

مطالعه آزمایشگاهی رفتار کمانشی و فراکمانشی پوسته های استوانه ای با شرایط مرزی ساده

حسین شوکتی، استادیار دانشکده فنی دانشگاه ارومیه

پست الکترونیکی: h.showkati@mailurmia.ac.ir

چکیده

ظرفیت بار بحرانی پوسته های استوانه‌های تحت اثر فشار یکنواخت جانبی وابسته به دو نسبت لاغری طول به شعاع (L/R) و شعاع به ضخامت (R/t) است. در این مقاله نتایج تست دو دستگاه پوسته استوانه ای با مشخصات هندسی $L/R=2$ و $R/t=909$ ساخته شد از ورق فولادی و تحت فشار یکنواخت ارایه شده است. شرایط مرزی دو انتهای استوانه ها بصورت مفصلی ساده یعنی فقط با قید شعاعی لبه ها میباشد. در هر یک از دو دستگاه پوسته مورد آزمایش مراحل بارگذاری پیش از کمانش و پس از کمانش تا فروریختگی انجام و نتایج حاصل گزارش گردیده است. علیرغم وجود نقص هندسی و شرایط مرزی ارتجاعی مقاومت بسیار خوبی ملاحظه گردید. کمانش اولیه به صورت موضعی بوده و تفاوت فشار بین دو حالت کمانش اولیه و کمانش کلی کاملاً زیاد و قابل توجه است. و همچنین مقاومت فراکمانشی قابل توجهی در هر دو نمونه ملاحظه گردید.

کلید واژه ها : کمانش، شرایط مرزی، فراکمانش.

۱- مقدمه

کاربرد پوسته های استوانه ای بعنوان یک عضو اصلی سازه ای از دیر باز برای مهندسين و طراحان در شاخه های مختلف مهندسی شناخته شده است. معادلات اساسی این پوسته ها توسط Flugge و Donnell در دهه ۱۹۳۰ ارائه شد و سپس محققان متعددی برای تبیین رفتار پیچیده این سازه ها تلاش نمودند. وجود نقض هندسی اولیه (Geometric Imperfection) در پوسته های استوانه ای همانند سایر سازه های جدار نازک موجب اندرکنش تغییر شکلهای قبل و بعد از کمانش میشود و این سبب پیدایش رفتار غیر خطی هندسی میگردد. نوع بارگذاری و حتی شرایط مرزی لبه های پوسته میتواند در این اندرکنش تأثیر کاملاً محسوسی داشته باشد. برای بررسی نظری کمانش و فراکمانش پوسته روشهای ریاضی و عددی مختلفی ارایه شده که در هر کدام بر

مطابقت روشهای مدلسازی با نمونه های واقعی از این سازه ها تلاش فراوانی صورت گرفته است.

در میان تمامی شیوه های تحقیقات مهندسی، آزمایش روی نمونه های با مقیاس واقعی اطمینان بخش ترین و مستندترین و در عین حال پرهزینه ترین روش محسوب میشود که نتایج آن از ارزش بالاتری نسبت به مدل‌های ریاضی و حتی مدل‌های آزمایشگاهی با مقیاس کوچکتر از یک برخوردار است. بر اساس نتایج و روابط غیر خطی Donnell ظرفیت بار بحرانی پوسته های استوانه ای زمانی که تحت اثر فشار یکنواخت جانبی قرار گیرد وابسته به دو نسبت لاغری طول به شعاع (L/R) و شعاع به ضخامت (R/t) است که همین ویژگی موجب تقلیل متغیرهای هندسی از سه به دو میگردد. بنابراین نتایج آزمایشات روی نمونه های با نسبت های لاغری مشخص برای نمونه های بزرگ و کوچک اما با همان نسبت های لاغری قابل تطبیق و معتبر خواهد بود. در این مقاله از همین خاصیت استفاده شده و دو

