

جمال زمانی^۱

دانشیار

ابوالفضل درویشه^۲

استاد

مجید سلیمانی^۳

کارشناس ارشد

محمدعلی ادبی

فیروز جایی^۴

کارشناس ارشد

آنالیز تجربی سازه‌های جاذب انرژی با سطح مقطع دایره‌ای و مقایسه آن با سازه‌های مربعی و بتنی تحت بارگذاری محوری شبه استاتیکی و دینامیکی (تا مرحله انفجار)

در بسیاری از سازه‌های مهندسی و به خصوص سازه‌های متحرک و به طور کل در سازه‌هایی که تحت تأثیر بار دینامیکی و یا استاتیکی قرار دارند، برای جلوگیری از خسارات و یا کاهش آن از سیستم‌های جذب انرژی استفاده می‌شود. از این رو مطالعات وسیعی بر روی سلول جاذب انرژی صورت پذیرفته است. در این مقاله پس از انجام بیش از ۹۰ تست تأثیر پارامترهای هندسی مانند ضخامت، قطر و ارتفاع سازه و همچنین تنش سلول سازه بر میزان نیروی مچالگی در حالت بارگذاری محوری بررسی شده است. سپس لوله‌های استوانه‌ای از لحاظ میزان جذب انرژی با لوله‌های مربعی و همچنین سازه بتونی مقایسه شده است.

واژه‌های راهنما: سازه‌های جدار نازک، بارگذاری محوری، جاذب‌های انرژی، بارگذاری شبه استاتیکی

۱- مقدمه

رفتار سازه‌های فلزی جدار نازک تحت بار فشار محوری و به عنوان جاذب انرژی سال‌های متمادی مورد بررسی قرار گرفته است. وزن و حجم کم، در دسترس بودن و صرفه اقتصادی مزیت‌هایی است که سبب گشته تحقیقات برای استفاده از این لوله‌ها و در جهت بهینه کردن ویژگی‌های جذب انرژی همچنان مستمر باشد. شایان ذکر است لوله فلزی استوانه‌ای جدار نازک یکی از متداول‌ترین انواع سازه‌های جدار نازک می‌باشد که کاربرد وسیعی در سیستم‌های جذب انرژی دارد. به طور کلی بررسی نمودارهای نیرو-جابجایی در بارگذاری شبه استاتیکی این لوله‌ها نشان می‌دهد که بار محوری تا تشکیل اولین چین افزایش می‌یابد (نیروی بیشینه) و سپس بسته به پارامترهای هندسی (مانند نسبت‌های قطر به ضخامت و طول به قطر) و همچنین خواص مواد، حالت‌های فروریزش متفاوتی قابل تصور است. در نگاه کلی، فروریزش، کماتش پلاستیکی و تشکیل چین‌های پیش‌رونده^۵ متقارن و نامتقارن را در بر دارد. تشکیل این چین خوردگی‌ها سبب بالا و پایین پایین رفتن نمودار نیرو می‌گردد. لهیدگی پیش‌رونده لوله‌ها تحت بار محوری را می‌توان با صرف نظر کردن از

^۱ نویسنده مسئول، دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی zamani@kntu.ac.ir

^۲ استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان

^۳ کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

^۴ کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی ma.adabi@yahoo.com

^۵ Progressive Folds

نیروهای لختی (بارگذاری شبه استاتیکی) و با در نظر گرفتن این نیروها (بارگذاری دینامیکی) به دو دسته مجزا تقسیم نمود. از ویژگی‌های این نوع ضربه‌گیرها می‌توان ارزان بودن، در دسترس قرار داشتن و سهولت نصب آن‌ها را نام برد. از طرف دیگر مسائل ناخواسته‌ای که در ارتباط با این نوع ضربه‌گیرها پیش می‌آید، دشواری پیش‌بینی شیوه فروریزش آن‌ها می‌باشد و همانطور که مشخص می‌باشد میزان جذب انرژی لوله‌ها، به مقدار زیادی بستگی به شیوه فروریزش (کمانش) آن‌ها دارد و در نتیجه اگر شیوه فروریزش را نتوان به طور دقیق پیش‌بینی کرد، میزان جذب دقیق انرژی غیرممکن خواهد بود. در ضمن طول لهیدگی این لوله‌ها نیز همواره درصدی از طول اولیه آن‌ها بوده و امکان دستیابی به طول لهیدگی برابر با طول لوله میسر نخواهد بود.

الف) بارگذاری شبه استاتیکی

پاکزلی و ماکولی [۱] رفتار لوله‌های جدار نازک با نسبت $D/t > 20$ (D قطر متوسط و t ضخامت) با مقطع دایروی و مربعی تحت بار محوری را بررسی کردند.

الحسنی و جانسون [۲] لهیدگی محوری لوله‌های مربعی که از چوب پر شده است را بررسی کردند. السکاندر [۳] رفتار لوله‌های جدار نازک با نسبت $D/t > 20$ (D قطر متوسط و t ضخامت) با مقطع دایروی و مربعی تحت بار محوری را بررسی کرد.

ماملیس و جانسون [۴] مچاله شدن لوله‌های استوانه‌ای را تحت شرایط شبه استاتیکی بررسی کردند. مهمترین موضوعات مورد بررسی آن‌ها بدست آوردن جزئیات عملی شکل فروریزش بود. آن‌ها معادلات تجربی را با نتایج آزمایش‌های خود در حالت‌های تغییر شکل الماس و متقارن مطابقت دادند.

آندروز [۵] برخورد محوری لوله‌های استوانه‌ای را تحت بار شبه استاتیکی براساس مشاهدات تجربی به ۷ گروه طبقه بندی کرد:

- متقارن
- الماسی
- اولر
- متقارن و الماسی (حالت ترکیبی)
- الماسی آنی
- متقارن آنی
- کج شدن از محور لوله

لوله‌های استوانه‌ای یا مربعی که از فوم پر شده است و تحت بار محوری قرار دارد به وسیله محققان زیادی بررسی شده است، آبرامویچ و ویرزبکی [۶]، رید و همکارانش [۷] و ردی و وال [۸] از این گروه هستند.

ماملیس و همکارانش [۹] هردو روش تئوری و آزمایشگاهی را در لهیدگی محوری برای لوله‌های جدار نازک از جنس PVC با شیارهای داخلی تکرار کردند.

ماملیس و همکارانش [۱۰] مطالعات تجربی را با استفاده از موادی متفاوت و در نرخ کرنش بالا (m/min) (۲/۵) تکرار کردند. نتایج آن شبیه معادلات تجربی است. ماملیس همچنین برخورد محوری لوله‌های استوانه-

ای جدار نازک را به صورت پارامتر بی بعد از نوع جنس مطالعه نمود. مواد مختلفی که شامل فولاد، آلومینیوم و PVC می‌شد، مورد استفاده قرار گرفت.

ویزرزبکی [۱۱] یک مدل جدید برای برخورد پیش‌رونده لوله‌های استوانه‌ای در حالت تغییر شکل متقارن ارائه کرد. او یک المان چین S مانند معرفی کرد. معادلات منتهی به نسبت $D/t > 20$ انطباق خوبی با نتایج تجربی داشت.

رید [۱۲] نمودار نیرو-جابجایی را برای بارگذاری محوری لوله‌ای که از ماسه پر شده است، ارائه نمود. آبرموچ و جونز [۱۳] برخورد محوری لوله‌ها را از شکل خمش اولر تا کمانش پیش‌رونده در شرایط بارگذاری استاتیکی و دینامیکی مطالعه کردند. آن‌ها دریافتند که مرحله تغییر شکل به طول لوله‌ها، سطح مقطع، جنس، کرنش سختی، نرخ کرنش و شرایط انتهایی بستگی دارد. آن‌ها گزارش کردند که کمانش عمودی (اولر) ممکن است منطبق بر بار بیشینه حامل ظرفیت ستون باشد و ممکن است چنین نباشد.

مطالعات تئوری معمولاً از اثرات دینامیکی (سختی) صرف‌نظر کرده، با مساله به مانند یک مورد شبه-استاتیکی که برای سرعت‌های برخورد کم قابل قبول است، رفتار می‌کنند.

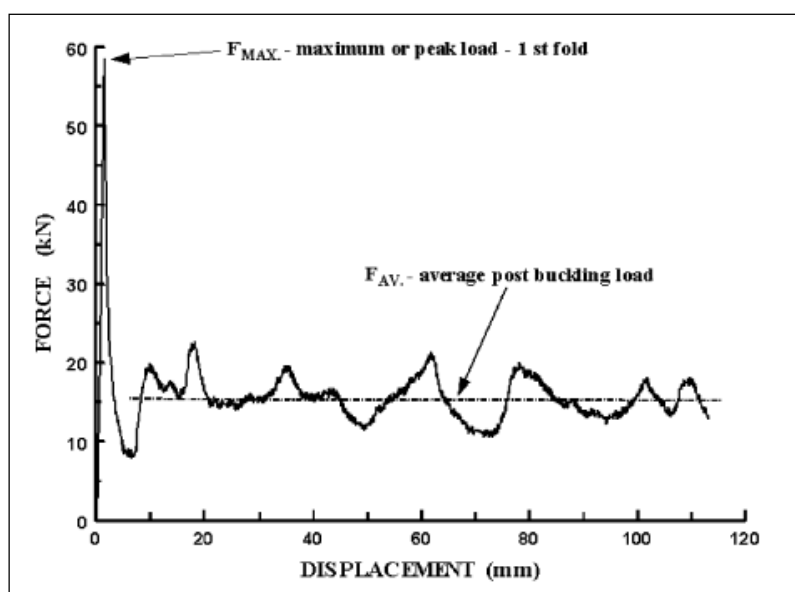
کوششی هم جهت کمینه کردن اختلاف نیروی لهیدگی در لوله‌ها تحت بار محوری توسط سینگیس وال سوبکی [۱۴] صورت گرفت. آن‌ها در لوله‌های چین‌دار با عمق چین مختلف برای کنترل تشکیل لولا‌های پلاستیک و کار پلاستیک کششی استفاده کردند.

