

بررسی تجربی اثر نرخ کرنش بر تغییر شکل و شکست پوسته‌های جدار نازک فلزی تحت بارگذاری انفجاری

جمال زمانی^۱، امین ضمیری^۲، احسان یآوری^۳

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی

دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۰۴/۲۵

پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۰۸/۰۹

چکیده

در این مقاله بررسی تجربی رفتار سازه‌های جدار نازک حامل مواد منفجره، مدنظر قرار گرفته است، مهم‌ترین بخش از پژوهش حاضر، تعیین اثر نرخ کرنش بر محدوده 10^{-4} تا 10^{+5} (S^{-1})، بر روی حداکثر تغییر شکل سازه است. برای بارگذاری‌های شبه استاتیکی و دینامیکی با نرخ کم (10^{-4} تا 1 (S^{-1}))، از سامانه هیدرواستاتیکی استفاده شده است. و برای بارگذاری با نرخ دینامیکی زیاد (10^4 تا 10^{+5} (S^{-1}))، از آزمایش‌های انفجار استفاده شده است. سازه مورد استفاده در آزمایش‌ها، آلومینیم با ضخامت سه میلیمتر با سه طول متفاوت از ۱۷ تا ۳۴ سانتیمتر است. به لحاظ اطمینان از صحت نتایج آزمایش‌ها، انجام سه بار آزمایش مدنظر قرار گرفت. در نهایت مقدار فشار لازم، برای ماکزیم تغییر شکل، در حالت‌های بارگذاری متفاوت، مشخص و مقایسه شده است. نتایج مبین افزایش فشار ماکزیم و مدر بارگذاری‌های دینامیکی به شبه استاتیکی با نسبت ۱/۵۷ تا ۱/۸۱ است قطعاً تغییر در رفتار سازه، مبین حساس بودن جنس آن، به نرخ بارگذاری است، و این به معنای آن است که، افزایش در نرخ کرنش، باعث افزایش تنش تسلیم ماده خواهد شد، که این افزایش در تنش تسلیم در این تحقیق به صورت کامل مشخص شده است.

کلید واژه

نرخ کرنش، پوسته حامل سازه سرچنگی، کرنش شکست دینامیکی، رابطه کوپرسایموند.

مقدمه

سازه تعریف و محاسبه کرد و ضمن ارایه معادله حرکت دیواره پوسته تحت فشار داخلی، با معرفی رژیم‌های پلاستیک مربوط به هر کدام، تغییر شکل ایجاد شده در دیواره سازه را در غالب فازهای حرکت مجزا بررسی کرد و نهایتاً روابطی به منظور محاسبه ماکزیم تغییر شکل ایجاد شده در دیواره پوسته ارایه کرد.

جونز و والتر برای اولین بار با طراحی یکسری آزمایش‌ها به مقایسه بین تحلیل‌های تئوری و تجربی بروی رفتار دینامیک-پلاستیک پوسته‌ها پرداختند [۳]. مکنزی و همکارانش منحنی‌هایی را بر اساس داده‌های تجربی، طراحی و ارائه کردند که به پیش‌بینی اثر انفجار در درون پوسته‌های استوانه‌ای بسته بسیار مفید می‌باشند ولی هیچ تلاشی برای توجیه تئوری بر روی آنها انجام نشد که نهایتاً بنهم و دافی توانستند با استناد به داده‌های تجربی برای پیش‌بینی میزان تغییر شکل ماکزیم پوسته‌های استوانه‌ای بسته تحت بارگذاری انفجاری مدلی تحلیلی ارائه دهند و بیان نمودند که پاسخ تغییر شکل پوسته در اثر بارگذاری انفجاری به دو عامل بارگذاری یکی ضربه اولیه و دیگری فشار تعادلی بستگی دارد [۴ و ۵]. در ادامه جونز این مسئله را به صورت تحلیلی و با استفاده از مدل

امروزه آزمایش‌های روی پوسته‌های جدار نازک تحت بارگذاری‌های داخلی و آنالیز رفتار این پوسته‌ها در حالت استاتیکی و دینامیکی از اهمیت زیادی برخوردار است. کاربرد فراوان سازه‌های جدار نازک از جنس‌های مختلف در صنایع اتومبیل‌سازی، صنایع هوایی و نظامی این اهمیت را بیشتر آشکار می‌سازد. اولین محققانی که رفتار دینامیکی سازه را به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند، منکیز^۱ و اپات^۲ بودند که آزمایش‌های خود را در سال ۱۹۷۳ بر روی تیرهایی از جنس آلومینیوم آلیاژ ۶۰۶۱-T6 انجام دادند [۱]. اولین بار رفتار دینامیک - پلاستیک یک پوسته استوانه‌ای طویل صلب - کاملاً پلاستیک تحت بارگذاری متقارن محوری با توزیع یکنواخت در طول استوانه با نمودار فشار- زمان مستطیلی قرار دارد، توسط هادج^۳ بررسی شد [۲]. وی کمترین بار مورد نیاز برای اینکه یک سازه صلب - پلاستیک دچار تغییر شکل شود را به عنوان بار شکست آن

۱. دانشیار، zamani@kntu.ac.ir (نویسنده مخاطب)