معادلات غیر خطی Donnell انجام داده اند. در مطالعه دیگری Tennyson & Booton [4] نشان دادند که اثرات هندسی در بار کمانشی در بارگذاری فشار خارجی یا پیچش نسبتاً ناچیز است. همچنین طی آزمایشاتی که Dowling و دیگران [5] روی پوسته های استوانه ای تقویت شده تحت اثر بار ترکیبی جانبی و محوری انجام دادند نتیجه گرفتند که نقض های هندسی اولیه تأثیر مهمی در فروریختگی پوسته ها ندارند. در یک مرور علمی بر روی کارهای تحقیقاتی اخیر در موضوع رفتار کمانشی پوسته ها توسط Ansourian [6] مسائل سازه ای مهم در رفتار مخازن و سیلوها مورد بحث قرار گرفت و روش طراحی ساده شده در مقابل بار باد و اثرات نارسائیها و قيود مرزی ارائه گردید. در اغلب موارد برای طراحی سازه های پوسته ای از حالت های ساده شده استفاده میشود و اثرات عواملی همچون نارسائی ها و رفتارهای غیر خطی توسط ضرائبی در نتایج محاسبات اعمال میگردد. برای چنین مواردی میتوان از نتایج و روابطی که برای چندین حالت از شرایط مرزی مختلف در لبه های پوسته ها استخراج شده استفاده نمود [7].

۳- برنامه آزمایشگاهی

۳-۱- ساخت نمونه ها

هر دو دستگاه نمونه آزمایشی از ورق فولادی به ضخامت ۵/۵۰ میلیمتر و به قطر و ارتفاع ۱ متر ساخته شدند. برای شناسائی خواص مصالح پوسته ها شش نمونه استاندارد از ورق مصرفی تهیه و تحت آزمایش کشش قرار گرفتند. طبق منحنی حاصل از این آزمایش مقدار تنش تسلیم ۲۴۲ Mpa بدست آمد. پس از برش ورق تخت فولادی به اندازه های نصف استوانه، عمل رول کردن آنها انجام و از اتصال هر دو قطعه از آنها یک استوانه ساخته شد. این نحوه ساخت پوسته موجب میشود که شکل هندسی دقیقتری برای استوانه حاصل و از نارسائی هندسی آن کاسته شود عمل جوشکاری در محورهای اتصال صفر و ۱۸۰ درجه توسط سیستم جوش اتوماتیک که سرعت حرکت الکتروود آن قابل تنظیم است انجام گرفت. مقداری از نارسائی های هندسی در مرحله جوشکاری به سازه پوسته وارد میشود. برای مهاربندی لبه های پوسته ربع حلقه هائی از همان ورق بریده شد و با عملیات لحیم کاری و جهت حفظ شکل دایره ای دو انتها نصب گردید. چنین شیوه ای دارای دو مزیت است، یکی اینکه مقاومت کافی در برابر نیروهای وارده در جین آزمایش از خود نشان میدهد و دیگر اینکه بدلیل پائین بودن حرارت نسبت به

دستگاه پوسته استوانه ای با مشخصات $L=1000 \text{ mm}$, $R=500 \text{ mm}$, $t=55 \text{ mm}$ با نسبت های $L/R=2$ و $R/t=909$ ساخته شده از ورق فولادی نرمه تحت آزمایش فشار یکنواخت بیرونی جانبی (و نه هیدرو استاتیک) قرار گرفته است. شرایط مرزی دو انتهای استوانه ها بصورت مفصلی ساده یعنی فقط با قید شعاعی لبه ها میباشد. نمونه های آزمایشی به کمک تجهیزات مناسب توسط مؤلف ساخته شد. اعمال فشار یکنواخت با ایجاد خلاء نسبی در درون پوسته صورت گرفت و برای حذف اثر فشار محوری از سیستم خاصی استفاده شد که در قسمتهای بعدی توضیح داده میشود. قید شعاعی در دو انتها با دو عدد تیر حلقوی با وزن حدود ۲٪ وزن پوسته تامین شد. محاسبه و طراحی این سخت کننده ها به کمک روابط پیشنهادی مؤلف صورت گرفت [2]. در ضمن بارگذاری پوسته ها مراحل قبل از کمانش، کمانش اولیه، کمانش کلی و فروریختگی مورد مشاهده و ارزیابی قرار گرفته، که در مقاله حاضر گزارش این مراحل ارائه میگردد.