گیلو و همکارانش [۱۵] بررسی‌های تجربی بیشتری را بر روی لوله‌های استوانه‌ای جدار نازک از جنس آلایزهای آلومینیوم در حالت شبه‌استاتیکی انجام دادند. آن‌ها محدوده آزمایش‌ها را تا $L/D < 10$ و $450 - 10 < D/t$ افزایش دادند و در نهایت یک نمودار طبقه‌بندی شده برای حالات تغییر شکل برای این لوله ارائه کردند. آن‌ها حالات تغییر شکل را به صورت زیر دسته‌بندی کردند:

- حالت متقارن محوری
 - حالت نامتقارن (حالت الماسی یا یوشیمورا) با تعداد متغیری لبه یا گوشه دایروی
 - حالت مرکب (ترکیب دو حالت قبل)
 - کمانش اولر یا سرتاسری
 - سایر حالات (فشاری ساده، چین‌های تکی و غیره)
- شکل (۱) یک نمونه نمودار نیرو-جابجایی را برای حالت شبه‌استاتیکی نشان می‌دهد. به طور کلی می‌توان گفت، نیروی محوری تا جاییکه اولین کمانش در یک مقدار نیروی بیشینه مشخص تشکیل شود، افزایش می‌یابد و نوسان‌های بار-تغییر مکان بعدی مربوط به چین‌های پیش‌رونده می‌باشد. پس از آن بسته به پارامترهای هندسی مانند نسبت‌های D/t و L/D و همچنین خواص مواد انواعی از حالت‌های فروریزش امکان پذیر است.

ب) بارگذاری دینامیکی

کمانش پلاستیکی دینامیکی را می‌توان به دو گروه طبقه‌بندی نمود:



شکل ۱- نمودار نیرو- جابجایی برای حالت شبه‌استاتیکی [۱۶]

۱- کمانش پلاستیکی دینامیکی آنی (که در گروه نوعی از برخورد قرار می‌گیرد که اینرسی نقش مهمی را در سرعت‌های بالا ایفا می‌کند).

۲- کمانش پیش‌دنده دینامیکی که در آن کمانش به صورت پیش‌رونده از یک انتهای لوله و در جهت پیشروی ایجاد می‌شود. این حالت در ضربه‌های با سرعت پایین هنگامیکه نیروی اینرسی جزئی است توسعه یافته است.

بار دینامیکی به بارگذاری با نرخ بالا گفته می‌شود که در گروه کرنش پلاستیکی زیاد که بیش از کرنش الاستیک می‌باشد، قرار دارد. چندین روش تئوری در لهدیگی دینامیکی از روش ساده حجم پلاستیک صلب استفاده می‌کنند که اغلب در تطابق خوبی با نتایج تجربی است.

رن [۱۶] کمانش پوسته‌های استوانه‌ای از جنس آلیاژهای آلومینیوم را بررسی کرد که کرنش- سختی قابل توجه با اندک اثر نرخ کرنش را نشان می‌دهد و گزارش داد که حالت تغییر شکل متأثر از سرعت برخورد (V) می‌باشد. آن‌ها تحلیل‌های تئوری ساده‌ای را بر مبنای ماده با خاصیت سختی کرنش خطی صلب و با صرف‌نظر از اثرات موج تنش، مشابه اثرات انتهایی ارائه کردند. آن‌ها دریافتند هنگامیکه سرعت ضربه کمتر از یک مقدار بحرانی مشخص V_{cr1} باشد، لوله استوانه‌ای فقط تغییر شکل پلاستیک در جهت‌های محوری و شعاعی خواهد داشت. به طور مشابه هنگامیکه سرعت ضربه بیش از V_{cr1} باشد، حالت متقارن تغییر شکل شروع به رخ دادن خواهد نمود. همچنین وقتی سرعت برخورد از یک مقدار بحرانی دیگر V_{cr2} که بزرگتر از V_{cr1} می‌باشد تجاوز نماید، حالت تغییر شکل از متقارن به الماس تغییر خواهد کرد.

ضربه محوری لوله‌ها با سرعت کم (تا ده متر بر ثانیه) به صورت شبه‌استاتیکی در نظر گرفته می‌شود [۱۷] و در نتیجه در تحلیل از اثر لختی صرف‌نظر می‌گردد. پاسخ یک مساله ضربه با برداشت بالا یک پدیده کمانش پیش‌رونده استاتیکی است. با وجود این چون برای اجسامی که نسبت به نرخ کرنش حساسیت دارند اثر این

کمانش قابل توجه است، کمانش پیش‌رونده از نوع دینامیکی خواهد بود. اگر برای سرعت‌های بالاتر اثر سختی لوله قابل توجه باشد پدیده‌ای بنام کمانش پلاستیکی دینامیکی ایجاد می‌شود. البته در این تحقیق منظور از بارگذاری دینامیکی بارگذاری سازه تحت موج حاصل از انفجار می‌باشد.

۲- نحوه آماده‌سازی قطعه‌ها

همانگونه که مشخص گردید، به منظور تعیین میزان جذب انرژی سازه‌های مورد نظر در این تحقیق، مقرر گردید تا تعدادی از این سازه‌ها ساخته و مورد آزمایش قرار بگیرند. البته نحوه انجام آزمایش‌ها در قسمت (۳) مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. در ادامه چگونگی آماده‌سازی سازه‌های مورد نیاز برای آزمایش‌ها مورد بحث قرار می‌گیرند. لوله‌های ساخته‌شده همانگونه که اشاره شد به صورت سازه‌های استوانه‌ایاز دو جنس آلومینیوم و برنج می‌باشند (ابعاد سازه‌ها در جداول (۱) و (۲) آمده است). همانگونه که در قبل اشاره گردید می‌بایست خواص مکانیکی لوله‌ها با یکدیگر یکسان گردد در حالیکه پس از انجام تست کشش بر روی قطعات همانطور که مشاهده گردید تنش‌های تسلیم، مختلف بود. اگر بخواهیم تاثیر نرخ بارگذاری و همچنین پارامترهای هندسی را مشخص کنیم می‌بایست تنش‌های تسلیم یکسان باشد. به همین منظور تصمیم بر آن شد تا تنش‌های تسلیم بالاتر به پایین‌ترین تنش تسلیم موجود در بین سازه‌ها رسانده شود. جهت پایین آوردن تنش‌های تسلیم روش آنیل کردن در کوره الکتریکی انتخاب گردید. روش کار بدین صورت بود که ابتدا از قطعات موجود که به صورت قوطی و یا لوله بودند ورق‌هایی به صورت مستطیل با ارتفاع ۲۰ cm تهیه گردید (از تمامی نمونه‌ها) و سپس ورق‌ها تحت بارگذاری کششی قرار گرفتند. لازم به توضیح است که به جهت شکل فک‌های موجود در دستگاه تست کشش امکان تست کشش خود لوله‌ها به صورت قوطی و یا استوانه وجود نداشت و به همین جهت ناگزیر به تست ورق‌هایی از همان لوله‌ها شدیم. بعد از بدست آوردن تنش‌های تسلیم ورق‌ها در حالت کششی، کمترین مقدار تنش به عنوان معیار در نظر گرفته شد و سپس ورق‌هایی از بقیه لوله‌ها تهیه شد. آنگاه این ورق‌ها درون کوره الکتریکی قرار گرفته و آنیل شدند. با استفاده از استاندارد ASM و جداول مربوط به بازپخت فلزات، درجه حرارت 300°C برای بازپخت آلومینیوم و درجه حرارت 538°C برای بازپخت برنج تعیین شد. سپس طی مراحل مختلف حرارت‌دهی و تغییر زمان، مابقی سازه‌ها به تنش مورد نظر رسانده شد. تمامی سازه‌های آلومینیومی به تنش تسلیم 130Mpa و تمامی سازه‌های برنجی به تنش تسلیم 365Mpa رسانده شدند.

جدول ۱- نتایج آزمایش‌های شبه‌استاتیکی بر روی استوانه آلومینیومی

جنس	قطر خارجی (mm)	ضخامت (mm)	ارتفاع (mm)	نیروی میانگین تجربی (N)	جذب انرژی (J)
Al	20	0.5	50	1625	53.2
Al	20	0.5	100	1610	91.2
Al	20	0.5	150	1631	128.4
Al	20	0.5	200	1602	180.6
Al	20	1	50	4459	163.4
Al	20	1	100	4386	320.4
Al	20	1	150	4597	458.7
Al	20	1	200	4726	623.6
Al	20	1.5	50	9547	295.4
Al	20	1.5	100	9425	546.7
Al	20	1.5	150	9256	791.4
Al	20	1.5	200	9128	101.6
Al	30	0.5	50	1920	61.4
Al	30	0.5	100	1984	124.8
Al	30	0.5	150	1999	184.7
Al	30	0.5	200	1825	269.1
Al	30	1	50	5690	214.4
Al	30	1	100	5497	384.9
Al	30	1	150	5364	634.1
Al	30	1	200	5590	841.6
Al	30	1.5	50	10530	365.7
Al	30	1.5	100	10984	740.1
Al	30	1.5	150	10252	1005.8
Al	30	1.5	200	11254	1431.8
Al	30	2	50	17469	531.3
Al	30	2	100	16952	1109.2
Al	30	2	150	17023	1689
Al	30	2	200	16853	2168.4
Al	40	0.5	50	2210	78.1
Al	40	0.5	100	2305	155.2
Al	40	0.5	150	2296	229
Al	40	0.5	200	2184	328.7
Al	40	1	50	6258	259.4
Al	40	1	100	6412	480.5
Al	40	1	150	6324	700.9
Al	40	1	200	6186	974.2
Al	40	1.5	50	13056	398.5
Al	40	1.5	100	12940	794.2
Al	40	1.5	150	12584	1230
Al	40	1.5	200	12369	1498.6
Al	40	2	50	18902	610.7
Al	40	2	100	18405	1184.9
Al	40	2	150	18671	1876.4
Al	40	2	200	18539	1486.7

