برابر با انرژی جنبشی اولیه، منهای انرژی جذب



استفاده از دو رابطه (۱۵) یا (۱۷) زمان پایان مرحله اول لهیدگی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$V_A(t_1) = V_G(t_1) \Rightarrow t_1 = \frac{V_0}{\frac{N_0 + N_0 - Gg}{G} + \frac{N_0 - Gg}{m^*}} \quad (18)$$

حال با قرار دادن زمان پایان مرحله اول لهیدگی در یکی از دو رابطه (۱۵ و ۱۷) سرعت نهایی ضربه زنده که همان سرعت اولیه در شروع مرحله دوم لهیدگی است محاسبه می‌شود:

$$V_G(t_1) = V_A(t_1) \Rightarrow \left(\frac{N_0}{G}\right) \frac{V_0}{\frac{N_0 + N_0 - Gg}{G} + \frac{N_0 - Gg}{m^*}} - V_0 = \left(-\frac{N_0 + Gg}{m^*} + \frac{V_0}{\frac{N_0 + N_0 - Gg}{G} + \frac{N_0 - Gg}{m^*}}\right) \frac{V_0}{\frac{N_0 + N_0 - Gg}{G} + \frac{N_0 - Gg}{m^*}} \quad (19)$$

شکل ۸ نمودار تغییرات سرعت ضربه زنده و لبه بالایی چین‌خوردگی را نسبت به زمان نشان می‌دهد. در طول مرحله اول لهیدگی، سرعت ضربه زنده کاهش و سرعت جرم متمرکز افزایش می‌یابد تا در لحظه  $t = t_1$  با یکدیگر مساوی می‌شوند. در این لحظه کوتاه شدن دیواره خاتمه می‌یابد و اولین لوله‌های خمیری شروع به شکل‌گیری می‌کند. مساحت سطح هاشورزده در شکل ۸ ناظر بر کاهش طول دیواره می‌باشد، در نتیجه، کاهش طول صفحه  $\Delta l$  از محاسبه سطح محصور بین نمودار سرعت ضربه زنده و جرم متمرکز به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\Delta l = \int (V_G - V_A) dt = \frac{-\frac{1}{2}V_0^2}{\frac{N_0}{G} + \frac{N_0 - Gg}{m^*}} \quad (20)$$

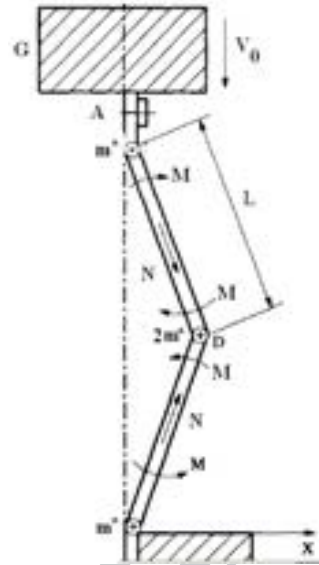
انرژی جذب شده در مرحله اول لهیدگی برابر با کاری است که سبب کاهش طول دیواره در این مرحله می‌شود، بنابراین با ضرب نیروی محوری خمیری در طول کوتاه‌شدگی در اثر آن، انرژی جذب شده در مرحله اول لهیدگی  $D_C$  به دست می‌آید:

$$D_C = N_0 \Delta l \Rightarrow D_C = \frac{\frac{1}{2}V_0^2 N_0}{\frac{N_0}{G} + \frac{N_0 - Gg}{m^*}} \quad (21)$$

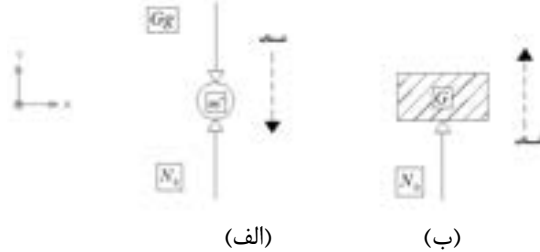
$$= \frac{1}{2} G V_0^2 \left( \frac{m^*}{m^* + G - \frac{G^2 g}{N_0}} \right)$$

اگر  $M_R = m^*/G$  نسبت جرم متمرکز به جرم ضربه زنده باشد، آنگاه رابطه (۲۱) به صورت زیر در می‌آید:

$$D_C = \frac{1}{2} m^* V_0^2 \left( \frac{1}{1 + M_R - \frac{Gg}{N_0}} \right) \quad (22)$$



شکل (۶): مدل سازه برای تحلیل لهیدگی در مرحله اول [۱۱].



شکل (۷): نمودار جسم آزاد برای، الف) جرم متمرکز در لبه بالایی یک لایه چین‌خوردگی و ب) ضربه زنده [۱۷].

با یک بار انتگرال‌گیری از رابطه (۱۴)، سرعت لبه بالایی لایه چین‌خوردگی برابر است با:

$$V_A = \frac{dY}{dt} \Big|_A = \left( -\frac{N_0}{m^*} + \frac{Gg}{m^*} \right) t \quad (15)$$

معادله حرکت ضربه زنده به صورت رابطه زیر است:

$$G \frac{d^2 Y}{dt^2} = N_0 \quad (16)$$

اگر از رابطه (۱۶) انتگرال‌گیری شود، سرعت ضربه زنده در خلال مرحله اول لهیدگی برابر است با:

$$V_G = \frac{dY}{dt} \Big|_G = \frac{N_0}{G} t - V_0 \quad (17)$$

که در آن،  $V_0$  سرعت اولیه ضربه زنده است.

محاسبه انرژی جذب شده: پایان مرحله اول لهیدگی  $t_1$  زمانی است که سرعت ضربه زنده و سرعت جرم متمرکز در لبه بالایی چین‌خوردگی با یکدیگر برابر شوند، به این ترتیب با

در رابطه بالا، مقدار  $l$  مجهول است و برای به دست آوردن آن کافی است  $P_m$  نسبت به این مقدار حداقل شود:

$$\frac{dP_m}{dl} = 0 \Rightarrow \pi H \left( \frac{-\pi R H / l^2}{\sqrt{3}} + 1 + \frac{2l}{3R} \right) - \frac{1}{4} \frac{G V_0^2}{\sigma_0} \frac{(\pi R H \rho)^2}{\left( \pi R H l \rho + G - \frac{G^2 g}{N_0} \right)^2} = 0. \quad (25)$$

محاسبه نیروی لهدیگی متوسط برای هر لایه چین خوردگی مستلزم یافتن مقدار  $l$  در هر لایه است که از رابطه (۲۵)، پارامتر  $l$  قابل محاسبه است. برای این منظور باید برنامه‌ای کامپیوتری نوشته شود که پارامتر  $l$  را در هر لایه محاسبه کرده و با قرار دادن آن در رابطه (۲۴) نیروی لهدیگی متوسط،  $P_m$ ، به دست آید و در پایان تشکیل هر لایه چین خوردگی، سرعت و جرم نهایی ضربه زننده را به عنوان مقادیر اولیه برای تشکیل لایه بعدی محاسبه کند. در نهایت از میانگین نیروی لهدیگی متوسط لایه‌ها استفاده می‌شود. در این تحقیق، تعداد لایه‌های چین خورده و طول لهدیگی لوله نیز به دست خواهد آمد.