۲- سابقه علمی موضوع

در صورتیکه انرژی خمشی ذخیره شده در سازه در مرحله قبل از کمانش زیاد باشد رفتار مرحله مزبور رفتار استاتیکی غیر خطی خواهد بود. در مرحله کمانش نیز بسته به نوع منحنی بار - خیز پوسته دو وضعیت قابل پیش بینی است. در نمونه های واقعی که بطور ناخواسته مقداری نقض هندسی دارند پدیده فروریختگی غیر خطی رخ میدهد. در حالیکه در یک پوسته ایده آل، تغییر شکلهای قبل از کمانش صفر بوده و در لحظه بار بحرانی با انشعاب در منحنی بار - خیز بصورت جهشی کمانش اتفاق می افتد. مقدار تئوریک این بار و مواد کمانش آن با مقادیر و بردارهای ویژه معین میشود. وضعیت فراکمانشی پوسته استوانه ای در اثر فشار بیرونی نیز با روشهای غیر خطی مطالعه شده اس [1]. اگر گیرداری لبه های پوسته بعنوان شرایط مرزی الاستیک متغییر باشد میتوان مقدار بهینه ای از سختی شرایط مرزی را پیدا کرد که در آن وضعیت مقاومت شبیه شرایط مرزی صلب فراهم شده باشد [2]. در طراحی سخت کننده های حلقوی انتهائی در این برنامه آزمایشگاهی از ایده مزبور استفاده شده است.

هر سیستم سازه ای در عمل دارای مقداری نارسائی هندسی است. این نارسائی در پوسته های با بار محوری نسبت به بار جانبی بسیار حساستر میباشد. Karman و Tsien [3] اساسیترین کار تحلیلی را در مسائل فراکمانشی با استفاده از روش ریتز و

و انتشار آن، کمتر از این مقدار نیز بوده است. برای حصول اطمینان از قرائت فشار مؤثر بر پوسته از یک مانومتر دستی نیز استفاده گردید. پس از پایان یافتن هر آزمایش فرم کمانش یافته پوسته ها بطور دقیق اندازه گیری و ثبت گردید.

۳-۳- ملاحظات و مشاهدات در هر آزمایش

در هر یک از دو دستگاه پوسته مورد آزمایش دو مرحله بارگذاری شامل: مرحله پیش از کمانش و مرحله کمانش و فراکمانش تا فروریختگی انجام گرفت. عمده ترین مشاهدات به قرار زیر است:

- ۱- همه تغییر شکلهای ناشی از بارگذاری قبل از کمانش اولیه در صورت حذف با بطور کامل حذف میشدند.
- ۲- کمانش اولیه با پیدایش تعداد محدودی از موجهای کمانش در بخش محدودی از جداره پوسته و در مقدار باری کمتر از فشار بحرانی سازه ایده آل اتفاق افتاد.
- ۳- با افزایش فشار جانبی تعداد امواج کمانش محیطی نیز اضافه شد تا فرم کمانشی عمومی پوسته فراهم گردید.
- ۴- تشکیل هر موج یا گروه موج کمانشی با صدای خفیف ناشی از جابجائی هوای مجاور جداره همراه بود.
- ۵- تعداد امواج محیطی نهائی در هر پوسته از تعداد پیش بینی شده تنوریک برای پوسته های ایده آل کمتر بود.
- ۶- در نمونه های آزمایشی مقاومت فراکمانشی قابل توجهی ملاحظه گردید.
- ۷- هر آزمایشی با وقوع گسیختگی در سازه یا نشت سریع فشار بعلت تغییر شکلهای بزرگ خاتمه یافت.
- ۸- در پوسته های آزمایشی فروریختگی با تشکیل خطوط تسلیم همراه بود و معمولاً در نواحی $L/4$ استوانه انشعاب این خطوط تسلیم ملاحظه شد و در مرحله نهائی با فروریختگی پیشی در این محل آزمایش پایان یافت.
- ۹- بررسی های دقیق نمونه ها پس از خاتمه آزمایش نشان میدهد که مقادیر تغییر شکل نهائی در موجهای بسمت داخل تقریباً چهار برابر تغییر شکلهای بسمت خارج است.
- ۱۰- طول موجهای کمانشی در هر نمونه بعلت وجود نقص های هندسی الزاماً یکسان نبودند.
- ۱۱- فرم کمانش طولی در هر موج به جای فرم سینوسی تقریباً بصورت پانلهای صفحه ای و تخت مشاهده شدند.
- ۱۲- خط جوش طولی پوسته که دارای سختی بیشتر نسبت به دیگر قسمتهای جداره آن است بصورت یک تقویت کننده عمل