جدول ۲- نتایج آزمایش های شبه استاتیکی بر روی استوانه برنجی

جنس	قطر خارجی (mm)	ضخامت (mm)	ارتفاع (mm)	نیروی میانگین تجربی (N)	جذب انرژی (J)
Brass	20	0.5	50	2864	105.6
Brass	20	0.5	100	3072	185.2
Brass	20	0.5	150	2958	259.6
Brass	20	0.5	200	2903	348.7
Brass	20	1	50	8691	292.2
Brass	20	1	100	8614	608
Brass	20	1	150	8578	894.3
Brass	20	1	200	8501	1143.2
Brass	20	1.5	50	16420	548.6
Brass	20	1.5	100	16035	1056.2
Brass	20	1.5	150	15923	1497.2
Brass	20	1.5	200	16125	1994.7
Brass	30	0.5	50	3654	121.3
Brass	30	0.5	100	3569	241.8
Brass	30	0.5	150	3602	364.1
Brass	30	0.5	200	3520	492.3
Brass	30	1	50	11201	417.6
Brass	30	1	100	10312	742
Brass	30	1	150	10024	1161
Brass	30	1	200	10124	1579.5
Brass	30	1.5	50	20059	694.2
Brass	30	1.5	100	19867	1346.7
Brass	30	1.5	150	19774	1994.6
Brass	30	1.5	200	19638	2669.1
Brass	30	2	50	31098	1009.2
Brass	30	2	100	30950	2141.5
Brass	30	2	150	30597	3195.1
Brass	30	2	200	31190	4284.6
Brass	40	0.5	50	4126	148.5
Brass	40	0.5	100	4198	298.4
Brass	40	0.5	150	4068	445.1
Brass	40	0.5	200	4005	597.5
Brass	40	1	50	12412	458.3
Brass	40	1	100	12368	897.1
Brass	40	1	150	12980	1324.8
Brass	40	1	200	12294	1824.9
Brass	40	1.5	50	22642	775.1

Brass	40	1.5	100	22871	1492.3
Brass	40	1.5	150	22315	2285.7
Brass	40	1.5	200	22109	2957.4
Brass	40	2	50	36950	1195.6
Brass	40	2	100	36571	2385.3
Brass	40	2	150	36128	3541
Brass	40	2	200	36498	4697.8

۳- چگونگی آزمایش‌ها

در این مرحله و پس از آماده‌سازی قطعات، قطعه‌های ساخته‌شده توسط دستگاه تست کشش- فشار، تست گردیدند (شکل ۲ و ۳). نحوه تست بدین صورت می‌باشد که دستگاه دارای دو فک بوده که فک پایین ثابت می‌باشد و فک بالا به دو صورت کششی (بالا) و فشاری (پایین) قابلیت حرکت دارد و دو قطعات بین این دو فک فولد می‌کنند (شکل ۴ و ۵). از طرفی سرعت حرکت فک‌ها قابل تنظیم می‌باشد و حداکثر سرعت دستگاه 500 mm/min و حداقل سرعت دستگاه 0.5 mm/min می‌باشد. فک بالایی دستگاه به یک سنسور نیرو^۱ مجهز می‌باشد که میزان نیروی وارده بر روی فک را به دستگاه PC متصل به دستگاه منتقل می‌کند. حداکثر بار فشاری که توسط دستگاه می‌توان اعمال نمود 100 KN می‌باشد. اطلاعات بدست آمده از سنسور نیرو به PC که مجهز به نرم افزار Q-Mat می‌باشد، منتقل می‌شود.



شکل ۳- دستگاه تست کشش- فشار (سازه‌های سلولی با مقطع مربع تحت بارگذاری فشاری در حالت مچالگی)



شکل ۲- دستگاه تست کشش- فشار (سازه‌های سلولی با مقطع مربع تحت بارگذاری فشاری)

¹ Load Cell

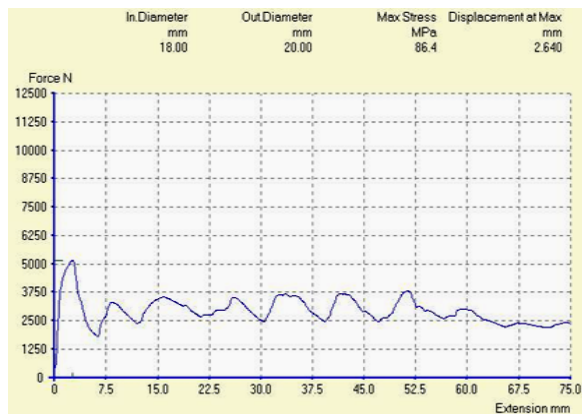


شکل ۵- نمونه های آزمایش شده سازه های استوانه ای از جنس آلومینیوم با تعداد تاخوردگی قابل ملاحظه

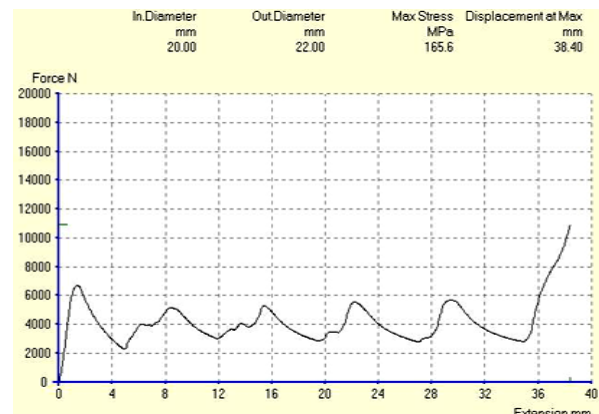


شکل ۴- نمونه های آزمایش شده سازه های استوانه ای از جنس برنج با تعداد تاخوردگی قابل ملاحظه

اطلاعات قابل دسترسی توسط PC عبارتند از: نمودار نیرو- جابجایی که نیرو بر حسب N و جابجایی بر حسب mm می باشد (شکل ۶ و ۷). از طرفی از روی همین نمودار می توان مقدار نیروی ماکزیمم که جهت شروع فولدینگ در لوله ها استفاده شده را نیز بدست آورد. همچنین می توان مقدار نیروی میانگین در طول فرآیند جذب انرژی را نیز توسط نرم افزار فوق بدست آورد و در آخر میزان جذب انرژی توسط سلول (بر حسب ژول) که همان سطح زیر منحنی نیرو- جابجایی است را نیز می توان توسط نرم افزار Q-Mat محاسبه نمود.



شکل ۷- نمودار نیرو- جابجایی مربوط به لوله برنجی



شکل ۶- نمودار نیرو- جابجایی مربوط به لوله آلومینیومی

سرعت بارگذاری در انجام تست های شبه استاتیکی در این تحقیق ۳۰ mm/min می باشد. نمونه ها پس از آماده شدن بین دو صفحه تخت موازی در دستگاه قرار می گیرند. در زمان مچالگی کامل لوله ها، نمودار نیرو- جابجایی سیر صعودی به خود می گیرد و این زمان پایان آزمایش است. بنابراین از روی نمودار نیرو-

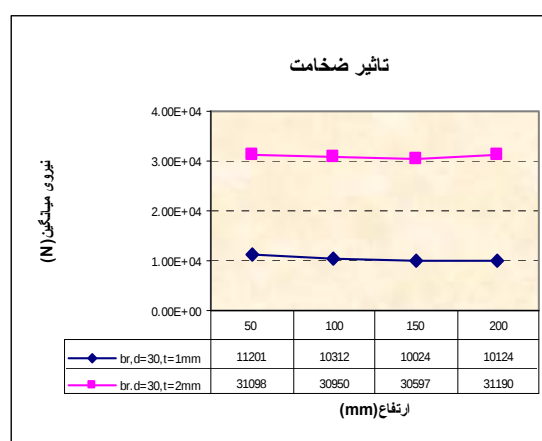
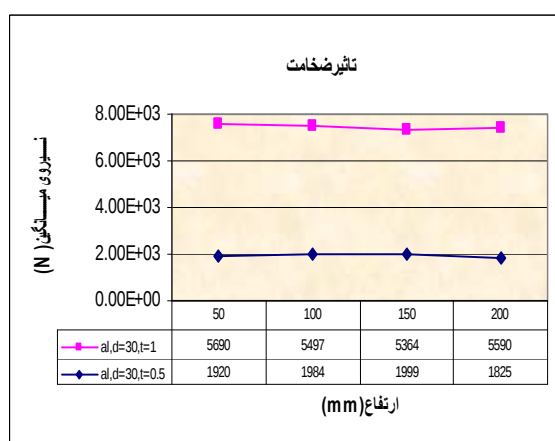
جابجایی که بر روی کامپیوتر کنار دستگاه مشخص است هنگامیکه مقدار نیرو سیر صعودی گرفت بارگذاری قطع می‌گردد. نتایج حاصل از بارگذاری شبه‌استاتیکی در جدول (۱) و (۲) آمده است.

۴- بحث و بررسی نتایج آزمایش‌ها

حال به بررسی تاثیر پارامترهای هندسی و مکانیکی بر روی میزان نیروی لازم جهت فولد می‌پردازیم.

