پیش بینی و ارائه روش آزمایش غیر مخرب کمانش پوسته استوانه‌ای فولادی تحت فشار هیدرواستاتیک خارجی

محمدهادی حاج‌محمد[۱]، علیرضا نداف‌اسکوئی[۲*]، محسن عزیزپوریان[۳]، شهاب ملکی[۴]

[۱] استادیار ، دانشگاه جامع امام حسین (ع)؛ mhajmohammad@ihu.ac.ir
[۲] دانشیار، دانشگاه جامع امام حسین (ع)؛ anadaf@ihu.ac.ir
[۳] کارشناس ارشد، دانشگاه جامع امام حسین (ع)؛ azizporyan@gmail.com
[۴] کارشناس ارشد، دانشگاه جامع امام حسین (ع)؛ maleki@gmail.com

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۸/۲۱
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۳/۱۲

کلمات کلیدی:
کمانش غیر مخرب
فشار خارجی
استوانه فولادی

چکیده

در این مقاله تحقیقات انجام شده در زمینه کمانش استوانه‌های فولادی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته شده است. با استفاده از نرم‌افزار برنامه‌نویسی متلب، برنامه‌ای جهت بدست آوردن محدوده بار کمانش پوسته‌های استوانه‌ای فولادی تحت فشار خارجی فراهم شده است. با مقایسه نتایج خروجی از نرم‌افزار و نمودارهای تحلیل شده، محدوده خطر کمانش در استوانه‌ها را با دقت خوبی می‌توان تشخیص داد. پس از تعیین رابطه‌ی مناسب برای پیش بینی کمانش، دستگاه آزمایش فشار هیدرواستاتیک با ثبت فشار و تغییرات حجم به صورت بر خط مهیا گردید. تجهیزات آزمایش کمانش به روش کنترل حجم جهت پیشگیری از تخریب ناگهانی بر روی دستگاه تعبیه، و آزمایش فشار هیدرواستاتیک خارجی بر روی نمونه‌ی فولادی اجرا شده است. بنابراین از وارد کردن بی‌مورد بار که باعث کمانش استوانه خواهد شد جلوگیری می‌شود. با این روش می‌توان با خطای حدود ۱۶درصد پیش از وقوع کمانش از تخریب قطعه و هزینه‌های ساخت مجدد نمونه جلوگیری کرد.

Prediction and Non-Destructive Buckling Test Method for Steel Cylindrical Shell under External Hydrostatic Pressure

Mohammad Hadi Hajmohammad [1], Allireza Naddaf Oskouie [2*], Mohsen Azizpourian [3] Shahabe Maleki[4]

[1] *Assistant Professor, Imam Hossein (AS); mhajmohammad@ihu.ac.*ir
[2] *Associate Professor, Imam Hossein (AS); anadaf@ihu.ac.ir*
[3] *M.Sc., Imam Hossein (AS*); *azizporyan@gmail.com*
[4] *M.Sc., Imam Hossein (AS); maleki@gmail.com*

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 11 Nov. 2016
Accepted: 2 Jun. 2018

Keywords:
Non-destructive testing buckling
hydrostatic pressure
steel cylinder

ABSTRACT

This paper Analyzed buckling of steel cylinders in other researches. Here by using MATLAB software, a program to buckling pressure range of steel cylindrical shell under external pressure is provided. By comparing the output results and analysis charts, the risk of buckling in the cylinders can be detected with very good accuracy. After determining the proper correlation to predict buckling, hydrostatic pressure testing system with record pressure and volume changes for online registration prepared. In order to prevent suddenly destruction, buckling test equipment with volume control method has been prepared and the hydrostatic pressure tests were carried out on specimens of steel. So from overall load which make buckling will be prevented. By this method, prediction of buckling pressure and prevention of samples destruction can be done with about 16% error.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.27.1.8]

۱ - مقدمه

پوسته‌های استوانه‌ای از جمله سازه‌هایی می‌باشند که در شاخه‌های مختلف مهندسی استفاده می‌شوند این پوسته‌ها از پرکاربردترین پوسته‌ها در صنعت بشمار می‌روند و کاربرد اصلی آنها در مخازن ذخیره به خصوص در مخازن ذخیره نفت خام و مخازن دخیره آب است امروزه در صنایع مختلف دریایی و فراساحلی، دکل‌ها، هوافضا و سکوهای نفتی نیز کاربرد فراوان دارد. پژوهشگران زیادی به تحقیق درباره رفتار کمانشی اینگونه پوسته‌ها پرداخته‌اند که از نتایج بدست آمده می‌توان به تاثیر بار در این پوسته‌ها، که اثرات زیادی در کمانش می‌گذارد اشاره کرد. تا کنون آزمایش بر روی کمانش پوسته‌ها به روش‌های مختلفی صورت گرفته است. هدف کلیه روش‌ها برقراری ارتباط مناسب‌تر میان نتایج تحلیلی و نتایج آزمایشگاهی است. با این وجود، هم چنان اختلاف میان نتایج آزمایش و پیش بینی‌ها وجود دارد[۱،۲]. این اختلاف، به دلائل مختلفی چون هندسه پوسته، شرایط مرزی و عیوب ساخت می‌باشد که به طور مشخص منجر به اختلاف میان رفتار کمانشی نتایج مدل ریاضی و مدل آزمایش می‌شود[۳،۴].

ارزیابی تحلیلی کمانش پوسته‌های استوانه‌ای تحت فشار هیدرواستاتیک خارجی نیز از موضوعاتی است که تا کنون مورد توجه محققین قرار گرفته است. سینگر و همکارانش در دو پژوهش جداگانه (۱۹۹۸و۲۰۰۲) به بررسی فنی و کامل روش‌های تجربی کمانش تحت فشار هیدرواستاتیک پوسته‌ها پرداخته و با روش‌های تئوری مقایسه کرده است [۵،۶]. مک‌کی و فون کولن (۲۰۱۰) به مطالعه و توضیح انواع روشهای آزمایش متداول برای پوسته‌های استوانه‌ای که تحت فشار هیدرواستاتیکی خارجی بکار میروند پرداخته‌اند، و به ارائه روش جدید کنترل حجم اشاره نموده اند[۷].

