



بررسی کمانش در پوسته استوانه ای با جوش طولی و محیطی

پیام سیدمنیر*، محمود شاکری، ایرج ستاری فر

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۵ فروردین ۱۳۹۶
بازنگری: ۹ خرداد ۱۳۹۶
پذیرش: ۱۱ تیر ۱۳۹۶
ارائه آنلاین: ۲ مرداد ۱۳۹۶

کلمات کلیدی:

کمانش
نقص‌های هندسی
پوسته استوانه‌ای
فشار محوری
جوش
مخازن

چکیده: پوسته‌های استوانه‌ای نازک بطور وسیعی در صنایع نفت، گاز و در صنایع هوا و فضا مورد استفاده قرار می‌گیرند، معمولاً این پوسته‌ها تحت تأثیر نیروهای محوری، فشار داخلی، فشار خارجی و نیروهای پیچشی می‌باشند، بنابراین طراحی ایمن در مقابل کمانش برای این پوسته‌های نازک، بسیار حائز اهمیت است. سال‌ها علت کمانش پوسته‌ها در نیرویی کمتر از نیروی تئوری محاسبه شده از حل کلاسیک به صورت معامی نزد محققین و دانشمندان علم مکانیک مطرح بوده، تا اینکه پس از انجام آزمایش‌های متعدد مشخص شد، نقص‌ها شامل عیب‌های هندسی، تغییر در ضخامت، عدم یکنواختی خواص مواد و شرایط مرزی و به طور کلی هر عیبی در مقایسه با یک پوسته استوانه‌ای کامل بدون عیب، منشاء کاهش نیروی کمانش نسبت به مقدار کلاسیک آن می‌باشد که مهم‌ترین آنها عیوب هندسی و خارج از گردی بودن پوسته نسبت به حالت کامل استوانه است. این نقص‌ها معمولاً تابع روش ساخت می‌باشند، جوشکاری پوسته‌ها در مخازن تحت فشار خود یکی از دلایل مهم ایجاد نقص‌های هندسی بخصوص در پیرامون محل جوشکاری است. این پژوهش به بررسی اثرات جوش در پوسته‌های استوانه‌ای تحت بار محوری می‌پردازد، به این ترتیب که نمونه‌هایی از جنس فولاد با جوش طولی و محیطی ساخته شده و عیب‌های هندسی آنها اندازه‌گیری و سپس تحت آزمایش کمانش قرار گرفته‌اند. همچنین عیب‌های اندازه‌گیری شده در مدل المان محدود اعمال و نیروی کمانش حاصل از آنالیز المان محدود با آزمایش تجربی مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد جوشکاری باعث کاهش قابل ملاحظه نیروی کمانش نسبت به مقدار نیروی بحرانی کلاسیک گردیده و کمانش پوسته با جوش طولی و محیطی به دلیل افزایش عیب‌های هندسی در نیرویی کمتر از پوسته‌ای با جوش فقط طولی رخ می‌دهد.

۱- مقدمه

اولین تئوری در خصوص پایداری پوسته‌های استوانه‌ای در مقابل کمانش توسط لرنز در ۱۹۰۸، تیموشنکو در ۱۹۱۰ و سوات ول در ۱۹۱۴ مطرح گردید، اولین آزمایش‌های تجربی توسط روبرتسون در ۱۹۲۹، فلوگه در ۱۹۳۲، ویلسون و نیومارک در ۱۹۳۳ و لوندکویست در ۱۹۳۳ انجام شد [۱]. در ابتدا عدم تطابق حاصل از تحلیل تئوری و نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی در محافل علمی مطرح بود. تا اینکه دلایل پراکندگی نتایج حاصل از اندازه‌گیری نیروی کمانش و اختلاف قابل ملاحظه آن با مقدار کلاسیک مشخص گردید. در واقع فرضیات تحلیل کلاسیک نسبت به واقعیت، دلیل اصلی اختلاف نتایج تجربی و پراکندگی آن‌ها نسبت به یکدیگر می‌باشد. این تفاوت در شرایط مرزی، وجود عیب در شکل هندسی پوسته نسبت به پوسته کامل، عدم یکنواختی در ضخامت و عدم یکنواختی در خواص مکانیکی جنس ماده (به خصوص در پوسته‌های کامپوزیتی) می‌باشد. تحقیقات وسیع و دنباله‌داری جهت مشخص شدن تأثیر نقص‌های اولیه هندسی در کاهش نیروی کمانش بحرانی نسبت به مقدار کلاسیک آن توسط دانل و وان [۲] در ۱۹۵۰، کویتز [۳] و [۴] در ۱۹۶۳، سابی [۵] در ۱۹۶۶، آربوز و ویلیامز [۶] در ۱۹۷۷، سینگر و آبرامویچ [۷] در ۱۹۹۵، تاکایا کوبایاشی [۸] در ۲۰۱۰، فانگ ژو [۹] در ۲۰۱۰، چولین [۱۰] در ۲۰۱۲، تیان چن [۱۱] در ۲۰۱۴ و سازمان

هوافضای آمریکا [۱۲] انجام شده و تاکنون نیز ادامه دارد. در مجموع این تحقیقات نشان داده است، نیروی بحرانی کمانش با افزایش مقدار نقص‌های هندسی اولیه و متناسب با شکل عیب اولیه کاهش چشم‌گیری پیدا می‌کند و این نقص‌ها نیز خود تابع روش ساخت پوسته می‌باشند. در این پژوهش کمانش پوسته‌های استوانه‌ای جوشکاری شده دارای جوش طولی و محیطی مورد بررسی قرار گرفته است. کمانش پوسته استوانه‌ای دارای جوش، تحت بارگذاری محوری با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس تحلیل گردیده و با استفاده از یک دستگاه پرس پیچی برای چندین نمونه با جوش‌های طولی و محیطی آزمایش کمانش تحت بار محوری انجام شده و نتایج به دست آمده با نتایج حاصل از روش المان محدود و روش کلاسیک مقایسه شده است. نتایج تجربی و عددی به دست آمده مطابقت بسیار زیادی با یکدیگر داشته ولی با محاسبات تحلیلی فاصله قابل ملاحظه‌ای نشان می‌دهند.

۲- روش پژوهش و ساخت پوسته‌ها

سه عدد پوسته از ورق فولادی ST12 به روش نورد و جوش و با مشخصات ابعادی مندرج در جدول ۱ ساخته شد. به منظور بررسی تأثیر جوش طولی و محیطی نمونه‌ها به نحوی ساخته شد که دو پوسته SL1 و SL2 مطابق شکل ۱ فقط دارای جوش طولی و پوسته SLC1 مطابق شکل ۲ دارای جوش طولی و محیطی باشد. ورق پوسته‌ها با دستگاه برش

جدول ۱: مشخصات ابعادی پوسته‌ها

Table 1. Description of the shell specimens

کد پوسته	قطر خارجی (میلی‌متر)	طول (میلی‌متر)	ضخامت (میلی‌متر)	نوع جوش
SL1	۳۰۲	۲۰۰	۱	طولی
SL2	۳۰۲	۲۰۰	۱	طولی
SLC1	۳۰۲	۲۰۰	۱	طولی + محوری

الاستیسیته یک نمونه آزمایش کشش بر اساس استاندارد E8 از ورق پوسته‌ها ساخته و توسط دستگاه کشش تحت آزمایش کشش قرار گرفت. نتیجه آزمایش کشش به شرح جدول ۲ می‌باشد.

جدول ۲: مشخصات مکانیکی ورق پوسته‌ها

Table 2. Mechanical properties of shell specimens

جنس ورق	ضخامت (میلی‌متر)	تنش تسلیم (MPa)	تنش ماکزیمم (MPa)	کرنش در ماکزیمم تنش
ST12	۱	۲۲۱/۶	۲۹۸	۳۸/۸ درصد

۲-۳- اندازه‌گیری نقص‌های هندسی ناشی از فرآیند ساخت

اندازه‌گیری عیب‌های هندسی با استفاده از اسکن سه‌بعدی انجام شده است. در این روش دوربین تصویربرداری مطابق شکل ۳ با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر تعداد زیادی از نقاط روی پوسته که در واقع تشکیل ابر نقاط را می‌دهد، ثبت نموده و شکلی سه‌بعدی از پوسته با اندازه واقعی آن ایجاد می‌نماید. سپس در نرم‌افزار کتیا^۲ این شکل سه‌بعدی تشکیل یافته از تعداد بی‌شماری نقطه در هر مقطع مورد نیاز بررسی و شکل عیب و نقص‌ها و اندازه آن‌ها نسبت به دایره مبنا ترسیم می‌گردد.