#### ۵- مطالعه تجربی عملکرد لوله دایروی تحت ضربه با

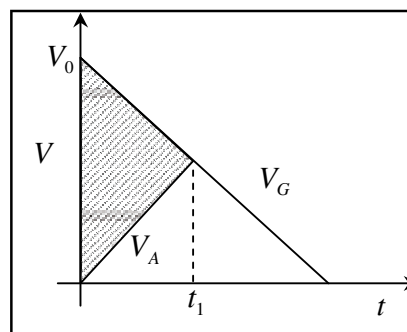
##### سرعت بالا

در ابتدا سامانه آزمون پرتابگر گازی معرفی می‌شود و سپس روش انجام آزمون توضیح داده خواهد شد.

#### ۵-۱- سامانه آزمون

پرتابگر گازی وسیله‌ای است که از آن می‌توان برای اندازه‌گیری سرعت و میزان نفوذ یک پرتابه در ابعاد کوچک و شبیه‌سازی آن در مقیاس بزرگ‌تر استفاده نمود. انجام آزمون‌ها توسط سامانه پرتابگر گازی مرکز تحقیقات بالستیک، ضربه و انفجار دانشگاه جامع امام حسین (ع) صورت گرفت. دو نما از این پرتابگر در شکل ۹ نشان داده شده است. این پرتابگر شامل کپسول‌های گاز و کمپرسور، محفظه شلیک و گنج‌های سرعت، گنج‌های فشار، نگهدارنده دیافراگم و محل قرار پرتابه است.

عملکرد دستگاه بدین ترتیب است که جریان گاز پس از باز شدن شیر کپسول حامل گاز هلیوم یا نیتروژن، پشت دیافراگم قرار می‌گیرد. دیافراگم در پرتابگر گازی به عنوان یک شیر سریع العمل<sup>۱</sup> مسیر جریان را برای بالا بردن فشار مسدود می‌کند و هنگامی که فشار گاز به فشار مورد نظر برای پاره شدن دیافراگم



شکل (۸): نمودار تغییر سرعت ضربه زننده و لبه بالای یک لایه چین خوردگی بر حسب زمان [۱۸].

#### ۴-۲- جذب انرژی کلی دینامیکی (در الگوهای مختلف

##### لهدیگی)

با توجه به رابطه (۸) مقدار کل انرژی جذب شده در اثر ایجاد یک چین خوردگی کامل در حالت استاتیکی و رابطه (۲۲)، میزان جذب انرژی کلی در حالت دینامیکی برابر است با:

$$D = 2\pi\sigma_0 H \left[ \frac{H(\pi R + l)}{\sqrt{3}} + l^2 \left( 1 + \frac{l}{3R} \right) \right] + \frac{1}{2} G V_0^2 \left( \frac{m^*}{m^* + G - \frac{G^2 g}{N_0}} \right). \quad (23)$$

با مقایسه روابط (۸) و (۲۳) مشاهده می‌شود که اثرات سرعت و جرم ضربه زننده و همین‌طور جرم لوله به رابطه (۸) اضافه شده است.

#### ۴-۳- نیروی لهدیگی متوسط دینامیکی (برای الگوی

##### لهدیگی آبراموویچ و جونز)

در الگوی لهدیگی آبراموویچ و جونز (شکل ۳)، به ازای تشکیل یک چین خوردگی کامل، لوله در راستای محور خود (راستای نیرو) به میزان  $\delta_e$  کوتاه می‌شود. بنابراین مقدار کار خارجی انجام شده برای تشکیل یک چین کامل معادل  $P_m \times \delta_e$  است. بنابراین با مساوی قرار دادن جذب انرژی کلی داخلی با کار خارجی انجام شده، نیروی متوسط لهدیگی به دست می‌آید:

$$P_m = \frac{\left\{ \pi H \left[ \frac{H(\pi R + l)}{\sqrt{3}} + l^2 \left( 1 + \frac{l}{3R} \right) \right] + \frac{1}{4} \frac{G V_0^2}{\sigma_0} \left( \frac{\pi R H \rho}{\pi R H l \rho + G - \frac{G^2 g}{N_0}} \right) \right\}}{0.86 - 0.402 (H/R)^{1/2}}. \quad (24)$$





شکل (۹): دو نما از پرتابگر گازی در مرکز تحقیقات بالستیک، ضربه و انفجار دانشگاه جامع امام حسین (ع) [۱۷].



شکل (۱۰): نمای دیافراگم در قبل و بعد از پارگی [۱۹].



شکل (۱۱): نمونه‌هایی از لوله‌های آلومینیومی [۱۷].

می‌رسد، این فشار بالا را به پشت پرتابه اعمال می‌نماید. اگر فشار کپسول به تنهایی برای پارگی دیافراگم کافی نباشد، کمپرسور به صورت خودکار وارد مدار شده و فشار را تا فشار پارگی بالا می‌برد.

در پرتابگر گازی به دلیل اجتناب از تکه تکه شدن دیافراگم، برای جلوگیری از آسیب رسیدن به مسیر حرکت گاز و پرتابه، باید از دیافراگم شیاردار استفاده نمود. در شکل ۱۰ نمایی از دیافراگم مورد استفاده در پرتابگر برای قبل و بعد از پارگی نشان داده شده است.

## ۵-۲- روش انجام آزمون

قطر داخلی لوله پرتابگر گازی ۱۶ میلی‌متر است (یعنی حداکثر قطر پرتابه ۱۶ میلی‌متر می‌باشد) و برای اینکه سطح داخل لوله آسیب نبیند از سابوت به عنوان پوشش نرم برای پرتابه (به ویژه اگر از جنس فولاد باشد) استفاده می‌شود که معمولاً از جنس پلاستیک پلی‌کربنات است. بنابراین هنگامی که از سابوت استفاده می‌شود، قطر پرتابه بر حسب نیاز کمتر از ۱۶ میلی‌متر است. اگر پرتابه از جنس نرم (برای مثال، آلومینیوم)

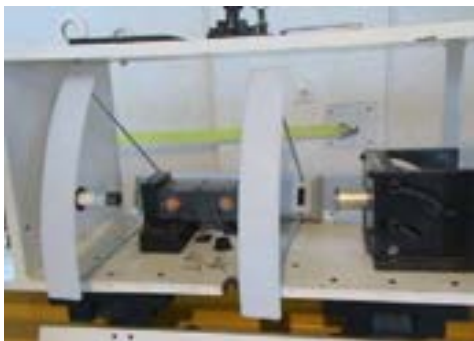
باشد، نیازی نیست که از سابوت استفاده شود. مشخصات نمونه‌های آزمایش از جمله ابعاد و جنس آنها در زیر آمده است:

**لوله دایروی:** لوله‌ای به قطر ۴۰، طول ۵۰ و ضخامت ۱/۱ میلی‌متر (جنس: آلومینیوم ۱۰۶۰) که در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

توضیح: لوله‌ها به روش اکستروژن تولید شده‌اند و خواص مکانیکی آنها تغییر کرده است (آلومینیوم ۱۰۶۰ H12).