حاج‌محمد و همکاران (۲۰۱۴) تغییر ضخامت یک پوسته بر روی کمانش و فشار تخریب آن تحت فشار هیدرواستاتیک خارجی را به روش آزمایش کنترل حجم انتها بسته را مورد مطالعه قرار داده‌اند[۸]. با توجه به اینکه منحنی تجربی بدست آمده از آزمایش کمانش استوانه‌های تحت فشار هیدرواستاتیک خارجی معیاری جهت مشخص شدن حد تحمل بار و همچنین طراحی و استفاده از استوانه‌های تحت فشارخارجی است [۱۱-۹]، بحث آزمایش استوانه ها از اهمیت خاص و مهمی برخوردار است. روس و همکارانش نیز (۲۰۰۵) با استفاده از روش تست استوانه با انتهای بسته به پژوهش در باره کمانش پوسته استوانه‌ای با تیغه‌های تقویت کننده در محدوده پلاستیک پرداخته اند [۱۲].

گوسیک و همکاران (۲۰۰۰) به بررسی اثر تغییر ضخامت محیطی بر کمانش پوسته استوانه‌ای تحت فشار هیدرواستاتیک پرداختند[۱۳]. لاپاتین و موروزوف (۲۰۱۲) به بررسی روابط تحلیلی یک پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی یک‌سر گیردار که تحت فشار یکنواخت جانبی قرار گرفته پرداختند، آنها در این تحقیق از روش گالرکین برای حل معادلات خود استفاده کردند و به کمک روش المان محدود نتایج خود را اعتبار سنجی نمودند [۱۴]. چن و همکاران(۲۰۱۱) به بررسی کمانش پوسته استوانه‌ای با ضخامت دیواره متغیر در هر مقطع تحت فشار خارجی یکنواخت پرداختند آنها روشی جدیدی جهت ارزیابی کمانش چنین پوسته‌هایی ارائه نمودند. در روش آنها برای ارزیابی کمانش چنین پوسته‌هایی، ضخامت معادل و طول معادل در کمانش پوسته استوانه‌ای با ضخامت ثابت جایگزین کمانش پوسته با ضخامت متغیر می‌شود [۱۵]. همچنین نگوین و همکاران (۲۰۰۹) به بررسی تحلیل پوسته استوانه‌ای با ضخامت متغیر تحت فشار خارجی پرداختند آنها از تئوری پوسته‌های نازک و روش بابنو -گالرکین به منظور حل معادلات استفاده نمودند. تفاوت عمده روش آنها با دیگر روش‌ها استخراج روابط مجانب برای بار کمانش بوده و نتایج عددی برای پوسته با تکیه‌گاه ساده تحت فشار خارجی مورد بررسی قرار گرفته است.با این وجود ارزیابی تجربی از نتایج بدست آمده صورت نگرفته و تنها به اعتبارسنجی نتایج در حالت ضخامت ثابت پرداخته شده است [۱۶].

در این تحقیق ابتدا با تحلیل و بررسی تعدادی از نمودارهای استخراج شده مقدار بار بحرانی کمانش در هر یک از نمودارها محاسبه شده است. با مقایسه داده‌های نمودارها، مقدار تغییرات شیب نمودار به مقدار میانگین شیب‌ها در نزدیکی محدوده کمانش به دلیل خطی بودن نمودار تا مرحله کمانش به راحتی بدست می‌آید و می‌توان یک بازه برای این محدوده مشخص کرد. این محدوده به عنوان محدوده بحرانی کمانش در نرم افزار متلب جهت برنامه نویسی استفاده شده است. با استفاده از روش آزمایش کنترل حجم [۷] و بهره‌گیری از تجهیزات اندازه‌گیری تغییرات فشار و حجم، دستگاه آزمایش غیر مخرب کمانش استوانه‌ی فولادی تحت فشار هیدرواستاتیک خارجی ارائه شده است. در ادامه به کمک این دستگاه، آزمایش غیر مخرب کمانش یک نمونه فولادی مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج آزمایش ارائه شده است.

۲-تحلیل نمودارهای کمانش

در ابتدا با تجزیه و تحلیلی ساده از نمودارهای مربوط به کمانش استوانه‌های فلزی این مطلب روشن خواهد شد که نمودارهای موجود اکثراً از لحاظ رفتاری شبیه هم بوده و از یک فرم خاص تبعیت می‌کنند. این مطلب به دلیل خواص مکانیکی فلز می‌باشد. البته با تغییرات در قطر، ضخامت و طول نمونه‌های آزمایش فقط تغییرات در قسمت دامنه یا برد نمودار بوجود می‌آید که در ماهیت اصلی نمودار تغییری حاصل نمی‌شود. شکل کلی نمودارها نیز شامل چند مرحله می‌باشند، بخش اول به صورت خطی تغییر می‌کند و با اعمال بار بیشتر، تغییر شکل نمونه آزمایش نیز بیشتر می شود. تا

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.27.1.8]

اینکه نمودار به قسمت حساس خود یعنی محدوده کمانش نزدیک می‌گردد. بعد از این مرحله (کمانش) نمونه وارد منطقه پلاستیک می‌گردد که با برداشتن بار اعمالی دیگر به شکل اولیه خود برنمی‌گردد و تغییرشکل‌ها به صورت دائمی می‌باشد.

با توجه به توضیحات بالا محدوده تغییرات خطی نمودار تا مرحله تغییر حالت نمودار (از خطی به غیر خطی) محدوده‌ای است که می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد. در این مرحله (کمانش) را می‌توان با رابطه‌ای ۱ که مربوط به کمانش پوسته‌های استوانه‌ای است[۱۷] را محاسبه کرد.