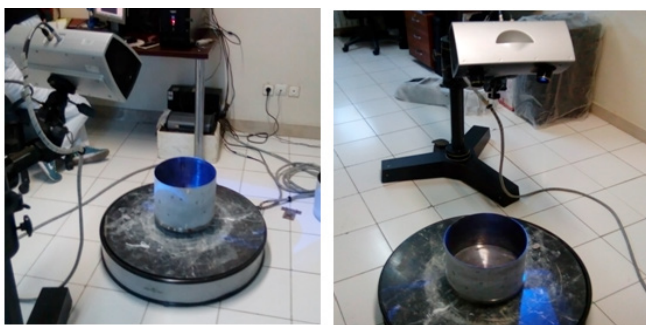


Fig. 3. 3D scanner camera

شکل ۳: دستگاه تصویربرداری سه‌بعدی اندازه‌گیری عیوب

با توجه به اینکه تأثیر عیوب در تحلیل المان محدود به این ترتیب است که میزان فرورفتگی یا بیرون آمدگی در جهت عمود بر سطح پوسته، روی گره‌ها اعمال می‌گردد [۷ و ۱۳] و فاصله المان‌ها نیز در جهت طولی پنج

دقیق به طوری که راستای لبه‌ها کاملاً موازی باشند، بریده و سپس با استفاده از دستگاه نورد سه غلتکه، تسمه‌ها به شکل استوانه درآورده شده و توسط فرآیند جوشکاری با گاز خنثی^۱ درز پوسته بدون فیلر، جوشکاری گردید.

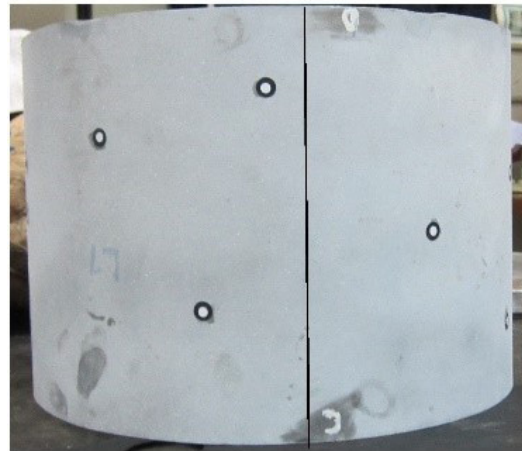


Fig. 1. Longitudinal weld in Specimens SL1 and SL2

شکل ۱: جوش طولی در پوسته‌های SL1,SL2

نمونه SLC1 از دو پوسته به طول ۱۰۰ میلی‌متر به نحوی که جوش‌های طولی آن‌ها در یک راستا نباشند، روی هم مونتاژ، گونیا و با یک جوش محیطی ساخته شد.

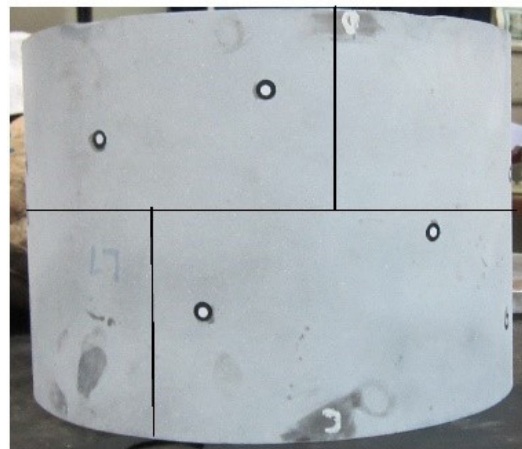


Fig. 2. Longitudinal and Circumferential welds in specimen SLC1

شکل ۲: چیدمان جوش طولی و محیطی در پوسته SLC1

۲-۱- مشخصات ابعادی نمونه‌ها

مشخصات ابعادی سه نمونه استوانه‌ای ساخته شده به شرح جدول ۱ می‌باشد.

۲-۲- خصوصیات مکانیکی ورق پوسته

به منظور مشخص نمودن خصوصیات مکانیکی ورق‌هایی که پوسته‌ها از آن ساخته شده است، از جمله تنش تسلیم، منحنی تنش-کرنش و مدول

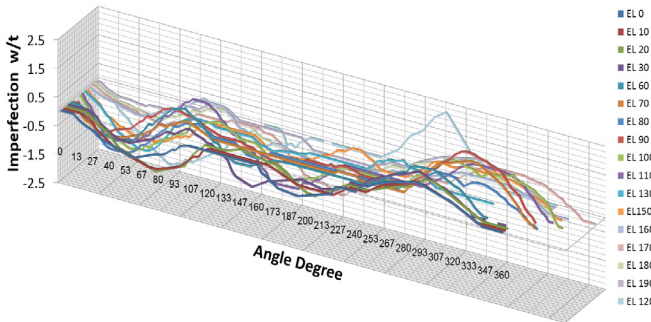


Fig. 6. Geometrical Imperfections on various sections in specimen SLC1

شکل ۶: نقص‌های هندسی در مقاطع مختلف پوسته SLC1

جدول ۳: اطلاعات آماری نقص‌های اندازه‌گیری شده در پوسته‌ها

Table 3. Statistical information of shells imperfections

کد پوسته	بیشترین (برآمدگی) (میلی‌متر)	کمترین (فرورفتگی) (میلی‌متر)	میانگین نقص‌ها (میلی‌متر)	انحراف معیار نقص‌ها
SL1	۰/۸۳۰	-۱/۵۵	۰/۴۱	۰/۴۹۵
SL2	۱/۰۳۸	-۲/۶۶	۰/۵۶	۰/۶۲۸
SLC1	۲/۲۹	-۲/۳۷	۰/۶۳	۰/۷۳۹

به سمت حل‌های کامپیوتری هدایت شده است [۸ و ۱۴]، در چنین مواردی سادگی معادلات حاکم از اهمیت کمتری برخوردار است. در نتیجه علاقه به استفاده از معادلات دائل کاسته شده است. باین حال سادگی نسبی معادلات به طور ایده آلی به‌عنوان مقدمه‌ای بر بررسی پایداری پوسته‌ها مورد توجه است. معادلات پایداری با این فرض که استوانه در دو انتها روی تکیه‌گاه ساده قرار داشته و تحت بار محوری که به‌طور یکنواخت توزیع شده است به دست آمده‌اند. در حین بارگذاری استوانه کوتاه شده و قطر آن در نقاط دور از تکیه‌گاه افزایش می‌یابد. تغییر شکل‌های اولیه متقارن بوده و بار بحرانی کوچک‌ترین باری است که در آن تعادل متقارن، پایداری پوسته از بین می‌رود.

تنش بحرانی با توجه به ابعاد و مشخصات هندسی پوسته‌ها از رابطه

زیر به دست می‌آید [۱]:

$$\sigma_{CL} = 0.605E \frac{h}{R} = 0.605 \times 189 \times 10^3 \times \frac{1}{150.5} = 759.5 \text{ MPa}$$

که در آن σ_{CL} تنش بحرانی، E مدول الاستیسیته N/m^2 ، h ضخامت پوسته mm و R شعاع متوسط پوسته mm است.

این تنش که به تنش کلاسیک نیز معروف است میزان تنش بحرانی شروع کمانش در پوسته ی مورد بحث می‌باشد. نیروی بحرانی معادل این تنش برابر $۷۳۲/۷۰۰$ نیوتون می‌باشد.