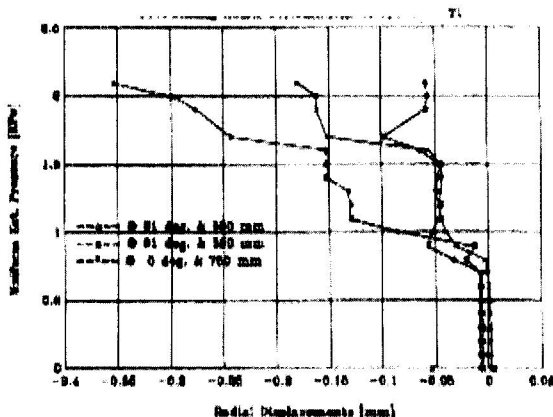
جوشکاری دارای تنش پس ماند کمتری است. البته برای اجرای چنین اتصالی مهارت و دقت افزونتری لازم است. برای تکمیل عملیات ساخت نمونه ها از چسب سلیکون برای درزبندی محل جوشکاری طولی استفاده شد تا از نشت هوا در حین آزمایش جلوگیری کند. هر چندکه پوسته های تحت اثر فشار جانبی نسبت به حالت بار محوری حساسیت کمتری در برابر نارسائیها دارند ولی نمونه های مورد آزمایش در هر قطعه ۵ درجه از محیط بطور دقیق اندازه گیری شدند.

۳-۲- نصب نمونه ها و جمع آوری داده ها

برای استقرار نمونه ها یک دستگاه قاب فلزی فضای طراحی و ساخته شد که پوسته های مورد آزمایش در قسمت درونی آن قرار میگرفت. برای بستن دو انتهای پوسته ها از دو قطعه ورق صلب دایره ای که توسط یک شفت میانی نگهداری میشوند استفاده شد. در حد فاصل لبه های این ورق ها با لبه های پوسته ها اورینگ های قابل تنظیم با فشار باد (تیوب لاستیکی) قرار داده شدند که در عین حالی که از نشت هوای داخلی در حین مکش جلوگیری میکردند هیچگونه نیروی محوری نیز به پوسته ها منتقل نمی نمودند. محل تماس این اورینگها حدود ۱۰ میلیمتر از لبه پوسته فاصله داشت. با این روش در موقع ایجاد خلاء نسبی در داخل استوانه، تنها فشار یکنواخت جانبی در آن اثر میکند. برای نصب ابزارهای اندازه گیری نظیر خیز سنج ها از سکوی حلقوی محیطی نصب شده بر قاب فضائی استفاده گردید. این حلقه حدود ۱۰۰ میلیمتر از جداره پوسته فاصله داشت که کافی برای اهداف آزمایشات بود. برای ایجاد فشار منفی از پمپ خلاء مناسبی استفاده شد و دو دستگاه مانومتر دستی و دیجیتالی نیز مقادیر فشار داخلی را در هر گام بارگذاری گزارش میکردند. علاوه بر استفاده از ابزارهای اندازه گیری مشاهدات عینی مربوط به روند آزمایشات نیز ثبت و جمع آوری شدند. در هر یک از پوسته های S_1 و S_2 بترتیب ۱۱ و ۱۳ خیز سنج در نقاط مختلف سازه نصب شدند که به یک دستگاه دیتالایگر ۱۶ کانال متصل و در مراحل مختلف بارگذاری در حالت قرائت تغییر شکلهای جانبی بودند. دقت این خیز سنج ها بسیار خوب و در حد 0.1% در طول ۵۰ میلیمتر تغییر شکل میباشد. عملکرد این خیز سنجها تا مرحله کمانش و نیز فراکمانشی بسیار خوب بود. مانومتر دیجیتالی مقدار خلاء نسبی درون پوسته را در هر مرحله بارگذاری نشان میداد افزایش فشار عموماً با گامهای 0.1 Mpa و در لحظه های وقوع کمانش اولیه