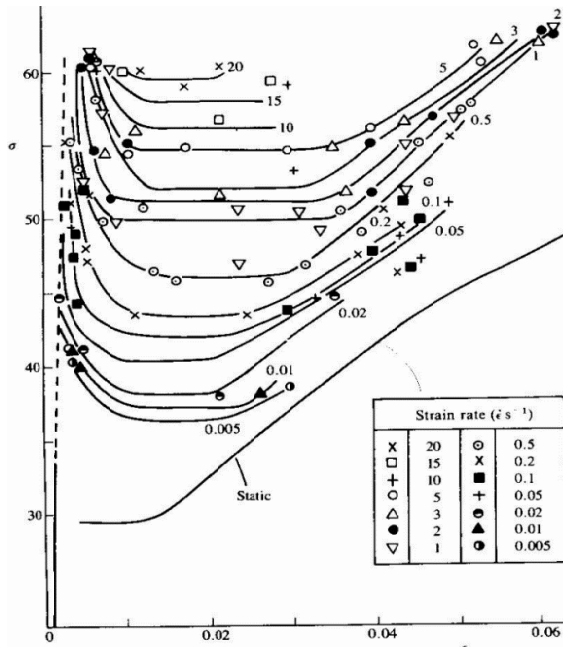
۲. کارشناس ارشد، a.zamiri@globalpetrotech.com

۳. دانشجوی کارشناسی ارشد، ehsanyavari@hotmail.com

برای وارد کردن اثر نرخ کرنش و محاسبه تنش دینامیکی از مدل کوپرسایموند استفاده شده است.

رفتار مواد حساس به نرخ کرنش

شکست دینامیکی ناشی از به کارگیری بارگذاری انفجاری در یک سازه، می تواند به نرخ بارگذاری، وابسته باشد. این مشاهدات، منجر به ایجاد فرضیه حساسیت به نرخ کرنش در مواد می شود. با انجام دو روش بارگذاری (بارگذاری استاتیکی و دیگر بارگذاری دینامیکی)، و با معلوم شدن میزان تغییر فرم ایجاد شده، امکان محاسبه حساسیت جنس سازه در مقابل نرخ کرنش قابل بررسی می باشد. البته دلیل عمده دلیل حساسیت در مقابل نرخ کرنش، افزایش تنش جریان است، با توجه به نمودار شکل (۱) که نمودار تنش-کرنش فولاد ساختمانی برای نرخ کرنش های مختلف را نشان می دهد. می توان دریافت که به طور کلی با افزایش نرخ کرنش استحکام ماده افزایش یافته و می توان از این پدیده به عنوان یک ضریب اطمینان اضافی استفاده کرد. حساسیت نسبت به نرخ کرنش وابسته به جنس ماده می باشد و کاملاً از هندسه سازه مستقل است.



شکل ۱. نمودار تنش-کرنش فولاد ساختمانی

برای نرخ کرنش های مختلف [۶]

روابط کلی بسیاری برای رفتار مواد حساس به نرخ کرنش ارائه گردیده است [۱۴ و ۱۵]. دستیابی به ثوابت مختلف این معادلات، نیازمند آزمایش های تجربی گسترده و دقیق است. مهم ترین رابطه

صلب- کاملاً پلاستیک مورد مطالعه قرار داد [۶]. حاصل کار محققین در این زمینه را می توان در کتاب ارزشمندی که توسط وی جمع آوری شده است یافت.

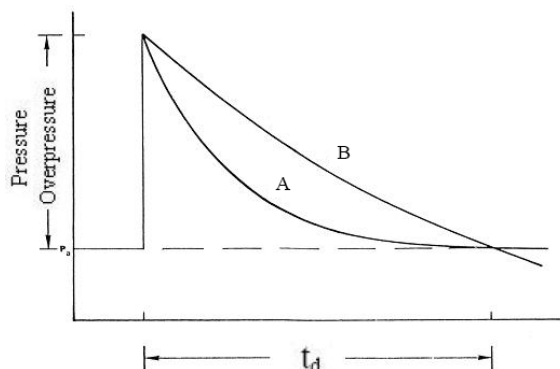
با توجه به پیشرفت تکنولوژی و ساخت تجهیزات تصویربرداری سریع، در سال های اخیر آزمایش های تجربی فراوانی برای مشاهده عینی رفتار پوسته های استوانه ای جدارنازک تحت بارگذاری شدید دینامیکی انجام شده است که از جمله می توان به آزمایش های انجام شده با استفاده از پدیده انفجار توسط بولا^۴ و سینگ^۵ و همکارانشان اشاره کرد [۷ و ۸]. سینگ و همکارانش به صورت تجربی دریافته اند که کرنش شکست با افزایش سرعت انبساط یا نرخ کرنش افزایش می یابد و کرنش شکست ماکزیمم در بعضی از مقادیر نرخ کرنش بحرانی ایجاد می شود. آنها به منظور ثبت روند تغییر شکل سازه نسبت به زمان، از روش عکسبرداری سریع^۶ و رادیوگرافی^۷ استفاده کردند.

چائو^۸ و شیفر^۹ ضمن انجام مطالعات گسترده، به مقایسه انواع بارگذاری های استاتیکی با دینامیکی توسط انفجار روی پوسته های استوانه ای پرداختند [۹]. همچنین کووآبارا^{۱۰} و همکارانش با استفاده از یک دستگاه بارگذاری داخلی به بررسی رفتار پوسته های جدارنازک فولادی پرداختند و منحنی های تنش-کرنش آلیاژهای مورد بررسی را استخراج کردند [۱۰].

با توجه به پیچیدگی های موجود، در سال های اخیر از روش های عددی (با کمک نرم افزارهای عددی همانند ABAQUS, LSDYNA, ...) برای تحلیل پاسخ دینامیکی سازه های تحت انفجار به طور روز افزونی، استفاده می شود روش عددی، روش بهتر و کارآمدتری برای تخمین پاسخ سازه می باشد. در همین راستا مارتینو^{۱۱} و همکارانش مطالعات آزمایشگاهی خود را بر روی انبساط و شکست پوسته های استوانه ای مسی در دو نوع نازک و ضخیم انجام دادند و نتایج تجربی را با تحلیل های عددی بر گرفته از نرم افزار ABAQUS مقایسه کردند و همچنین لانگ^{۱۲} و همکارانش مدل های مختلف المان محدود را جهت اعمال اثرات نرخ کرنش بر روی پوسته ها بررسی نمودند [۱۱ و ۱۲].