بدیهی است که برای ایجاد ضربه در نمونه‌های آزمایشی، باید از صفحه‌های تخت بافر استفاده شود تا پرتابه پس از شلیک، از داخل لوله عبور نکند. پرتابه به بافری که به لوله چسبیده برخورد می‌کند و ضربه به لوله منتقل می‌شود. پرتابه و بافر می‌بایست صلب باشند که بعد از برخورد، انرژی جنبشی وارده توسط پرتابه را کاملاً به لوله‌ها منتقل کند، اما در عمل بافر و پرتابه صلب وجود ندارد و بخشی از انرژی توسط تغییر شکل پرتابه و بافر تلف می‌شود.

**توضیح:** لبه ایجاد شده در دیسک‌ها، برای این است که دیسک به صورت هم‌مرکز به لوله متصل و مانع لغزش لوله بر روی دیسک شود.



شکل (۱۴): محفظه پرتابگر گازی [۱۷].

#### ۶- نتایج و بحث

در ابتدا نتایج آزمون‌های تجربی و سپس نتایج تئوری حاصل از خروجی یک برنامه کامپیوتری بررسی می‌شوند و مدل تئوری جدید (جذب انرژی و نیروی لهیدگی متوسط دینامیکی که شامل اثر اینرسی می‌باشد) نسبت به مدل تئوری قبلی (جذب انرژی و نیروی لهیدگی متوسط استاتیکی) بررسی و مقایسه می‌شود. در نهایت، نتایج آزمون‌های تجربی انجام شده و همچنین نتایج آزمون‌های مرجع [۵] را با نتایج تئوری مقایسه کرده و بر روی آنها بحث می‌شود.

محاسبات روی نمونه‌هایی با  $H = 1/1 \text{ mm}$ ,  $R = 19/45 \text{ mm}$  و  $L = 50 \text{ mm}$  از جنس آلومینیوم ۱۰۵۰ با تنش تسلیم  $70 \text{ MPa}$  (لوله آلومینیومی تولید شده به روش اکستروژن از آلومینیوم ۱۰۵۰) صورت گرفته است که با جرم‌های تقریباً یکسان و سرعت‌های مختلف ضربه زننده توسط دستگاه پرتابگر گازی مورد اصابت قرار گرفته‌اند. لازم به ذکر است که هیچ‌گونه عملیات حرارتی روی پرتابه، بافر و لوله در این پنج آزمون انجام نشده است.

#### ۶-۱- نتایج آزمون‌های تجربی

در بین چهارده آزمون انجام شده، آزمون‌های شماره (۱۳-۹) که ضخامت بافر در آنها ۷ میلی‌متر است و پرتابه به مرکز بافر برخورد داشته است، برای بررسی انتخاب شده‌اند. سرعت پرتابه‌ها در این پنج آزمون ذکر شده، در حدی بوده که چین‌خوردگی (لهیدگی پیش‌رونده) در نمونه‌ها ایجاد شود، اما در آزمون‌های شماره (۶ و ۸) سرعت‌ها کمتر از آن حد بوده و کمانش پلاستیک دینامیکی در نتیجه‌ی آن آزمون‌ها رخ داده است. شکل نهایی نمونه‌ها، در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ مشاهده می‌شود.

صفحه تخت بافر: دیسک‌های لبه‌دار به قطر ۵۰ و ضخامت ۷ میلی‌متر (جنس: فولاد VCN200) که در شکل ۱۲ نشان داده شده‌اند.

پرتابه: استوانه به قطر ۱۳ و طول ۳۰ میلی‌متر (جنس: فولاد VCN150) که در شکل ۱۳ به همراه سابوت نشان داده شده است.

سابوت: پوسته استوانه‌ای به طول ۳۰، قطر ۱۶، ضخامت انتهایی ۱ و ضخامت دیواره ۱/۵ میلی‌متر (جنس: پلی‌کربنات) که در شکل ۱۳ نشان داده شده است.



شکل (۱۲): نمونه‌هایی از بافرها [۱۷].



شکل (۱۳): نمونه‌هایی از پرتابه‌ها به همراه سابوت [۱۷].

محل قرارگیری نمونه آزمایش تحت ضربه در محفظه پرتابگر گازی مطابق شکل ۱۴ است. در این محفظه صفحه هدفی وجود دارد که یک دیسک پله‌دار (طول پله ۳ میلی‌متر است) به آن پیچ شده است. مطابق شکل ۱۴ یک طرف لوله در آن قرار می‌گیرد، برای اینکه لوله کاملاً به طور افقی و هم مرکز با لوله‌ی پرتابگر قرار بگیرد. توضیح: همان‌طور که در شکل ۱۴ مشخص است، علاوه بر سرعت‌سنج لیزری، از سرعت‌سنج نوری (کورنوگراف) نیز برای تأیید نتایج سرعت‌سنج لیزری استفاده شده است.

بخشی از انرژی جنبشی ضربه زننده صرف تغییر شکل پرتابه و بافر می‌شود، به همین دلیل با شبیه‌سازی تقریبی مطابق جدول ۲ از جرم معادل  $M$  و سرعت معادل  $V$  در محاسبه انرژی جنبشی معادل وارد بر لوله ( $k$ ) استفاده می‌شود که  $M$  مجموع جرم ضربه زننده (پرتابه و سابوت) و جرم بافر است و  $V$  سرعت مشترک پرتابه و بافر در یک لحظه است، این سرعت از رابطه بقای ممنتوم خطی،  $M_p V_0 / (M_p + M_b)$  (جرم بافر می‌باشد)، به دست می‌آید.  $k$  انرژی جنبشی پرتابه و بافر در لحظه هم‌سرعت شدن است که از رابطه  $0.5 M V^2$  به دست می‌آید. در واقع،  $k$  جذب انرژی در لوله است.  $\delta f_e$  کاهش نهایی طول لوله و  $Pm_e^d$  نیروی دینامیکی (لهیدگی) متوسط است که از رابطه  $k$  تقسیم بر  $\delta f_e$  به دست می‌آید. شکل نهایی جاذب‌ها در شکل‌های ۱۷-۲۱ مشاهده می‌شود.

در این شکل‌ها، مشخص است که در نمونه‌ها دو یا سه، چین‌خوردگی متقارن و سپس چین‌خوردگی‌های الماسی به وجود آمده است، بنابراین در محاسبات و مقایسه با نتایج تئوری، فرض شده که چین‌خوردگی‌ها کاملاً متقارن است و چین‌خوردگی الماسی وجود ندارد.

همچنین در شکل‌های ۲۲-۲۶ تغییر شکل بافر و تغییر قطر محل تماس پرتابه از نتایج تجربی قابل مشاهده است.