الف) تاثیر ضخامت لوله

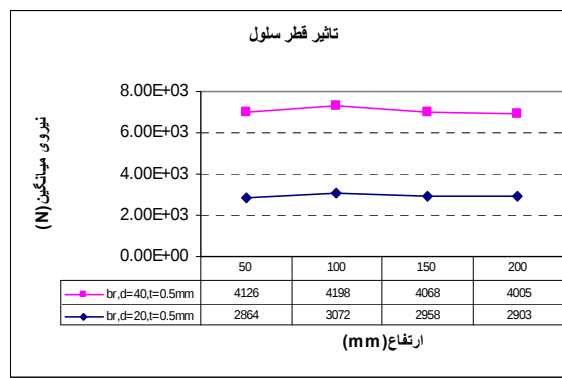
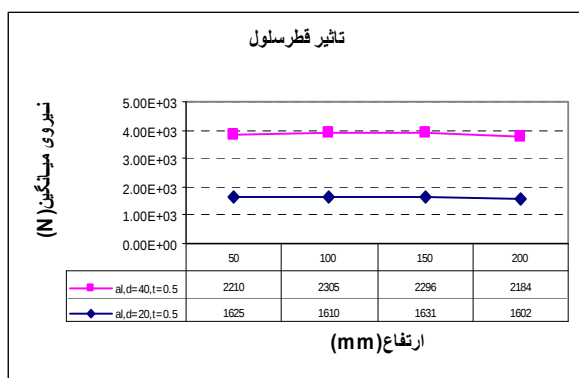
اثر ضخامت لوله‌ها در آزمایش‌های مختلف بر اساس نتایج حاصل از این آزمایش‌ها در جداول (۱) و (۲) مبین آن است که با افزایش ضخامت لوله به میزان ۲ برابر میزان نیروی لهیدگی در حدود ۱۹۶٪ افزایش پیدا می‌کند (شکل ۸).



شکل ۸- تاثیر ضخامت لوله در میزان نیروی میانگین لهیدگی

ب) تاثیر قطر لوله

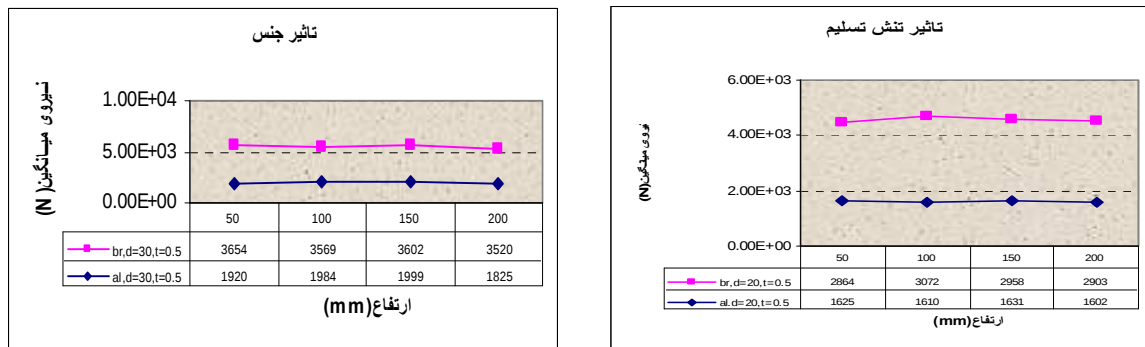
در این بخش آزمایش‌های لازم بر روی نمونه‌ها صورت پذیرفته است. نتایج حاصل از این آزمایش‌ها در جداول (۱) و (۲) آورده شده است. همانگونه که از روی نتایج حاصله نیز مشخص است با افزایش قطر لوله به میزان ۲ برابر میزان نیروی لهیدگی درمورد سازه ۳۹٪ افزایش پیدا می‌کند (شکل ۹).



شکل ۹- تاثیر قطر لوله در میزان نیروی میانگین لهیدگی

ج) تاثیر ارتفاع و تنش تسلیم لوله

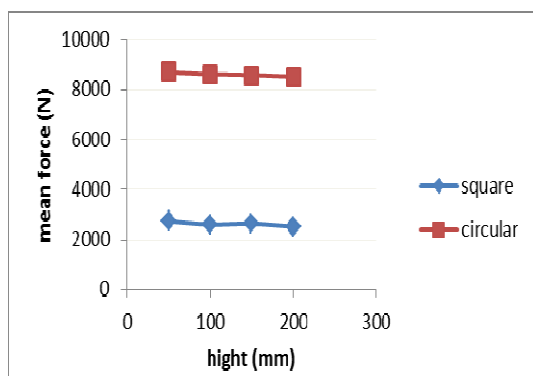
اثر ارتفاع لوله ها و تنش تسلیم دو نمونه مختلف از جنس آلومینیوم و برنج مورد مطالعه قرار گرفته است. همانگونه که از روی نتایج حاصله نیز مشخص است با افزایش تنش تسلیم لوله از آلومینیوم به برنج به میزان ۲۷۶٪ میزان نیروی لهیدگی در حدود ۸۳٪ افزایش پیدا می کند (شکل ۱۰). از طرفی از شکل (۱۰) می توان نتیجه گرفت که افزایش ارتفاع لوله باعث کاهش نیروی لازم جهت فولدینگ می شود که این کاهش بسیار ناچیز و قابل چشم پوشی است.



شکل ۱۰ - تاثیر ارتفاع و تنش تسلیم لوله در میزان نیروی میانگین لهیدگی

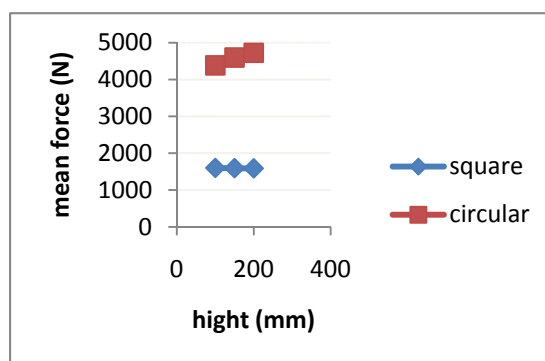
۵- مقایسه سازه های جدار نازک با مقطع مربع و دایره

در ادامه نتایج حاصل از آزمایش های مربوط به لوله های استوانه ای که در جداول (۱) و (۲) آمده با نتایج آزمایش های مشابه مربوط به لوله های مربعی در مرجع [۱۸]، با هم مقایسه می شوند. مقایسه باید زمانی صورت گیرد که حجم یا وزن دو لوله در ارتفاع برابر، یکسان باشند لذا یک سری از آزمایشات مربوط به سازه های استوانه ای و مربعی که در طول برابر کمترین میزان اختلاف در حجم را داشته اند (۱/۱ درصد اختلاف در حجم)، انتخاب و مقایسه شدند (جدول ۳). شکل های (۱۱) الی (۱۶) نمودارهای مربوط به نیروی میانگین فولدینگ، انرژی جذب شده و انرژی جذب شده بر واحد حجم را در ارتفاع های یکسان برای سازه های استوانه ای و مربعی از جنس آلومینیوم و برنج نشان می دهند. مقایسه نشان می دهد که سازه های استوانه ای آلومینیومی و برنجی به ترتیب به طور میانگین ۶۵ و ۶۹/۵ درصد نیروی میانگین، ۵۵/۴ و ۶۸/۲ درصد انرژی جذب شده و ۵۴/۹ و ۶۷/۸ درصد انرژی جذب شده بر واحد حجم سازه بیشتر از سازه های مربعی دارا می باشند. نتایج نشان می دهند که سازه های استوانه ای در مقایسه با سازه های مربعی در حجم تقریباً مشابه نیروی بیشتری را تحمل کرده در نتیجه انرژی بیشتری را جذب می کنند. بنابراین می توان نتیجه گرفت که سازه های استوانه ای جاذب انرژی بهتری نسبت به سازه های مربعی هستند.



شکل ۱۲- مقایسه نیروی میانگین سازه‌های استوانه‌ای و

مربعی بر حسب ارتفاع برای برنج



شکل ۱۱- مقایسه نیروی میانگین سازه‌های استوانه‌ای و

مربعی بر حسب ارتفاع برای آلومینیوم

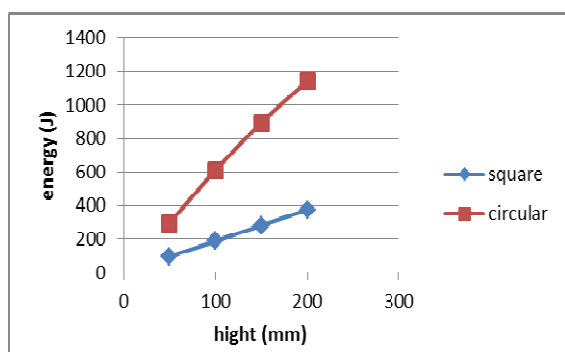
جدول ۳- مقایسه نتایج آزمایش‌های شبه‌استاتیکی سازه‌های جدار نازک آلومینیومی و برنجی

با سطح مقطع‌های مربع و دایره

E/V (J/mm ³)	حجم نمونه (mm ³)	جذب انرژی (E) (J)	نیروی میانگین (F) (N)	ارتفاع (mm)	عرض خارجی (mm)	جنس
0.021814	5900	128.7	1600.1	100	30	Al
0.027661	8850	244.8	1593.4	150	30	Al
0.02122	11800	250.4	1588.1	200	30	Al
0.031729	2950	93.6	2735.3	50	30	Brass
0.031746	5900	187.3	2596.7	100	30	Brass
0.031751	8850	281	2631	150	30	Brass
0.031754	11800	374.7	2502.8	200	30	Brass
0.053704	5966	320.4	4386	100	20	Al
0.051257	8949	458.7	4597	150	20	Al
0.052263	11932	623.6	4726	200	20	Al
0.097955	2983	292.2	8691	50	20	Brass
0.101911	5966	608	8614	100	20	Brass
0.099933	8949	894.3	8578	150	20	Brass
0.09581	11932	1143.2	8501	200	20	Brass