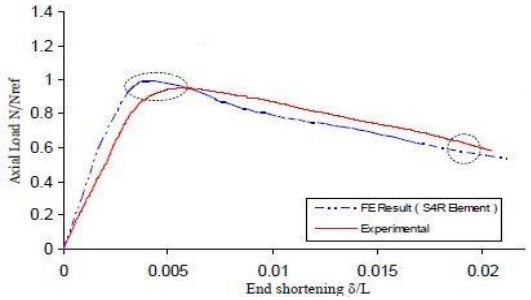
$$p_{cr} = 0.92(E)\left(\frac{R}{L}\right)\left(\frac{h}{R}\right)^{\frac{5}{2}} \qquad (1)$$

در رابطه فوق‌الذکر P_{cr} فشار بحرانی کمانش، E مدول، R شعاع نمونه، L طول نمونه، h ضخامت نمونه می‌باشد.

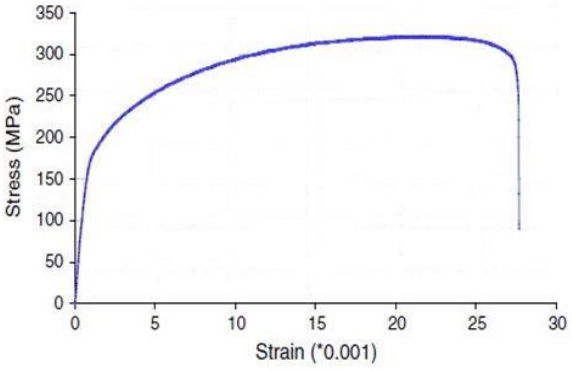
جهت تعیین اینکه دقیقاً نمودار در چه زمانی از حالت خطی به غیر خطی تبدیل می‌شود از داده‌های دقیق در آن قسمت استفاده شده است. با استفاده از روابط ساده ریاضی می‌توان این داده‌ها را تحلیل کرده، مقدار شیب‌های نقطه به نقطه، نسبت تغییرات شیب نقاط را بدست آورده و از آنها در جهت مقصود خود استفاده کرد.

۳- تحلیل نمودارهای کمانش تحقیق‌های تجربی

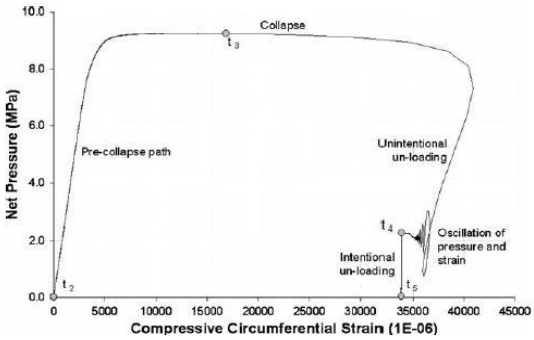
از تحقیق‌های مختلف شکل‌های ۱ تا ۳ که مربوط به نمودارهای آزمایش کمانش پوسته استوانه‌ای فولادی[۱۸و۱۹و۷] می‌باشد، جهت تحلیل و گرفتن داده‌های آزمایش کمانش استفاده شده است. در مراحل بعدی تحقیق از این داده‌ها می‌توان در جهت رسیدن به نقطه بحرانی که همان محدوده کمانش (تغییر شیب نمودار) است استفاده کرد. هم‌چنین در جدول ۱ مشخصات نمونه‌هایی که نمودار آنها مورد استفاده قرار گرفته جهت قرار دادن در رابطه تحلیلی کمانش و بدست آوردن مقدار بار بحرانی مشخص می‌باشند.



شکل۱- نمودار فشار و تغییرات حجم[۱۸]



شکل۲- نمودار تنش کرنش[۱۹]



شکل۳- نمودار تنش کرنش [۷]

جدول۱- مشخصات نمونه‌هایی که در مقالات استفاده شده

عنوان	R (mm)	L (mm)	E (MPa)	T (mm)
نمونه اول	۱۹۶/۵	۸۷/۶۶	۲۱۶	۳
نمونه دوم	۴۱/۴۷	۷۰	۲۱۰	۶/۳۵
نمونه سوم	۲۱	۱۲۰	۱۸۷	۱/۲

۴-تحلیل نرم افزاری

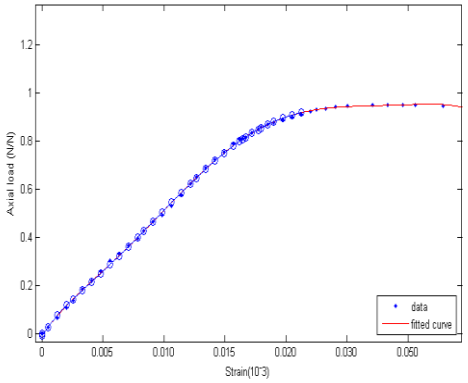
در نرم افزار متلب دستورات لازم جهت بکارگیری در انجام آزمایش آزمایشگاهی و مشخص کردن محدوده بحرانی کمانش استفاده شده است. نرم افزار در هنگام رسیدن به این منطقه باید از ادامه آزمایش به دلیل مخاطره آمیز بودن و رسیدن به محدوده کمانش جلوگیری کند. نتیجه استفاده از داده‌های تحقیقات اشاره شده و تقریب تابع چند جمله‌ای و دستور توقف آزمایش در نقطه خطر در شکل‌های ۴ تا ۶ نشان داده شده است. نتایج به صورت دو نمودار روی هم قابل تشخیص می‌باشند. نمودار اولی که به صورت خط می‌باشد مربوط به داده‌های اولیه بوده، و نمودار دوم که با دایره‌های کوچک مشخص شده و روی نمودار اولی رسم گردیده مربوط به ورودی‌های اولیه و خروجی‌هایی است که با جاگذاری ورودی‌های اولیه در تابع درجه ۳ بدست آمده است.