جدول (۲): مشخصات معادل ضربه زننده‌ها در آزمون‌های

تجربی [۱۷].

Specimen Number	$M$ (gr)	$V$ (m/s)	$k$ (J)
T9	۱۴۱/۳	۶۸/۹۸۳	۳۳۶/۲۰
T10	۱۴۱/۴	۶۲/۶۸۲	۲۷۷/۷۸
T11	۱۴۱/۳	۵۳/۱۴۱	۱۹۹/۵۱
T12	۱۴۱/۲	۴۹/۸۹۳	۱۷۵/۷۵
T13	۱۴۱/۴	۵۶/۱۰۷	۲۲۲/۵۶

جدول (۳): داده‌های تجربی نمونه‌های آزمایشی [۱۷].

Specimen Number	$k$ (J)	$\delta f_e$ (mm)	$Pm_e^d$ (N)
T9	۳۳۶/۲۰	۳۶	۹۳۳۸/۸۹
T10	۲۷۷/۷۸	۳۵	۷۹۳۶/۵۷
T11	۱۹۹/۵۱	۲۷	۷۳۸۹/۲۶
T12	۱۷۵/۷۵	۲۴	۷۳۲۲/۹۲
T13	۲۲۲/۵۶	۳۳	۶۷۴۴/۲۴



شکل (۱۵): ایجاد کماتش پلاستیکی دینامیکی در لوله آلومینیومی در آزمون شماره (۶) با سرعت ضربه زننده

$$V_0 = 107/852 \text{ m/s} \quad [17]$$



شکل (۱۶): ایجاد کماتش پیش‌رونده دینامیکی در لوله آلومینیومی در آزمون شماره (۸) با سرعت ضربه زننده

$$V_0 = 115 \text{ m/s} \quad [17]$$

در جدول‌های ۳-۱، داده‌های تجربی نمونه‌های آزمایشی آورده شده است. در این جداول  $M_p$  و  $V_0$  به ترتیب جرم و سرعت پرتابه همراه با سابوت می‌باشند که با ترازو و سرعت‌سنج لیزری اندازه‌گیری شده‌اند.  $k$  انرژی جنبشی اولیه پرتابه همراه با سابوت است که از عبارت  $0.5 M_p V_0^2$  به دست می‌آید.

جدول (۱): مشخصات ضربه زننده‌ها در آزمون‌های

تجربی [۱۷].

Specimen Number	$M_p$ (gr)	$M_b$ (gr)	$V_0$ (m/s)	$k$ (J)
T9	۳۳/۶	۱۰۷/۷	۲۹۰/۱۰۰	۱۴۱۳/۸۵
T10	۳۳/۸	۱۰۷/۶	۲۶۲/۲۲۶	۱۱۶۲/۰۹
T11	۳۳/۹	۱۰۷/۴	۲۲۱/۵۰۰	۸۳۱/۶۱
T12	۳۳/۶	۱۰۷/۶	۲۰۹/۶۷۰	۷۳۸/۵۵
T13	۳۳/۹	۱۰۷/۵	۲۳۴/۰۲۸	۹۲۸/۳۴



شکل (۲۱): نحوه لهیدگی لوله آلومینیومی در آزمون شماره (۱۳) [۱۷].



شکل (۱۷): نحوه لهیدگی لوله آلومینیومی در آزمون شماره (۹) [۱۷].



شکل (۲۲): تغییر شکل بافر و تغییر قطر محل تماس پرتابه از آزمون تجربی در آزمون شماره (۹) [۱۷].



شکل (۱۸): نحوه لهیدگی لوله آلومینیومی در آزمون شماره (۱۰) [۱۷].



شکل (۲۳): تغییر شکل بافر و تغییر قطر محل تماس پرتابه از آزمون تجربی در آزمون شماره (۱۰) [۱۷].



شکل (۱۹): نحوه لهیدگی لوله آلومینیومی در آزمون شماره (۱۱) [۱۷].



شکل (۲۴): تغییر شکل بافر و تغییر قطر محل تماس پرتابه از آزمون تجربی در آزمون شماره (۱۱) [۱۷].



شکل (۲۰): نحوه لهیدگی لوله آلومینیومی در آزمون شماره (۱۲) [۱۷].



سرعت معادل  $V$  در برنامه به عنوان داده‌های ورودی استفاده می‌شوند.

در جدول ۴، داده‌های تئوری حاصل از برنامه کامپیوتری آورده شده است.  $Q$  تعداد لایه‌های چین‌خورده و  $Q'$  تعداد لایه‌های چین‌خورده کامل است.  $Pm^d$  میانگین نیروی لهیدگی دینامیکی لایه‌های چین‌خورده کامل (جمع نیروی لهیدگی متوسط دینامیکی هر لایه تقسیم بر تعداد لایه‌ها) است،  $D^d$  مجموع جذب انرژی لایه‌های چین‌خورده کامل است و  $\delta f$  در اینجا، طول لهیدگی لوله است که از کاهش نهایی طول لوله مقداری بیشتر است و از مجموع طول مؤثر لهیدگی هر لایه چین‌خوردگی کامل، رابطه (۱۰) به دست می‌آید.

ممکن است در واقعیت یک لایه چین‌خوردگی ناقصی هم بعد از چین‌خوردگی‌های کامل وجود داشته باشد که این برنامه کامپیوتری بر اساس شروطی که در آن قید شده است، قادر است آن را تحلیل کند. این برنامه تا زمانی محاسبات را انجام می‌دهد که انرژی جنبشی وارد بر لایه آخر مساوی یا بیشتر از جذب انرژی محاسبه شده در آن لایه بر فرض کامل بودن چین‌خوردگی باشد، یعنی اگر کمتر شد، چین‌خوردگی در لایه آخر به صورت ناقص است و جذب انرژی در آن کمتر از حالتی است که چین‌خوردگی به صورت کامل رخ دهد.

در جدول ۵، جذب انرژی در لایه آخر که به صورت ناقص چین‌خورده است، نشان داده شده است. این انرژی ( $D_Q$ ) از اختلاف انرژی جنبشی معادل وارد بر جاذب  $k$  و مجموع جذب انرژی لایه‌های چین‌خورده کامل در حالت دینامیکی  $D^d$ ، رابطه (۲۳)، به دست می‌آید، البته در واقعیت مقداری از این انرژی صرف تولید صدا و حرارت و دیگر انرژی‌ها می‌شود. در این جدول، جذب انرژی در لایه آخر بر فرض کامل بودن چین‌خوردگی ( $D_Q$ ) نیز آمده است که بیشتر از جذب انرژی در لایه چین‌خورده ناقص است. همچنین در این جدول مجموع جذب انرژی لایه‌های چین‌خورده کامل در حالت استاتیکی (که در همه لایه‌ها یکسان است)  $D^s$ ، از رابطه (۱) آورده شده که نسبت به حالت دینامیکی کمتر است.

