



مطالعه عددی و تجربی تاثیر نواقص هندسی بر بار کمانش تحت نیروی محوری در استوانه‌های کامپوزیتی سوراخ دار و بدون سوراخ

فتح‌اله طاهری بهروز^{1*}، میلاد امید²، محمود مهرداد شکر³

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران

2- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران

3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران

* تهران، صندوق پستی 16846-13114، taheri@iust.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 12 دی 1394

پذیرش: 04 فروردین 1395

ارائه در سایت: 23 تیر 1395

کلید واژگان:

کمانش

استوانه‌های کامپوزیتی

نواقص هندسی

چکیده

استوانه‌های جدارنازک به علت وجود نواقصی که به طور ناخواسته و البته اجتناب‌ناپذیر در حین ساخت قطعه، جابجایی یا در هنگام نصب به وجود می‌آید و یا در طبیعت مواد سازنده قطعه وجود دارد تحت بارهای فشاری محوری در باری کمتر از بار شکست بحرانی دچار کمانش می‌شوند. امروزه برای طراحی استوانه‌های جدار نازک از گزارش NASA SP-8007 استفاده می‌شود که استخراج آن حاصل از آزمون‌های کمانش استوانه‌های فلزی است و برای استوانه‌های کامپوزیتی طراحی نشده گرچه در زمینه استوانه‌های کامپوزیتی نیز از آن استفاده می‌شود و علاوه بر آن نتایجی بسیار محتاطانه را پیش‌بینی می‌کند. روش‌های اعمال نواقص هندسی شامل روش اصلاح شده استفاده از شکل‌مدهای حاصل از حل خطی کمانش (M-LBMI) و اعمال بار تحریک کننده عرضی (SPLI) برای استوانه‌های بدون سوراخ و با سوراخ دایروی در این مقاله انجام شده است. برای تایید نتایج عددی استوانه‌های کامپوزیتی جدار نازک با لایه چینی $[90/+23/-23/90]$ ساخته شده و تحت بار فشاری محوری آزمون کمانش شدند. نتایج تجربی به دست آمده دقت نتایج عددی را تایید می‌کنند. همچنین نشان داده شد در استوانه بدون سوراخ اعمال نواقص هندسی باعث افت زیاد بار کمانش در مقایسه با حالت بدون اعمال نواقص هندسی است ولی در استوانه‌های با وجود سوراخ، اعمال نواقص هندسی تاثیری کمتر از 10% در کاهش بار کمانش دارند که این پدیده نشان‌دهنده اهمیت تاثیر وجود سوراخ بر روی کمانش در مقایسه با وجود نواقص هندسی است.

Experimental and numerical examination of the effect of geometrical imperfection on buckling load in axially compressed composites cylinder with and without cutout

Fathollah Taheri-Behrooz*, Milad Omid, Mahmood Mehrdad Shokrieh

School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 16846-13114, Tehran, Iran, taheri@iust.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 02 January 2016
Accepted 23 March 2016
Available Online 13 July 2016

Keywords:

Buckling
Composite cylindrical shell
Geometric imperfections

ABSTRACT

When a cylindrical shell subject to a compressive load, because of various imperfections happened during processes as manufacturing, handling, assembling and machining, buckling occurs in loads lower than corresponding static failure load. Still many of cylindrical shell structures are designed against buckling based on experimental data introduced by NASA SP-8007 as conservative lower bound curves. In the manuscript, non-linear methods of Modified Linear Buckling Modeshaped Imperfections (M-LBMI) and Single Perturbation Load Imperfections (SPLI) for composite cylindrical shell with and without cutout are investigated. In order to evaluate the numerical results composite cylinder with stacking sequence of $[90/+23/-23/90]$ are manufactured by using filament winding method and buckling tests are performed under axial loading. Non-linear numerical results in cylinder with and without cutout are close together and have good agreement with experimental data. It was concluded that buckling load predicted by SPLI and modified LBMI method on cylinder with cutout is close to result of case without apply geometric imperfections. In summary, it was concluded that cutout on the cylinder body act as an imperfection to trigger buckling of the structures so there is no need to apply geometrical imperfections.

1- مقدمه

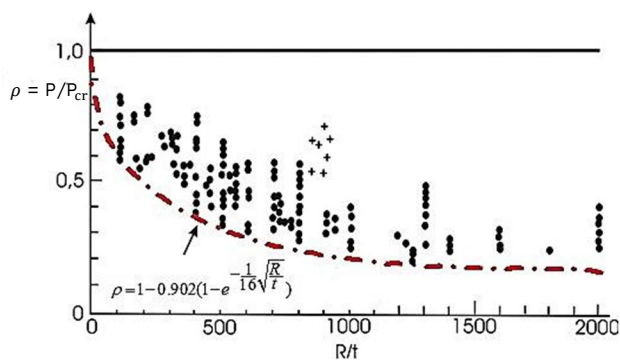
فشاری محوری بالاتری نسبت به سایر مقاطع هندسی دارد و همچنین به علت نسبت استحکام به وزن بالاتر مواد کامپوزیتی در مقایسه با مواد فلزی،

استوانه‌های جدار نازک به‌علت شکل منحصر به فرد خود قابلیت تحمل بار

Please cite this article using:

F. Taheri Behrooz, M. Omid, M. Mehrdad Shokrieh, Experimental and numerical examination of the effect of geometrical imperfection on buckling load in axially compressed composites cylinder with and without cutout, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 6, pp. 367-377, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:



شکل 1 نمودار NASA-SP8007 [9]

Fig. 1 NASA SP-8007 diagram [9]

نوشته و اجرا شد تحول عظیمی در طراحی کمانش استوانه‌های کامپوزیتی ایجاد گردید.

در پیشبرد روش‌های عددی هان و همکارانش [16,15] یک بار تحریک کننده عرضی قبل از شروع بار محوری بر روی سازه اعمال کردند، افزایش این بار عرضی میزان تحمل سازه در برابر کمانش را کاهش می‌داد تا جایی که حساسیت سازه به افزایش بار عرضی از بین می‌رفت و بار کمانشی در آن نقطه را بار کمانشی سازه معرفی می‌کردند. آن‌ها این مفهوم را از مقاله منتشر شده به زبان آلمانی اسلینگر [17] برداشت کردند. اسلینگر با انجام آزمایش و فیلم‌برداری با دوربین سرعت بالا متوجه شده بود که قبل از وقوع ناپایداری در یک نقطه یک اعوجاج محلی رخ می‌دهد. کاسترو و همکارانش [18] روش اعمال نواقص به‌صورت بار تحریک کننده را به‌صورت جزئی بررسی کرده‌اند. همچنین تأثیر لایه چینی بر روی نواقص در این مقاله بررسی شده است.

دگنهارد و همکارانش در سال 2010 [19] ادامه فعالیت‌ها در زمینه بررسی نواقص به‌صورت اتفاقی و آماری را بررسی کرده‌اند آن‌ها برای بررسی‌های آماری از شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده کرده‌اند و تأثیر نواقص هندسی، بارگذاری و مواد را انجام داده است و متوجه شده است که نواقص هندسی بیشترین تأثیر را بر روی تغییر بار کمانش دارند.

کاسترو و همکارانش [20] در سال 2014 نحوه حل عددی هر کدام از روش‌های اعمال انواع نواقص هندسی و تأثیر آن بر روی کمانش استوانه‌های جدارنازک کامپوزیتی را مطالعه نموده و نتایج به‌دست آمده از روش‌های متفاوت را با یکدیگر مقایسه نموده است.