برای افزایش دقت پیش بینی های تحلیلی از رفتار سازه، باید پدیده حساسیت به نرخ کرنش و اثر آن بر رفتار ماده و سازه مورد توجه قرار گیرد. رفتار مواد تابعی از نرخ بارگذاری وارد بر آنها می باشد. برای وارد کردن اثر نرخ کرنش، مدل های مختلفی ارائه شده اند، که از آن جمله می توان به مدل های رایج تر همانند کوپرسایموند^{۱۳} و جانسون-کوک^{۱۴} اشاره کرد [۱۳]. در این مقاله

در رابطه بالا Z به عنوان فاصله مقیاس‌بندی تعریف می‌شود. R فاصله از مرکز انفجار به متر و W جرم ماده منفجره معادل TNT (کیلوگرم) می‌باشند. نتیجتاً ایمپالس بر واحد سطح بر حسب Pa.s به دست می‌آید.



شکل ۲. مقایسه دو نمودار فشار- زمان انفجار با فشار بیشینه و مدت زمان بارگذاری یکسان [۱۶]

با مشخص شدن ایمپالس، دافی، رابطه‌ای برای نرخ کرنش در محفظه‌های بسته ارائه کرده است [۵]، که در آن ρ, h, r به ترتیب شعاع، ضخامت و چگالی پوسته است.

$$\dot{\epsilon} = \frac{I_0}{\rho h r} \quad (4)$$

طراحی و پیاده‌سازی آزمایش‌ها

آزمایش‌های تجربی انجام شده بر روی سه مقیاس از پوسته برگرفته از یک سازه سرجنگی انتخاب شده و ابعاد هندسی آنها در جدول (۲) آورده شده است شکل (۳) تصویر نمونه در مقیاس ۰/۷۵ را نشان می‌دهد. این نمونه‌ها تحت دو نوع بارگذاری، ابتدا بارگذاری استاتیکی با دستگاه هیدرواستاتیک و سپس تحت بارگذاری انفجاری با ماده منفجره C4 قرار گرفته‌اند. آزمایش‌ها در هر مقیاس با افزایش ماده منفجره تا رسیدن به مرز پارگی پوسته ادامه می‌یابد. تمامی نمونه‌ها از جنس آلومینیوم AA1050 با ضخامت ۳ میلی‌متر و تنش تسلیم ۹۵MPa و چگالی ۲۷۰۰ Kg/m³ بوده که به روش اسپینینگ^{۱۵} ساخته شدند.

جدول ۲. مشخصات هندسه نمونه‌ها

مقیاس	تعداد نمونه	ضخامت (mm)	طول نمونه (Cm)	طول استوانه (Cm)
۱	۵	۳	۱۷	۸
۰/۷۵	۶	۳	۲۵	۱۲
۰/۵	۳	۳	۳۴	۱۶

بنیادی در این زمینه توسط کوپرسایموند ارائه گردیده است [۶]:

$$\sigma'_0 \geq \sigma_0 \dot{\epsilon} = D \left(\frac{\sigma'_0}{\sigma_0} - 1 \right)^q \quad (1)$$

که در آن σ'_0 تنش جریان پلاستیک دینامیک در نرخ کرنش پلاستیک تک محوره $\dot{\epsilon}$ و σ_0 تنش جریان پلاستیک استاتیکی و D و q ثوابت معین برای جنس‌های خاص می‌باشند. معادله فوق را به صورت زیر هم می‌توان نوشت:

$$\frac{\sigma'_0}{\sigma_0} = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{D} \right)^{\frac{1}{q}} \quad (2)$$

ثوابت D و q برای مواد مختلف در جدول (۱) آورده شده است. در رابطه کوپرسایموند هنگامی که $\dot{\epsilon} = D$ باشد، بدون توجه به مقدار q خواهیم داشت: $\sigma'_0 = 2\sigma_0$ [۶].

جدول ۱. ثوابت D و q معادله (۲) برای مواد مختلف [۶]

MATERIAL	D (1/sec)	Q
Mild steel	۴۰/۴	۵
Aluminium Alloy	۶۵۰۰	۴
Titanium (Ti 50A)	۱۲۰	۹
Stainless Steel 304	۱۰۰	۱۰

روابط انفجار

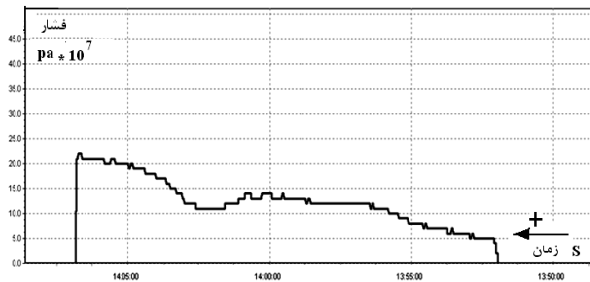
انفجار پدیده آبی است که از رها شدن مقدار زیادی انرژی در مدت زمان بسیار اندک ایجاد می‌شود، در واقع فشار در یک جهش ناگهانی نسبت به فشار محیط تا فشار ماکزیمم P_m افزایش یافته و سپس افت می‌نماید تا به فشاری کمتر از فشار محیط اطراف برسد. قدرت تخریب یک موج انفجار توسط ایمپالس حاصل از آن تعیین می‌شود که تابعی از فشار ماکزیمم، مدت زمان فاز مثبت فشار می‌باشد. همان‌گونه که در شکل (۲) مشخص شده است، از بین موج‌های A و B با فشار ماکزیمم و مدت زمان فاز مثبت یکسان، نمودار B توانایی تخریب بیشتری دارد، زیرا سطح زیر نمودار آن که نشان‌دهنده ایمپالس می‌باشد بیشتر است. این مقدار بر واحد سطح توسط رابطه تجربی گودمن ارائه می‌شود [۱۶].