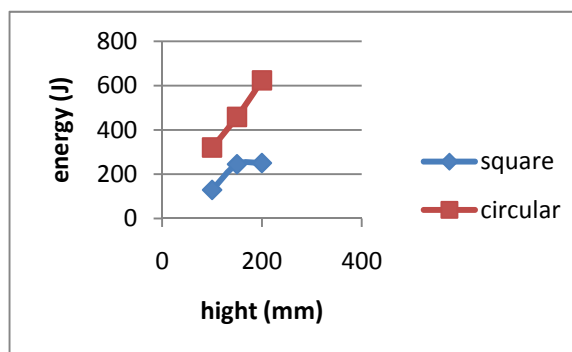
سازه‌های مربعی

سازه‌های استوانه‌ای



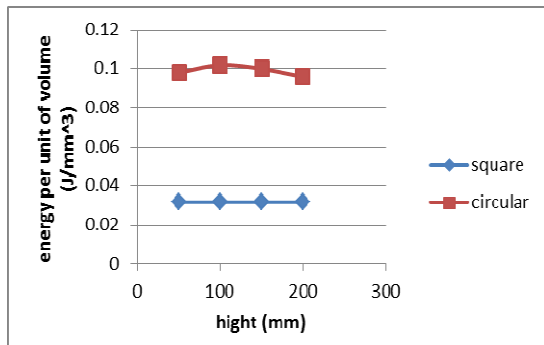
شکل ۱۴- مقایسه انرژی جذب‌شده سازه‌های استوانه‌ای و

مربعی بر حسب ارتفاع برای برنج

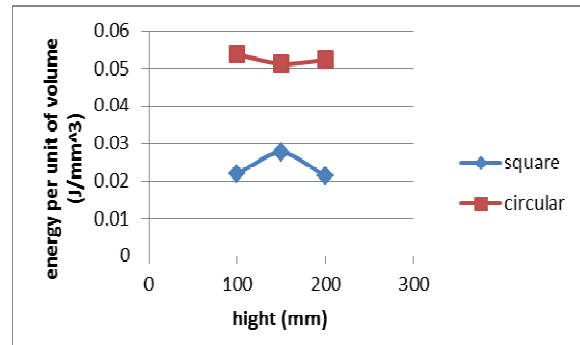


شکل ۱۳- مقایسه انرژی جذب‌شده سازه‌های استوانه‌ای و

مربعی بر حسب ارتفاع برای آلومینیوم



شکل ۱۶- مقایسه انرژی جذب شده بر واحد حجم سازه- های استوانه‌ای و مربعی بر حسب ارتفاع برای برنج



شکل ۱۵- مقایسه انرژی جذب شده بر واحد حجم سازه‌های استوانه‌ای و مربعی بر حسب ارتفاع برای آلومینیوم

۶- اثر بارگذاری دینامیکی (انفجاری) بر سازه جدار نازک برنجی

نظر به اینکه یکی از بهترین روش‌های ایجاد بار دینامیکی، استفاده از موج حاصل از انفجار می‌باشد و همانگونه که در مباحث قبل اشاره گردید در این آزمایش‌ها از انفجار به عنوان بار دینامیکی استفاده شده است. در این قسمت، سازه جدار نازک برنجی تحت بارگذاری انفجاری قرار گرفته و با نتایج استاتیکی و همچنین با آزمایش‌های مربوط به بارگذاری انفجاری بر سازه بتونی [۱۹] مقایسه شده است.

الف) تعیین ماده منفجره و وسایل جانبی آن

ماده مورد استفاده C_4 است که به دلیل خمیری بودن و شکل‌گیری آسان آن بیشتر مد نظر قرار گرفت. معادل وزنی ماده C_4 بر حسب TNT برابر با ۱/۳۷ می‌باشد [۲۰]. چاشنی الکتریکی نمره ۸ برای انجام این آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفته است.

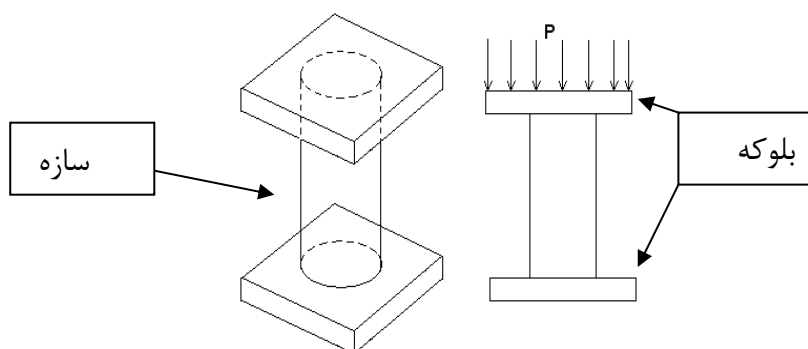
ب) سازه‌های جدار نازک استوانه‌ای از جنس برنج

در این پروژه فقط بارگذاری دینامیکی این سازه‌ها مد نظر بوده است و هدف از انجام آزمایش‌ها بر روی این سازه‌ها بدست آوردن میزان نیروی لازم برای مچالگی آن‌ها در حالت دینامیکی می‌باشد. در حقیقت تاثیر میزان نرخ کرنش بر روی استحکام این سازه‌ها مورد مطالعه قرار خواهد گرفت که در نهایت مقایسه‌ای بین بارگذاری استاتیکی و دینامیکی خواهد بود. ماده مورد استفاده برای آزمایش‌ها از جنس برنج به قطر خارجی ۲۰ mm، ضخامت ۰/۵ mm و ارتفاع ۵۰ mm و تنش تسلیم استاتیکی ۴۲۵ MPa می‌باشد.

ج) نتایج حاصله بر روی سازه‌های جدار نازک استوانه‌ای از جنس برنج

برای این منظور حدود ۲۰ آزمایش انفجار جهت رسیدن به هدف مورد نظر صورت گرفته است که در این آزمایش‌ها ضخامت، قطر و ارتفاع لوله‌های برنجی ثابت و برای بدست آوردن مقدار نیروی مورد نیاز برای لهیدگی سازه، عمل انفجار بر روی دو بلوک انجام شد (شکل ۱۷). البته حدود ۷ آزمایش اولیه جهت رسیدن به مقدار ماده منفجره و فاصله مورد نظر برای ایجاد تک‌فولد انجام شد تا سازه کاملاً له یا مچاله نشود. نتایج

حاصل بر روی نمونه تکی را می‌توان تقریباً برای نمونه‌های گروهی نیز به کار برد. فشار ناشی از انفجار در جرم‌ها و فواصل مختلف از ماده منفجره با استفاده از داده‌های کتاب مرجع [۲۱] موجود است. نتایج آزمایش‌ها در جدول (۴) آورده شده است. در این بخش بررسی تاثیر سطح مقطع‌های متفاوت بر روی لهیدگی سازه، نرخ کرنش‌های تجربی نیز محاسبه شده و با نتایج تست‌های استاتیکی مقایسه خواهند شد. همچنین ضریب افزایش دینامیکی در این سازه‌ها نیز محاسبه می‌شود.



شکل ۱۷- شمایی از بارگذاری انفجاری بر روی سازه‌های جدار نازک برنجی

جدول ۴- نتایج آزمایش‌های مربوط به بارگذاری دینامیکی (انفجاری) بر روی سازه‌های جدار نازک برنجی

تعداد فولد	جابجایی (mm)	فشار اوج P(MPa)	$Z \left(m/kg^{1/3} \right)$	سطح مقطع (mm*m m)	فاصله (m)	ماده منفجره (Kg)	تست
فولد ناقص	1.20	4.6	0.65	90×80	0.20	0.02	B1
1.5	5	3.28	0.55	90×80	0.165	0.02	B2
فولد ناقص	1	4.6	0.65	90×80	0.18	0.015	B3
فولد ناقص	1.1	2.78	0.6	90×80	0.15	0.012	B4
فولد نکرد	0.2	2	0.7	90×80	0.21	0.020	B5
2	7	3.4	0.53	90×80	0.16	0.02	B6
0.5	2.7	2.4	0.65	90×80	0.18	0.015	B7
2	7	2.78	0.6	90×80	0.16	0.015	B8
فولد نکرد	0.3	3.28	0.55	80×80	0.165	0.020	B9
فولد نکرد	0.2	3.4	0.53	80×80	0.15	0.015	B10
2	8	3.9	0.5	80×80	0.14	0.017	B11
1	3.2	2.78	0.6	80×80	0.18	0.02	B12
1	4	3.28	0.55	80×80	0.14	0.015	B13

میزان پارامتر فاصله مقیاس‌بندی شده (Z) که برابر است با فاصله سازه از ماده منفجره (R) تقسیم بر ریشه سوم جرم ماده منفجره ($W^{1/3}$) تأثیر بسیار تعیین‌کننده‌ای در مشخص شدن فشار و دیگر پارامترهای انفجار دارد. کمترین مقدار Z برای آزمایش‌های انجام گرفته بر روی سازه‌های جدار نازک برنجی در

حدود $Z=0/55$ می باشد که بر اساس این مقدار فشار موج انفجار برابر است با $3/28 \text{ MPa}$ یا Kg/cm^2 $33/4$. نکات زیر از آزمایشات بدست آمد:

۱- در یک سطح مقطع یکسان با افزایش مقدار پارامتر Z یا کاهش فشار، میزان لهیدگی یا جابجایی در جهت طولی سازه کم می شود.

۲- بهترین نوع بارگذاری برای ایجاد یک فولد یا لهیدگی بر روی سازه با سطح مقطع $80 \times 90 \text{ mm}^2$ بطور متوسط با $Z=0/56$ قابل دسترسی است در حالیکه برای سطح مقطع با ابعاد $80 \times 80 \text{ mm}^2$ مقدار متوسط $Z=0/5$ نیاز است.