هیلبرگر و استارنر [21] ضمن مرور روش‌های سنتی و جدید در مورد اعمال نواقص هندسی، آزمایش‌های آزمایشگاهی انجام داده و نتایج را با مدل‌سازی عددی مقایسه کردند. آن‌ها اثر هر کدام از انواع نواقص بر روی کمانش استوانه‌های ساخته شده از مواد کربن/اپوکسی با 3 لایه چینی $\pm 45/0/90$ s, $\pm 45/90/2$ s, $\pm 45/0/90$ s بررسی نمودند. بیساگنی در سال 2015 [22] استوانه‌های کامپوزیتی ساخته شده از کربن را تحت بارهای فشاری محوری استاتیکی و دینامیکی بررسی کرد و به این نتیجه رسید که استوانه‌های کامپوزیتی توانایی تحمل بار پس از کمانش تا 40% بار در لحظه کمانش را دارا هستند.

پدیده کمانش در استوانه‌های با وجود سوراخ ابتدا در مواد همسانگرد مورد بحث و بررسی قرار گرفت [23-25] و سپس در زمینه استوانه‌ها کامپوزیتی گسترش داده شد. به‌طور کلی در زمینه کمانش در استوانه‌ها با وجود سوراخ به خصوص در استوانه‌های کامپوزیتی فعالیت‌های محدودی انجام شده است.

استوانه‌های جدارنازک کامپوزیتی امروزه در صنایع مختلفی به خصوص ساخت بدنه وسایل هوایی از جمله هواپیماها، موشک‌ها و ... کاربردهای فراوانی دارند.

به‌طور کلی پوسته‌های جدار نازک کامپوزیتی استحکام بالایی در تحمل تنش‌های غشایی دارند، با اعمال بارهای فشاری محوری مقادیر انرژی کرنشی غشایی افزایش می‌یابد ولی به‌علت وجود نواقص هندسی که در حین ساخت به‌وجود می‌آید و یا نواقص در هنگام بارگذاری رفتار استوانه از حالت ایده‌آل فاصله گرفته و بخشی از انرژی کرنشی غشایی تبدیل به انرژی کرنشی خمشی می‌شود. این پدیده در هنگام انتقال انرژی کرنشی غشایی به خمشی به سرعت رخ می‌دهد و باعث حرکت خارج از صفحه در بدنه استوانه می‌شود که با افت شدید عکس‌العمل بار محوری در تکیه‌گاه همراه است که به آن کمانش می‌گویند.

روابط تحلیلی خطی اولیه در زمینه کمانش استوانه‌های جدارنازک توسط ساوت-ول [1] انجام گرفته است. در فرضیات ساوت-ول استوانه ایده‌آل مدل سازی شده بود ولی به‌علت وجود نواقص هندسی نتایج بدست آمده با نتایج آزمایش اختلاف زیادی داشت. روابط تحلیلی برای اعمال نواقص هندسی اولیه در استوانه‌ها در ابتدا توسط فلوجه [2]، دائل [3]، کوپتر [4] بسط داده شد. فرضیات فلوجه و دائل به‌علت این که کمانش را به‌صورت رفته رفته و یکنواخت مدل‌سازی می‌کردند در ابتدا با شکست مواجه شد زیرا در واقع پدیده کمانش به‌صورت ناگهانی رخ می‌دهد. پس از آن دائل و ون [5] روابط دائل را که قبلاً انجام شده بود بر پایه فرضیات کوپتر اصلاح کردند. یک مرور کامل از روابط تحلیلی خطی و غیرخطی با وجود نواقص هندسی و نتایج تجربی در زمینه کمانش استوانه‌های جدار نازک کامپوزیتی تا سال 1975 توسط تنیسون [6] انجام شده است. تنوری کوپتر برای تحلیل کمانش در استوانه‌های کامپوزیتی دارای نواقص هندسی توسط کارد در سال 1969 [7] استفاده شده است. او از این تنوری برای بررسی حساسیت به نواقص با بهره گیری از روش ایجاد انحراف اولیه برای شروع کمانش استفاده کرد. او نتایج تحلیلی خود را برای سه ماده شیشه/اپوکسی، بورون/اپوکسی و بورون/آلومینیوم در دو شرط مرزی ساده و گیردار انجام داد و نوع شیشه/اپوکسی را به طریق پیچش الیاف ساخت و نتایج خود را با آزمایش فشار محوری مقایسه کرد و توانست اختلاف با نتایج تجربی را به 21% کاهش دهد. خات و وینکایا [8] با استفاده از تنوری کوپتر مدهای تقارن محوری که از حل خطی کمانش به روش مقادیر ویژه به‌دست می‌آمد را به‌عنوان نواقص اولیه در استوانه قرار می‌دادند. در تحلیل آن‌ها رفتار پیش از کمانش نادیده گرفته شده بود و فقط بار کمانشی محاسبه می‌شد. به‌منظور کاهش اختلاف نتایج تنوری و آزمایش در سال 1968 ناسا یک نمودار برای تحلیل کمانش استوانه‌ها تحت بار محوری طی گزارش NASA SP-8007 منتشر کرد که در آن نسبت بار واقعی کمانش به بار حاصل از نتایج تنوری (ρ) به‌عنوان ضریب کاهش¹ برحسب نسبت R/t ارائه می‌شود (شکل 1 [9]). این نمودار براساس آزمون‌های کمانش بر روی استوانه‌های فلزی به‌دست آمده است و به‌علت افزایش دقت ساخت و بارگذاری با پیشرفته شدن دستگاه‌های ساخت و آزمایش، نتایج بدست آمده از این نمودار امروزه بسیار محتاطانه است.

با به‌وجود آمدن نرم‌افزارهای کامپیوتری مانند پستاپ² که توسط دیکسون و همکارانش [11,10] همچنین پاندا-2³ که توسط باشنل [14-12]

¹ Knock-Down Factor (KDF)² POSTOP³ PANDA-2



Fig. 2 Geometrical properties and stacking sequence

شکل 2 مشخصات هندسی و لایه چینی

23±2 درجه به‌دست آمده است. برای استخراج خواص مکانیکی در راستای الیاف و عمود بر الیاف ابتدا صفحات 300×300 mm تک جهته شیشه/اپوکسی با روش پیچش الیاف و استفاده از یک مندرل با مقطع مستطیل ساخته شده است و پس از برش نمونه‌های موردنظر و انجام آزمون‌های کشش براساس استاندارد [31] ASTM D3039 توسط دستگاه سننام⁶، خواص مکانیکی در جهت الیاف، عمود بر الیاف و ضریب پواسون به‌دست آمده است. برای استخراج مدول برشی، صفحات [0/90] ساخته شده و نمونه‌های دارای شیار V شکل براساس استاندارد [32] ASTM D7078 برش خورده و مدول مماسی نمونه‌های محاسبه شده است. نتایج خواص مکانیکی استخراج شده در جدول 2 ارائه شده است.

2-3- روش انجام آزمون کماتش

دستگاه مورد استفاده برای آزمایش استوانه بدون سوراخ، دستگاه زویک روئل⁷ با ظرفیت بارگذاری 50 tons و دستگاه استفاده شده برای آزمایش استوانه‌های سوراخ‌دار، دستگاه سننام با ظرفیت بارگذاری 15 tons است. نتایج استخراج شده از دستگاه‌های استفاده شده برای آزمون کماتش نمودار بار برحسب کوتاه‌شدگی طول استوانه است. انجام آزمون کماتش به روش کنترل جابجایی و سرعت حرکت فک متحرک به‌منظور بارگذاری 0.01 mm/s است. شرایط مرزی دو انتهای استوانه به‌صورت گیردار است. در استوانه‌های سوراخ‌دار و بدون سوراخ به‌منظور کنترل یکنواخت بودن بارگذاری در دوطرف استوانه کرنش‌سنج در نزدیکی لبه‌های بارگذاری و در راستای محور استوانه نصب شده است. علاوه بر این در استوانه‌های با وجود سوراخ، برای بررسی رفتار استوانه در اطراف سوراخ و مقایسه آن با قسمت بدون سوراخ استوانه، کرنش‌سنج‌هایی در راستای طولی و محیطی در اطراف سوراخ و در ناحیه مقابل سوراخ در طرف دیگر استوانه نصب شده است. "شکل 3" محل نصب