$$\frac{I_0}{W^{1/3}} = 6895 \left(\frac{0.06076}{Z} + \frac{0.02770}{Z^2} + \frac{0.002945}{Z^3} \right) \quad (3)$$

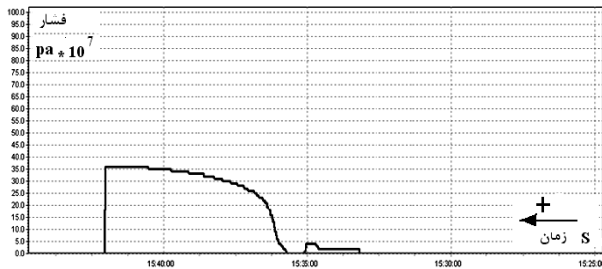
$$Z = \left(\frac{R}{W^{1/3}} \right)$$



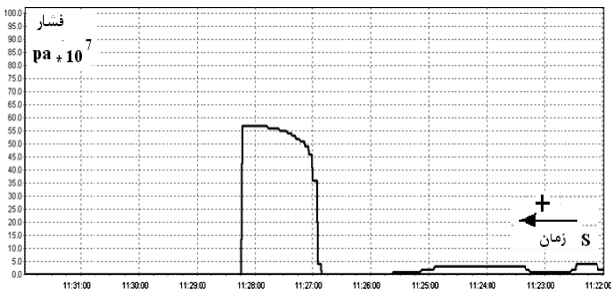
شکل ۵. نحوه قرارگیری سازه و بارگذاری در دستگاه هیدرواستاتیکی



شکل ۶. الف- نمودار فشار- زمان در آزمون هیدرواستاتیکی برای مقیاس ۱

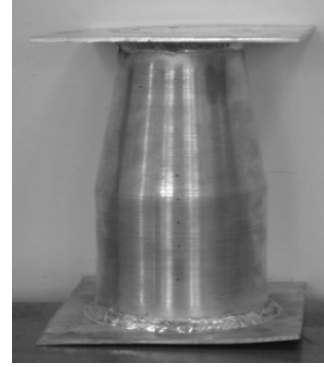


شکل ۶. ب- نمودار فشار- زمان در آزمون هیدرواستاتیکی برای مقیاس ۰/۷۵



شکل ۶. پ- نمودار فشار- زمان در آزمون هیدرواستاتیکی برای مقیاس ۰/۵

نتایج این آزمون‌ها برای سه مقیاس از پوسته‌ها در جدول (۳) آورده شده‌اند. در این جدول فشار شکست استاتیکی سازه از روی



شکل ۳. تصویر نمونه با مقیاس ۰/۷۵

آزمون‌های هیدرواستاتیکی

آزمون‌های هیدرواستاتیکی به وسیله دستگاه تست هیدرواستاتیکی انجام می‌گیرد. این دستگاه مجهز به یک سیستم هیدرولیکی با امکان کنترل برروی نرخ بارگذاری است، که توانایی بارگذاری برروی پوسته‌های جدار نازک و ضخیم در هندسه‌های متفاوت تا قطر ۶۰ سانتیمتر و ارتفاع ۱ متر را دارا می‌باشد. شکل (۴) نمای ظاهری این دستگاه را نشان می‌دهد.



شکل ۴. دستگاه آزمون هیدرواستاتیک ساخته شده در آزمایشگاه مکانیک انفجار جهت همین پروژه

مسئله مهم، داده‌برداری و ثبت داده‌ها در این دستگاه است. این امر با به کارگیری حسگرهای فشار از جریان سیال و کرنش سنج‌های نصب شده برروی سازه و انتقال سیگنال‌های خروجی از آنها به قسمت ثبت داده‌ها و نرم افزار میسر می‌گردد. در این نرم‌افزار به راحتی می‌توان فشار مخزن تست شده و نیز کرنش مخزن را مورد بررسی قرارداد و ضمناً رسم نمودار کرنش- زمان و نمودار فشار- زمان از قابلیت این نرم‌افزار است. همان‌طوری که در شکل (۵) دیده می‌شود نمونه پوسته جدار نازک در دستگاه مستقر و آماده برای بارگذاری می‌باشد. البته سازه نشان داده شده در شکل از نوع اسپین شده نبوده و بلکه از نوع جوشکاری شده است.

نمودار فشار- زمان دستگاه و تنش شکست استاتیکی با تقریب نسبتاً خوبی از رابطه تنش پوسته‌های استوانه‌ای یعنی $\sigma = P_{st}r/h$ حاصل شده است. از نمودارهای کرنش- زمان دستگاه می‌توان

ماکزیم تغییر شکل نهایی و نرخ کرنش را به دست آورد. همچنان که از آزمون‌ها برمی‌آید، با افزایش سایز نمونه‌ها فشار شکست استاتیکی و نرخ کرنش کاهش می‌یابد.