۳- در برخی از آزمایش ها با داشتن شرایط یکسان میزان جابجایی ها متفاوت است علت این امر به خاطر مایل وارد شدن موج انفجار بر روی بلوکه بارگذاری می باشد که باعث پریدن سازه از وسط بلوکه ها می شود و گاهی هیچ جابجایی بر روی سازه دیده نمی شود. در شکل (۱۸) سازه های جدار نازک تحت آزمایش های مختلف نشان داده شده اند.



شکل ۱۸- سازه های جدار نازک برنجی تحت آزمایش های انفجار

د- محاسبه ضریب افزایش دینامیکی^۱

مقایسه بین فشارهای دینامیکی ناشی از انفجار و فشارهای استاتیکی جهت بدست آوردن میزان افزایش استحکام ماده در برابر بارهای دینامیکی در جدول ۵ داده شده است. فشار دینامیکی با داشتن مقدار Z از داده های [۲۱] بدست می آید و برای بدست آوردن فشار استاتیکی بصورت زیر عمل می کنیم:

$$A = 2\pi r t \quad (۱)$$

$$F_y = A \cdot \sigma \quad (۲)$$

r و t به ترتیب شعاع و ضخامت لوله برنجی هستند و σ استحکام تسلیم برنج می باشد. پس از جایگذاری پارامترهای مربوطه مقدار نیروی لازم برای تسلیم لوله بدست می آید.

$$F_y = 13350 \text{ N} \quad (۳)$$

حال بسته به اندازه بلوک مورد استفاده برای بارگذاری بر روی لوله، فشار استاتیکی محاسبه می شود که این مقادیر در جدول (۵) آمده است.

^۱ Dynamic increase factor

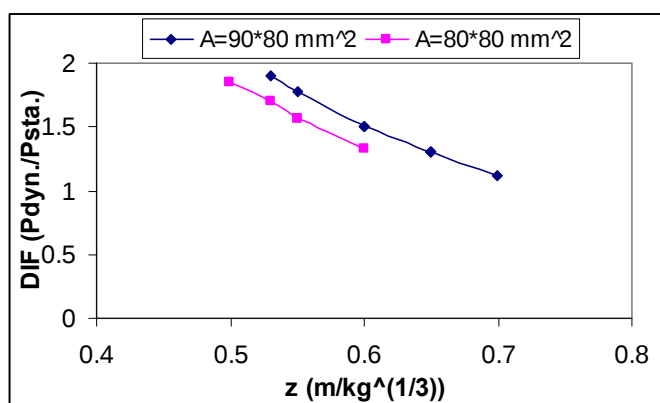
در شکل (۱۹) تحلیل نتیجه جدول (۵) نشان داده شده است. در این شکل تاثیر پارامتر فاصله مقیاس بندی شده و سطح مقطع های متفاوت بر روی مقادیر ضریب افزایش دینامیکی تحلیل شده است. نتایج زیر حاصل شده است:

۱- در یک سطح مقطع یکسان، با افزایش Z ، ضریب افزایش دینامیکی کاهش پیدا می کند توجه این پدیده به خاطر وارد شدن نیرو در زمان طولانی می تواند باشد زیرا برای ایجاد عمل لهیدگی با فشار کم زمان زیادی نیاز است.

جدول ۵- محاسبه ضریب افزایش دینامیکی در سازه های جدار نازک برنجی

تست	سطح مقطع (mm*mm)	Z ($m/kg^{1/3}$)	فشار انفجار (MPa) P_{Dyn}	فشار استاتیکی (MPa) P_{Sta}	$DIF = \frac{P_{Dyn.}}{P_{Sta.}}$
B1	90×80	0.65	2.4	1.85	1.3
B2	90×80	0.55	3.3	1.85	1.78
B3	90×80	0.65	2.4	1.85	1.3
B4	90×80	0.6	2.8	1.85	1.5
B5	90×80	0.7	2.06	1.85	1.12
B6	90×80	0.53	3.65	1.85	1.9
B7	90×80	0.65	2.4	1.85	1.3
B8	90×80	0.6	2.8	1.85	1.5
B9	80×80	0.55	3.3	2.1	1.57
B10	80×80	0.53	3.65	2.1	1.7
B11	80×80	0.5	3.9	2.1	1.85
B12	80×80	0.6	2.8	2.1	1.33
B13	80×80	0.55	3.3	2.1	1.57

۲- برای سطح مقطع های متفاوت، در Z یکسان، سطح مقطع بزرگتر دارای ضریب افزایش دینامیکی بالاتری می باشد. چون سطح مقطع بزرگتر در Z یکسان، دارای نیروی اعمالی بالایی نسبت به سطح مقطع کوچکتر می باشد در نتیجه در زمان یکسان از بارگذاری دارای نرخ بارگذاری بالایی خواهد بود و نرخ بارگذاری بالا نرخ کرنش را بالا برده و همانطور که می دانیم با افزایش نرخ کرنش مقادیر ضریب افزایش دینامیکی نیز افزایش پیدا می کند.



شکل ۱۹- تاثیر پارامتر Z و سطح مقطع های متفاوت بر روی مقادیر ضریب افزایش دینامیکی

و) محاسبه نرخ کرنش

جهت محاسبه نرخ کرنش، ابتدا با داشتن مقدار طول جابجایی یا لهیدگی در هر آزمایش برای سازه‌ها و تقسیم آن به طول اولیه سازه که برابر با 50 mm می‌باشد، مقدار کرنش متوسط حساب می‌شود و از طرفی با استفاده از جداول مرجع [۲۱] زمان اعمال بار انفجار برای مواد منفجره در شرایطی که در آزمایش‌ها اعمال شده است تقریباً برابر با $100 \mu\text{s}$ بدست می‌آید لذا با تقسیم کرنش به زمان بارگذاری نرخ کرنش متوسط حاصل می‌شود. در جدول (۶) نتیجه این محاسبات آورده شده است.

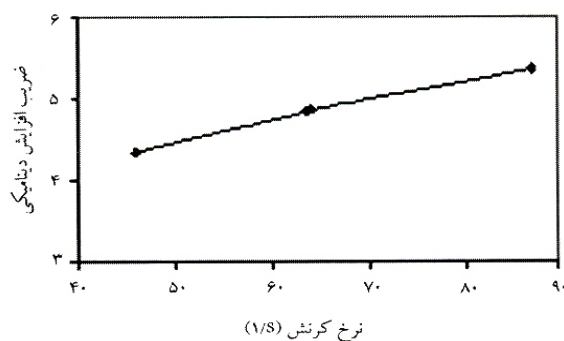
در شکل (۲۰) تحلیل نتیجه جدول (۶) نشان داده شده است. در این شکل تاثیر نرخ کرنش بر روی مقادیر ضریب افزایش دینامیکی تحلیل شده است. نتایج زیر حاصل شده است:

۱- با افزایش نرخ کرنش ضریب افزایش دینامیکی، افزایش پیدا می‌کند و این ضریب برای برنج بین $1/3$ تا $1/8$ در نوسان است.

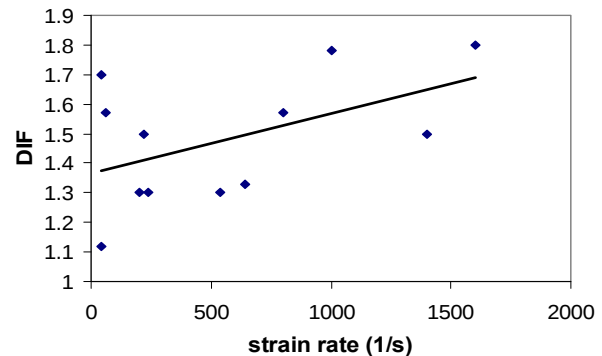
۲- درمقایسه با نمودار نرخ کرنش بر حسب DIF برای بتون (شکل ۲۱)، ضریب افزایش دینامیکی در بتون حدود ۳ تا ۴ برابر بیشتر از سازه برنجی می‌باشد.

جدول ۶- محاسبه نرخ کرنش

تست	Z ($m/kg^{1/3}$)	جابجایی (mm)	کرنش (mm/mm)	نرخ کرنش تجربی $\dot{\epsilon}$	$\frac{P_{Dyn.}}{P_{Sta.}}$ DIF _{exp}
B1	0.65	1.20	0.024	240	1.3
B2	0.55	5	0.1	1000	1.78
B3	0.65	1	0.02	200	1.3
B4	0.6	1.1	0.022	220	1.5
B5	0.7	0.2	0.004	40	1.12
B6	0.53	7	0.14	1400	1.9
B7	0.65	2.7	0.054	540	1.3
B8	0.6	7	0.14	1400	1.5
B9	0.55	0.3	0.006	60	1.57
B10	0.53	0.2	0.004	40	1.7
B11	0.5	8	0.16	1600	1.85
B12	0.6	3.2	0.064	640	1.33
B13	0.55	4	0.08	800	1.57



شکل ۲۱- رابطه بین نرخ کرنش و ضریب افزایش دینامیکی برای بتون [۱۹]



شکل ۲۰- رابطه بین نرخ کرنش و ضریب افزایش دینامیکی برای برنج

ه) مقایسه با رابطه کاپر- سایموند

در معادله ارائه شده توسط کاپر- سایموند رابطه بین نرخ کرنش و ضریب افزایش دینامیکی به صورت زیر تعریف شده است:

$$DIF = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{D} \right)^{1/q} \quad (۴)$$

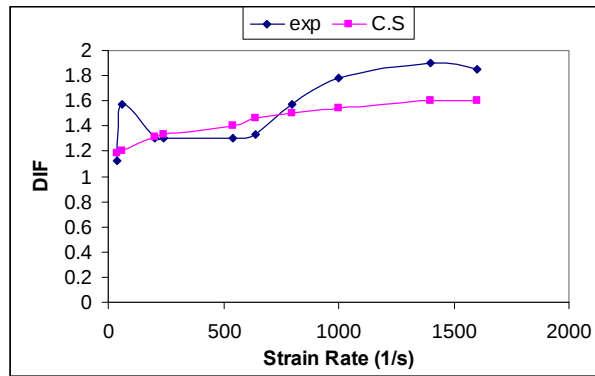
که q, D به نوع سازه بستگی دارند و مقادیر آن‌ها از جداول موجود قابل محاسبه است. با فرض داشتن نرخ کرنش و مقادیر ثابت معادله $q=4$ و $D=6500$ ، مقادیر ضریب افزایش دینامیکی DIF قابل محاسبه است. در جدول (۷) نتیجه محاسبات با نتایج تجربی مقایسه شده است و حاصل آن بوسیله نمودار شکل (۲۲) تحلیل گردیده است.