جدول 2 خواص مکانیکی و کسر حجمی الیاف

Table 2 Mechanical properties and fiber volume fraction		
نماد	مقدار	پارامتر
E_x	35.5 (GPa)	مدول الاستیک در راستای الیاف
E_y	5.4 (GPa)	مدول الاستیک در راستای عمود بر الیاف
E_s	4.085 (GPa)	مدول برشی
ν_{xy}	0.3	ضریب پواسون
V_f	56%	کسر حجمی الیاف

⁶ SANTAM

⁷ Zwick Roell

هیلبرگر و همکارانش [26] کماتش با وجود سوراخ در استوانه‌های کامپوزیتی به روش تحلیلی را بررسی و با نرم افزار STAGS¹ و نتایج تجربی مقایسه کردند. مدل سازی عددی هیلبرگر [26] در نرم افزار STAGS انجام شده بود و تفرشی [27] مدل او را در نرم‌افزار آباکوس² مدل‌سازی کرد و به تطابق نتایج پرداخت. اوریفینی و بیسگانی در سال 2013 [28] روش بار تحریک کننده عرضی (SPLI) را برای استوانه‌های با وجود سوراخ بررسی کرده‌اند. آربلو و همکارانش [29] تغییرات قطر سوراخ و نسبت شعاع به ضخامت پوسته را برای صفحات و استوانه‌های سیلندری به روش SPLI بررسی کرده‌اند. ولی این فعالیت‌ها [29,28] در زمینه استوانه سوراخ‌دار همراه با آزمون تجربی کماتش و بررسی میزان صحت نتایج نبوده است.

در این مقاله تحلیل کماتش در یک استوانه کامپوزیتی با ابعاد هندسی و لایه‌چینی مشخص با و بدون سوراخ دایروی تحت بار محوری فشاری با روش -های حل عددی خطی و غیرخطی انجام شده است. جهت اعمال عیوب هندسی با روش اصلاح شده استفاده از شکل موده‌های خطی کماتش به عنوان نواقص (M-LBIM³) و روش بار تحریک کننده عرضی (SPLI⁴) و برای بررسی میزان صحت هر کدام از روش‌ها آزمون‌های کماتش انجام گرفته است و نتایج با یکدیگر مقایسه شده و در مورد علل اختلاف نتایج بحث شده است.

2- آزمون تجربی کماتش

2-1- مشخصات هندسی نمونه‌ها

براساس نیازهای این پژوهش 4 عدد استوانه مشابه بدون سوراخ با طول 700 mm، قطر 189 mm و ضخامت 2.2 mm و 3 عدد استوانه دارای سوراخ به ترتیب با قطر سوراخ 50, 80, 100 mm به روش پیچش الیاف ساخته و آزمایش شده است. محل سوراخ در هر استوانه در وسط بدنه و تعداد سوراخ در هر استوانه یک عدد می باشد. جدول 1 جزئیات مشخصات هندسی هر نمونه را نمایش داده است.

لایه چینی انجام گرفته به صورت [90/23/-23/90] و میزان ضخامت در هر لایه 0.55 mm است. "شکل 2" مشخصات هندسی و لایه چینی استوانه‌ها را نمایش داده است.

2-2- تعیین خواص مکانیکی مواد

رزین مورد استفاده در ساخت این نمونه‌ها رزین اپوکسی کد LY556 تولید شده توسط شرکت هانتسمان است. الیاف استفاده شده الیاف شیشه روپنگ⁵ از نوع E با تکیس 2400 است. نحوه ساخت استوانه‌ها به روش پیچش الیاف و عرض هر دسته الیاف 5 cm است. براساس استاندارد [30] ASTM D3171 با سوزاندن نمونه‌ها کسر حجمی الیاف بین 55% تا 57% و زاویه پیچش

جدول 1 مشخصات هندسی نمونه‌ها (ابعاد برحسب میلی‌متر)

Table 1 Geometrical properties of samples (dimentions in mm)

نام نمونه	قطر داخلی	ضخامت متوسط	طول استوانه	قطر سوراخ
A2	378	2.1±0.1	700±2	----
A3	378	2.1±0.1	700±2	----
A4	378	2.1±0.1	700±2	----
B50	378	2.1±0.1	700±2	50±1
B80	378	2.1±0.1	700±2	80±1
B100	378	2.1±0.1	700±2	100±1

¹ STRuctural Analysis of General Shells

² ABAQUS

³ Modified – Linear Buckling Modeshaped Imperfections

⁴ Single Perturbation Load Imperfections

⁵ Roving

فیکسچر بر روی نمونه یک پیش‌بار بین 2 kN تا 3 kN بر روی نمونه‌ها قرار داده می‌شود و دستگاه سپس شروع به ضبط نتایج می‌کند. در استوانه‌های بدون سوراخ برای اطمینان از صحت نتایج، نمونه‌های A2, A3, A4 با ابعاد و لایه چینی یکسان مورد آزمون قرار گرفته‌اند و "شکل 6" نمودار بار بر حسب کوتاه شدگی طول استوانه در این سه نمونه را نمایش می‌دهد. در ابتدای بارگذاری به دلیل وجود اصطکاک در اجزاء فیکسچر و گریپ‌ها و عدم انتقال کامل بار به کل استوانه نمودار "شکل 6" در بارهای پایین غیرخطی بوده ولی بعد از آن تا لحظه کمانش رفتار به صورت خطی ادامه می‌یابد.

در استوانه‌های بدون سوراخ کمانش به صورت کاملاً ناگهانی و همراه با یک صدای شدید و بلند رخ می‌دهد، در هنگام کمانش بار به صورت ناگهانی کاهش می‌یابد به‌طور مثال در نمونه A3 بار از حدود 191 kN در لحظه کمانش به 9 kN در لحظه پس از کمانش کاهش می‌یابد. مطابق "شکل 6" ملاحظه می‌شود که رفتار هر سه نمونه آزمایش شده تا قبل از کمانش مشابه یکدیگر است که نمایانگر دقت ساخت یکسان در استوانه است و بارهای کمانش در نمونه‌های متفاوت از حدود 170 kN تا 190 kN متفاوت است. جدول 3 بارهای کمانش در هر سه نمونه را نشان می‌دهد. در لحظه پس از کمانش مودهای کمانش بر روی بدنه استوانه ظاهر می‌شود، "شکل 7" استوانه در لحظه پس از کمانش را نمایش می‌دهد. به منظور بررسی یکنواخت بودن بارگذاری مقادیر کرنش‌های محوری 1

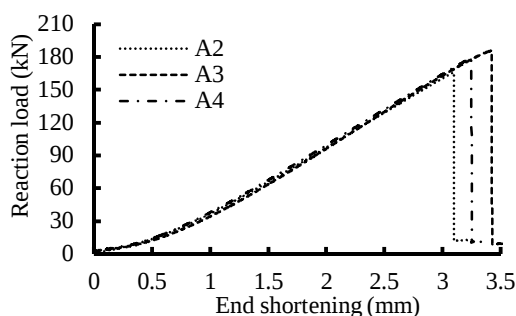


Fig. 6 Results of buckling test for cylinder without cutout

شکل 6 نتایج آزمون کمانش استوانه‌های بدون سوراخ

جدول 3 مقادیر بار کمانش در نمونه‌های استوانه بدون سوراخ

Table 3 Buckling load in cylinders without cutout

شماره نمونه	بار کمانشی (kN)	کاهش طول در هنگام کمانش (mm)
A2	170.991	3.02
A3	191.803	3.52
A4	184.356	3.23
میانگین	182.383	3.22