میلی‌متر می‌باشد، به همین دلیل روی مدل سه‌بعدی حاصل از تصویربرداری در نرم‌افزار کتیا از لبه تا انتهای پوسته به فاصله هر پنج میلی‌متر مقطعی زده شده و دایره‌ی کامل مینا نیز با شعاع $۱۵۰/۵$ میلی‌متر ترسیم و سپس اختلاف نقاط واقعی با دایره مینا که همان میزان نقص‌ها در جهت شعاع می‌باشد به دست می‌آید. دیاگرام تغییرات شعاع یا همان نقص‌های هندسی که نمایان‌گر خارج از مرکز بودن، بیضی بودن و تغییر شعاع در مقاطع مختلف است، در پوسته SL1 مطابق شکل ۴ می‌باشد.

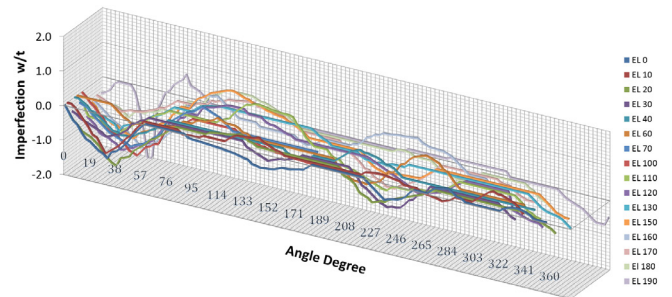


Fig. 4. Geometrical Imperfections on various sections in specimen SL1

شکل ۴: نقص‌های هندسی در مقاطع مختلف پوسته SL1

تحلیل اطلاعات در خصوص نقص‌های پوسته SL2 که دارای جوش طولی می‌باشد با همان روش ذکر شده در پوسته SL1 می‌باشد. دیاگرام تغییرات شعاع یا همان نقص‌های هندسی در شکل ۵ نشان داده شده است.

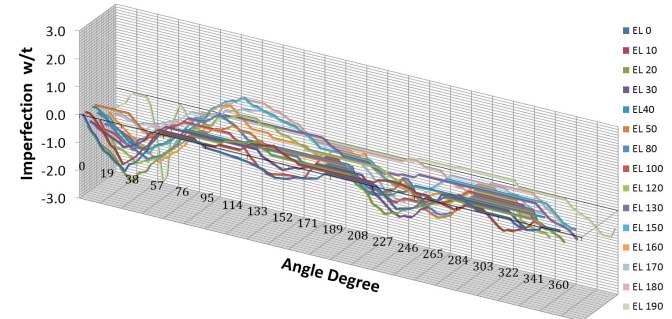


Fig. 5. Geometrical Imperfections on various sections in specimen SL2

شکل ۵: نقص‌های هندسی در مقاطع مختلف پوسته SL2

تغییرات شعاع یا همان نقص‌های هندسی برای پوسته SLC1 در شکل ۶ نشان داده شده است.

اطلاعات آماری نقص‌ها شامل بیشترین و کمترین مقدار، انحراف معیار و متوسط اندازه‌ی آن‌ها در جدول ۳ آمده است.

۳- تحلیل کلاسیک پوسته استوانه ای تحت فشار محوری

در بسط معادلات پایداری پوسته‌های استوانه‌ای تأکید اصلی بر معادلات نسبتاً ساده‌ای است که توسط دائل [۱ و ۲] پیشنهاد شده است. با وجود ساده‌سازی، این معادلات اساس اغلب آنالیزهای پایداری در کتب و مقالات را تشکیل می‌دهد. در سال‌های اخیر بسیاری از فعالیت‌ها روی آنالیز پوسته‌ها

۴- تحلیل عددی به کمک المان محدود

با توجه به پیچیدگی معادلات غیرخطی در تحلیل پوسته‌های استوانه‌ای با عیب‌های اولیه تحت فشار محوری، عملاً حل تحلیلی پوسته بسیار مشکل می‌باشد. به منظور برآورد نیروی کماتش و رفتار پس از کماتش، پوسته دارای عیب اولیه از روش‌های عددی و نرم‌افزارهای تحلیل روش المان محدود استفاده می‌شود. نرم‌افزار مورد استفاده در تحلیل پوسته‌های مورد نظر آباکوس^۱ [۱۵] می‌باشد. دو روش عمده در تحلیل کماتش با نرم‌افزار آباکوس مورد استفاده قرار می‌گیرد، تحلیل خطی و تحلیل غیرخطی، در تحلیل خطی مودهای کماتش و مقادیر ویژه متناظر با هر مود قابل حصول است. ولی نتیجه تحلیل آن براساس تئوری کلاسیک کماتش استوار است و مقادیر به دست آمده از این روش تحلیل تقریباً معادل حل کلاسیک می‌باشد. در این روش امکان اعمال نقص‌ها وجود ندارد. ولی این امکان را مهیا می‌سازد تا مطابق تئوری کویتز^۲ [۳ و ۴] در تحلیل غیرخطی کماتش، نتایج حاصل از مودهای کماتش تحلیل خطی را در تحلیل غیرخطی وارد کرد تا به این طریق با تقریب نسبتاً خوبی تأثیر نقص‌ها را در تحلیل غیرخطی اعمال نموده و منحنی نیرو-جابجایی را به دست آورد. در تحلیل خطی معمولاً اولین مود کماتش کم‌ترین مقدار ویژه را دارد و به تبع آن کم‌ترین نیروی بحرانی نیز متعلق به همین مود می‌باشد. استفاده دیگر تحلیل خطی به دست آوردن اندازه مناسب برای شبکه‌بندی می‌باشد. با توجه به اینکه هر چه اندازه شبکه ریزتر انتخاب شود نتایج به تحلیل کلاسیک نزدیک‌تر است ولی زمان بیشتری صرف تحلیل می‌شود، مطابق موارد توصیه شده در مرجع [۱۴] مناسب این است با یک حدس اولیه بر مبنای درصدی از طول نیم‌موج حاصل از کماتش، طول و عرض المان را انتخاب و سپس تحلیل را انجام داد. با کوچک‌تر کردن ابعاد المان در تحلیل‌های بعدی به نقطه بهینه زمان تحلیل و دقت در نتایج می‌توان دست یافت و از اندازه به دست آمده در تحلیل غیرخطی می‌بایست استفاده نمود. در تحلیل غیرخطی امکان اعمال نقص‌های اولیه اندازه‌گیری شده به روش مستقیم هم وجود دارد. در این پروژه علاوه بر تحلیل خطی به دلایل ذکر شده در بالا، از تحلیل غیرخطی با اعمال نقص‌های حاصل از مود اول کماتش که به صورت متقارن بوده و از یک تابع سینوسی پیروی می‌کند و همچنین تحلیل غیرخطی با اعمال مستقیم نقص‌های اندازه‌گیری شده در گره‌های المان‌بندی پوسته شبیه‌سازی شده بهره برده شده است. تا اولاً تئوری کویتز در تحلیل پوسته با نقص‌های اولیه متقارن در مقایسه با نتایج تجربی انجام شده ارزیابی گردد؛ ثانیاً تحلیل غیرخطی با اعمال نقص‌های واقعی اندازه‌گیری شده جهت مقایسه‌ی نتایج آنالیز المان محدود با نتایج تجربی صورت پذیرفته باشد تا بتوان ضمن بررسی تأثیر نقص‌ها مقایسه‌ای بین نتایج تجربی و عددی داشت.