**جدول (۴):** داده‌های تئوری حاصل از برنامه کامپیوتری [۱۷].

Specimen Number	$Q$	$Q'$	$D^d$ (J)	$\delta f$ (mm)	$Pm^d$ (N)
T9	۹	۸	۳۱۲/۹۶	۶۹/۶۲۰۴	۴۴۸۹/۹
T10	۸	۷	۲۷۲/۱۱	۶۰/۹۱۵۱	۴۴۶۱/۸
T11	۶	۵	۱۹۳/۱۲	۴۳/۵۰۸۹	۴۴۳۳/۳
T12	۵	۴	۱۵۴/۴	۳۴/۸۰۷۰	۴۴۳۰/۷
T13	۶	۵	۱۹۳/۹	۴۳/۵۱۰۲	۴۴۵۱/۱



**شکل (۲۵):** تغییر شکل بافر و تغییر قطر محل تماس پرتابه از آزمون تجربی در آزمون شماره (۱۲) [۱۷].



**شکل (۲۶):** تغییر شکل بافر و تغییر قطر محل تماس پرتابه از آزمون تجربی در آزمون شماره (۱۳) [۱۷].

## ۲-۶- نتایج تئوری

در حالت استاتیکی طول چین‌خوردگی، جذب انرژی و نیروی لهیدگی متوسط در همه لایه‌ها یکسان به دست می‌آید، اما در حالت دینامیکی که اثر اینرسی ضربه زننده و لایه‌های قبلی بر لایه‌های جدید لحاظ شده است، طول چین‌خوردگی، جذب انرژی و نیروی لهیدگی متوسط در هر لایه متفاوت و در عمل هم این چنین است. بر این اساس همان‌طور که در قسمت (۳-۴) ذکر شد، برای محاسبه جذب انرژی و نیروی لهیدگی متوسط دینامیکی که در آن اثر اینرسی لحاظ شده است، برنامه‌ای کامپیوتری نوشته شده است که پارامتر  $l$  را از رابطه (۲۵) در هر لایه چین‌خوردگی محاسبه می‌کند و با قرار دادن آن در رابطه‌ی (۲۳ و ۲۴) این مقادیر به دست می‌آیند و در پایان، تشکیل هر لایه چین‌خوردگی، سرعت و جرم نهایی ضربه زننده را به عنوان مقادیر اولیه برای تشکیل لایه بعدی محاسبه می‌کند. مقادیر جرم و سرعت ضربه زننده، داده‌های ورودی برنامه می‌باشند. مشخصات ضربه زننده‌ها در تئوری مطابق جدول ۱ است. در تئوری فرض بر آن است که ضربه زننده به طور مستقیم بدون بافر به جاذب (لوله) برخورد کند و ابعاد آن، دهانه لوله را در بر داشته باشد، به همین دلیل با شبیه‌سازی تقریبی مطابق جدول ۲ از جرم معادل  $M$  و

لحظه) استفاده می‌شود و این سرعت از  $V_0$  چهار تا پنج برابر کمتر است. اگر ابعاد پرتابه‌ها به اندازه‌ای بود که به طور مستقیم به بافر برخورد داشتند و سرعت‌ها هم در حد  $V_0$  بود، نیروی لهیدگی دینامیکی افزایش خیلی بیشتری نسبت به نیروی لهیدگی استاتیکی پیدا می‌کرد.

### ۳-۶- مقایسه و بررسی نتایج آزمون‌های تجربی و تئوری

در این قسمت نتایج بخش‌های (۶-۱) و (۶-۲) مقایسه و بحث می‌شوند.

در جدول ۷ نتایج کاهش نهایی طول لوله،  $\delta f$ ، حاصل از آزمون‌های تجربی و تحلیل تئوری آمده است. البته در بخش (۶-۲) ذکر شد که  $\delta f$  تئوری از کاهش نهایی طول لوله مقداری بیشتر است زیرا آن مقدار اضافی، طول قسمت مجاله شده است و از جدول ۷ مشخص است که در آزمون‌های شماره (۹ و ۱۰) با توجه به طول اولیه نمونه‌ها ( $L=50\text{ mm}$ )، اگر طول اولیه نمونه‌ها بیشتر از ۵۰ میلی‌متر و حداقل در حد مقادیر تئوری بود، چین خوردگی‌ها ادامه داشتند.

### جدول (۷): مقایسه کاهش نهایی طول لوله با طول

اولیه  $L=50\text{ mm}$ ، در دو حالت تئوری و تجربی.

Specimen Number	$\delta f_c$ (mm)	$\delta f$ (mm)
T9	۳۶	۶۹/۶
T10	۳۵	۶۰/۹
T11	۲۷	۴۳/۵
T12	۲۴	۳۴/۸
T13	۳۳	۴۳/۵

به طور کلی از جدول ۷ نتیجه گرفته می‌شود که نتایج کاهش نهایی طول لوله در دو حالت تئوری و تجربی، با ذکر این نکته که نتایج تجربی با فرض چین خوردگی‌های متقارن حاصل شده‌اند، هم‌خوانی خوبی با هم دارند. کاهش نهایی طول لوله، تنها پارامتری است که در حالت تجربی به طور مستقل به دست آمده است.

در جدول ۸ نتایج نیروی لهیدگی دینامیکی،  $Pm^d$  حاصل از آزمون‌های تجربی و تحلیل تئوری آمده است. در شکل ۲۷ نمودار نیروی لهیدگی متوسط بر حسب سرعت پرتابه در دو حالت تئوری و تجربی نشان داده شده است و در آن مشخص است که نتایج تئوری دینامیکی نسبت به نتایج تئوری استاتیکی به نتایج تجربی نزدیک‌تر است. علت اختلاف نتایج تئوری و تجربی در واقع این است که در رابطه‌های تئوری، ساده‌سازی

### جدول (۵): بررسی جذب انرژی در لایه آخر [۱۷].

Specimen Number	$D^s$ (J)	$D^d$ (J)	$k'$ (J)	$D_Q$	$D_Q$
T9	۲۶۷/۱	۳۱۲/۹۶	۳۳۶/۲۰	۲۳/۲۴	۳۷/۹۰۴
T10	۲۲۸/۹۴	۲۷۲/۱۱	۲۷۷/۷۸	۵/۶۷	۳۷/۸۰۱
T11	۱۵۲/۶۳	۱۹۳/۱۲	۱۹۹/۵۱	۶/۳۹	۳۷/۸۰۷
T12	۱۱۴/۴۷	۱۵۴/۴	۱۷۵/۷۵	۲۱/۳۵	۳۷/۹۰۶
T13	۱۵۲/۶۳	۱۹۳/۹	۲۲۲/۵۶	۲۸/۶۶	۳۷/۹۴۹

درصد افزایش نیروی لهیدگی متوسط دینامیکی نسبت به نیروی لهیدگی متوسط استاتیکی، در جدول ۶ آمده است. در این جدول  $Pm^s$  نیروی لهیدگی متوسط استاتیکی بر مبنای الگوی لهیدگی آبراموویچ<sup>۱</sup> و جونز<sup>۲</sup> است و از رابطه (۱۱) برای برای چین‌های بینابین که در آن، اثر نرخ کرنش و نیز اثر اینرسی لحاظ نشده است، به دست می‌آید (این نیرو به شعاع، ضخامت و تنش تسلیم لوله بستگی دارد و به همین علت در هر پنج آزمون مقداری ثابت دارد) و  $Pm^d$  نیروی لهیدگی متوسط دینامیکی بر مبنای الگوی لهیدگی آبراموویچ و جونز است و از رابطه (۲۴) که در آن تنها اثر اینرسی لحاظ شده است (که این نیرو را به جرم و سرعت ضربه زننده و جرم جاذب وابسته می‌کند و علاوه بر اینکه در هر آزمون مقدار متفاوتی دارد، در هر لایه چین خوردگی نیز مقدار متفاوتی دارد که از میانگین آنها استفاده می‌شود)، به دست می‌آید.