Fig. 7 Cylinder after buckling



شکل 7 استوانه پس از کمانش

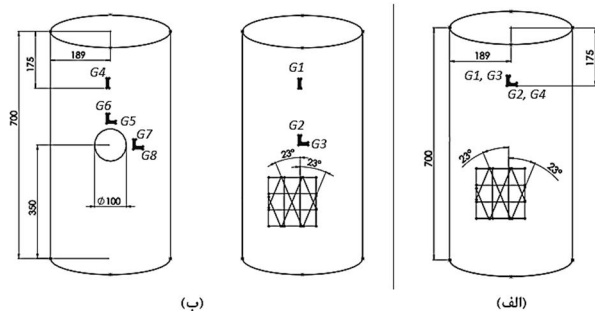


Fig. 3 Location of strain gages cylinder, A. without cutout and B. with cutout

شکل 3 شماتیک قرار گیری کرنش سنج استوانه الف. بدون سوراخ ب. سوراخ‌دار (دو طرف استوانه)

کرنش‌سنج‌ها بر روی نمونه را نمایش می‌دهد. برای استخراج مقادیر کرنش سنج‌ها از دستگاه داده بردار TMR-211 استفاده شده است. برای افزایش صحت در یکنواخت بودن بارگذاری فیکسچری طراحی شده است که نواقص بارگذاری ناشی از غیریکنواخت بودن سطح بارگذاری را پوشش دهد. برای این منظور بین صفحه اعمال بار از طرف دستگاه آزمون و صفحه اعمال بار بر روی استوانه یک گلوله کروی قرار می‌گیرد تا صفحه‌ای که بر روی استوانه بارگذاری می‌کند قابلیت دوران و پوشش سطح را داشته باشد. "شکل 4" شماتیک کلی این فیکسچر را نمایش می‌دهد. بر روی سطوح بارگذاری فیکسچر شیارهایی ایجاد شده است که از هر انتها پوسته استوانه به اندازه 3mm درون آن می‌رود و به منظور جلوگیری از خرابی لبه‌های بارگذاری و انتقال بار به پوسته استوانه دو انتهای استوانه با نوارهایی به عرض 5cm و ضخامت 1.5 mm تقویت شده است. "شکل 5" شرایط تقویت دو انتهای استوانه و قرارگیری لبه‌های بارگذاری درون فیکسچر را نمایش می‌دهد.

پس از انجام آماده‌سازی نمونه‌ها، نصب فیکسچرها بر روی دستگاه و نصب کرنش‌سنج‌ها بر روی نمونه و اتصال آن‌ها به دستگاه داده بردار، آزمون کمانش انجام می‌شود. در ابتدا برای اطمینان از قرارگیری صحیح و کامل

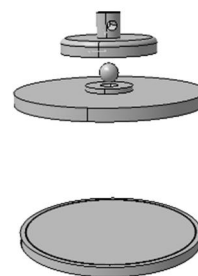


Fig. 4 Schematic of buckling test fixture

شکل 4 نمای کلی فیکسچر آزمون کمانش

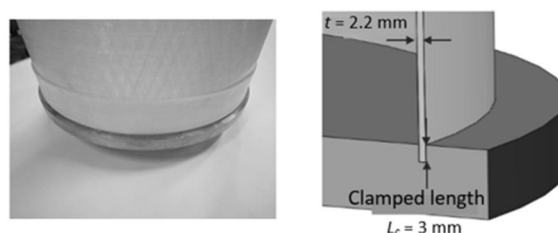


Fig. 5 Installation and reinforcement edge of cylinder

شکل 5 قرار گیری لبه‌های استوانه درون فیکسچر و تقویت محل بارگذاری

جدول 4 مقادیر بار کمانش و کاهش طول تا لحظه کمانش در استوانه‌های سوراخ‌دار

Table 4 Buckling load and corresponded end shortening

نام نمونه	قطر سوراخ (mm)	بار کمانش (kN)	کاهش طول (mm)
B50	50	119.275	2.64
B80	80	102.372	2.29
B100	100	91.493	2.21

در سطح سوراخ‌دار استوانه را نمایش می‌دهد. رفتار کرنش‌سنج 4 که در نزدیکی محل بارگذاری نصب شده است ابتدا با توجه به فشاری بودن بار نمایش‌دهنده رفتار فشاری درون صفحه‌ای است ولی با افزایش بار در حدود باری برابر با 0.6 بار کمانش رفتار برون‌صفحه‌ای در آن ناحیه مشاهده می‌گردد به صورتی که بخشی از کرنش فشاری در آن ناحیه برداشته می‌شود ولی بار فشاری تا هنگام کمانش بر روی استوانه باقی می‌ماند.

رفتار کرنش‌سنج‌های 6 و 7 نشان دهنده پیچیده بودن جابجایی‌ها در اطراف سوراخ است به‌طوری که مشاهده می‌شود در ابتدا گرچه کرنش‌ها به صورت فشاری است ولی مقادیر آن‌ها کمتر از کرنش‌سنج 4 می‌باشد که این پدیده تعامل کرنش‌های غشایی و خمشی (درون و برون صفحه‌ای) در اطراف سوراخ را نمایش می‌دهد. گرچه در ابتدا مقادیر کرنش‌های 6 و 7 منفی است ولی در ادامه با ایجاد رفتار برون صفحه‌ای در نقاط متناظر با آن‌ها مقادیر آن‌ها مثبت می‌شود.

کرنش‌سنج 5 در نقطه متناظر با قرارگیری کرنش‌سنج 6 و در راستای محیطی نصب شده است و همواره مقادیر کرنش منفی را نمایش می‌دهد که نمایش دهنده حرکت رو به داخل پوسته استوانه در محل ساعت 12 است. کرنش‌سنج 8 در نقطه متناظر با قرارگیری کرنش‌سنج 7 و در راستای محیطی نصب شده است و همواره مقادیر کرنش مثبت را نمایش می‌دهد که نمایش دهنده حرکت رو به بیرون پوسته استوانه در محل ساعت 3 است. نرخ بالای کرنش در کرنش‌سنج طولی 7 و حرکت برون صفحه‌ای آن ناحیه به سمت بیرون استوانه می‌تواند شروع کننده و عامل اصلی ناپایداری در استوانه باشد.

وقوع کمانش در استوانه‌های سوراخ‌دار به صورت محلی و فقط در اطراف سوراخ رخ می‌دهد و بقیه نواحی دچار اعوجاج غیرقابل بازگشت نمی‌شوند. "شکل 11" استوانه B80 قبل و پس از کمانش را نمایش می‌دهد.

3- تحلیل عددی کمانش

مشخصات هندسی و خواص مکانیکی استفاده شده در حل عددی مشابه با نمونه‌های آزمایشگاهی انتخاب شده است و شرایط مرزی با توجه به نوع قرارگیری نمونه در فیکسچر به صورت گیردار انتخاب شده است. نوع المان انتخاب شده با توجه به نوع هندسه و جنس کامپوزیتی نمونه به صورت المان 4 گرهی پوسته عمومی S4R که معادلات تغییر شکل‌های برشی مرتبه اول بر آن حاکم است استفاده شده است. در استوانه بدون سوراخ همگرایی مش‌ها در تعداد 56 المان در راستای طولی و 92 المان در راستای محیطی همگرا شده است. برای استوانه‌های با وجود سوراخ علاوه بر همگرایی کلی مش در سرتاسر سازه باید همگرایی مش‌ها در اطراف سوراخ نیز بررسی شود. در استوانه با سوراخی به قطر 50 mm پس از جداسازی یک مربع از کل استوانه با ضلع 200 mm به مرکزیت سوراخ، در تعداد 30 المان در راستای محیطی اطراف سوراخ و 14 المان در راستای شعاعی با نسبت تراکم 5 (نسبت بزرگترین به کوچکترین المان) همگرایی رخ داده است. "شکل 12" نمایی از استوانه‌ها با مش‌بندی همگرا شده را نمایش می‌دهد.