مطابق با جدول ۲ مقادیر ثابت تابع و مقدار ضریب رگرسیون[۱] (دقت تابع)، ارائه شده است. دلیل استفاده از تابع درجه ۳ جهت بالا بردن

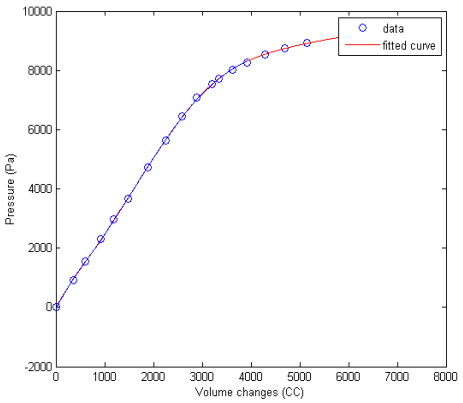
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.27.1.8]

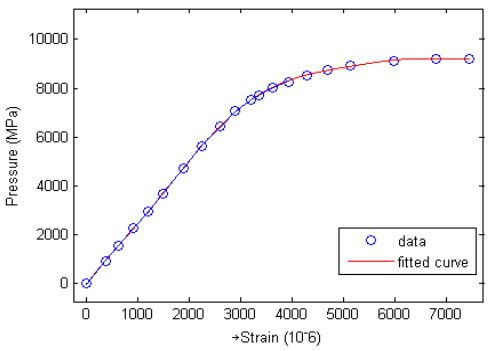
دقت تابع و نزدیکی رفتار مواد با این تابع است. با توجه به نمودارهای بدست آمده از خروجی نرم افزار مشاهده می‌شود که اکثر نمودارهای آبی در محدوده‌ای نزدیک به محدوده کمانش متوقف شده‌اند که نشانگر این مطلب است که می‌توان به این نتایج اطمینان کامل داشت، و از این اطلاعات جهت استفاده در آزمایش فشار هیدرواستاتیک پوسته‌های استوانه‌ای استفاده کرد.



شکل۴- خروجی نرم افزار برای نمونه [۱۸]



شکل۵- خروجی نرم افزار برای نمونه [۱۹]



شکل۶- خر وجی نرم افزار برای نمونه [۷]

$$deltam = \left(\frac{m_i - \sum \frac{m_i}{i}}{\sum \frac{m_i}{i}} \right) \qquad (۲)$$

رابطه شماره ۲ تابع تخمین زده شده بوسیله نرم‌افزار از طریق استفاده از داده‌هایی می‌باشد که به رایانه ارسال شده است. این رابطه همان مقدار میانگین تغییرات شیب از ابتدای نمودار تا نقطه مورد تست در آزمایش(میانگینی از شیب‌های بدست آمده تا نقطه جدید در آزمایش می‌باشد) که مورد تجزیه و تحلیل برای نرم افزار است.

در جدول ۲ دقت تابع و همچنین ثوابت تابع تخمین زده شده ارائه گردیده است. دقت تابع نشان داده شده در جدول توسط نرم افزار، جهت تابع درجه ۳ انتخاب شده خواهد بود که با توجه به داده‌های ارسالی از دستگاه تست کمانش هیدرواستاتیک خارجی استخراج شده و این عدد در محدوده عدد یک می‌باشد. لازم به ذکر است هر چقدر این عدد ارائه شده برای توابع مختلف به عدد یک نزدیکتر باشد نشان از بالا بودن ضریب اطمینان تابع تعیین شده توسط نرم افزار می‌باشد، که در عمل هم مشاهده خواهد شد.

جدول۲- توابع خروجی نرم‌افزار و دقت تابع

دقت تابع	ثوابت
0.9995	$p_1 = 1.215\times10^{-7}$ $p_2 = -1.288\times10^{-5}$ $p_3 = 0.0005346$ $p_4 = 0.01082$
0.9985	$p_1 = 0.003338\times10^{-7}$ $p_2 = -0.006125$ $p_3 = 0.004537$ $p_4 = -7144$
0.9996	$p_1 = 9.352\times10^{15}$ $p_2 = -4.436\times10^{14}$ $p_3 = 6.796\times10^{12}$ $p_4 = -4.637\times10^{10}$

۵- روش آزمایش کنترل حجم

در این تحقیق نمودارهای تغییرات فشار بر حسب حجم مایع (روغن یا آب) مورد بررسی قرار گرفته است. در این روش (کنترل حجم) مایع خروجی از نمونه مورد تست به صورت کاملاً تدریجی و تحت کنترل خواهد بود لذا از این روش برای آزمایش نمونه‌های استوانه‌ای تحت فشار هیدرواستاتیک خارجی استفاده شده است.

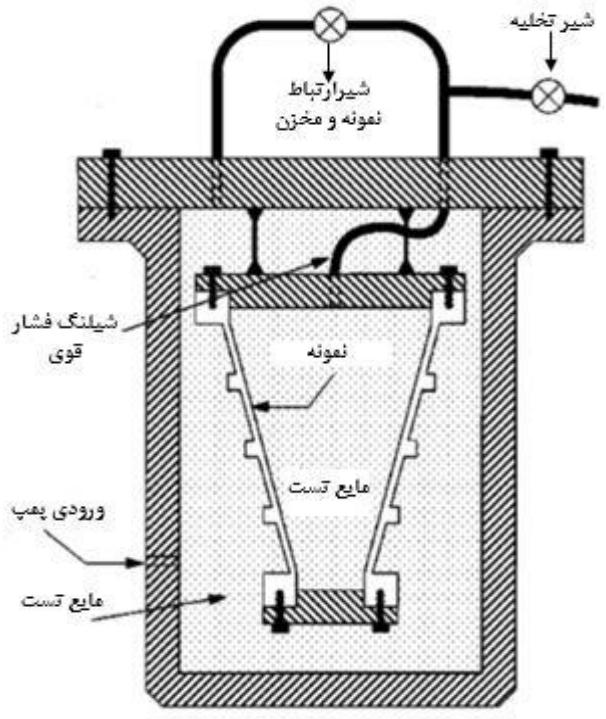
با انجام تنظیمات اولیه دستگاه آزمایش کمانش هیدرو استاتیک خارجی از کمانش ناگهانی نمونه مورد آزمایش در این روش خاص جلوگیری می‌شود.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.27.1.8]

در ابتدا نمونه استوانه‌ای که جهت آزمایش در داخل مخزن قرار خواهد گرفت، باید کاملاً آب بند باشد. در این روش باید نمونه را قبل از قرار دادن در داخل مخزن دستگاه آزمایش از طریق ایجاد سوراخ در انتهای استوانه از مایع که می‌تواند (روغن یا آب) باشد مطابق با شکل۷ پر کرد. در ادامه بوسیله شیلنگ فشار قوی و یک شیر، ارتباط بین داخل نمونه و مخزن برقرار گردیده و از طریق پمپ دستی که به مخزن دستگاه آزمایش متصل شده فشار مخزن بالا برده خواهد شد.