۴-۱- مدل‌سازی و المان‌بندی نمونه‌ها

به منظور شبیه‌سازی، مدل کاملی از پوسته استوانه‌ای با ابعاد ساخته شده به صورت سه بعدی با تکیه‌گاه ساده در محیط برنامه آباکوس ایجاد می‌گردد. خصوصیات ماده به دست آمده در آزمایش کشش، شامل خواص الاستیک و پلاستیک در بخش خصوصیات ماده وارد شده و شرایط مرزی متناسب با تکیه‌گاه ساده به‌نحوی که لبه پایین از حرکت در همه جهات محدود شده و به لبه بالا فقط در جهت طولی به سمت پایین به اندازه دو میلی‌متر امکان حرکت داده می‌شود، اعمال می‌گردد. نوع المان انتخابی به منظور اجتناب از پیچش و برش المان‌ها، چهارگوش مربعی S4R5 [۸ و ۱۵] و اندازه آن‌ها ۵*۵ با توجه به نتیجه آنالیز حساسیت شبکه‌بندی در نظر گرفته شده است. نوع تحلیل مدل با نقص‌های اولیه به دو روش انجام شده و ابتدا از نتایج حاصل از مود اول تحلیل خطی به‌عنوان فایل ورودی نقص‌ها در تحلیل غیرخطی استفاده شده است. این روش مطابق تئوری کویتز می‌باشد، سپس به‌طور مستقیم عیب‌های هندسی اندازه‌گیری شده به‌عنوان فایل ورودی نقص‌ها در تحلیل غیرخطی وارد گردیده است. قطعاً اعمال مستقیم نقص‌های هندسی که میزان فرورفتگی و بیرون‌آمدگی نسبت به نمونه کامل در مختصات استوانه‌ای می‌باشد، به‌نحوی که شعاع واقعی استوانه در محل گره‌های المان را مشخص می‌کند نتایج دقیق‌تری در بر خواهد داشت.

۴-۲- تحلیل کماتش پوسته با اعمال نقص‌های مود اول (تحلیل غیرخطی)

نقص‌های هندسی از عوامل کاهش نیروی کماتش نسبت به بار بحرانی کلاسیک می‌باشند و نتایج تجربی نشان می‌دهد نیروی کماتش واقعی بین ده تا هشتاد درصد نیروی کلاسیک می‌باشد [۲، ۵ و ۶]، به همین دلیل به منظور تخمین نیروی کماتش نسبت به واقعیت می‌بایست نقص‌های هندسی را اندازه‌گیری و در مدلینگ المان محدود اثر داد. با توجه به اینکه عملاً اندازه‌گیری نقص‌ها به‌خصوص برای سازه‌های بزرگ امکان‌پذیر نبوده و بسیار مشکل و هزینه‌بردار می‌باشد، مطابق تئوری کویتز [۳] می‌توان نقص‌های حاصل از مود کماتش تحلیل خطی که کم‌ترین مقدار ویژه را دارد به‌عنوان نقص‌های اولیه در تحلیل غیرخطی وارد نمود تا برآورد نسبتاً نزدیکی به واقعیت داشت. به منظور اعمال نقص‌های اولیه در تحلیل، فایل خروجی مود اول کماتش تحلیل خطی که کمترین مقدار ویژه را دارد، در تحلیل وارد می‌نماییم. نیروی کماتش با اعمال نقص‌ها، مطابق مود اول کماتش تحلیل خطی، تقریباً ۱۶ درصد نیروی کماتش کلاسیک می‌باشد. منحنی نیرو-جابجایی این روش تحلیل در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود نیروی بحرانی کماتش در این حالت برابر ۱۱۷/۰۹۴ نیوتون می‌باشد.

شکل کماتش یافته در این تحلیل مطابق شکل ۸ می‌باشد.

۴-۳- تحلیل کماتش پوسته با اعمال نقص‌های واقعی اندازه‌گیری شده

بهترین روش برای تخمین قابل‌قبول نیروی بحرانی کماتش اعمال

- 1 ABAQUS
- 2 KOITER

ترتیب شکل واقعی پوسته و عیب های حاصل از ساخت و محل جوش ها در مدل وارد و تحلیل نزدیک به واقعیت انجام می گردد.

۴-۳-۱- تحلیل پوسته SL1 با اعمال نقص های واقعی

پس از شبیه سازی پوسته کامل در بخش تحلیل غیرخطی، با دستور ایمپرفکشن فایل از قبل آماده شده عیب های هندسی که میزان جابجایی گره ها در راستای عمود بر سطح پوسته را مشخص می نماید، بر اساس مختصات استوانه ای روی گره ها در مدل اعمال شده و تحلیل صورت پذیرفت، نتیجه تحلیل به صورت منحنی نیرو-جابجایی در شکل ۹ و وضعیت کمناش یافته در شکل ۱۰ آمده است، همان طور که در شکل مشاهده می شود، مقدار نیروی کمناش حدی به دست آمده در نتیجه تحلیل $104/503$ نیوتون و میزان جابجایی در نیروی کمناش $0/26$ میلی متر می باشد.

۴-۳-۲- تحلیل پوسته SL2 با اعمال مقادیر واقعی نقص ها

مطابق آنچه برای پوسته SL1 گفته شد نقص های هندسی اندازه گیری شده در تحلیل المان محدود پوسته SL2 اعمال گردید. مقدار نیروی کمناش حدی به دست آمده در نتیجه تحلیل $101/115$ نیوتون و میزان جابجایی در نیروی کمناش $0/3$ میلی متر می باشد. منحنی نیرو-جابجایی در شکل ۱۱ و کمناش نمونه در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

۴-۳-۳- تحلیل پوسته SLC1 با اعمال مقادیر واقعی نقص ها

نقص های هندسی اندازه گیری شده در تحلیل المان محدود پوسته SLC1 اعمال گردید. مقدار نیروی کمناش حدی به دست آمده در نتیجه تحلیل $91/066$ نیوتون و میزان جابجایی در نیروی کمناش $0/262$ میلی متر می باشد. منحنی نیرو-جابجایی در شکل ۱۳ و کمناش نمونه در شکل ۱۴ نشان داده شده است.

۵- آزمایش کمناش پوسته های جوشکاری شده

پوسته های استوانه ای نورد و جوشکاری شده پس از اندازه گیری عیب های هندسی به منظور مشخص کردن نیروی بحرانی کمناش و به دست آوردن منحنی نیرو-جابجایی با دستگاه پرس پیچی تحت آزمایش کمناش قرار گرفتند. به منظور اعمال نیروی یکنواخت در سرتاسر لبه پوسته ها برای پایین و بالای استوانه دو عدد پولکی، طراحی و ساخته شد. تا شرایط اعمال بار روی لبه ها یکنواخت و از ایجاد ممان جلوگیری شود. ضمن اینکه لبه پوسته ها کاملاً موازی بوده و پولکی ها جهت انطباق بهتر با پوسته دارای یک نافی پنج میلی متری بوده که به داخل پوسته وارد شده و شرایطی را ایجاد می کند که مشابه اتصال کله گی به پوسته و یا اتصال پوسته ها به یکدیگر در بدنه مخازن باشد. با توجه به اینکه آزمایش کمناش با پولکی انجام گردید و تبعیت لبه های پوسته از نافی پولکی اجتناب ناپذیر می باشد، به همین دلیل اندازه گیری مقادیر نقص ها نیز با مونتاژ پولکی ها صورت گرفت تا مقدار

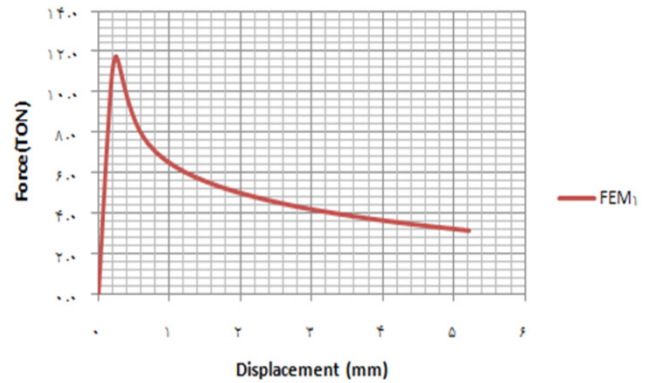


Fig. 7. Load – Displacement curve in nonlinear analysis with first mode of buckling imperfections