کمانش اولیه (رفتار الاستیک) در شکل های ۱ و ۲ آورده شده است. کمانش اولیه پوسته S_1 در فشار $2/6 \text{ Mpa}$ و پوسته S_2 در $2/2 \text{ Mpa}$ اتفاق افتاد. حداقل دو دلیل برای این اختلاف در فشار کمانشی قابل ذکر است. نخست اینکه نارسائی هندسه پوسته S_1 حدود ۱۰٪ کمتر از S_2 است و دیگر اینکه تیرهای تقویتی آن ۲۰۰٪ (در $n=8$) سخت بود. کمانش کامل محیطی با $n=8$ در نمونه S_1 در فشار $2/74 \text{ Mpa}$ و در نمونه S_2 در فشار $3/5 \text{ Mpa}$ حاصل شد. لازم به ذکر است که سیستم درزبندی نمونه S_2 در موقع افزایش بار و در اثر تغییر شکل های بزرگ آسیب دید و فشار آن به صفر تقلیل یافت ولی پس از ترمیم و بارگذاری مجدد تا مرحله کمانش کامل پیش رفت. زمانی که محیط پوسته ها را ۸ موج کامل کمانشی فراگرفته بود بارگذاری ادامه داده شد که افزایش فشار که حاکی از رفتار فراکمانشی پوسته ها بود مشاهده شد. بالاخره نمونه S_1 تا فشار $4/1 \text{ Mpa}$ و نمونه S_2 تا $4/5 \text{ Mpa}$ مقاومت نموده و پس از آن گسیختگی جوش طولی پوسته S_1 در فاصله ۱۹۰ میلیمتری از مرکز و فروریختگی سیستم درزبندی پوسته S_2 در فشار نهائی آن، موجب خاتمه آزمایش ها گردید. شکل های ۳ و ۴ رفتار فراکمانشی دو پوسته آزمایشی را تا مرحله فروریختگی نشان میدهد. تاکید میشود که رژیم فراکمانشی هر دو پوسته از تغییر شکل های بزرگ کمانشی پلاستیک متاثر گردیده است.

نمونه ای از فرم فروریختگی محیطی این دو پوسته در شکل ۵ آورده شده است. بیشترین مقدار خیز جانبی پوسته S_1 در ارتفاع میانی و در $\theta = 200^\circ$ برابر با ۱۰٪ شعاع پوسته میباشد. این مقدار برای پوسته S_2 برابر ۱۲٪ شعاع آن است (شکل ۵ و ۶). تغییر شکل حلقوی نمونه S_2 نسبت به نمونه S_1 بترتیب ۹۰٪ در لبه فوقانی و ۲۵٪ در لبه تحتانی بود.



شکل ۱: رفتار پوسته S_1 در مراحل قبل از کمانش

می کند. البته در نمونه S فروریختگی نهائی با شکستن موضعی یکی از خط جوش ها اتفاق افتاد.

۱۳- فرم نهائی هر وجه کمانشی پوسته شبیه یک صفحه تخت مستطیلی است که تحت اثر بار جانبی قرار داشته باشد و فروریختگی پوسته با خطوط تسلیم از نوع دالهای دوطرفه شباهت کامل دارد. هرچه وجه حاصله در پوسته فروریخته در دو انتهای خود به سیستم تکیه گاهی متشکل از خطوط تسلیم V شکل و تیر حلقوی لبه تکیه دارد.

۴- نتایج آزمایشات

در هر یک از دو دستگاه پوسته آزمایش شده مراحل پنجگانه زیر ملاحظه و مورد بررسی قرار گرفته است:

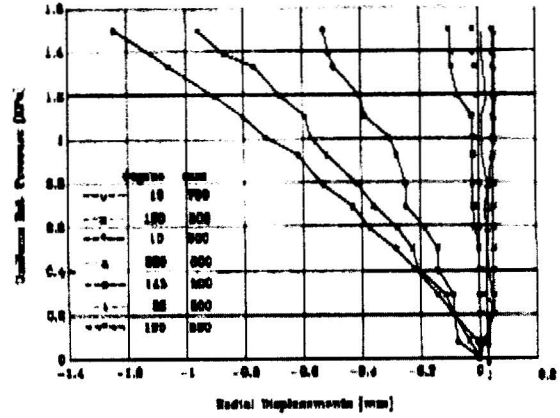
- ۱- مرحله قبل از کمانش
- ۲- کمانش اولیه
- ۳- کمانش کلی
- ۴- مرحله فراکمانش
- ۵- فروریختگی