در صورت باز بودن شیر اتصال‌دهنده نمونه و مخزن، فشار نمونه و دستگاه آزمایش برابر خواهد بود. در این روش آزمایش بعد از بالا بردن فشار مخزن تا محدوده کمانش با بستن شیر متصل کننده مخزن به داخل نمونه ارتباط بین فشار داخل نمونه و فشار مخزن قطع خواهد شد. در ادامه با باز کردن شیری که جهت خارج شدن مایع داخل نمونه به محیط بر روی درپوش دستگاه آزمایش تعبیه گردیده، می‌توان به صورت کاملا کنترل‌شده مایع را از داخل نمونه به خارج هدایت کرد. خروج مایع از داخل نمونه باعث ایجاد اختلاف فشار بین نمونه و مخزن خواهد کرد. در نهایت با ادامه پیدا کردن روند خروج مایع از داخل نمونه اختلاف فشار بین داخل نمونه و مخزن بالا رفته و در نهایت باعث بوجود آمدن کمانش در نمونه خواهد شد. در این روش می‌توان با اندازه‌گیری حجم مایع خروجی از داخل نمونه و همچنین مقدار افزایش فشار ایجاد شده نمودار کمانش را جهت تجزیه و تحلیل و رفتار شناسی نمونه ترسیم کرد [۷].



شکل۷- شماتیک دستگاه آزمایش در روش کنترل حجم[۷]

۶- مقایسه پیش بینی کمانش با مقالات و رابطه تحلیلی

بر اساس تحلیل انجام شده در محدوده بحرانی کمانش بر روی نمودارها، محدوده‌ی بحرانی کمانش در بازه قابل اتکای ۰/۵ تا ۰/۶ برای نسبت تغییرات شیب نمودارها به مقدار میانگین شیب در نقطه مورد نظر (رابطه ۲) می‌باشد. این مقدار در زمان تغییر شیب از قسمت خطی به غیرخطی به وجود می‌آید. بنابراین باید نرم افزار متلب زمانی که داده‌های ورودی را می‌گیرد در زمان رسیدن به این نسبت از ادامه آزمایش جلوگیری کند.

در جدول ۳ مقادیر کمانش تحلیلی، بارکمانشی آزمایش که در مقالات بدست آمده و همچنین مقادیرکمانش پیش‌بینی شده، ارائه گردیده است. با مقایسه این مقادیر خصوصاً درصد اختلاف مقدار کمانش پیش بینی شده و مقدار کمانش بدست آمده از مقالات مشاهده خواهد شد که این مقادیر اختلاف چندانی با هم نداشته (۱۵٪ تا ۱۲/۵٪)، می‌توان از این داده‌ها به این نتیجه رسید که از روش پیش‌بینی کمانش جهت استفاده در آزمایش کمانش پوسته‌های استوانه‌ای می‌توان استفاده کرد. استفاده از این روش هم از لحاظ زمان آزمایش، و همچنین به دلیل اینکه از شکست نمونه جلوگیری به عمل خواهد شد، مقرون به صرفه می‌باشد.

جدول۳- مقایسه نتایج روش پیش بینی با دیگر مقادیر

ردیف	نمونه۱	نمونه۲	نمونه۳
فشار کمانش تحلیلی(MPa)	۲۳/۵۶	۱۰/۵۴	۱۱/۲۴
فشار کمانش نمونه آزمایش شده در مقالات(MPa)	۲۱	۹/۶	۹/۶
فشار کمانش پیش بینی شده(MPa)	۱۷/۷	۸/۲	۸/۴
درصد اختلاف پیش بینی شده با تحلیلی	٪۲۴	٪۲۱	٪۲۱
درصد اختلاف کمانش آزمایش مقالات با پیش بینی شده	٪۱۵	٪۱۴	٪۱۲/۵

نمونه فولادی که برای آزمایش در این تحقیق مورد اســـتفاده قرار گرفته است، از لحاظ فیزیکی و مکانیکی طبق جدول ۴ می‌باشد.

جدول۴- مشخصات نمونه فولادی

جنس	فولاد
بار کمانشی تحلیلی(MPa)	۰/۷۸
طول (mm)	۷۰۰
قطر(mm)	۲۵۰
ضخامت(mm)	۲
مدول (GPa)	۲۱۰

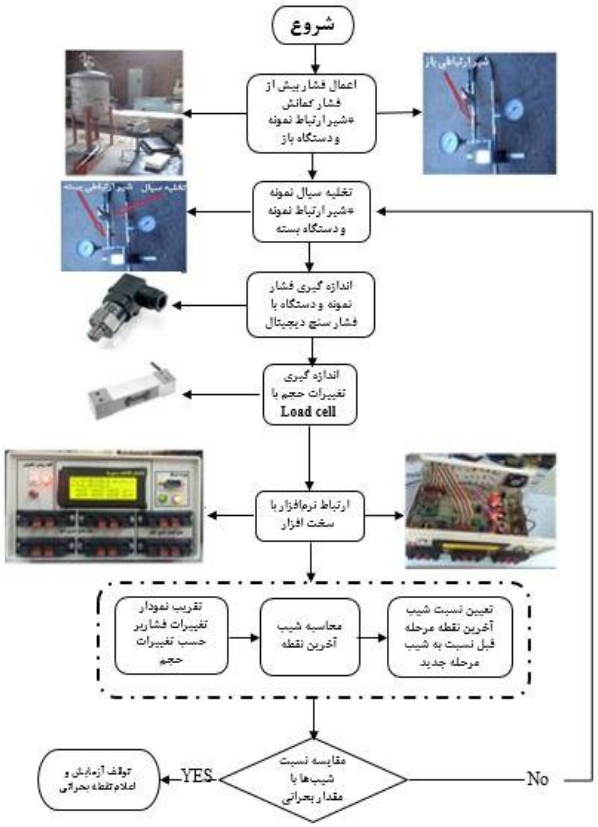
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.27.1.8]