جدول ۳. نتایج آزمون‌های هیدرواستاتیکی صورت گرفته بر روی پوسته‌ها

مقیاس	تعداد نمونه	ضخامت (mm)	P_{st} (Mpa)	W_f (mm)	σ (Mpa)	ϵ	$\dot{\epsilon}$ (1/s) $\times 10^{-2}$
۰/۵	۵	۳	۵/۷	۳/۷۲	۹۵	۷/۴۶	۹/۹
۰/۷۵	۶	۳	۳/۷	۱۰/۰۵	۹۲/۵	۱۱	۲/۹
۱	۳	۳	۲/۴	۱۲/۵۶	۸۰	۱۱/۰۴	۱/۲

در جدول (۴) همچنین مقیاس سازه‌ها، میزان وزن ماده منفجره، ایمپالس، زمان و مود شکست به ترتیب ملاحظه می‌گردد.

آزمون‌های انفجاری

برای انجام آزمایش‌های دینامیکی (انفجار) بر روی پوسته‌های مورد بررسی یک فیکسچر که بتواند شرایط مرزی مناسب را ارضا نماید و در مقابل بارگذاری انفجاری اعمالی مقاومت داشته باشد طراحی و ساخته شد.

جدول ۴. نتایج آزمون‌های انفجاری صورت گرفته بر روی پوسته‌ها

Scale	TNT Equ (kg)	I/A (Pa/Sec)	% ϵ exp	T (msec)	Failure Mode
۰/۵	۰/۰۰۴۹۵۸	۶۷۷	۱۱/۲	۰/۰۷۲	I
۰/۵	۰/۰۰۷۶۳۸	۹۹۰	۱۷	۰/۰۸۲	I
۰/۵	۰/۰۰۸۹۷۸	۱۱۴۳	۲۲/۷	۰/۰۹۲	I
۰/۵	۰/۰۱۰۳۱	۱۲۹۴	۳۳/۵	۰/۰۹۷	I
۰/۵	۰/۰۱۱۶۵	۱۴۴۳	-	-	I*
۰/۷۵	۰/۰۸۹۷۸	۵۸۸	۶	۰/۰۸۶	I
۰/۷۵	۰/۰۱۱۶۵	۷۳۵	۸/۸۶	۰/۰۹۳	I
۰/۷۵	۰/۰۱۴۳۳	۸۹۸	۱۳/۷۰	۰/۱۰۱	I
۰/۷۵	۰/۰۱۷۰۱	۱۰۴۳	۲۰/۱۸	۰/۱۰۷	I
۰/۷۵	۰/۰۲۱۰۳	۱۲۲۶	۳۲/۶۶	۰/۱۱۷	I
۰/۷۵	۰/۰۲۲۳	۱۲۹۷	-	-	I*
۱	۰/۰۲۰۱۳	۷۷۶	۱۶/۵	۰/۱۱۰	I
۱	۰/۰۲۲۹۷	۸۶۵	۱۶/۶۲	۰/۱۱۵	I
۱	۰/۰۲۵۰۵	۹۵۵	-	-	I*

بارگذاری انفجاری با استفاده از ماده منفجره C4 اعمال گردید. این ماده منفجره (وزن معادل TNT ۱.۳۴) شکل پذیر و نرم است. برای انجام آزمون‌ها ابتدا ماده منفجره به کمک ترازوی الکترونیکی و با دقت ۱ گرم در مقادیر مورد نظر انتخاب و سپس به کمک یک کره توخالی به صورت کروی در آورده شد. برای تحریک ماده منفجره از چاشنی الکتریکی شماره ۸ و یک سوئیچ معمولی استفاده گردید و به منظور بارگذاری انفجاری متقارن، چاشنی در مرکز محور تقارن پوسته قرار داده شد.

برای ایجاد بارگذاری‌های متنوع دینامیکی بر روی پوسته‌ها، پارامتر ماده منفجره (جرم ماده منفجره) در هر مقیاس تا رسیدن به مرز انهدام پوسته تغییر می‌یافت. همچنین با تغییر هر مقیاس نیز پارامتر فاصله ماده منفجره تا دیواره پوسته (شعاع پوسته در محل قرارگیری ماده منفجره) نیز متغیر بود. نمونه‌ها پس از بارگذاری به وسیله یک دستگاه رومر^{۱۶} اندازه‌گیری شد. داده‌برداری از چندین مقطع، انجام پذیرفت. سپس داده‌ها به وسیله فایل IGES ذخیره شده و با کمک نرم‌افزار Solidwork و با استفاده از یک سطح مرجع پروفیل تغییر شکل و سرانجام بیشترین مقدار تغییر شعاع هر مقیاس در جدول (۴) مشخص شده است. شایان ذکر است، در این جدول مود شکست I و I* به ترتیب به صورت زیر تعریف می‌گردد:

حالت I- تغییر شکل قابل ملاحظه پلاستیک بدون ایجاد پارگی
حالت I*- ایجاد پارگی موضعی در مرکز پوسته در اثر تغییر شکل

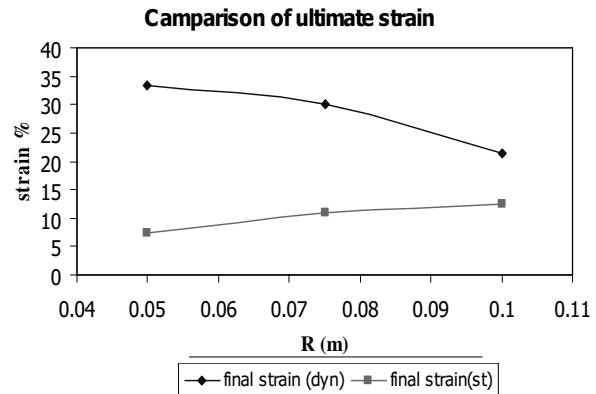
بحث و بررسی نتایج

در مقایسه بین آزمون‌های هیدرواستاتیکی و انفجاری پوسته‌ها می‌توان گفت که میزان ماکزیم کرنش شکست استاتیکی و ماکزیم کرنش دینامیکی قبل از پارگی در هر مقیاس بسیار متفاوت می‌باشد که دلیل آن ماهیت دینامیکی بارگذاری انفجاری است. میزان کرنش شکست استاتیکی بین مقادیر ۱۲٪ تا ۸٪ بوده و تقریباً ثابت می‌باشد در صورتی که کرنش نهایی قبل از پارگی انفجاری برخی از آزمون‌ها تا ۳۵٪ نیز می‌رسند. این نشان می‌دهد که کرنش نهایی دینامیکی بسیار بیشتر از کرنش شکست استاتیکی