و 3 در دو طرف استوانه A4 در "شکل 8" ارائه شده است (محل کرنش سنج‌ها در "شکل 3" موجود است). مشاهده می‌شود که بیشترین اختلاف کرنش در دو طرف استوانه حدود 3% است که نشان‌دهنده بارگذاری تقریباً یکنواخت است.

نحوه آماده‌سازی آزمون استوانه‌های سوراخ‌دار و بدون سوراخ یکسان است، "شکل 9" نمودار بار برحسب جابجایی را در هر سه نمونه و جدول 4 مقادیر بار کمانش و مقدار کوتاه‌شدگی طول استوانه در هنگام کمانش را نمایش می‌دهد. رفتار هر سه نمونه با وجود تغییرات در اندازه سوراخ تا قبل از کمانش یکسان است ولی با افزایش اندازه قطر سوراخ میزان بار کمانش و کاهش طول در هنگام کمانش کاهش می‌یابد. مشابه استوانه‌های بدون سوراخ رفتار نمودار در ابتدا غیرخطی است و سپس تا لحظه کمانش به‌صورت خطی ادامه می‌یابد. برخلاف استوانه‌های بدون سوراخ که تا لحظه کمانش هیچ آثاری از ناپایداری و اعوجاج در استوانه مشاهده نمی‌شود، در استوانه‌های سوراخ‌دار در حین انجام آزمون پوسته استوانه در اطراف سوراخ به‌طور مشهودی دچار اعوجاج می‌گردد و اطراف سوراخ در محل ساعت‌های 3 و 9 به سمت بیرون شروع به حرکت می‌کند ولی رفتار نمودار بار-کوتاه‌شدگی همواره خطی است تا این که در لحظه کمانش با یک اعوجاج ناگهانی و زیاد در اطراف سوراخ، کمانش محلی رخ می‌دهد و مقدار بار در لحظه پس از کمانش نیز به صورت ناگهانی افت زیادی می‌کند. همچنین در حین بارگذاری فشاری صداهایی شنیده می‌شود که همراه با تغییر رنگ اطراف سوراخ است که این پدیده نمایش دهنده ایجاد شکست در الیاف، جدایش لایه‌ها و یا انواع خرابی‌ها در اطراف سوراخ تا قبل از ناپایداری است. رفتار جابجایی پوسته در اطراف سوراخ بسیار پیچیده است و برای مشاهده دقیق این رفتار باید نتایج کرنش سنج‌ها بررسی شود.

شکل 10-الف مقادیر کرنش‌های محوری و 10-ب کرنش‌های محیطی

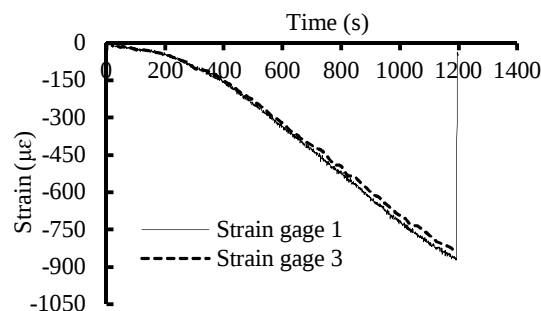


Fig. 8 Longitudinal strain on both sides of cylinder

شکل 8 کرنش‌های طولی در دو طرف استوانه

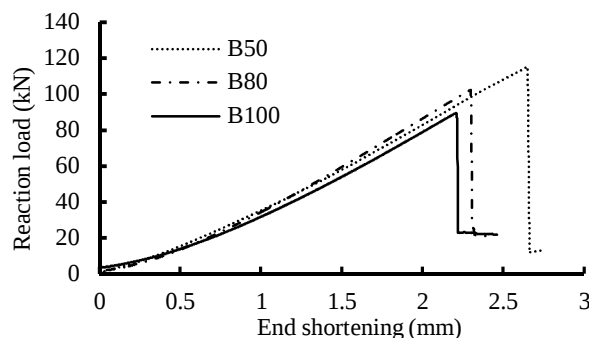


Fig. 9 Results buckling test for cylinder with cutout

شکل 9 نتایج آزمون کمانش استوانه‌های سوراخ‌دار

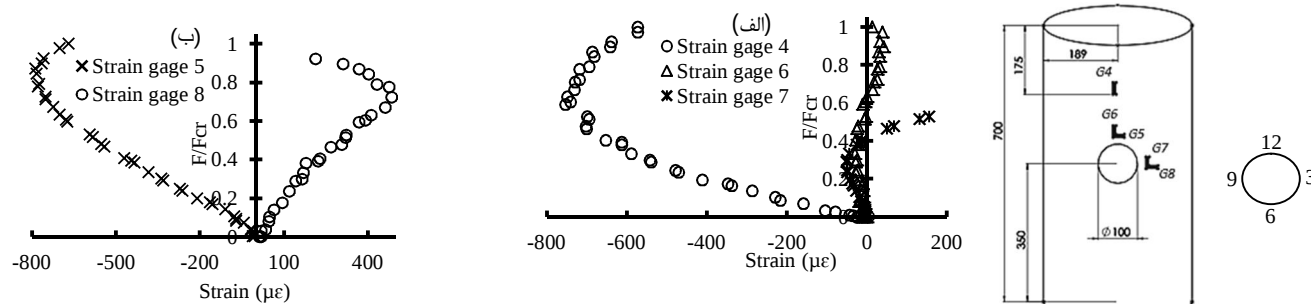


Fig. 10 A. Longitudinal strain around cutout B. Circumferential strain around cutout

شکل 10 الف. کرنش‌های طولی در اطراف سوراخ ب. کرنش‌های محیطی اطراف سوراخ

تغییر فاکتور دمپینگ، مقدار $1e-7$ افت ناگهانی عکس‌العمل بار را در حل به خوبی نمایش می‌دهد. انتخاب نامناسب فاکتور دمپینگ باعث می‌شود که در هنگام کمناش عکس‌العمل بار به صورت یکنواخت افت پیدا کند. در این مقاله حل‌های خطی کمناش و روش‌های اعمال نواقص هندسی به روش اعمال بار انحرافی و روش اصلاح شده استفاده از شکل‌مادهای کمناش خطی به عنوان نواقص که توسط نویسنده اصلاح شده است در دو حالت استوانه‌های سوراخ‌دار و بدون سوراخ ارائه می‌گردد.

3-1- حل عددی برای استوانه‌های بدون سوراخ

حل خطی عددی در پوسته‌های استوانه‌ای تبدیل به یک مسئله مقدار ویژه می‌شود که مقادیر ویژه آن بارهای کمناش و بردارهای ویژه متناظر با آن‌ها شکل‌مادهای کمناش را نمایش می‌دهد. در استوانه‌های بدون سوراخ این حل به علت ایده‌آل در نظر گرفتن پوسته همواره نتایج غیرواقع‌بینانه و غیر محتاطانه‌ای را ارائه می‌دهد. با توجه به این که شکل‌مادهای کمناش در لحظه کمناش بر روی استوانه ظاهر می‌گردد می‌توان آن‌ها را با یک ضریبی از اندازه ضخامت بر روی پوسته ایده‌آل استوانه قرار داد. تغییرات شکل‌مود به صورت نامنظم بار کمناش را در یک محدود با اختلاف کم ثابت نگه می‌دارد همچنین رفتار سفتی استوانه قبل از کمناش را تغییر نمی‌دهد ولی افزایش اندازه نواقص باعث کاهش هم در رفتار سفتی قبل از کمناش و هم بار کمناشی می‌شود. به علت این که شکل نواقص در استوانه به صورت کاملاً اتفاقی است و در نتیجه بارهای به‌دست آمده از شکل‌مادهای متفاوت نتایج متفاوت ولی نزدیک به یکدیگری را پیش‌بینی می‌نماید از بین انواع شکل‌مادهای متفاوت، شکل‌مودی که بار کمناشی متناظر با آن بیشترین احتمال به وقوع پیوستن در تابع چگالی نرمال احتمال را دارد به عنوان شکل نواقص برای اعمال بر روی استوانه انتخاب می‌شود. همچنین برای انتخاب اندازه نواقص با توجه به "شکل 13" در اندازه نواقص بیشتر از 0.2 برابر ضخامت افت محسوس عکس‌العمل بار در لحظه پس از کمناش مشاهده نمی‌شود بنابراین اندازه نواقص در بازه 0 تا 0.2 برابر ضخامت برای اعمال بر روی استوانه مناسب است. برای ایجاد ریسک پایین در نتایج از 25 درصد پایین این بازه یعنی 0.18 برابر ضخامت به عنوان اندازه نواقص استفاده می‌شود.