شکل۸- نمونه فولادی قبل از آزمایش

۷- روش آزمایش کنترل حجم هوشمند

با توجه به فلوچارت ارائه شده در شکل ۹، در این روش نمونه را قبل از اینکه در داخل دستگاه آزمایش قرار دهند از مایع (آب یا روغن) پر کرده و دو انتهای آن را طوری که بتوان از طریق شیلنگ یک انتهای آن را به حسگرهای فشار مرتبط کرد بسته و انتهای دیگر را با درپوش کاملاً می‌بندند. بعد از انجام این کار نمونه را در داخل مخزن دستگاه گذاشته و درپوش مخزن را بسته، فشار داخل مخزن که در ابتدا با فشار داخل نمونه ارتباط دارد بالا برده شده و قبل از آزمایش ارتباط داخل نمونه و مخزن بوسیله شیرهای ارتباطی قطع خواهد شد. از طریق شیر برقی به مایع داخل نمونه به آرامی اجازه خروج داده خواهد شد. خروج مایع باعث اختلاف فشار بین نمونه و مخزن شده این روند به صورت کاملاً دیجیتال انجام می‌شود در نهایت با ادامه این روند نمونه به مرحله کمانش می‌رسد. ولی در این روش با توجه به کد متلبی که برای همین کار تهیه شده اجازه داده نمی‌شود نمونه کمانش کند و قبل از کمانش نمونه عملیات آزمایش به صورت هوشمند قطع خواهد شد. این مزیت می‌تواند از شاخصه‌های مهم در این روش آزمایش باشد.



شکل۹- فلوچارت آزمایش کمانش غیر مخرب به روش کنترل حجم هوشمند

۸- انجام آزمایش و بررسی خروجی‌های نرم افزار

با توجه به مقدار ضریب نسبت تغییرات شیب به مقدار میانگین برای نمونه فولادی (محدوده خطر کمانش) که در مراحل قبل بدست آمد (۰/۵-۰/۶)، و با استفاده از نمونه آماده شده آزمایش تجربی اجرا شده است.



شکل۱۰- نمای کلی از دستگاه و متعلقات آزمایش کمانش غیر مخرب هیدرواستاتیک خارجی

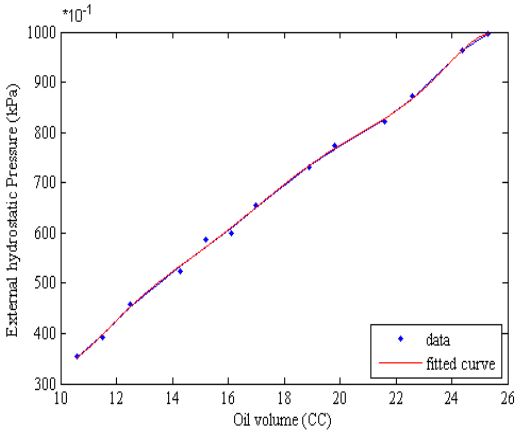
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.27.1.8]

این مقدار ضریب تغییرات شیب به نرم‌افزار داده شده تا در مراحل عملی آزمایش اگر داده‌های آزمایش به این محدوده رسید، از ادامه آزمایش به صورت کاملاً هوشمند جلوگیری کند. با این کار از شکست نمونه در اثر اعمال فشار بیشتر جلوگیری می‌کند که در نمودارهای زیر کاملاً قابل لمس می‌باشد. البته در این آزمایش ابتدا با ضرایبی که در محدوده امن از لحاظ کمانشی هستند(ضریب تغییرات شیب بزرگ) شروع به آزمایش شده است که برای هر ضریب یک بار آزمایش به طور کامل انجام گرفته است. همان‌طور که قابل مشاهده است نمای کلی از دستگاه آزمایش و متعلقات آن در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

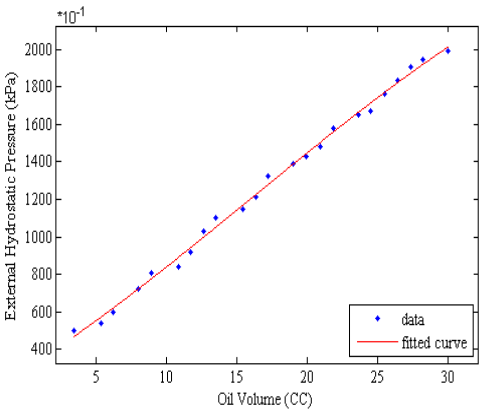
شکل‌های ۱۱ تا ۱۶ نمودارهای خروجی نرم‌افزار می‌باشند که با توجه به ضرایب مختلف ارائه شده‌اند.

در نمودار شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که برای ضریب ۰/۹ که به نرم افزار جهت توقف مرحله آزمایش داده شده است، آزمایش صورت گرفته و در فشار ۱بار انجام آزمایش متوقف شده است.

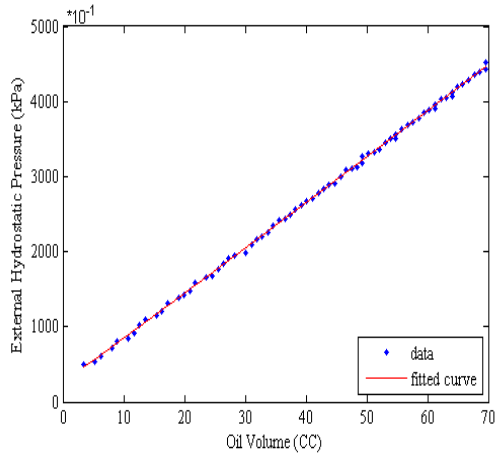


شکل۱۱- نمودار کمانشی خروجی از نرم‌افزار برای ضریب(۰/۹)

شکل ۱۲ که برای خروجی دوم و مربوط به ضریب ۰/۸ است نیز کاملاً مشهود است که آزمایش در مرحله‌ای که فشار به محدوده ۲بار رسیده است آزمایش متوقف گردیده است.