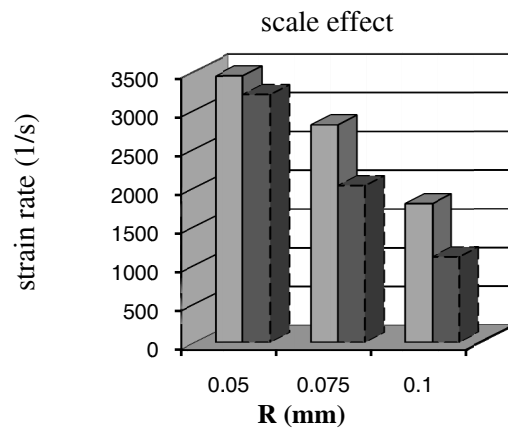
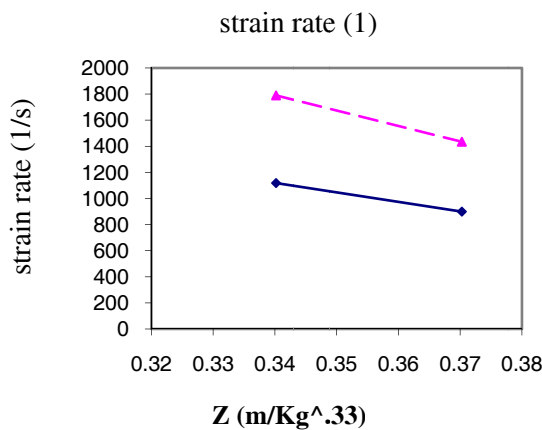
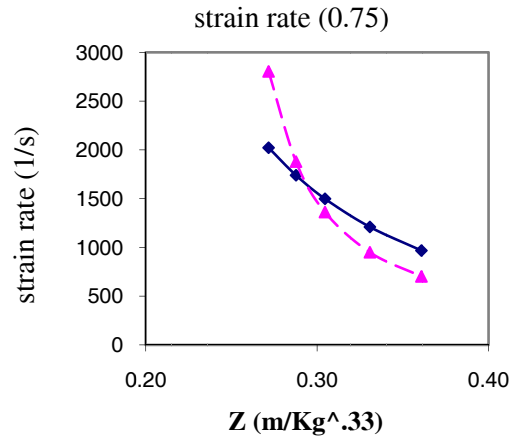
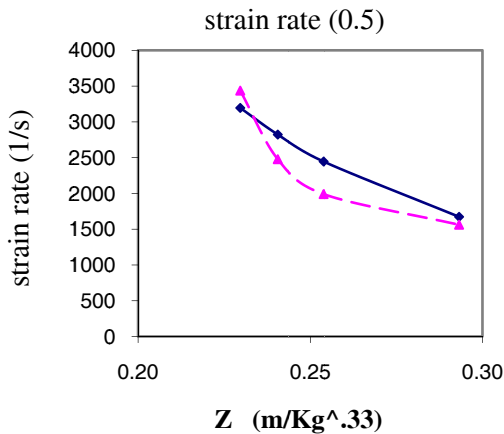
حال برای به دست آوردن نرخ کرنش تجربی در آزمون‌های انفجاری باید مدت زمان این کرنش ایجاد شده را یافت به این منظور برای به دست آوردن مدت زمان هر آزمون با فرض اینکه پالس اعمالی به شکل مستطیلی می‌باشد، میزان ایمپالس اعمالی را بر فشار آن تقسیم کرده و مدت زمان حرکت پوسته را تخمین زد. نرخ کرنش تئوری نیز با رابطه (۴) تعیین می‌شود. منحنی‌های ارائه شده در شکل (۸) برای نرخ کرنش‌های تجربی و تئوری ثابت می‌کند که اختلاف بین این دو مقدار ناچیز است. در نهایت میانگین خطای این دو نرخ کرنش ۱۵٪ می‌شود.

در نمودار ارائه شده در شکل (۸) مقایسه‌ای بین نرخ کرنش‌های سه مقیاس انجام شده است که نشان می‌دهد هر چه مقیاس بزرگ‌تر گردد همان‌طوری که کرنش شکست کاهش می‌یابد، میزان نرخ کرنش نیز کاهش می‌یابد.

است. این مقایسه در نمودار (۷) کاملاً مشهود است. نهایتاً براساس نتایج حاصل از آزمایش‌ها می‌توان اظهار نمود که با افزایش ضریب مقیاس، کرنش نهایی دینامیکی کاهش می‌یابد.



شکل ۷. مقایسه کرنش نهایی شکست استاتیکی با کرنش نهایی انفجاری



شکل ۸. نمودار مقایسه نرخ کرنش تجربی و تئوری، (رنگ‌های قرمز و آبی به ترتیب به نتایج تئوری و تجربی مربوط است)

فشار شکست دینامیکی را با استفاده از رابطه (۵) به دست آورد. با داشتن فشار شکست دینامیکی و همچنین فشار شکست استاتیکی، نسبت فشار شکست دینامیکی به شکست استاتیکی حاصل می‌گردد.