### جدول (۶): مقایسه نیروی لهیدگی دینامیکی با نیروی

لهیدگی استاتیکی.

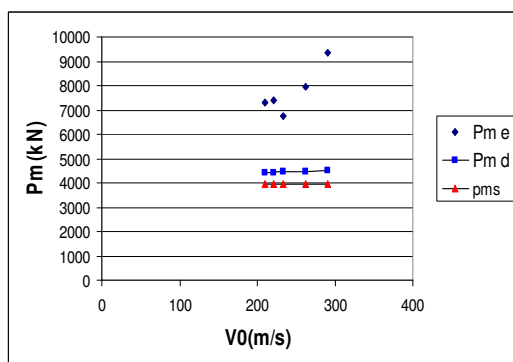
Specimen Number	$Pm^s$ (N)	$Pm^d$ (N)	درصد اختلاف
T9	۳۹۵۴/۴	۴۴۸۹/۹	۱۳/۵۴
T10	۳۹۵۴/۴	۴۴۶۱/۸	۱۲/۸۳
T11	۳۹۵۴/۴	۴۴۳۳/۳	۱۲/۱۱
T12	۳۹۵۴/۴	۴۴۳۰/۷	۱۲/۰۴
T13	۳۹۵۴/۴	۴۴۵۱/۱	۱۲/۵۶

درصد افزایش محاسبه شده در جدول ۶ مقدار قابل توجهی است اما بسیار زیاد نیست، علت هم این است که با توجه به سرعت بالای پرتابه، بخش زیادی از انرژی جنبشی صرف تغییر شکل پرتابه و بافر می‌شود و در محاسبه نیروی لهیدگی دینامیکی از سرعت  $V$  (سرعت مشترک پرتابه و بافر در یک

1- Abramowitz

2- Jones





شکل (۲۷): نمودار نیروی لهیدگی متوسط دینامیکی بر حسب سرعت پرتابه در دو حالت تئوری  $Pm^d$  و تجربی  $Pm^e$ .

#### ۶-۴- بررسی نتایج تجربی مرجع [۵] و مقایسه آنها با نتایج مدل تحلیلی جدید

در این قسمت از نتایج تجربی مرجع [۵] برای بررسی و مقایسه مدل تئوری جدید (نیروی لهیدگی متوسط دینامیکی که شامل هر دو اثر اینرسی و نرخ کرنش می‌باشد) نسبت به مدل تئوری قبلی (نیروی لهیدگی متوسط دینامیکی که فقط اثر نرخ کرنش در آن لحاظ شده است) استفاده می‌شود.

محاسبات روی نمونه‌هایی با  $H = 1/2$  mm،  $R = 28/0.32$  mm از جنس فولاد نرم با تنش معیار  $0.2$  درصد  $222$  N/mm<sup>2</sup> و تنش نهایی  $336$  N/mm<sup>2</sup> صورت گرفته است که با جرم‌ها و سرعت‌های مختلف ضربه زننده توسط دستگاه چکش سقوطی<sup>۱</sup> مورد اصابت قرار می‌گیرند. مشخصات ضربه زننده‌ها و لوله‌های جدار نازکی که به عنوان جاذب انرژی مورد استفاده قرار گرفته‌اند و لهیدگی‌ها به صورت متقارن است، در جدول ۹ آورده شده است.  $L$  طول لوله،  $M$  جرم ضربه زننده و  $V_0$  سرعت اولیه برخورد ضربه زننده به نمونه‌ی آزمایشی می‌باشد.

در جدول ۱۰ داده‌های تجربی نمونه‌های آزمایشی که مشخصات آن در جدول ۹ آمد، آورده شده است.  $k$  انرژی جنبشی اولیه است که از رابطه  $0.5 MV_0^2$  به دست می‌آید،  $\delta_f$  کاهش نهایی طول لوله است و  $P_m^d$  نیروی دینامیکی متوسط است که از رابطه  $K/\delta_f$  به دست می‌آید.

درصد افزایش نیروی لهیدگی متوسط دینامیکی نسبت به نیروی لهیدگی متوسط استاتیکی، در جدول ۱۱ آمده است.  $Pm^s$  نیروی لهیدگی متوسط استاتیکی بر مبنای الگوی لهیدگی آبراموویچ و جونز است و در آن اثر نرخ کرنش لحاظ شده است. این نیرو از روابط (۱۱) برای چین‌های بینابین و (۱۳) به دست می‌آید.  $Pm^d$  نیروی لهیدگی متوسط دینامیکی بر مبنای الگوی

صورت گرفته و در واقع هیچ استهلاکی در آنها در نظر گرفته نشده است. همچنین در روابط تئوری با استفاده از جرم و سرعت معادل، نتایج به صورت تقریبی به دست آمده‌اند. علت دیگر این است که در آزمون‌های تجربی، فرض شده که چین خوردگی‌ها به طور کامل متقارن است و چین خوردگی الماسی وجود ندارد، در صورتی که اگر چین فرضی نمی‌شد، به دلیل چین خوردگی الماسی، جذب انرژی و در نتیجه نیروی لهیدگی کمتری باید از نتایج تجربی محاسبه می‌شد.

به طور کلی مشکلاتی که در انجام این تحقیق وجود داشت و باعث خطا در محاسبات می‌شد، بدین شرح است: مشکلاتی که در آماده‌سازی دستگاه جهت انجام آزمون‌ها به وجود آمد شامل: عدم قرارگیری صحیح صفحه هدف به طوری که پرتابه به مرکز بافر برخورد کند، عدم پیش‌بینی دقیق سرعت پرتابه با استفاده از دیافراگم‌های پاره شونده و کوچک بودن قطر داخلی لوله پرتابگر گازی که باعث می‌شد از پرتابه‌های کوچک استفاده شود و برای انجام آزمون نیاز به بافر باشد.