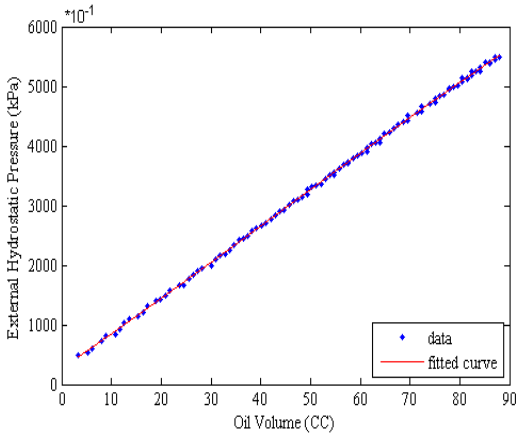


شکل۱۲- نمودار کمانشی خروجی از نرم‌افزار برای ضریب(۰/۸)

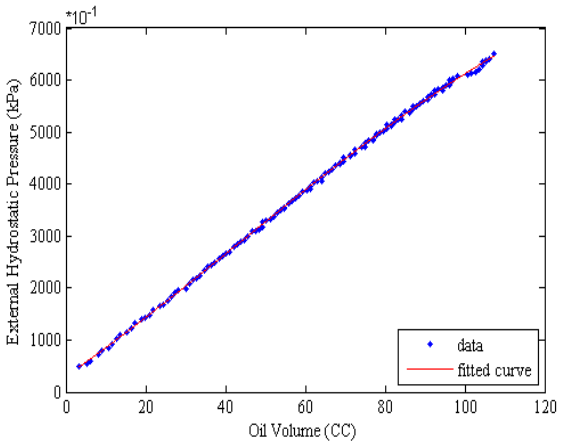


شکل۱۳: نمودار کمانشی خروجی از نرم‌افزار برای ضریب(۰/۷)

همچنین در شکل ۱۴ نتایج برای ضریب ۰/۶ ارائه شده است. در این شکل محدوده‌ی کمانش برابر ۵/۵ بار تعیین شده است.



شکل۱۴- نمودار کمانشی خروجی از نرم‌افزار برای ضریب(۰/۶)



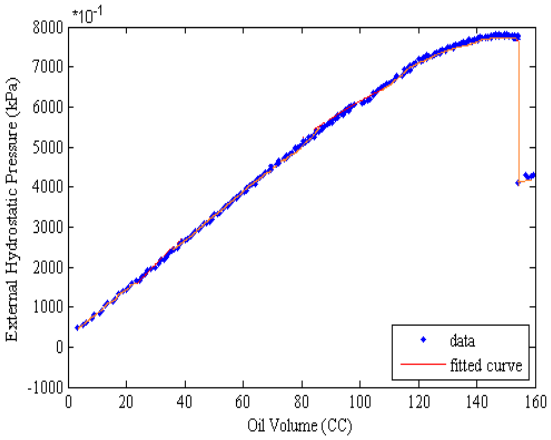
شکل۱۵- نمودار کمانشی خروجی از نرم‌افزار برای ضریب(۰/۵)

در شکل ۱۵ نیز مشاهده می‌گردد برای ضریب ۰/۵ آزمایش در فشار۶/۵ بار متوقف شده است. این نتایج همگی با تغییر ضریب از ابتدا شروع شده و آزمایش به صورت کامل انجام گرفته است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.27.1.8]

همچنین در فشاری که در نمودارها به خوبی قابل تشخیص هست آزمایش متوقف شده است.



شکل۱۶- نمودار کمانشی خروجی از نرم‌افزار برای ضریب(۰/۴)

درشکل ۱۶ برای ضریب ۰/۴ با توجه به خروجی نرم‌افزار، کمانش نمونه اتفاق افتاده و قابل تشخیص می‌باشد. شکل ۱۷مربوط به کمانش نمونه و شکل ۱۸ مرحله پس کمانش که بعد از مرحله کمانش اتفاق خواهد افتاد را نشان داده است.



شکل۱۷- نمونه فولادی بعد از کمانش و ضریب ۰/۴ در آزمایش



شکل۱۸- نمونه فولادی بعد از پس کمانش

جدول۵- جدول مقایسه بار کمانشی با توجه به ضرایب آزمایش

ردیف	ضریب شیب نمودار	بار کمانشی اعمالی (MPa)	در صد اختلاف با مقدار بار کمانش تحلیلی (۰/۸۴ MPa)	درصد اختلاف با مقدار کمانش واقعی (۰/۷۸ MPa)
۱	۰/۹	۰/۱	٪۸۸	٪۸۷
۲	۰/۸۵	۰/۱۳	٪۸۴	٪۸۳
۳	۰/۸	۰/۲	٪۷۶	٪۷۵
۴	۰/۷۵	۰/۳۸	٪۵۴	٪۵۱
۵	۰/۷	۰/۴۵	٪۴۶	٪۴۲
۶	۰/۶۵	۰/۵	٪۴۰	٪۳۵
۷	۰/۶	۰/۵۵	٪۳۴	٪۲۹
۸	۰/۵۵	۰/۶	٪۲۸	٪۲۳
۹	۰/۵	۰/۶۵	٪۲۲	٪۱۶

با توجه به جدول ۵ و مورد مقایسه قرار دادن بار کمانشی بدست آمده از روش پیش بینی با، بار کمانشی که از روش تحلیل بدست آمده کاملاً قابل تشخیص خواهد بود که با بهره‌گیری از روش ارائه شده در این تحقیق با اختلاف حدود ۱۶درصد، می‌توان از کمانش نمونه مورد آزمایش جلوگیری کرد و همچنین می‌توان گفت که جلوگیری از تخریب نمونه دستاوردی مهم و قابل توجه می‌باشد، که از لحاظ اقتصادی هم می‌تواند مورد توجه قرار بگیرد.