"شکل 14" نمودار بار کمناش حاصل از روش غیرخطی اعمال نواقص به روش شکل مود هندسی را به ازای نواقص به اندازه 0.18 برابر ضخامت، در شکل نواقص متناظر با شکل‌مادهای متفاوت نمایش می‌دهد. شکل مود انتخاب شده به عنوان الگوی اعمال نواقص هندسی بر روی استوانه شکل مودی است که بار کمناش متناظر با آن نزدیکترین عدد به مقدار میانگین

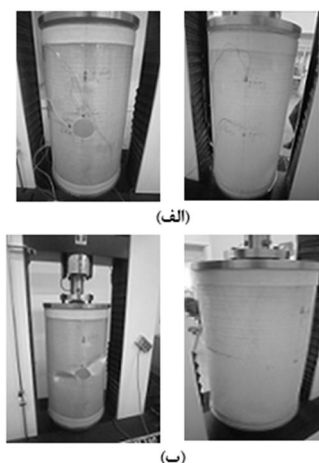


Fig. 11 B80 cylinder A. Before buckling B. After buckling

شکل 11 استوانه B80 الف. قبل از کمناش ب. پس از کمناش

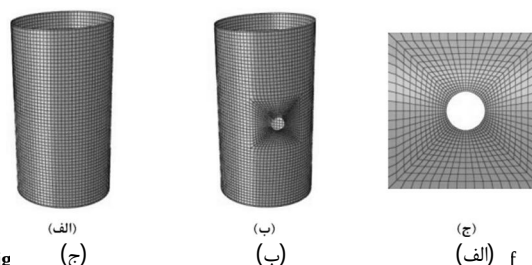


Fig. 12 cylinder with cutout C. Detail of meshing

شکل 12 الف. مش بندی استوانه بدون سوراخ ب. مش بندی استوانه سوراخ‌دار ج. جزئیات مش بندی در اطراف سوراخ

نرم‌افزار استفاده شده برای حل عددی نرم‌افزار [33] ABQAUQS - 6.12 است. در این مقاله دو نوع روش حل استفاده شده است. برای حل عددی به روش خطی کمناش از روش حل مسئله مقدار ویژه استفاده می‌شود که می‌تواند مقادیر بارهای کمناش و شکل‌مادهای متناظر با هر کدام را استخراج کند. برای بررسی تاثیر اعمال نواقص هندسی و همچنین بررسی رفتار بار-جابجایی در حین بارگذاری از حل غیرخطی استاندارد ضمنی استفاده می‌شود. مانند شرایط آزمون کمناش یک جابجایی با سرعت یکسان با شرایط بارگذاری در آزمون تجربی، بر روی تمامی نودهای سطح بارگذاری اعمال می‌شود. در مسائلی مانند کمناش که سطح انرژی کرنشی در لحظه کمناش به طور ناگهانی کاهش می‌یابد برای به‌دست آوردن نتایج غیرمحتاطانه باید فاکتور دمپینگ را تنظیم کرد، در این مسئله با بررسی همگرایی نتایج با

مشخص بار عرضی که P_1 نامیده می‌شود، هرچه مقدار آن افزایش یابد بار کمانش تغییر نمی‌کند. بار کمانش ثابت N_1 نامیده شده و آن به عنوان ظرفیت بار کمانش محوری در نظر گرفته می‌شود. در "شکل 16" نتیجه این روش با روش اعمال نواقص هندسی به روش شکل مود خطی مقایسه شده است. نسبت بار محاسبه شده در هر روش به بار کمانش در حالت خطی KDF و مقدار جابجایی شعاعی متناظر با اعمال بار انحرافی δ است.

مقادیر KDF در هر دو روش همگرا می‌شود ولی در روش SPLI اصول انتخاب بار کمانش بر روی همگرایی KDF است و در اندازه 0.87 همگرا می‌شود. روش LBMI نیز در گذشته بر مبنای همگرایی نتایج بوده است و همان گونه که در "شکل 15" مشهود است نتایج محتاطانه‌ای را پیش‌بینی می‌کند ولی با اصلاح این روش [34] مشخص شده است که انتخاب بار کمانش در روش LBMI بدین صورت مناسب نمی‌باشد و اندازه نواقص باید در محدوده کمتر از 0.2 برابر ضخامت باشد که برای یک انتخاب محتاطانه اندازه 0.18 برابر ضخامت انتخاب شده است و KDF متناظر با آن 0.85 است که نتیجه آن نزدیک به نتیجه روش SPLI است.

2-3- حل عددی برای استوانه سوراخ‌دار

در استوانه‌های با وجود سوراخ به علت تمرکز تنش در اطراف سوراخ، در صورتی که اطراف سوراخ تقویت نشده باشد ناپایداری ابتدا در نواحی اطراف سوراخ رخ می‌دهد. "شکل 17" شکل‌مدهای کمانش و بارکمانش متناظر با آن‌ها را در استوانه سوراخ‌دار با قطر سوراخ 50 mm نمایش می‌دهد. حل خطی کمانش استوانه‌های سوراخ‌دار بارهای کمانش پایین‌تر را متناظر با شکل‌مدهایی نمایش می‌دهد که پوسته استوانه را در اطراف سوراخ دچار اعوجاج کرده‌اند و بارهای کمانشی متناظر با شکل‌مدهایی که سرتاسر استوانه را دچار اعوجاج کرده‌اند نزدیک به بار کمانش خطی در حالت استوانه بدون سوراخ است.

برای بررسی کمانش استوانه‌های سوراخ‌دار به روش غیرخطی علاوه بر اعمال نواقص هندسی که در قسمت استوانه‌های بدون سوراخ انجام شده است، می‌توان فرض کرد که وجود سوراخ استوانه را از حالت متقارن محوری خارج می‌کند و بنابراین خود سوراخ به‌عنوان یک نقص در بدنه استوانه عمل کرده و باعث شروع کمانش می‌شود.

برای استفاده از روش اعمال نواقص هندسی به شکل‌مدهای خطی باید این فرضیه را در نظر گرفت که نواقص هندسی در سرتاسر استوانه وجود دارد و همان‌گونه که در "شکل 17" مشخص است شش شکل‌مود اول فقط اعوجاج در اطراف سوراخ را نمایش می‌دهند و برای استفاده به عنوان الگوی نواقص هندسی مناسب نیستند و باید از شکل‌مدهایی استفاده کرد که