خطای بین نتایج تجربی و نتایج حاصل از فرمول کاپر- سایموند بین ۵ تا ۳۰ درصد بدست آمده است که از جمله عوامل خطاساز می‌توان به ثوابت q, D و همچنین نرخ کرنش‌های محاسبه شده بصورت تجربی اشاره کرد.

جدول ۷- مقایسه نتایج تجربی و تحلیلی ضریب افزایش دینامیکی

در صد خطا %	$DIF_{cs}^* = \frac{P_{Dyn.}}{P_{Sta.}}$	$DIF_{exp} = \frac{P_{Dyn.}}{P_{Sta.}}$	نرخ کرنش تجربی $\dot{\epsilon}$	$z (m/kg^{1/3})$	تست
2	1.33	1.3	240	0.65	B1
14	1.54	1.78	1000	0.55	B2
1	1.31	1.3	200	0.65	B3
12	1.32	1.5	220	0.6	B4
0.5	1.18	1.12	40	0.7	B5
16	1.6	1.9	1400	0.53	B6
8	1.4	1.3	540	0.65	B7
7	1.6	1.5	1400	0.6	B8
24	1.2	1.57	60	0.55	B9
31	1.18	1.7	40	0.53	B10
14	1.6	1.85	1600	0.5	B11
10	1.46	1.33	640	0.6	B12
5	1.5	1.57	800	0.55	B13

^۱ با استفاده از فرمول کاپر- سایموند



شکل ۲۲- مقایسه بین معادله کاپر- سایموند و نتایج تجربی برای ضریب افزایش دینامیکی

۷- مقایسه سازه بتونی و جدار نازک از جنس برنج

نظر به اهمیت سازه های بتونی در استفاده در برابر موج های تخریبی حاصل از انفجار در ادامه این تحقیق بر آن بوده تا مقاومت سازه های سلولی جاذب انرژی (مد نظر این تحقیق) با سازه های بتونی مقایسه گردند.

الف) مقایسه بین دو سازه بتونی و سازه جدار نازک از نقطه نظر حجمی

با توجه به معلوم بودن حجم سازه بتونی و با این فرض که می توان نتایج حاصل از بارگذاری بر روی سازه جدار نازک تکی را به چند تایی نیز تعمیم داد لذا نسبت نیرو به حجم بین دو سازه قابل محاسبه است. برای سازه بتونی با ضخامت ۵ سانتیمتر و ابعاد ۳۰×۲۰ سانتیمتر مربع که در تست ۴-۵-B از جدول (۸) آمده است مقدار فشار لازم برابر با ۱۱ MPa می باشد که نیرویی برابر با ۶۶۰ KN را به سازه بتونی وارد می کند. نسبت نیرو به حجم برای سازه بتونی برابر خواهد شد با:

$$\left(\frac{F}{V}\right)_{concrete} = 0.22 \frac{N}{mm^3} \quad (5)$$

برای سازه جدار نازک برنجی، با توجه به مقدار فشار لازم برای لهیدگی یک نمونه تکی از جدول (۴)، می توان مقدار فشار مورد نیاز برای نمونه های چند تایی را بدست آورد. برای این منظور برای اینکه مقایسه ای نیز با سازه بتونی صورت گیرد ابعاد سازه جدار نازک را نزدیک به ابعاد بتون در نظر می گیریم پس در جهت ضلع ۳۰ سانتیمتری ۱۵ عدد سازه جدار نازک به ارتفاع ۵ سانتیمتر و قطر ۲ سانتیمتر قرار داده می شود و در جهت ضلع ۲۰ سانتیمتر ۱۰ عدد از این سازه ها کنار هم قرار می گیرند. بنابراین با این چیدمان ۱۵۰ عدد از این سازه ها به کار برده می شوند که نیروی مورد نیاز برای لهیدگی آن ها در حدود ۱۵۰ برابر حالت تکی خواهد بود. در حالیکه از بلوک ۸۰×۹۰ mm² استفاده کنیم برای آزمایش B2 از جدول (۴) مقدار نیرو برابر خواهد شد با:

$$F = P_{Dyn} \times 80 \times 90 = 3.3 \times 80 \times 90 = 23760 N \quad (6)$$

برای چیدمان ۱۵۰ تایی مقدار نیروی مورد نیاز ۱۵۰ برابر حالت تکی خواهد شد و مقدار آن برابر با ۳۵۶۴ KN می شود. لذا نسبت نیرو به حجم، با توپر فرض کردن داخل سازه (حجم ظاهری) برابر خواهد شد با:

$$\left(\frac{F}{V}\right)_{\text{cellular}} = \frac{3564}{200 \times 300 \times 50} = 1.188 \text{ N/mm}^3 \quad (7)$$

نسبت نیرو به حجم با فرض توخالی فرض کردن سازه (حجم واقعی) برابر خواهد شد با:

$$\left(\frac{F}{V}\right)_{\text{cellular}} = \frac{3564}{150 \times (2\pi r h)} = \frac{3564}{150 \times 2\pi \times 10 \times 0.5 \times 50} = 15.13 \text{ N/mm}^3 \quad (8)$$

که در فرمول اخیر r ، شعاع لوله برنجی، t ضخامت دیواره لوله و h ارتفاع آن می‌باشد. با توجه به نتایج حاصله برای هر دو سازه از نقطه نظر حجمی چنین می‌توان نتیجه گرفت که سازه بتونی در مقایسه با سازه برنجی نیروی کمتری در واحد حجم برای شکسته شدن نیاز دارد. بنابراین سازه برنجی نیروی بیشتری در واحد حجم نسبت به بتون جذب می‌کند. که این میزان جذب در سازه جدار نازک با فرض حجم ظاهری، $5/4$ برابر سازه بتونی، و با فرض حجم واقعی، $6/5$ برابر سازه بتونی می‌باشد.

جدول ۸- نتایج آزمایش انفجار مربوط به سازه بتونی [۱۹]

تست	ماده منفجره (Kg)	فاصله (m)	$Z (m/kg^{1/3})$	فشار اوج P (MPa)	فاصله تکیه گاهها	ملاحظات
A-4-1	0.03	0.2	0.58	3	0.245	ترک خورد
A-4-2	0.03	0.21	0.6	2.78	0.245	ترک نخورد
A-4-3	0.03	0.19	0.55	3.28	0.245	ترک خورد
A-3.5-1	0.03	0.2	0.58	3	Back Support	ترک نخورد
B-5-1	0.03	0.15	0.43	5	0.245	ترک خورد
B-5-2	0.03	0.15	0.43	5	Back Support	ترک نخورد
B-5-3	0.03	0.1	0.29	10	Back Support	ترک نخورد
B-5-4	0.04	0.1	0.26	11	Back Support	ترک خورد
C-4-1	0.03	0.17	0.50	3.9	0.245	ترک نخورد
C-4-2	0.03	0.18	0.52	3.5	0.245	ترک خورد
C-4-3	0.03	0.09	0.26	11	0.15	ترک نخورد
C-4-4	0.03	0.10	0.29	10	0.15	ترک خورد
D-2-1	0.1	0.3	0.58	3	0.245	متلاشی شد
D-4-1	0.03	0.17	0.50	3.9	0.245	ترک خورد
D-5-1	0.03	0.07	0.20	15.5	0.15	ترک نخورد
D-5-2	0.03	0.075	0.21	14.5	0.15	ترک خورد
E-5-1	0.02	0.13	0.37	6	0.245	ترک نخورد
E-5-2	0.03	0.12	0.35	7.1	0.245	ترک خورد
E-5-3	0.03	0.14	0.40	5.75	0.245	ترک خورد
E-4-1	0.03	0.15	0.43	5	0.1	ترک نخورد
E-3-1	0.03	0.1	0.29	10	Back Support	ترک خورد

ب) مقایسه بین دو سازه بتونی و سازه جدار نازک از نقطه نظر وزنی

با نیروهایی که در بخش قبلی محاسبه شد و با مشخص بودن چگالی هر کدام از سازه‌ها نسبت نیرو به وزن را بدست می‌آوریم. چگالی بتون برابر با 2300 Kg/m^3 و چگالی برنج برابر با 8300 Kg/m^3 می‌باشد. نسبت نیرو به وزن در سازه بتونی برابر است با:

$$\left(\frac{F}{\rho.V}\right)_{concrete} = \frac{660}{2300 \times 0.2 \times 0.3 \times 0.05} = 95.652 \quad KN/Kg \quad (9)$$

نسبت نیرو به وزن سازه برنجی برابر است با:

$$\left(\frac{F}{\rho.V}\right)_{cellular} = \frac{3564}{8300 \times (2\pi \times 0.1 \times 0.0005 \times 0.05) \times 150} = 182.24 \quad KN/Kg \quad (10)$$

با مقایسه اعداد حاصله برای دو سازه در حالت نسبت نیرو به وزن ملاحظه می شود که نیروی بیشتری برای لهیدگی سازه جدار نازک نسبت به سازه بتونی در یک وزن ثابت نیاز است. که این نسبت بیان کننده دو برابر شدن جذب نیروی سازه برنجی نسبت به سازه بتونی در یک جرم ثابت می باشد.