از جمله مشکلاتی که در تهیه نمونه‌های آزمایش به وجود آمد شامل: تهیه لوله‌های آلومینیمی با ضخامت کم و جنس نرم و مشخص، (مثلاً آلومینیوم سری ۱۰۰۰) بود که بعد از تهیه آن پس از مدت زمان زیادی، آنها را با دقت زیادی به اندازه‌های یکسان برش داده و با قالب خاصی لوله را از حالت بیضوی به دایروی تبدیل کرده و دو سطح آنها به صورت عمود درآورده شد که انجام این کارها هزینه و زمان زیادی را صرف کرد.

لازم به ذکر است که از ۱۴ آزمونی که انجام شد، در ۷ آزمون آن پرتابه به مرکز برخورد نکرد که باعث لهیدگی لوله به صورت مورب شد و در ۷ آزمون دیگر که تقریباً به مرکز برخورد کرد، پس از چین خوردگی متقارن، چین خوردگی‌های الماسی هم به وجود می‌آمد. از دلایل الماسی شدن می‌توان به حالت بیضوی لوله‌ها، ناهمگن بودن و مطمئن نبودن از استاندارد جنس لوله‌ها اشاره کرد.

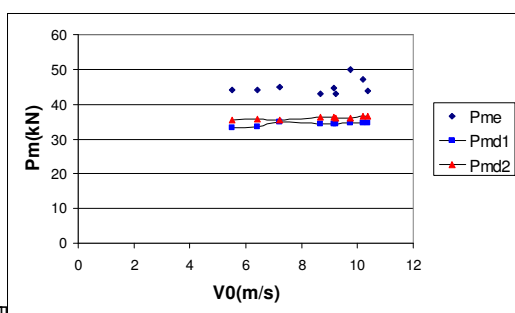
#### جدول (۸): مقایسه‌ی نیروی لهیدگی دینامیکی در دو حالت

تئوری و تجربی.

Specimen Number	$Pm_e^d$ (N)	$Pm^d$ (N)
T9	۹۳۳۸/۸۹	۴۴۸۹/۹
T10	۷۹۳۶/۵۷	۴۴۶۱/۸
T11	۷۳۸۹/۲۶	۴۴۳۳/۳
T12	۷۳۲۲/۹۲	۴۴۲۰/۷
T13	۶۷۴۴/۲۴	۴۴۵۱/۱

1- Drop Hammer Rig

در شکل ۲۸ نمودار تغییرات نیروی لهیدگی متوسط برای لوله‌های جدار نازک در ازای تغییرات سرعت ضربه زننده بر اساس جداول ۱۰ و ۱۱ نمایش داده شده است. از شکل ۲۸ قابل مشاهده است که نتایج تئوری جدید که هر دو اثر اینرسی و نرخ کرنش در آن لحاظ شده است، نسبت به نتایج تئوری قبلی که فقط اثر نرخ کرنش در آن لحاظ شده بود، به نتایج تجربی نزدیکتر هستند. اختلاف کم مقادیر تئوری جدید و تئوری قبلی نشان می‌دهد که می‌توان از اثر اینرسی در سرعت‌های پایین صرف نظر کرد. این اختلاف در نتایج آزمون‌های تجربی مرجع [۱۷] به علت سرعت‌های بالاتر بیشتر است و این اثر اینرسی و سرعت را در محاسبه نیروی لهیدگی نشان می‌دهد.



شکل (۲۸): نمودار نیروی لهیدگی نسبت به تغییرات سرعت برای  $Pmd1$ ،  $H=1/2$  mm،  $R=28/0.32$  mm بیانگر نیروی لهیدگی متوسط استاتیکی با اثر نرخ کرنش،  $Pmd2$  بیانگر نیروی لهیدگی متوسط دینامیکی با اثر نرخ کرنش و اثر اینرسی و  $Pme$  بیانگر نتایج تجربی از مرجع [۵].

#### ۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله مدل آبراموویچ و جونز برای تحلیل فرآیند فروریزش لوله‌های دایروی تحت بار ضربه‌ای (دینامیکی) اصلاح شده و اتلاف انرژی ناشی از کوتاه‌شدگی اولیه دیواره لوله، اینرسی اولیه (جرم ضربه زننده) و اثرات اینرسی لایه‌های چین‌خورده قبلی بر لایه چین‌خورده جدید در نظر گرفته شده است. در نظر گرفتن میزان جذب انرژی در مرحله کاهش طول دیواره لوله و اضافه نمودن جرم لایه‌های چین‌خورده قبلی به جرم ضربه زننده در تشکیل چین‌خوردگی جدید، باعث اصلاح در محاسبه تحلیلی انرژی جذب شده طی فروریزش جاذب استوانه‌ای و نیز نیروی متوسط فروریزش (لهیدگی) شده است. بر اساس بررسی نتایج مدل اصلاح شده مشاهده شد که سرعت و جرم ضربه زننده (اینرسی اولیه جاذب) به خصوص در سرعت‌های برخورد بالا و جرم زیاد ضربه زننده، تأثیر بسزایی در نیروی متوسط لهیدگی و جذب انرژی لوله داشته و با افزایش

لهیدگی آبراموویچ و جونز است و در آن علاوه بر اثر نرخ کرنش، اثر اینرسی نیز لحاظ شده است. این نیرو از روابط (۲۴)، مدل تئوری جدید و (۱۳) به دست می‌آید. در رابطه (۱۳)  $q$  و  $D$  برای فولاد نرم به ترتیب برابر با  $3/91$  و  $s^{-1}$  با این فرض که  $\sigma_0 = \sigma_{ii}$  باشد، قرار داده می‌شوند.

جدول (۹): مشخصات ضربه‌زننده‌ها و نمونه‌های آزمایشی [۵].

Specimen Number	$L$ (mm)	$M$ (kg)	$V_0$ (m/s)
T1	۱۳۳/۱	۷۳/۶	۹/۲۳۰
T4	۱۷۸/۱	۷۳/۶	۱۰/۳۷۲
T5	۲۲۴/۱	۷۳/۶	۹/۱۵۳
T37	۹۹/۹	۷۳/۶	۵/۵۰۴
T39	۱۰۰/۲	۷۳/۶	۶/۴۰۱
T41	۱۰۰/۰	۷۳/۶	۸/۶۶۷
T43	۱۰۰/۰	۲۶/۶	۹/۷۳۰
T45	۱۰۰/۰	۲۶/۶	۱۰/۱۹۸
T46	۱۰۰/۲	۷۳/۶	۷/۱۹۷
$R=28/0.32$ mm, $H=1/2$ mm			

جدول (۱۰): داده‌های تجربی نمونه‌های آزمایشی مرجع [۵].

Specimen Number	$K$ (kJ)	$\delta_f$ (mm)	$Pm^d$ (kN)
T1	۳/۱۴	۷۳/۰	۴۳/۰
T4	۳/۹۶	۹۰/۳	۴۳/۹
T5	۳/۰۸	۶۹/۱	۴۴/۶
T37	۱/۱۱	۲۵/۲	۴۴/۰
T39	۱/۵۱	۳۴/۲	۴۴/۲
T41	۲/۷۶	۶۴/۰	۴۳/۱
T43	۱/۲۶	۲۵/۲	۵۰/۰
T45	۱/۳۸	۲۹/۳	۴۷/۱
T46	۱/۹۱	۴۲/۶	۴۴/۸

جدول (۱۱): داده‌های تئوری نمونه‌های آزمایشی مرجع [۵].