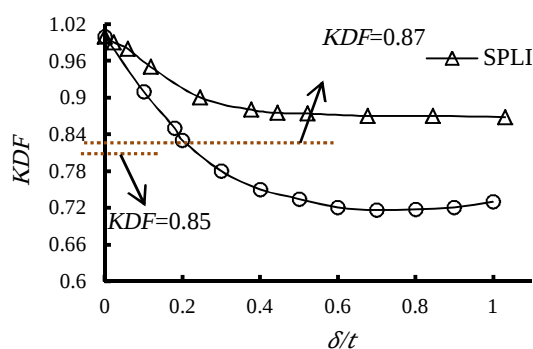


Fig. 16 Comparison M-LBMI and SPLI methods

شکل 16 مقایسه روش‌های M-LBMI و SPLI

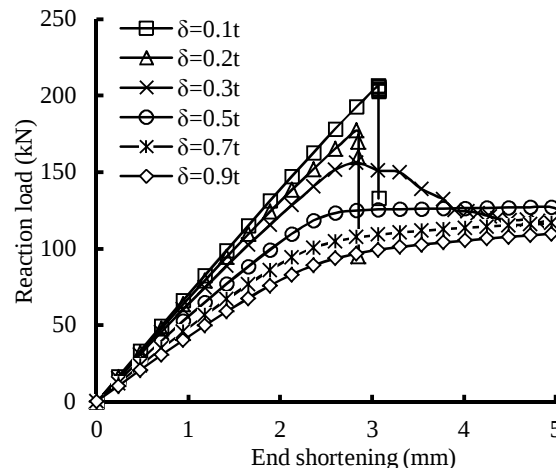


Fig. 13 Reaction load - End shortening curves for different amplitude of imperfections

شکل 13 نمودار عکس‌العمل بار برحسب جابجایی به ازای اندازه نواقص متفاوت

بارهای کمانش حاصل از اعمال شکل‌مدهای متفاوت به‌عنوان نواقص هندسی است. بار کمانش متناظر با این شکل مود بیشترین مقدار را در نمودار توزیع چگالی احتمال دارد که در "شکل 15" نمایش داده شده است.

روش بار انحرافی عرضی که توسط هان و همکارانش [16,17] پیشنهاد شده، روشی بسیار مرسوم است که در زمینه کمانش استوانه‌های جدار نازک بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش ابتدا یک بار متمرکز تحریک کننده شعاعی (SPL) در بدنه پوسته اعمال می‌شود، سپس بار فشاری محوری تا زمانی اعمال می‌شود که کمانش رخ دهد. مراحل ذکر شده مجدد تکرار می‌گردد و در هر مرحله بار تحریک کننده افزایش می‌یابد. با افزایش بار تحریک کننده میزان بار کمانش کاهش می‌یابد تا این که در یک مقدار

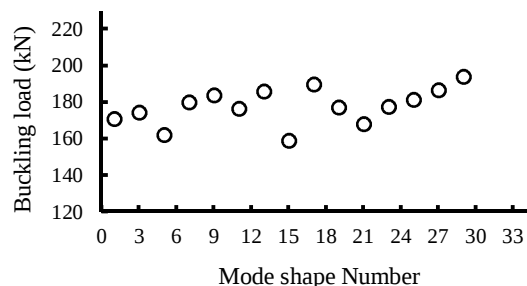


Fig. 14 Buckling load in LBMI method for $\delta = 0.18t$

شکل 14 بارکمانش در نواقص به شکل‌مدهای متفاوت با اندازه 0.18 برابر ضخامت

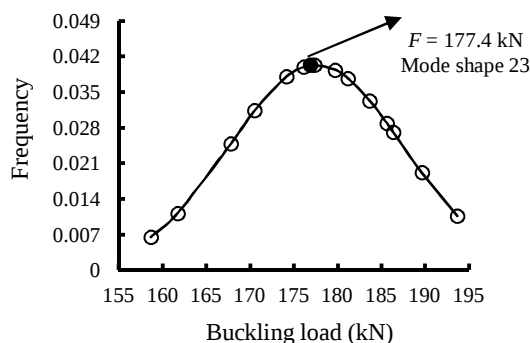


Fig. 15 Probability density function for buckling load

شکل 15 توزیع نرمال احتمال بارهای کمانش

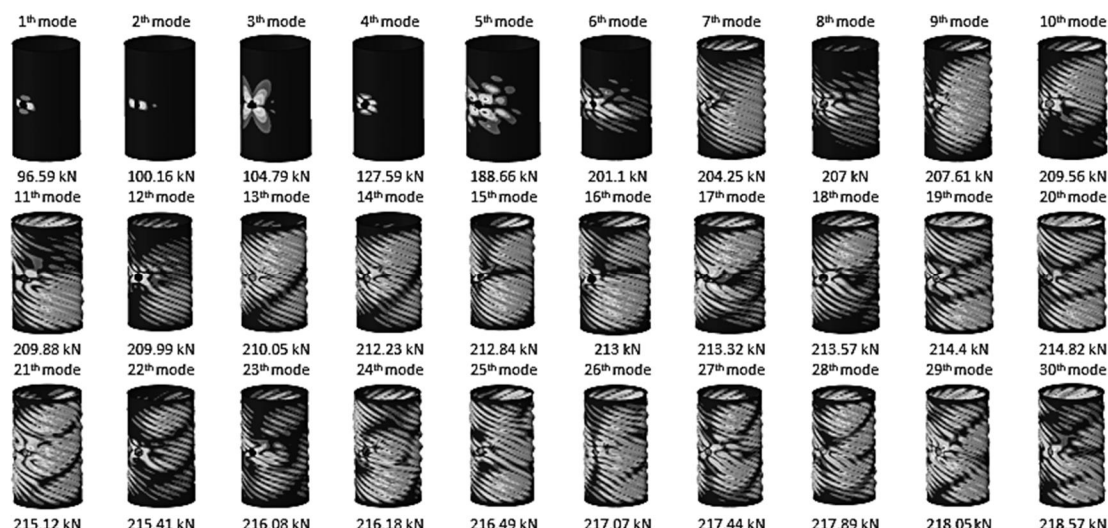


Fig. 17 The first thirty modeshape of linear buckling in cylinder with 50 mm diameter cutout

شکل 17 سی شکل مود اول کمانش خطی استوانه سوراخ‌دار با قطر سوراخ 50 mm

استفاده از روش اعمال بار انحرافی (SPLI) مشابه حالت استوانه بدون سوراخ است با این تفاوت که با از بین رفتن تقارن محوری در استوانه با وجود سوراخ، محل اعمال بار انحرافی اهمیت پیدا می‌کند و برای بررسی آن مطابق "شکل 20" نتایج یک بار با اعمال بار انحرافی در لبه سوراخ و یک بار دور از سوراخ برای استوانه با قطر سوراخ 50 mm استخراج شده است. در این شکل نسبت بار کمانش در روش اعمال بار انحرافی به روش بدون اعمال بار انحرافی را نمایش می‌دهد. در هر دو حالت محل اعمال بار انحرافی، نتایج در قسمت همگرا شده بین 4 درصد برای حالتی که بار انحرافی دور از سوراخ باشد تا 6 درصد برای حالتی که بار انحرافی در لبه سوراخ باشد، کمتر از روش بدون اعمال نواقص هندسی است که این پدیده نشان‌دهنده تأثیر ناچیز بار انحرافی بر روی بار کمانش در استوانه با وجود سوراخ است. مقدار بار کمانش در حالت بدون اعمال نواقص هندسی 118.36 kN است و برای احتیاط بیشتر در پیش‌بینی بار کمانش به روش SPLI نتیجه با اعمال بار انحرافی در لبه سوراخ در نظر گرفته می‌شود که مقدار آن 111.25 kN محاسبه می‌شود.