با توجه به رابطه کوپر-سایموند ارائه شده در معادله (۲) می‌توان با داشتن فشار شکست استاتیکی از آزمون‌های هیدرواستاتیکی از جدول (۲)، مقادیر نرخ کرنش تجربی و ثوابت مربوط به جنس ماده،

از طرفی میزان نسبت فشار دینامیکی از طریق رابطه Cowper & Symonde محاسبه می‌شود ولی در این رابطه از ضرایب D و q استفاده شده که برای هر آلیاژ از آلومینیوم این مقادیر متفاوت است ولی یک جفت ضریب برای کلیه آلیاژهای آلومینیوم وجود دارد که برابر با D=6500 و q=4 است.

$$\frac{P_{dyn}}{P_{st}} = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{D} \right)^{\frac{1}{q}} \Rightarrow \eta_{c\&s} = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{D} \right)^{\frac{1}{q}} \quad (5)$$

مقایسه نسبت بین فشارهای دینامیکی ناشی از انفجار به فشارهای استاتیکی در جدول زیر برابر است با η (C&S)* که جهت تعیین میزان افزایش استحکام ماده در برابر بارهای دینامیکی یکی از مهم‌ترین داده‌های تجربی است. در جدول (5) فشار شکست استاتیکی تجربی با استفاده از داده‌های دستگاه هیدرواستاتیک به دست آمده و فشار دینامیکی از روابط تقریبی برای فشار حاصل از انفجار که توسط گراهام عنوان شده است، محاسبه می‌شود. حال اگر فشار دینامیکی محاسبه شده را بر فشار استاتیکی تقسیم نماییم میزان η (C&S)* حاصل می‌گردد.

با توجه به جدول (5) مشخص می‌گردد که نسبت فشار دینامیکی در هر مقیاس با افزایش ماده منفجره و کاهش میزان Z (افزایش بار انفجاری) زیاد می‌شود تا اینکه پوسته به پارگی می‌رسد.

جدول 5. میزان نسبت فشار دینامیکی و فشار استاتیکی تجربی

test No.	TNT Equ. (kg)	P _{st} (Mpa)	$\dot{\epsilon}$ (exp) (1/s)	η (C&S)*	P _{dyn} (Mpa)
1	۰/۰۰۴۹۵۸	۵/۷	۱۵۶۱	۱/۷۰	۹/۶۹
۲	۰/۰۰۷۶۸۰	۵/۷	۱۹۹۰	۱/۷۴	۹/۹۴
۳	۰/۰۰۸۹۷۸	۵/۷	۲۴۷۷	۱/۷۹	۱۰/۱۸
۴	۰/۰۱۰۳۱۸	۵/۷	۳۴۳۶/۴	۱/۸۵	۱۰/۵۶
۵	۰/۰۱۱۶۵	۵/۷	-	-	-
۶	۰/۰۰۹۸۷۸	۳/۷	۷۰۱/۷	۱/۵۷	۵/۸۲
۷	۰/۰۱۱۶۵۵	۳/۷	۹۴۹/۶	۱/۶۲	۵/۹۹
۸	۰/۰۱۴۳۳۸	۳/۷	۱۳۶۱/۶	۱/۶۷	۶/۲۰
۹	۰/۰۱۷۰۱۸	۳/۷	۱۸۷۹/۶	۱/۷۳	۶/۴۱
۱۰	۰/۰۲۱۰۳۸	۳/۷	۲۸۰۴/۱	۱/۸۱	۶/۷۰
۱۱	۰/۰۲۲۳	۳/۷	-	-	-
۱۲	۰/۰۲۰۳۹	۲/۴	۱۴۹۵/۳	۱/۶۹	۴/۱۳
۱۳	۰/۰۲۲۹۷	۲/۴	۱۷۸۹/۲	۱/۷۲	۴/۰۴
۱۴	۰/۰۲۵۰۵۸	۲/۴	-	-	-

نتیجه گیری

به منظور بررسی تغییر شکل پوسته‌ها تحت نرخ کرنش‌های مختلف، پوسته‌هایی از جنس آلومینیوم در سه مقیاس از یک نمونه سازه سرچنگی طراحی شد. در نرخ کرنش استاتیکی، برای به دست آوردن فشار و کرنش شکست استاتیکی، آزمون‌هایی با دستگاه هیدرواستاتیک بر روی نمونه‌ها انجام گرفت و در نرخ کرنش دینامیکی، پوسته‌ها با ماده منفجره تحت بارگذاری انفجاری قرار گرفتند. در مقایسه بین آزمون‌های هیدرواستاتیکی و انفجاری پوسته‌ها نشان می‌دهد که:

۱. در آزمون‌های انفجاری با زیاد شدن مقدار ماده منفجره، قدرت انفجار یا ضربه اعمالی افزایش یافته، مولفه فشاری تنش داخلی پوسته برای مدت زمان بیشتری اعمال می‌شود و در نهایت کرنش شکست افزایش می‌یابد. که این از خصوصیات مواد حساس به نرخ کرنش می‌باشد. رهیافت کلی در انبساط ناشی از انفجار در پوسته‌های جدار نازک فلزی این است که کرنش شکست با افزایش نرخ کرنش افزایش می‌یابد.

۲. کرنش نهایی دینامیکی در هنگام شکست بسیار بیشتر از کرنش شکست استاتیکی می‌باشد. این به دلیل نرخ کرنش بالایی است که در بارگذاری دینامیکی اعمال شده است، و از طرفی بارگذاری انفجاری یا دینامیکی با نرخ بالا باعث افزایش استحکام سازه و نهایتاً کرنش بیشتر در سازه می‌گردد.