Specimen Number	$Pm^s$ (kN)	$Pm^d$ (kN)	درصد اختلاف
T1	۳۴/۳۴۸	۳۶/۰۵۹	۴/۹۸
T4	۳۴/۶۱۴	۳۶/۵۳۳	۵/۵۴
T5	۳۴/۳۲۹	۳۶/۳۲۲	۵/۸۱
T37	۳۳/۲۵۸	۳۵/۳۳۰	۶/۲۳
T39	۳۳/۵۶۱	۳۵/۶۷۲	۶/۲۹
T41	۳۴/۲۰۷	۳۶/۲۱۳	۵/۸۶
T43	۳۴/۴۶۷	۳۶/۰۱۲	۴/۴۸
T45	۳۴/۵۷۵	۳۶/۵۲۶	۵/۶۴
T46	۳۴/۸۰۵	۳۵/۵۵۰	۲/۱۴

8. Zhang, T.G. and Yu, T.X. "A Note on a 'Velocity Sensitive' Energy-Absorbing Structure", *Int. J. Impact Eng.*, Vol. 8, No. 1, pp. 43-51, 1989.
9. Tam, L.L. and Calladine, C.R. "Inertia and Strain-Rate Effects in a Simple Plate-Structure under Impact Loading", *Int. J. Impact Eng.*, Vol. 11, No. 3, pp. 349-377, 1991.
10. Karagiozova, D. and Jones, N. "A Note on the Inertia and Strain-Rate Effects in the Tam and Calladine Model", *Int. J. Impact Eng.* Vol. 16, No. 4, pp 637-649, 1995.
11. Su, X.Y., Yu, T.X., and Reid, S.R. "Inertia-Sensitive Impact Energy-Absorbing Structures Part I: Effects of Inertia and Elasticity", *Int. J. Impact Eng.*, Vol. 16, No. 4 , pp. 651-672, 1995.
12. Su, X.Y., Yu, T.X., and Reid, S.R., "Inertia-Sensitive Impact Energy-Absorbing Structures Part II: Effect of Strain Rate", *Int. J. Impact Eng.*, Vol. 16, No. 4 , pp. 673-689, 1995.
13. Karagiozova, D. and Jones, N. "Dynamic Elastic-Plastic Buckling of Circular Cylindrical Shells under Axial Impact", *Int. J. Solids and Structures*, Vol. 37, No. 14, pp. 2005-2034, 2000.
14. Karagiozova, D., Alves, M., and Jones, N. "Inertia Effects in Axisymmetrically Deformed Cylindrical Shells under Axial Impact", *Int. J. Impact Eng.*, Vol. 24, No. 10, pp. 1083-1115, 2000.
15. Karagiozova, D. and Jones, N. "Dynamic Effects on Buckling and Energy Absorption of Cylindrical Shells under Axial Impact", *Int. J. Thin-Walled Structures*, Vol. 39, No. 7, pp. 583-610, 2001.
16. Xu, X., Ma, J., Lim, C.W., and Chu, H. "Dynamic Local and Global Buckling of Cylindrical Shells under Axial Impact", *Int. J. Engineering Structures*, Vol. 31, No. 5, pp. 1132-1140, 2009.
17. Rezvani, M. "Theoretical, Numerical and Experimental Investigation of a Cylindrical Absorber Subjected to High Speed Axial Impact Loadings", Thesis of MSc., Eng. Dep't., Faculty of Eng., Imam Hossein Univ., Tehran, 2012 (In Persian).
18. Feli, S. and Shokri, A. "Dynamic Progressive Buckling of Square Tubes under Axial Impact Loadings", *Aerospace Mech. J.*, Vol. 5, No. 4 , pp. 53-65, 2010 (In Persian).
19. Khodarahmi, H., Vahedi, KH., and Lotfi, H., "Numerical and Experimental Analysis of Groove Depth and Estimation of Burst Pressure in Rupture Discs", *Aerospace Mech. J.*, Vol. 8, No. 1 , pp. 85-98, 2012 (In Persian).

سرعت و جرم ضربه زننده، نیروی متوسط لهیدگی و میزان جذب انرژی افزایش می‌یابد. بر اساس بررسی انجام شده در این مقاله، مشخص شد که مقادیر نیروی متوسط لهیدگی و میزان جذب انرژی محاسبه شده توسط مدل تحلیلی اصلاح شده، پیش‌بینی بهتری در حدود ۱۲ تا ۱۴ درصد برای نیروی لهیدگی در سرعت‌های بالا نسبت به مدل آبراموویچ و جونز نموده است.

در این تحقیق، کمانش پیش‌رونده دینامیکی و کمانش پلاستیک دینامیکی به صورت تجربی مشاهده شدند و مشخص شد که در محدوده خاصی از سرعت، کمانش پیش‌رونده دینامیکی و در سرعت‌های کمتر از آن محدوده، کمانش پلاستیک دینامیکی رخ می‌دهد. در کمانش پیش‌رونده دینامیکی نتایج تجربی کاهش نهایی طول لوله، جذب انرژی و نیروی لهیدگی متوسط دینامیکی با نتایج تئوری مقایسه گردید و مشخص شد که نتایج تجربی و تئوری همخوانی مناسبی با هم دارند.

#### ۸- مراجع

1. Jones, N. "Structural Impact", Cambridge Univ. Press, Cambridge, Uk, 1989.
2. Al Galib, D. and Limam, A. "Experimental and Numerical Investigation of Static and Dynamic Axial Crushing of Circular Aluminum Tubes", *Thin-Walled Structures*, Vol. 42, No. 8, pp. 1103-1137, 2004.
3. Alexander, J.M. "An Approximate Analysis of the Collapse of Thin Cylindrical Shells under Axial Loading", *Q. J. Mech. Appl. Math.*, Vol. 13, No. 1, pp. 10-15, 1960.
4. Abramowicz, W. "The Effective Crushing Distance in Axially Compressed Thin-Walled Metal Columns", *Int. J. Impact Eng.* Vol. 1, No. 3, pp. 309-17, 1983.
5. Abramowicz, W. and Jones, N. "Dynamic Axial Crushing of Circular Tubes", *Int. J. Impact Eng.* Vol. 2, No. 3, pp. 263-81, 1984.
6. Ren, W., Mingbao, H., Zhuping, H., and Qingchun, Y. "An Experimental Study on the Dynamic Axial Plastic Buckling of Cylindrical Shells", *Int. J. Impact Eng.* Vol. 1, No. 3, pp. 249-256, 1983.
7. Calladine, C.R. and English, R.W. "Strain-Rate and Inertia Effects in the Collapse of Two Types of Energy-Absorbing Structure". *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 26, No's. 11-12, pp 689-701, 1984.