شکل ۷: منحنی نیرو-جابجایی در تحلیل غیرخطی با اعمال نقص های مود اول کمناش

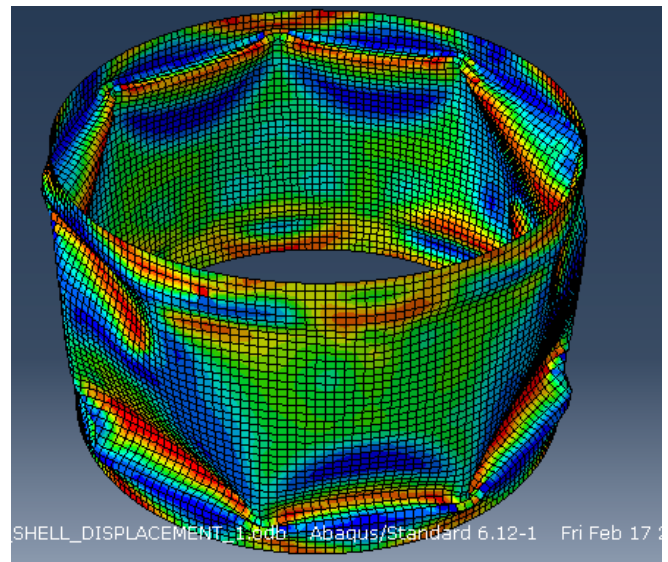


Fig. 8. Buckling deformation contours in nonlinear analysis with first mode of buckling imperfections

شکل ۸: وضعیت کمناش یافته تحلیل غیرخطی با اعمال نقص های مود اول کمناش تحلیل خطی

مستقیم نقص های اندازه گیری شده در تحلیل المان محدود مدل پوسته کامل می باشد. برای این کار در بخش استپ^۱ نوع تحلیل استاتیک ریکس^۲ انتخاب می گردد. سپس دستور ایمپرفکشن^۳ با مشخص کردن مسیر فایل ورودی نقص ها که قبلاً در نوت پد^۴ و براساس مقادیر اندازه گیری شده در مختصات استوانه ای آماده شده است، قبل از ردیف استپ در فایل برنامه مدلینگ وارد و سپس در بخش جاب^۵ تحلیل غیرخطی انجام می گردد. در این فایل میزان عیب هر گره از المان که قبلاً در مدل کتیا مشخص شده وارد می شود، به این

- 1 STEP
- 2 STATIC RIKS
- 3 IMPERFECTION
- 4 NOTE PAD
- 5 JOB

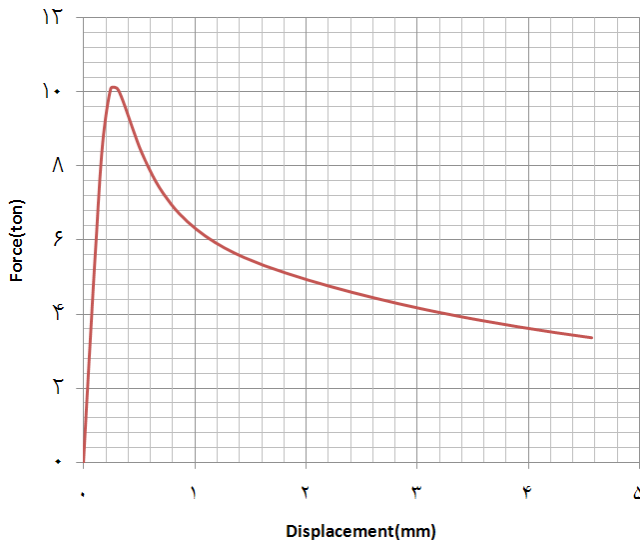


Fig. 11. Nonlinear analysis load-displacement curves

شکل ۱۱: منحنی نیرو-جابجایی در تحلیل غیرخطی با اعمال نقص‌ها

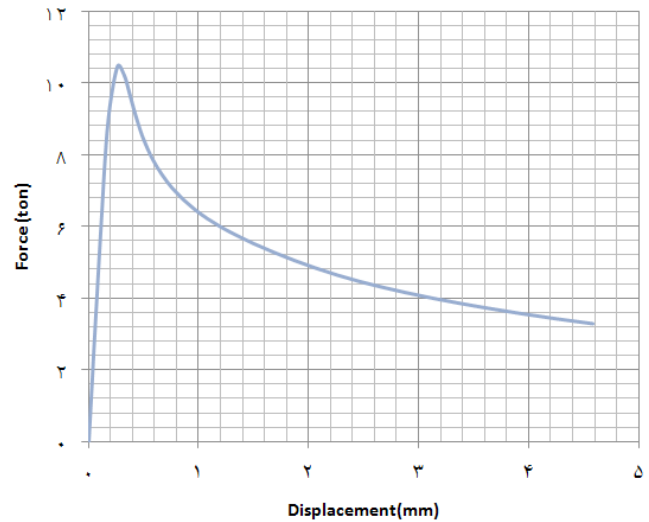


Fig. 9. Nonlinear analysis load-displacement curves

شکل ۹: منحنی نیرو-جابجایی در تحلیل غیرخطی با اعمال نقص‌ها

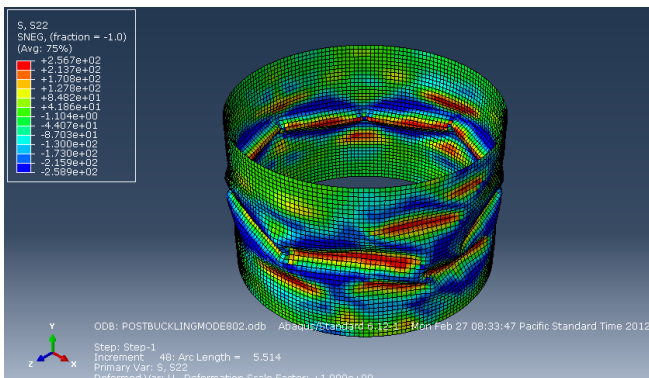


Fig. 12. Buckling deformation of the shell specimen SL2

شکل ۱۲: کمانش پوسته SL2

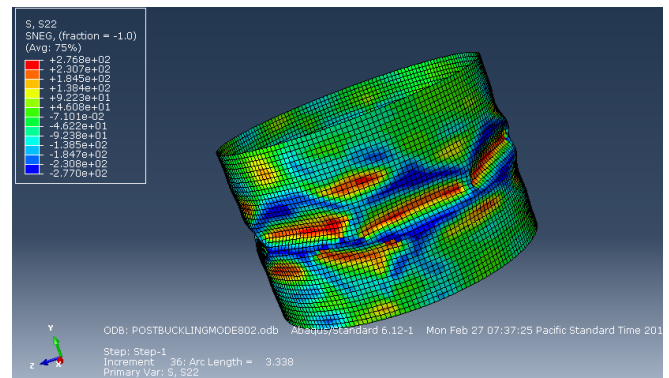


Fig. 10. Buckling deformation of the shell specimen SL1

شکل ۱۰: کمانش پوسته SL1

بررسی نیروی کمانش بحرانی در محدوده ی الاستیک است، بنابراین رفتار پس از کمانش مدنظر نبوده و بعد از جابجایی حدود ۲/۷ میلی‌متر بازویی پرس، آزمایش متوقف گردید. نیروی کمانش در جابجایی ۱/۸۵ میلی‌متر معادل ۱۰۰/۷۸۷ نیوتون و منحنی نیرو-جابجایی پوسته در شکل ۱۶ نشان داده شده است.

نمایی از کمانش نمونه SL1 در شکل ۱۷ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، کمانش در قسمت بالایی نزدیک به لبه شروع و در ادامه بخش پایینی، کمی بالاتر از لبه پایین دچار فرورفتگی شده است.

۵-۲- آزمایش تجربی کمانش پوسته های SL2
نمونه SL2 مشابه نمونه SL1 مورد آزمایش کمانش قرار گرفت و پس از جابجایی حدود ۴ میلی‌متر بازویی بالایی پرس، آزمایش متوقف گردید. نیروی کمانش در جابجایی ۱/۷۴ میلی‌متر معادل ۹۲/۳۳۴ نیوتون و منحنی نیرو-جابجایی نمونه در شکل ۱۸ نشان داده شده است.