در بارگذاری مرحله قبل از کمانش تنها رفتار استاتیکی بدون تغییر شکل های بزرگ و ناگهانی در پوسته مشاهده گردید. ولی در مراحل کمانش اولیه و کلی تغییر شکل های کمانشی بزرگ و خمیری دیده شد. در پوسته های استوانه ای که تحت اثر فشار جانبی قرار میگیرند پس از کمانش کلی، مرحله مقاومت فراکمانشی نیز بظهور میرسد. در این برنامه آزمایشگاهی تغییر شکل های کمانشی بعنوان نارسائی هندسی اولیه سازه محسوب شده و رفتار فراکمانشی آن مورد بررسی قرار گرفته است. پدیده کمانش و فراکمانش پوسته را در این مقاله میتوان بعنوان واکنش پایداری الاستو پلاستیک سازه توصیف نمود. حلقوی بودن لبه ها تا مرحله فراکمانش باقی مانده و تنها در مرحله نهائی فروریختگی، ناپایداری جانبی تیرهای حلقوی در لبه های رخ داده است. تعداد امواج کمانشی این تیرها با تعداد امواج کمانشی پوسته کاملاً مطابقت داشته و کمانش جانبی تیرها بعرض بسیار کم آنها کاملاً یک پدیده موضعی تلقی می گردد.

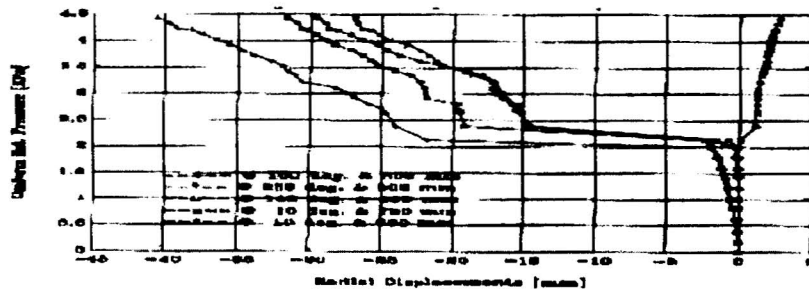
تعداد موجهای کمانش محیطی در هر نمونه برابر ۸ میباشد که بمقدار قابل توجهی از تعداد تئوریک آن ($n=11$) کمتر است. علت اصلی این اختلاف به موضوع نارسائیهای هندسی و تکیه گاهی مربوط میشود. بیشترین مقدار نارسائی اولیه در S_1 و S_2 بترتیب ۹t و 10t است. برای تعدادی از خیز سنج ها در هر دو نمونه منحنی های بار - تغییر شکل در بارگذاریهای قبل از