۳. بر اساس نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی، با ثابت ماندن ضخامت پوسته و همچنین افزایش شعاع پوسته کرنش شکست کاهش یافته و استحکام سازه در برابر نرخ کرنش تحلیل می‌رود. این ثابت می‌کند که در سازه‌های با شعاع بزرگ‌تر استحکام سازه‌ای کاهش می‌یابد. کاهش این مقدار از ۱/۷۲ به ۱/۸۵ در آزمون‌ها مبین این موضوع است.

۴. به طور کلی با در نظر گرفتن داده‌های آزمون‌های هیدرواستاتیکی و اثر نرخ کرنش بر روی سازه در آزمون‌های دینامیکی - انفجار می‌توان به نسبت فشار دینامیکی این نوع سازه‌ها دست یافت. با دستیابی به نسبت فشار دینامیکی می‌توان بدون استفاده از آزمون‌های انفجاری پیش‌بینی‌های درستی نسبت به شکست دینامیکی سازه مورد نظر انجام داد، که مسلماً این روش در تحلیل سازه سرچنگی بسیار مفید است.

تشکر و قدردانی

در پایان از زحمات آقای مهندس توحیدی و همکارانشان در شرکت نوید پژوهش فردا برای کمک به طراحی و ساخت دستگاه هیدروتست مخازن تشکر و قدردانی می‌گردد.

4. Mackenzie, A., Dalrymple, E. W., and Schwartz. 1965. *designofpressurevesselsforconfiningexplosives*. Mackenzi: piccatinnyarsenal dovernifeltmanreserchlabs.
5. Benham, R.A., and Duffey. T.A. 1973. Experimental-Theoretical correlation on the containment of explosions in Closed cylindrical vessels. 4th Int conference of center for High energy Forming Vail. Colorado July 9-13.
6. Jones. N. 1989. *Structural Impact*. U.K: Cambridge University Press.
7. Bola, M. S., Madan, A. K., & Singh, M. 1992. Expansion of Metallic Cylinders Under Explosive Loading. *Defence Sci.* 42(3):157-63.
8. Singh, M., Suneja, H. R., Bola, M. S., and Prakash, S. 2002. Dynamic Tensile Deformation and Fracture of Metal Cylinders at High Strain rates. *International Journal of Impact Engineering* 27(2): 101-159
9. Tong Wa Chao, Joseph E., and Shepherd. 2003. Comparison of fracture response of preflowed Tubes under Internal static and dynamic loading. *Journal of Pressure Vessel Technology* 49: 752-761
10. Kuwabara, T., Ishiki. M., Kuroda. M., and Takahashi. S. 2003. Yield locus and work-hardening behavior of a thin-walled steel specimen subjected to combined tension-internal pressure. *Journal de Physique* IV105: 347-354.
11. Martineau, R.L., C.A. Anderson, and F.W. Smith. 2000. Expansion of cylindrical subjected to Internal Explosive Detonation. Los Alamos. NM87545.
12. Molyneaux, T. C. K., Li, L. Y., and Firth, N. 1993. Impact responses of circular cylindrical shells under explosive loading. *Advances in Engineering Software*, 18(1): 7-13.
13. Johnson, G. R., and Cook, W. H. 1983. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics, The Hague, The Netherlands, 541-547.
14. Perzyna. 1996. Fundamental Problems in Viscoplasticity, *Advances in Applied Mechanics. Academic Press* 9: 243-377
15. Campbell. 1973. Dynamic Plasticity Macroscopic & Microscopic Aspects. *Material Science & Eng* 12: 3-21.
16. Goodman. H.J. 1960. Compiled free-air blast data on bare spherical penttolite, Ballistic Research Laboratories, Aberdeen proving ground, Maryland.

علائم و اختصارات:

σ_0	تنش جریان پلاستیک استاتیک
ε	نرخ کرنش پلاستیک تک محوره
σ_0'	تنش جریان پلاستیک دینامیک
D	ثابت رابطه کوپر سایموند
q	ثابت رابطه کوپر سایموند
P_m	فشار ماکزیم انفجار
R	فاصله از مرکز انفجار به متر
W	جرم ماده منفجره معادل TNT به کیلوگرم
Z	فاصله مقیاس بندی شده
I_0	ضربه بر واحد سطح به Pa.s
I/A	ضربه بر واحد سطح به Pa.s
ρ	چگالی پوسته مورد آزمایش
h	ضخامت پوسته مورد آزمایش
r	شعاع پوسته مورد آزمایش
w_f	بیشترین شعاع تغییر شکل نهایی
P_C	فشار شکست استاتیکی
T	زمان
P_{St}	فشار شکست استاتیکی
P_{dyn}	فشار شکست دینامیکی
$\eta_{c\&s}$	نسبت فشار دینامیکی

پی نوشت

- | | |
|---------------------------|--------------------|
| 1. Menkes | 9. Shepherd |
| 2. Opat | 10. Kuwabara |
| 3. Hodge | 11. Martineau |
| 4. Bola | 12. Long |
| 5. Singh | 13. Cowper-Symonds |
| 6. High Speed photography | 14. Johnson-Cook |
| 7. Flash radiography | 15. Spinning |
| 8. Chao | 16. Romer |

مراجع

1. Menkes. S.B., Opat. H.J. 1973. Broken beams: Tearing and Shear failure in explosively loaded clamped beams. *Experimental Mechanics* 480-486 Kluwer Academic Publishers.
2. Hodge, P. G. 1955. Impact pressure loading of rigid-plastic cylindrical shells. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 3(3): 176-188.
3. Jones, N., and R. M. Walters. 1972. A comparison of theory and experiments on the dynamic plastic behavior of shells. *Archives of Mechanics* 24(5-6):701-14.