عیب‌های هندسی اندازه‌گیری شده دقیقاً مطابق شرایط آزمایش کمانش بوده و شبیه‌سازی کامپیوتری و آنالیز المان محدود با واقعیت شرایط تست، حداکثر انطباق را داشته باشد. شکل ۱۵ شرایط آزمایش و نحوه مونتاژ پولکی‌ها روی پوسته را نشان می‌دهد.

۵-۱- آزمایش تجربی کمانش پوسته های SL1

نمونه SL1 که تنها دارای جوش طولی می باشد، ابتدا روی پولکی پایین قرار داده، سپس بازویی بالایی پرس به آهستگی به سمت پایین حرکت داده شد. به دقت وضعیت نشستن نافی پولکی‌ها در داخل پوسته بررسی گردید تا به‌طور یکنواخت نافی پولکی داخل پوسته قرار بگیرد و سرتاسر پولکی بدون فاصله در بالا و پایین روی لبه پوسته نشاندند. این ملاحظات به این منظور است که نیروی اعمالی از سوی پرس به‌طور یکنواخت در تمام طول لبه ی پوسته توزیع گردد و هیچ نیرویی به‌جز فشار محوری تا حد ممکن وجود نداشته باشد. سپس حد نیروی ۳۰ تن با سرعت یک میلی‌متر بر دقیقه روی دستگاه تنظیم گردید، پوسته تحت فشار قرار گرفت و ناگهان به همراه صدا کمانش در قسمت بالای پوسته اتفاق افتاد. با توجه به اینکه هدف پروژه

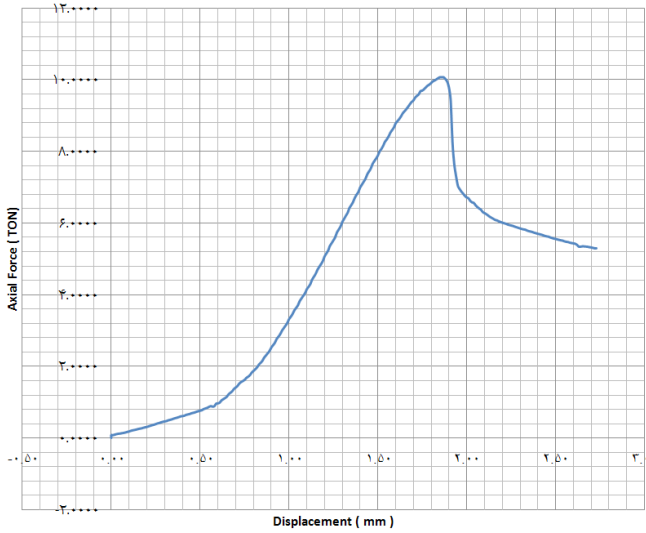


Fig. 16. Load - Displacement Curve SL1

شکل ۱۶: منحنی نیرو-جابجایی کماتش نمونه SL1

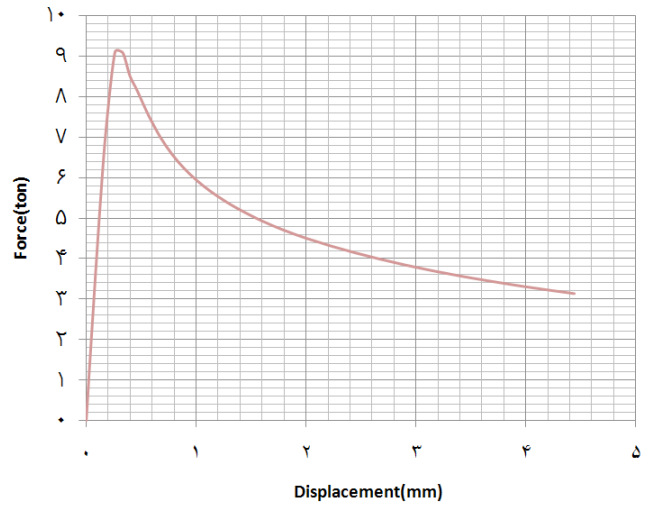


Fig. 13. Nonlinear analysis load-displacement curves

شکل ۱۳: منحنی نیرو-جابجایی در تحلیل غیرخطی با اعمال نقص‌ها

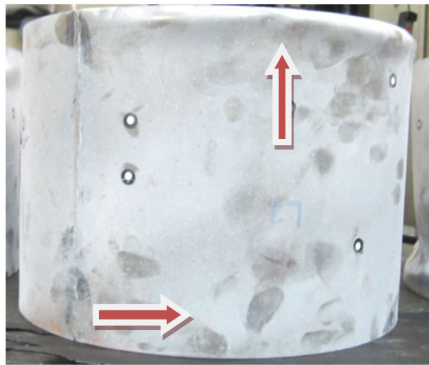


Fig. 17. Buckling deformation of the shell specimen SL1

شکل ۱۷: نمایی از کماتش نمونه SL1

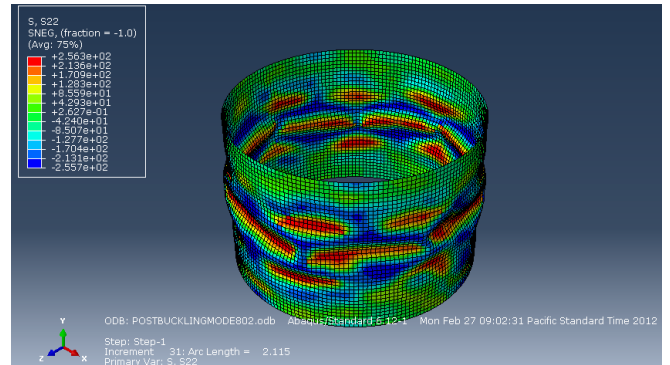


Fig. 14. Buckling deformation contour SLC1

شکل ۱۴: کماتش پوسته SLC1

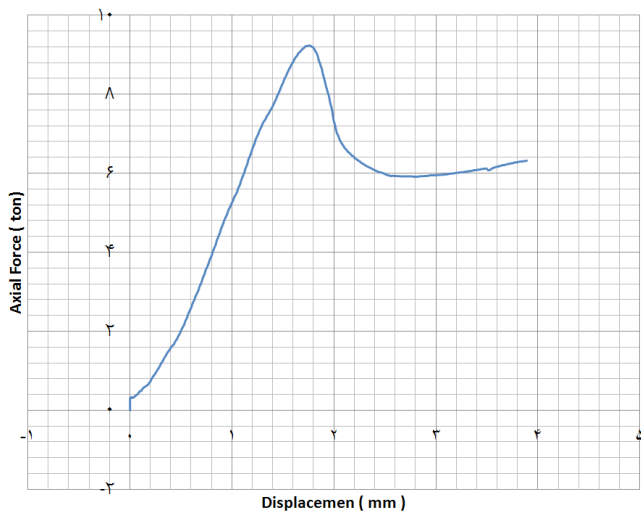


Fig. 18. Load - Displacement Curve SL2

شکل ۱۸: منحنی نیرو-جابجایی کماتش نمونه SL2



Fig. 15. Experimental platform

شکل ۱۵: آزمایش کماتش تحت فشار محوری



Fig. 21. Buckling deformation of the shell specimen SLC2

شکل ۲۱: نمایی از کماتش نمونه SLC1

۶- بررسی نتایج

در این بخش نتایج حاصل از آزمایش کماتش و آنالیز المان محدود در حالت های مختلف بررسی و با یکدیگر مقایسه شده است.