بنابراین چنین نتیجه گیری می شود که سازه جدار نازک برنجی در مقایسه با سازه بتونی جذب انرژی بیشتری را دارا می باشد. همچنین سازه های جدار نازک با وزن کم تر (سبک بودن) و اشغال فضای کم تر در مقایسه با سازه بتونی همان کارایی را می توانند از خود نشان دهند.

نتیجه گیری

همانگونه که از نتایج آزمایش ها برمی آید، تأثیر ضخامت بر میزان جذب انرژی از پارامترهای قطر و تنش تسلیم بیشتر است. افزایش ضخامت سلول ها به میزان زیادی سبب افزایش میزان جذب انرژی می شود. افزایش قطر و تنش تسلیم نیز سبب افزایش میزان جذب انرژی می شود به همین دلیل سازه برنجی جاذب انرژی بهتری نسبت به سازه آلومینیومی است. افزایش ارتفاع سلول باعث کاهش نیروی لازم جهت فولدینگ می شود که این کاهش بسیار ناچیز است.

از مقایسه شکل مقطع لوله در این آزمایشات نتیجه می شود که سازه های استوانه ای آلومینیومی و برنجی به ترتیب به طور میانگین ۶۵ و ۶۹/۵ درصد نیروی میانگین، ۵۵/۴ و ۶۸/۲ درصد انرژی جذب شده و ۵۴/۹ و ۶۷/۸ درصد انرژی جذب شده بر واحد حجم سازه بیشتر از سازه های مربعی دارا می باشند. به همین دلیل بهتر است از لوله های استوانه ای به عنوان جاذب انرژی استفاده شود.

از آزمایش های بارگذاری دینامیکی (انفجاری) بر سازه جدار نازک برنجی و سازه بتونی نتایج زیر حاصل می شود:

۱- در یک سطح مقطع یکسان، با افزایش Z، ضریب افزایش دینامیکی کاهش پیدا می کند. در Z یکسان، برای سطح مقطع های مختلف، سطح مقطع بزرگتر دارای ضریب افزایش دینامیکی بالاتری می باشد.

۲- با افزایش نرخ کرنش، ضریب افزایش دینامیکی افزایش پیدا می کند و در مقایسه با سازه بتونی، ضریب افزایش دینامیکی در بتون حدود ۳ تا ۴ برابر بیشتر از سازه برنجی است.

۳- خطای بین نتایج حاصل از فرمول کاپر- سایموند و نتایج تجربی برای ضریب افزایش دینامیکی بین ۵ تا ۳۰ درصد بدست آمد که از جمله عوامل خطا ساز می توان به D، q و همچنین نرخ کرنش های محاسبه شده بصورت تجربی اشاره کرد.

۴- سازه برنجی نیروی بیشتری در واحد حجم نسبت به سازه بتونی جذب می‌کند که این میزان جذب در سازه جدار نازک با فرض حجم ظاهری، $5/4$ برابر سازه بتونی، و با فرض حجم واقعی، 65 برابر سازه بتونی می‌باشد.

۵- سازه برنجی نسبت به سازه بتونی به نیروی لهیدگی بیشتری در واحد وزن نیاز دارد که این نسبت بیان‌کننده دو برابر شدن جذب سازه برنجی نسبت به سازه بتونی در یک جرم ثابت می‌باشد.

مراجع

- [1] Pugsley, A.G., and Maccaulay, M., "The Large-Scale Crumpling of Thin Cylindrical Columns", Quarterly J. Mech. Appl. Math. Vol. 13, No.1, pp. 1-9, (1960).
- [2] Al-Hassani, S.T.S., Johnson, W., and Lowe, W.T., "Characteristics of Inversion Tube under Axial Loading", J. Mech. Engng. Sci. Vol. 14, No. 6, pp. 370-381, (1972).
- [3] Alexander, J.M., "An Approximate Analysis of the Collapse of Thin Circular Shell under Axial Loading", Quarterly Journal of Mechanic and Applied Mathematic, Vol. 13, No. 1, pp. 10-15, (1983).
- [4] Mamalis, A.G., and Johnson, W., "The Quasi-static Crumpling of Thin Walled Circular Cylinder and Frusta under Axial Compression", Int. J. Mech. Sci. Vol. 25, No. 9, pp. 713-732, (1983).
- [5] Andrews, K.R.F., England, G.L., and Ghani, E., "Classification of the Axial Collapse of Cylindrical Tubes under Quasi-static Loading", Int. J. Mech Sci, Vol. 25, No. 9, pp. 687-696, (1983).
- [6] Wierzbicki, T., and Abramowicz, W., "On the Crushing Mechanics of Thin-walled Structures", Journal of Applied Mechanics, Vol. 50, No. 4a, pp. 727-734, (1983).
- [7] Reid, S.R., Reddy, T.Y., and Gray, M.D., "Static and Dynamic Axial Crushing of Foam-filled Sheet Metal Tubes", International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 28, No. 5, pp. 295-322, (1986).
- [8] Reddy, T.Y., and Wall, R.J., "Axial Compression of Foam-filled Thin-walled Circular Tubes", International Journal of Impact Engineering, Vol. 7, No. 2, pp. 151-166, (1988).
- [9] Mamalis, A.G., Manolakos, D.E., Viegelman, G.L., and Johnson, W., "Energy Absorption and Deformation Modes of Thin PVC Tubes Internally Grooved when Subjected to Axial Plastic Collapse", Int. J. Proceedings of the Institution of Mechanical Engng, Vol. 203, pp. 1-8, (1989).
- [10] Mamalis, A.G., Manolakos, D.E., Demosthenouse, G.A., and Johnson, W., "Axial Plastic Collapse of Thin Bi-Material Tubes as Energy Dissipating Systems", Int. J. Impact Engng, Vol. 11, No. 2, pp. 185-196, (1991).

- [11] Wierzbicki, T., Bhat, S.U., Abramowicz, W., Brodtkin, D., and Alexander Revisited, "A Two Folding Elements Model of Progressive Crushing of Tubes", Int. J. Solids Struct. Vol. 29, No. 24, pp. 269-288, (1992).
- [12] Reiad, S.R., "Plastic Deformation Mechanisms in Axially Compressed Metal Tubes used as Impact Energy Absorbers", Int. J. Mech. Engng. Sci. Vol. 35, No. 12, pp.1035-1052, (1993).
- [13] Abramowicz, W., and Jones, N., "Transition From Initial Global Bending to Progressive Buckling of Tubes Loading Statically and Dynamically", Int. J. Impact. Engng. Vol. 19, No. 5, pp. 415-437, (1997).
- [14] Singace, A.A., and El-Sobky, H., "Behavior of Axially Crushed Corrugated Tubes", Int. J. of Mech. Sciences, Vol. 39, No. 3, pp. 249-268, (1997).
- [15] Guillow, S.R., LU, G., and Grzebiet, R.H., "Quasi-static Axial Compression of Thin-walled Metal Tubes", Int. J. Mech. Sci. Vol. 43, No. 9, pp. 2103-2123, (2001).
- [16] Ren, W., and Minagbao. H., "An Experimental Study on the Dynamic Axial Plastic Buckling of Cylindrical Shells", Int. J. Impact. Engng. Vol. 1, No. 3, pp. 249-256, (1983).
- [17] Abramowicz, W., and Jones, N., "Dynamic Axial Crushing of Circular Tubes", International Journal of Impact Engineering, Vol. 2, No. 3, pp. 263-281, (1984).
- [۱۸] حسینی، س.و.، زمانی، ج.، درویشه، ا. و سلیمانی، م.، "تحلیل تجربی و عددی تأثیر پارامترهای هندسی و مکانیکی بر نیروی لهیدگی جاذب‌های انرژی چهارگوش تحت بارگذاری محوری"، مجله علمی پژوهشی مکانیک و هوافضا، جلد ۲، شماره ۲، آذر (۱۳۸۵).
- [۱۹] زمانی، ج.، رفاهی اسکویی، ا.، "تحلیل تجربی تأثیرات نرخ کرنش بر رفتار سازه‌های بتونی در بارگذاری-های حاصل از موج انفجار و معرفی یک مدل ریاضی جدید رفتاری بتون"، مجله علمی پژوهشی شریف، شماره ۴۸، خرداد (۱۳۸۸).
- [20] Michael, M., and Swisdak, J., "Explosion Effects and Properties", Part 1: Explosion Effects in Air, Naval Surface Weapon Center, Report No. TR-75-116, (1975).
- [21] Kinney, G. F., and Graham, K. J., "*Explosive Shocks in Air*", Springer-Verlag, New York, NY, Second Edition, (1985).

فهرست نمادهای انگلیسی

A: سطح مقطع لوله برنجی

DIF: ضریب افزایش دینامیکی

F: نیروی لهیدگی

F_y : نیروی تسلیم استاتیکی لوله برنجی

h : ارتفاع لوله برنجی

P_{dyn} : فشار دینامیکی

P_{sta} : فشار استاتیکی

r : شعاع لوله برنجی

t : ضخامت دیواره لوله برنجی

V : حجم

Z : فاصله مقیاس بندی شده

نمادهای یونانی

ε : نرخ کرنش

ρ : چگالی

Abstract

In most of engineering structures, specially moving structures and in general in structures under dynamic and static loadings, energy absorber systems are used for preventing or reducing damages. In this paper after doing up to 90 tests, the effects of geometrical parameters such as thickness, diameter and height of structures also mechanical parameter of yield stress in structure on value of folding force in out of plane loading is investigated. Subsequently, circular tube is compared with square tube and also concrete structure in amount of energy absorption.