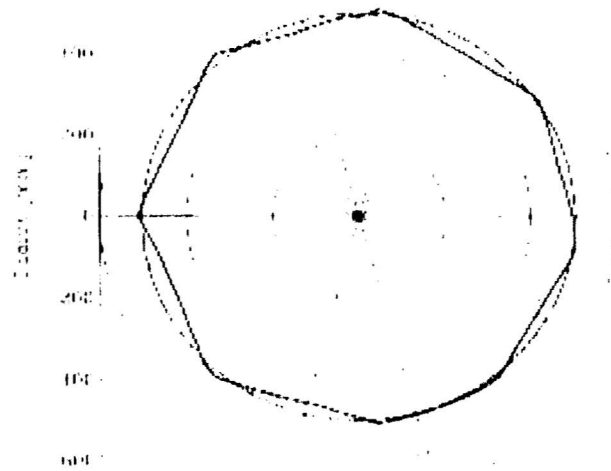
شکل ۳: رفتار فراکمانش پوسته S_2



شکل ۴: رفتار پوسته S_2 در مراحل قبل از کمانش



شکل ۵: رفتار فراکمانشی پوسته S_1

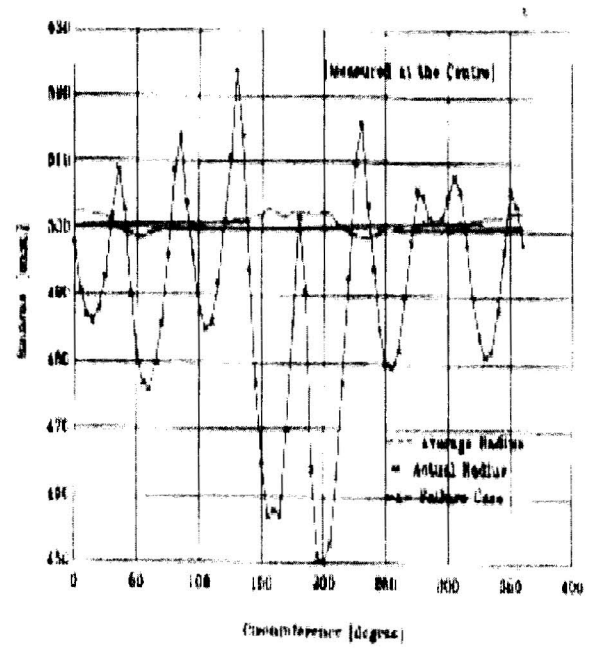


موسسه علمی و فرهنگی شهید بهشتی، تهران

شکل ۵: فروریختگی پوسته S_2 در مقطع میانی آن



شکل ۷: کمانش کلی پوسته S_1 ($n=8$)



شکل ۶: تصویری از پوسته تست شده اول را نشان می دهد

جدول ۱: مقایسه نتایج آزمایشات با نتایج حاصل از تحلیل اجزاء محدود

فروریختگی	کمانش کلی	کمانش اولیه	
۱/۰۷	۰/۷۲	۰/۶۸	پوسته S_1
۱/۱۶	۰/۶۲	۰/۵۸	پوسته S_2

۵- نتیجه گیری

طبق نتایج Bushnell [8] در مورد اثر تنشهای پس ماند ضریب کاهش مقاومت پوسته های استوانه ای در اثر خمکاری و جوشکاری در مدل های تحلیلی ۱۵٪ و در نمونه های آزمایشگاهی ۲۸٪ می باشد. با فرض $E = 2 \times 10^5 \text{ Mpa}$ و به کمک روابط پیشنهادی بر اساس آنالیز اجزاء محدود [7]، برای پوسته های استوانه ای ایده ال نظیر، با لبه های ساده $Q_{cr} = 3/82 \text{ Mpa}$ و $n=11$ بدست می آید. جدول ۱ نسبت های فشار در حالت آزمایش شده را به حالت ایده آل کلاسیک نشان می دهد.

در مورد مود کماتش نیز در هر دو پوسته آزمایش شده نسبت ۰/۷۳ بدست می آید. وجود نقض های هندسی محیطی و طولی و نیز نصب تیرهای حلقوی الاستیک بجای قید صلب شعاعی در لبه ها از جمله عوامل اختلاف در نتایج آزمایش با تئوری می باشد. چون تقویتی نصب شده در نمونه S_1 قویتر از نمونه S_2 است مقدار بار کماتشی اولیه و کلی آن نیز بیشتر بدست آمده است. عبارت دیگر رفتار نمونه S_1 به حالت شرایط مرزی کلاسیک نزدیکتر میباشد و جالب توجه است که مقدار بار بحرانی در کماتش کلی در این نمونه ۷۲٪ پوسته ایده آل بدست آمده که با نتایج Bushnell کاملاً مطابقت دارد. لیکن در نمونه S_2 بدلیل تغییر شکلهای زیاد در تیر حلقوی بار بحرانی آن ۱۰٪ کمتر از نمونه اول میباشد. ظرفیت فراکمانشی در هر دو پوسته آزمایش شده وجود دارد که بترتیب در نمونه های اول و دوم ۷٪ و ۱۶٪ است. البته بعلاوه اینکه آزمایش نمونه اول در اثر گسیختگی اتصال جوش و نمونه دوم بدلیل نشت هوا متوقف شده است نمی توان گفت که مقدار دقیق ظرفیت بعد از کماتش چقدر می باشد. در یک بر نامه تحقیق آزمایشگاهی برای اینگونه پوسته ها [9] نسبت نتایج تست به تئوری برابر ۰/۷۵ بدست آمده است که با نتایج این مقاله تنها ۴٪ اختلاف دارد. در پایان چند نکته ای قابل توجه نیز به استنتاجات فوق اضافه میگردد:

- ۱- علیرغم وجود نقص هندسی و شرایط مرزی ارتجاعی در پوسته های استوانه ای تحت اثر فشار خارجی مقاومت بسیار خوبی ملاحظه گردید.
- ۲- رفتار پوسته قبل از کماتش کاملاً ارتجاعی و بدلیل وجود نارسائی هندسی، دارای رژیم غیر خطی است.
- ۳- کماتش اولیه بصورت موضعی بوده و در فشاری بسیار پائینتر از فشار بحرانی کلاسیک اتفاق می افتد.

- ۴- تفاوت فشار بین دو حالت کماتش اولیه و کماتش کلی کاملاً زیاد و قابل توجه است.
- ۵- مقاومت فراکمانشی قابل توجهی در هر دو نمونه ملاحظه گردید.
- ۶- فروریختگی پوسته ها در فشار بالاتر از فشار کماتش کلی و معمولاً با پدیده پیچش موضعی در ارتفاع ۱/۴ پوسته همراه است.
- ۷- شرایط تکیه گاهی کلاسیک را می توان با تیرهای حلقوی سبک و با کارائی بسیار مناسب فراهم کرد. نسبت وزن این قیدها به وزن پوسته حدود ۲٪ میباشد.

مراجع

- [۱] شوکتی، حسین، " رفتار غیر خطی هندسی پوسته های استوانه ای تحت اثر فشار یکنواخت بیرونی "، ارائه شده به ششمین کنفرانس بین المللی عمران سال ۱۳۸۲، دانشگاه صنعتی اصفهان.
- [۲] شوکتی، حسین، P. Ansourian، " رفتار کماتش ارتجاعی پوسته های استوانه ای با شرایط تکیه گاهی الاستیک "، پنجمین کنفرانس بین المللی عمران سال ۱۳۷۹، دانشگاه فردوسی مشهد.
- [3] Karman T.V. & Tsien H. S. (1941) ; " The Buckling of Thin cylindrical Shells Under Axial Compression ' , J.Aeron . Soc, 8, 303 - 312.
- [4] Booton, M. & Tennyson, R. C. (1977) ; " Design Criteria for Elastic Buckling of Circular cylinders Under Combined Loading Stability of Structures Under Static and Dynamic Loads " , ASCE333- 351 .
- [5] Dowling, P, Harding, J. E, Agelidis, N. and Fahy, W. (1982); "Buckling of Orthogonally Stiffened Cylindrical Shells Used in Offshore Engineering", Proceeding colloquium, Univ. of Stuttgart, Germany, pp. 239 - 274.
- 6-P. Ansourian (1992) , " On the Buckling Analysis and Design of Silos and Tanks " , J . ,Constructional Steel Research 23 , 273 - 294 .
- [7] Showkati, H. and Ansourian, P, "Influence of Primary Boundary conditions on the Buckling of Shallow Cylindrical Shells", J. Construct. Steel Res V.36, No. 1, (1995), pp. 53 - 75.
- [8] Bushnell, D. (1980), "Effect of Cold Bending and Welding on Buckling of Ring Stiffened Cylinders", J.Computer & Structures 12,291-307.

Experimental Study of Buckling and Postbuckling Behavior of Cylindrical Shells

Hossein Showkati

Civil Engineering Faculty, Urmia University

h.showkati@mail.urmia.ac.ir

The buckling and postbuckling response of laterally pressurized cylindrical Shells was investigated experimentally, with special attention given to the influence of elastic boundary conditions. In this program two specimens were fabricated from mild steel sheets of 1 meter length, 1 meter diameter and 0.55 mm thickness, they were tested under the action of inertial vacuum. Initial geometric imperfections were measured.

Their behavior was characterized by prebuckling, initial buckling overall buckling, postbuckling and final collapse by a local torisional failure. The final deformations were measured.

Key Words: Buckling, Boundary condition, Postbuckling