۶-۱- مقایسه نتایج آزمایش تجربی و بررسی اثر جوش طولی و محیطی بر نیروی کماتش

منحنی نیرو-جابجایی آزمایش کماتش سه پوسته ساخته شده جهت مقایسه در شکل ۲۲ آورده شده است:

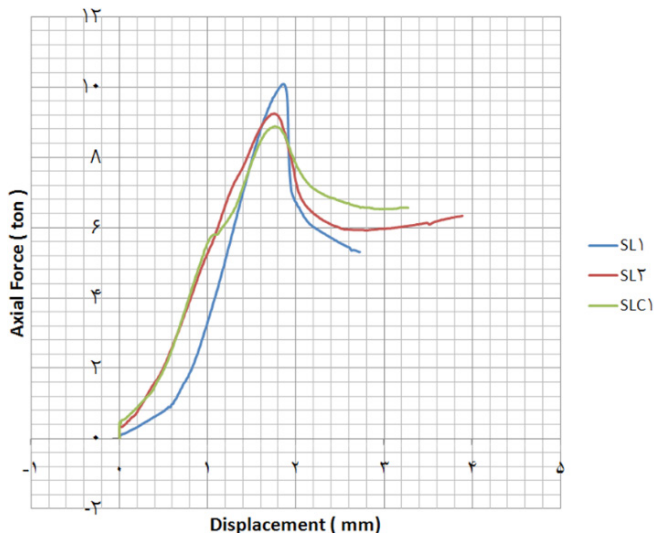


Fig. 22. Experimental load-displacement curves

شکل ۲۲: مقایسه منحنی نیرو-جابجایی سه پوسته تحت آزمایش

همان طور که در شکل مشاهده می شود شیب اولیه در هر سه منحنی تقریباً یکسان است و نیروی کماتش پوسته SLC1 که دارای جوش طولی و محیطی می باشد، از نیروی کماتش دو پوسته دیگر که فاقد جوش محیطی می باشند کمتر است. مقایسه تنش حدی کماتش پوسته ها با تنش کلاسیک و تنش تسلیم در جدول ۴ نشان آورده شده است.

در جدول ۶ پارامتر بی بعد w_0/t نمایانگر مقدار متوسط عیب هندسی است که w_0 میزان فرورفتگی یا بیرون آمدگی نسبت به دایره مینا در پوسته

نمایی از کماتش نمونه SL2 در شکل ۱۹ نشان داده شده است، همان طور که در شکل دیده می شود کماتش در قسمت بالایی و روی خط جوش طولی دچار فرورفتگی شده است.

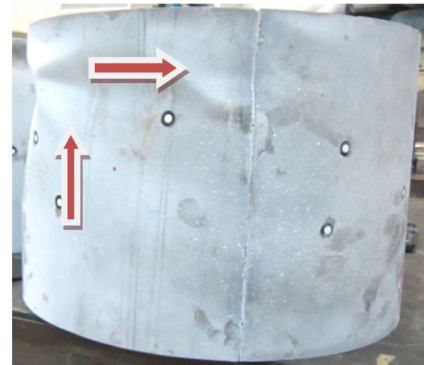


Fig. 19. Buckling deformation of the shell specimen SL2

شکل ۱۹: نمایی از کماتش نمونه SL2

۵-۳- آزمایش تجربی کماتش پوسته های SLC1

نمونه SLC1 پس از مونتاژ پولکی ها به بازوی بالا و پایین پرس روی قرار داده شد. به دقت وضعیت نشست نافی پولکی ها در داخل پوسته بررسی شد. بعد از جابجایی حدود ۳/۵ میلی متر بازوی بالایی پرس آزمایش متوقف گردید. نیروی کماتش در جابجایی ۱/۷۶ میلی متر معادل ۸۸/۹۲۰ نیوتون و منحنی نیرو-جابجایی نمونه در شکل ۲۰ نشان داده شده است.

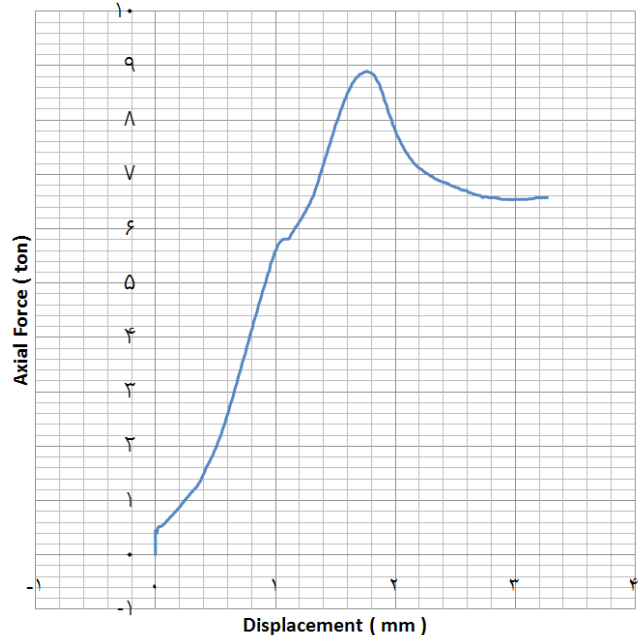


Fig. 20. Load - Displacement Curve SLC2

شکل ۲۰: منحنی نیرو-جابجایی کماتش نمونه SLC1

نمایی از کماتش نمونه SLC1 در شکل ۲۱ نشان داده شده است. همان طور که در شکل دیده می شود کماتش نزدیک به لبه بالایی شروع و در ادامه دچار فرورفتگی شده است.

جدول ۵: مقایسه نیروی کماتش واقعی با آنالیز المان محدود و اعمال مقادیر نقص های مود اول کماتش

Table 5. Experimental and numerical results of the shells with first mode of buckling imperfection

درصد اختلاف نتایج تجربی با تحلیل غیرخطی	نیروی کماتش در آنالیز المان محدود (نیوتن)	نیروی کماتش (نیوتن)	کد پوسته
۱۰٪	۱۱۷/۰۹۴	۱۱۰/۷۸۷	SL1
۲۱٪	۱۱۷/۰۹۴	۹۲/۳۳۴	SL2
۲۴٪	۱۱۷/۰۹۴	۸۸/۹۲۰	SLC1

جدول ۶: مقایسه نیروی کماتش تجربی با آنالیز المان محدود و اعمال مقادیر نقص های واقعی

Table 6. Experimental and numerical results of the shells

درصد اختلاف نتایج تجربی با تحلیل غیرخطی	نیروی کماتش در آنالیز المان محدود (نیوتن)	نیروی کماتش (نیوتن)	کد پوسته
۴٪	۱۰۴/۵۰۳	۱۰۰/۷۸۷	SL1
۹٪	۱۰۱/۱۱۵	۹۲/۳۳۴	SL2
۳٪	۹۱/۰۶۶	۸۸/۹۲۰	SLC1

۷- جمع بندی و نتیجه گیری

پس از بررسی نتایج و مقایسه آن‌ها می‌توان نتیجه‌گیری کرد که نیروی بحرانی کماتش، به‌خصوص در پوسته‌های حساس به نقص‌ها و تحت فشار محوری، با افزایش مقدار عیب، کاهش چشم‌گیری نسبت به نیروی کلاسیک خواهد داشت. روش و کیفیت فرآیند ساخت در مقدار عیب‌های تأثیرگذار است. فرآیند نورد و جوشکاری که روش مرسوم در ساخت پوسته مخازن تحت فشار و مخازن ذخیره است، روشی است که با نقص‌ها همراه است. عموماً فرآیند جوشکاری نه‌تنها در محل جوش بلکه در کل پوسته نیز باعث ایجاد عیب نسبت به پوسته کامل بدون عیب می‌گردد. هرچه میزان و حجم جوشکاری بیشتر باشد این عیب‌ها از جمله خارج از مرکز بودن، بیضی شدن، تغییر شعاع و فرورفتگی یا بیرون آمدگی، بیشتر خواهد شد. تفکیک عیوب ناشی از جوش و نورد و مونتاژ در پوسته‌ها مشکل بوده و عملاً بررسی اثر این نقص‌ها به‌صورت ترکیبی می‌باشد. جهت‌های جوشکاری نیز در مقدار و میزان عیب مؤثر هستند.

- مقدار نقص های هندسی پوسته با جوش محیطی و طولی از نقص های هندسی پوسته‌هایی با جوش فقط طولی بیشتر است. همچنین نسبت کاهش نیروی کماتش نسبت به نیروی کلاسیک متناسب با مقدار عیب‌های هندسی است.