۹- نتیجه گیری

با انجام آزمایش کمانش به صورت هوشمند، تمامی اجزاء و دستگاه‌های مرتبط با آزمایش بدون کمترین دخالت کاربر در امر آزمایش گرفتن شروع به کار کرده و تمامی اجزاء با ارسال داده به رایانه کار خود را انجام می‌دهند. در نهایت رایانه از داده‌ها جهت انجام آزمایش استفاده خواهد کرده، و نتیجه را در پایان کار جهت بهره‌برداری کاربر ارائه می‌دهد. مشاهده نتایج بدست آمده از آزمایش انجام شده به درستی و صحت انجام کار دستگاه آزمایش غیر مخرب کمانش، و همچنین نشان از درست انجام شدن روند آزمایش می‌دهد. بنابراین با این دستاورد از وارد کردن بی‌مورد بار که باعث کمانش قطعه و از بین رفتن استوانه خواهد شد جلوگیری می‌شود. هم چینین فشار کمانش پیش از وقوع پدیده‌ی کمانش با تقریب خوبی تعیین می‌شود.

نتایج حاصل از آزمایش، اختلاف ناچیز مقدار بار تحمل شده توسط نمونه نسبت به مقدار واقعی کمانش را نشان می‌دهد. مقدار واقعی مربوط به ضریب شیب (۰/۵) می‌باشد. این مقدار در زمان آزمایش اختلاف (٪۱۶) مقدار بار بدست آمده از روش آزمایش غیر مخرب کمانش با مقدار بار واقعی کمانش را برای نمونه فولادی نشان می‌دهد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.27.1.8]

همچنین درصد اختلاف ۱۶٪ برای یک تست آزمایشگاهی کاملاً هوشمند و کنترل شده با توجه به اینکه تا کنون روشی که بار کمانشی نمونه‌ها را با ۸۴٪ بار کمانشی نهایی تشخیص دهد وجود نداشته قابل توجه می‌باشد.

۱۰-تشکر و قدردانی

با تشکر از زحمات و کمک‌های بی دریغ مدیر محترم مرکز تحقیقات دریایی دانشگاه جامع امام حسین(ع) که در کلیه مراحل تحقیق با نظارت و راهنمایی های ارزنده خود در ارتقای سطح کیفی این تحقیق بسیار مؤثر بودند، کمال تشکر و قدردانی می‌شود.

مراجع

1- Ross, C.W. Aylward, and D. Boltwood,(1971), "*General instability of ring-reinforced circular cylinders under external pressure"*, RINA Transactions, 113: p. 73-82.

2- Slankard, R, (2010), *"Tests of the elastic stability of a ring-stiffened cylindrical shell"*, model BR-4 (λ=1.103), subjected to hydrostatic pressure.

3- Bosman, T.N. Pegg, and P. Keuning,(1993), *"Experimental and numerical determination of the nonlinear overall collapse of imperfect pressure hull compartments"*, in Proceedings of Warship'93, International Symposium on Naval Submarines.

4- Bisagni, C, (2000), *"Numerical analysis and experimental correlation of composite shell buckling and post-buckling"*, Composites Part B: Engineering, 31(8): p. 655-667.

5- Singer J, Arbocz J, Weller T, (1998), Buckling experiments: *"experimental methods in buckling of thin-walled structures Volume 1"*. Wiley & Sons, New York.

6- Singer J, Arbocz J, Weller T, (2002), Buckling experiments: *"experimental methods in buckling of thin-walled structures Volume 2"*. Wiley & Sons, New York.

7- MacKay.J.and F.VanKeulen, (2010), "*Areview of external pressure testing techniques for shells including a novel volume-control method. Experimental Mechanics"*, 50(6):p.753-772.

8- Hajmhmd, m. h, (2014),*"Evaluation of buckling and Pskmansh cylindrical shell of variable thickness under external hydrostatic pressure testing machine by the end of the pack,"* Marine Center University of Imam Hussein, "In Persian".

9- BSI, (1980), BS 5500 British standard specification for unfired fusion welded pressure vessels, Issue 5, United Kingdom: *British Standards Institution (BSI)*.

10- ECCS. Buckling of steel shells: (1988), European recommendations, Brussels*: European Convention for Constructional Steelwork (ECCS*).

11- Ross CTF, Little APF, Adeniyi KA (2005) *"Plastic buckling ofring-stiffened conical shells under external hydrostatic pressure.Ocean Eng* 32:21–36.

12- DPA. (2001), SSP 74 Design of submarine structures. United Kingdom: *defence procurement agency, Sea Technology Group*.

13- Gusic, G.A. Combescure, and J. Jullien, (2000), *"The influence of circumferential thickness variations on the buckling of cylindrical shells under external pressure"*, Computers & Structures, 74(4): p. 461-477.

14- Lopatin, (2012*),"Buckling of a composite cantilever circular cylindrical shell subjected to uniform external lateral pressure"*, composite structurs 553-562.

15- Lei Chen, (2011), *"Buckling of cylindrical shells with stepwise variable wall thickness under uniform external pressure"*, Engineering structures 3570-3578.

16- Nguyen, (2009), *"Buckling under the external pressure of cylindrical shells with variable thickness"*, international journal of solids and structures 4163-4168.

17-Jack R. Vinson, (1989), *"The Behavior of Thin Walled Structures: Beams, Plates, and Shells"*, *Department of* Mechanical Engineering University of Delaware Newark, Del, USA.

18-Mahmoud Shariati, M. Mehdi Zadeh, (2001), *"experimental study and numerical aperture semi-elliptic steel cylindrical shells buckling under the pressure axis"*. Amir Kabir University, "In Persian".

19- Tohid Ghanbari Ghazijahani, Hossein Showkati, (2013*), "Experiments on cylindrical shells under pure bending and external pressure"*. (109-122), **"**In Persian**"**.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.27.1.8]