- در پوسته ی SLC1 که مقدار نقص‌ها بیشتر از پوسته‌های SL1 و SL2 است، نیروی کماتش کمتر می‌باشد. مقدار نیروی کماتش

جدول ۴: نیروی کماتش در پوسته‌ها تحت فشار محوری

Table 4. Axial Buckling Load

کد پوسته	w_0/t	نیروی کماتش (نیوتن)	تنش (MPa)	σ_{cr}/σ_y	σ_{cr}/σ_{CL}
SL1	۰/۴۵	۱۰۰/۷۸۷	۱۰۶	۰/۴۸	۰/۱۴
SL2	۰/۵۵	۹۲/۳۳۴	۹۷	۰/۴۴	۰/۱۲۸
SLC1	۰/۷۰	۸۸/۹۲۰	۹۴	۰/۴۲	۰/۱۲۳

و t ضخامت پوسته می‌باشد.

درصد اختلاف نیروی کماتش پوسته SLC1 نسبت به نمونه SL1 حدود ۱۲٪ و نسبت به پوسته SL2 حدود ۳٪ می‌باشد.

۶-۲- مقایسه نتایج آزمایش تجربی با تحلیل غیرخطی پوسته و اعمال مقادیر نقص های مود اول کماتش تحلیل خطی

در شکل ۲۳ نتیجه تحلیل المان محدود کماتش با اعمال نقص های حاصل از مود اول کماتش تحلیل خطی، در تحلیل غیرخطی، با نتایج تجربی مقایسه شده است. مشاهده می‌شود اختلاف تحلیل المان محدود با اعمال نقص‌های مود اول کماتش با نیروی کماتش حاصل از آزمایش اختلاف جزئی دارد و درصد اختلاف آن با نمونه های مورد آزمایش در جدول ۵ آمده است.

۶-۳- مقایسه تحلیل المان محدود با اعمال نقص‌های واقعی و نتایج آزمایش کماتش تجربی

نیروی کماتش حاصل از تحلیل غیرخطی با اعمال مقادیر عیب های هندسی اندازه‌گیری شده و نیروی کماتش حدی بحرانی آزمایش تجربی در جدول ۶ آمده است.

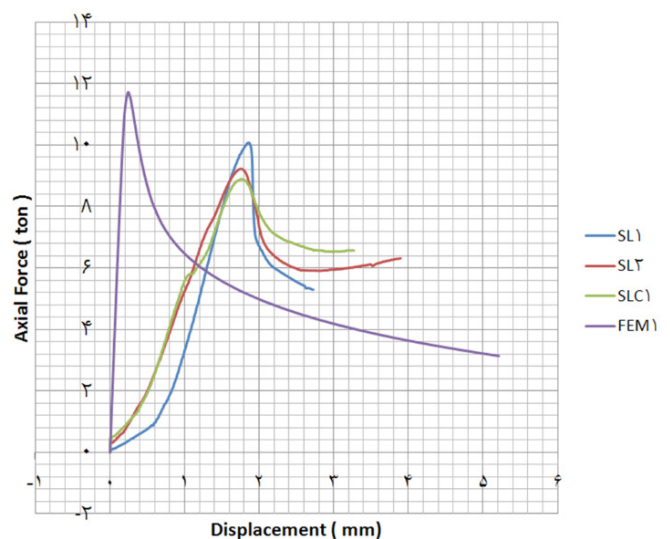


Fig. 23. Experimental and nonlinear analysis load-displacement curves

شکل ۲۳: مقایسه منحنی نیرو-جابجایی آزمایش تجربی با تحلیل غیرخطی

- [3] L. H. Donnell, A new Theory for the buckling of thin cylindrical under axial compression, *ASME* Vol.56, (1934) 795-806.
- [4] KOITER W. T. *The Effect of Axisymmetric Imperfection on Buckling of Cylindrical Shell under Axial Compression*, Lockheed Missiles and Space Co. Rep. 6-90-63-86 Palo Alto Calif, (1963).
- [5] KOITER W. T. *On The Stability of Elastic Equilibrium*. Ph.D Thesis, Delft University Amsterdam, (1945).
- [6] J. de Vries. *The Imperfection Data Bank And its Application*. Ph.D Thesis ISBN 978-90-8892-012-7 The Netherlands Defense Academia, (2009).
- [7] A.J. Sobey. *The Buckling of Axially Loaded Circular Cylinder with Initial Imperfection*. Aeronautical Research Council Reports and Memoranda Royal Aircraft Establishment Bedford England, (1966).
- [8] D. MOSS. *Pressure Vessel Design Manual*, Gulf Professional Publishing, America, (2004).
- [9] ABAQUS CAE Users Manual Ver. 6.4
- [10] J. ARBOCZ. *Recent Development In Shell Stability Analysis*. International Colloquium on Stability of Steel Structure also Technical University Delft The Netherland, (1990).
- [11] V. I. Weingarten, P.Seide. *Buckling of Thin Walled Circular Cylinders SP-8007*, NASA, (1968).
- [12] CEN. Euro code 3 Stability of Shell Structure, EN1993 1-6, (2009).
- [13] T. Kobayashi, Y. Mihara. *Application of Abaqus for Practical Postbuckling Analyses of Cylindrical Shells under Axial Compression*, SIMULIA Customer Conference. Tokyo, Japan, (2010).
- [14] J. Singer, H. Abramovich, The Development of Shell Imperfection Measurement Techniques. *Thin-Walled Structure* 23(1995) 379-398.
- [15] Tian Chen. *On Introduction Imperfection in the Non-Linear Analysis of Buckling of Thin Shell Structure*. Ph.D. Thesis. Mechanics Department of TU Delft University, 2014.
- [16] C. lin , et al. Effect of weld reinforcement on axial plastic buckling of welded steel cylindrical shells. *Journal of Zhejiang University*, SCIENCE A 13.2 (2012).
- [17] Fang, Zhou, Effect of weld on axial buckling of cylindrical shells. *Advanced Materials Research*. Vol. 139, (2010).

پوسته SLC1 از پوسته SL1 حدود ۱۱٪ و از پوسته SL2 حدود ۴٪ کمتر است.

- وجود عیب های هندسی در حد ضخامت ورق باعث کاهش قابل توجه نیروی کمانش حدی واقعی، نسبت به نیروی کمانش کلاسیک می گردد که در این آزمایش ضریب کاهش نسبت به نیروی کمانش کلاسیک بین ۰/۱۲ تا ۰/۱۴ می باشد.
- تحلیل المان محدود غیرخطی با اعمال نقص های مود اول کمانش تحلیل خطی، نتایج بسیار نزدیکی با نتایج تجربی داشته و اختلاف آن با نتایج تجربی بین ۱۰٪ تا ۲۴٪ می باشد، درواقع تئوری کویتز که شکل عیب ها را در تحلیل خود به صورت سینوسی و مشابه شکل مود اول کمانش در نظر می گیرد، روش مناسبی در تخمین نیروی کمانش سازه های بزرگ بدون اندازه گیری نقص های آن ها می باشد.
- تحلیل المان محدود با اعمال مستقیم نقص های هندسی در مدل شبیه سازی شده پوسته بهترین روش برای تخمین نیروی کمانش و طراحی بوده و اختلاف آن با نتایج تجربی بین ۳٪ تا ۹٪ می باشد.

فهرست علائم

t	ضخامت پوسته
علامت یونانی	
s	تنش
w_0	مقدار نقص اولیه
زیرنویس	
CL	مقدار کلاسیک
Cr	مقدار بحرانی
y	مقدار تسلیم

منابع

- [1] Bo. O. Almroth, Do. Brush, *Buckling of bars, plates and shells*, (1975).
- [2] M.H Schneider, Jr. and R.J. Feldes, J.R. Halcomb and C.C. Hoff. *Stability analysis of perfect and imperfect cylindrical Shell using MSC/Nastran linear and nonlinear buckling*. Mc Donnell Douglas Aerospace (1994).

Please cite this article using:

P. Seyedmonir, M. Shakeri, I. Sattarifar, Buckling Analysis on Cylindrical Shell with Longitudinal and Circumferential

Welds, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 50(3) (2018) 551-560.

DOI: 10.22060/mej.2017.12721.5408

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