4- مقایسه نتایج عددی و تجربی

مسئله کمانش استوانه‌های سوراخ‌دار و بدون سوراخ با روش‌های متفاوت عددی انجام شده است و برای سنجش میزان صحت نتایج عددی در روش‌های متفاوت آزمون‌های کمانش برای استوانه بدون سوراخ و 3 استوانه با وجود سوراخ دایروی با قطرهای 50, 80, 100 mm انجام شده است. در روش

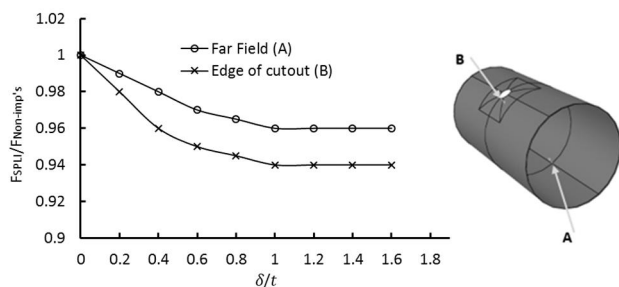


Fig. 20 Ratio of buckling load With perturbation load to without it in two area

شکل 20 نسبت بار کمانش در روش SPLI به روش بدون اعمال نواقص در دو ناحیه اعمال بار انحرافی

اعوجاج در سرتاسر بدنه استوانه را نمایش می‌دهد. مشابه استوانه‌های بدون سوراخ "شکل 18" نمودار بار کمانش حاصل از روش غیرخطی اعمال نواقص به روش شکل مود هندسی را به ازای نواقص به اندازه 0.18 برابر ضخامت، در شکل نواقص متناظر با شکل مدهای متفاوت نمایش می‌دهد و "شکل 19" نمودار توزیع چگالی احتمال برای آن دسته از بارهای کمانش که شکل مود متناظر با آن‌ها اعوجاج در سرتاسر پوسته استوانه است (شکل مود 7 تا 30) را نمایش می‌دهد. بیشترین احتمال به وقوع پیوستن مربوط به بار کمانش 108.34 kN و با الگوی نواقص هندسی مشابه شکل مود 30 می‌باشد.

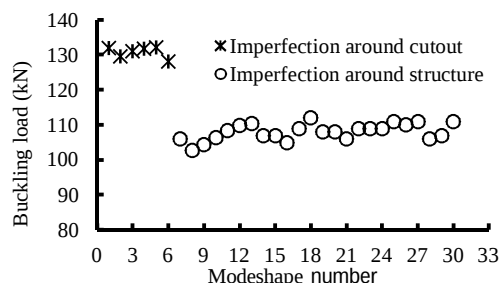


Fig. 18 Buckling load in different modeshape patterns imperfections and $\delta = 0.18t$ in cylinder with 50 mm cutout

شکل 18 بار کمانش در نواقص به شکل مدهای متفاوت با اندازه 0.18 برابر ضخامت در استوانه با قطر سوراخ 50 mm

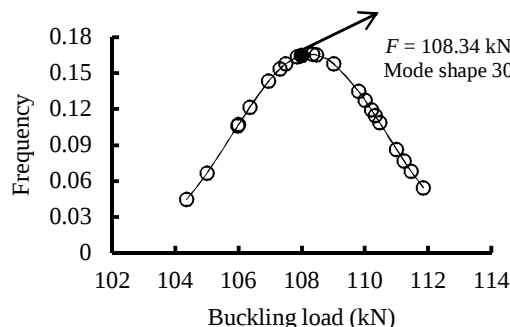


Fig. 19 Probability density function for buckling load with 50mm cutout

شکل 19 توزیع نرمال احتمال بارهای کمانش در استوانه با قطر سوراخ 50 mm

جدول 5 مقادیر بار کمانش، KDF حاصل از روش‌های متفاوت و اختلاف نتایج با

مقادیر تجربی در استوانه بدون سوراخ

Table 5 Buckling load and corresponding KDF in different method in cylinder without cutout

روش	بار کمانش (kN)	نسبت بار کمانش به بار انحراف از نتایج آزمایش (KDF)	انحراف از نتایج آزمایش (%)
حل خطی	207.32	1	13
میانگین نتایج آزمایش	182.38	0.88	-----
حل غیرخطی (بار انحرافی)	181.57	0.87	-0.4
حل غیرخطی (اصلاح شده نواقص با شکل مود خطی)	177.4	0.85	-2.7
NASA SP-8007	124.39	0.6	-31

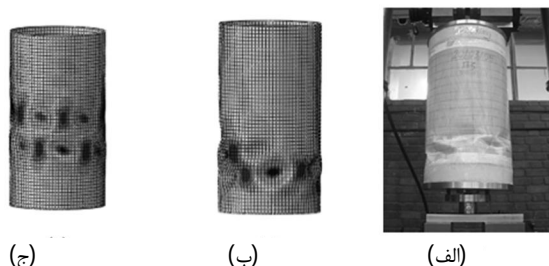


Fig. 22 Cylinder after buckling A. Buckling test B. SPLI method C. M-LBMI method

شکل 22 استوانه پس از کمانش الف. آزمون کمانش ب. روش SPLI ج. روش M-LBMI

نتایج آزمون کمانش در قسمت خطی نزدیک به همدیگر است. در روش‌های عددی غیرخطی با اعمال نواقص هندسی قبل از کمانش نمودار اندکی از حالت خطی انحراف پیدا می‌کند و تا لحظه کمانش شیب آن کاهش می‌یابد. جدول 6 مقادیر بار کمانش حاصل از روش‌های متفاوت و درصد خطای هر روش را نسبت به نتیجه آزمون کمانش برای استوانه با قطر سوراخ 50 mm ارائه داده است.

مشاهده می‌شود که تمامی روش‌ها نتایج محتاطانه‌ای را نسبت به بار تجربی کمانش محاسبه کرده‌اند ولی روش حل خطی مربوط به کمانش محلی در پیش‌بینی بار کمانش نتایج محتاطانه‌تری را نسبت به سایر روش‌ها پیش‌بینی کرده است. برخلاف استوانه‌های بدون سوراخ که نتایج بار کمانش

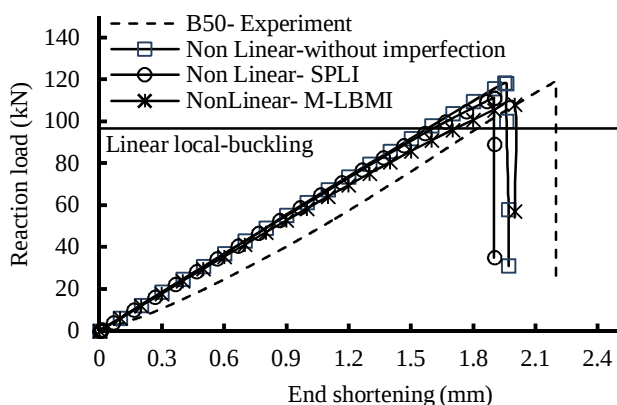


Fig. 23 Reaction load – End shortening in different method for cylinder with 50 mm cutout

شکل 23 بار برحسب کوتاه‌شدگی دو سر استوانه با قطر سوراخ 50 mm

عددی استوانه‌های سوراخ‌دار فقط روش حل و نتایج استوانه سوراخ‌دار با قطر 50 mm ارائه شده است و استوانه با قطر سوراخ‌های دیگر نیز به روش مشابه انجام می‌گردد و در این قسمت فقط نتایج آن‌ها ارائه می‌گردد.

"شکل 21" نمودار بار برحسب کوتاه‌شدگی دو سر استوانه در روش‌های عددی غیرخطی انجام شده و نتایج آزمون کمانش نمایش داده شده است. در ابتدای نمودارهای آزمون کمانش به علت این که در ابتدای آزمون، بار به‌طور کامل در استوانه پخش نشده است به صورت غیرخطی است و پس از آن تا لحظه کمانش به‌صورت خطی ادامه می‌یابد و شیب نمودارهای روش‌های متفاوت عددی و نتایج آزمون کمانش در قسمت خطی یکسان است. در این نمودار بار کمانش به روش خطی و روش NASA SP-8007 نیز ارائه شده است. جدول 5 مقادیر بارهای کمانش حاصل از روش‌های متفاوت عددی و میانگین نتایج آزمایش را ارائه داده است. مقادیر حاصل از بار کمانشی خطی، ظرفیت بالا و البته غیر واقع بینانه را در مقایسه با نتایج آزمون پیش‌بینی می‌کند و همچنین نتایج NASA SP-8007 و دو روش غیرخطی اعمال بار انحرافی (SPLI) و استفاده از مودهای خطی کمانش (M-LBMI) به عنوان نواقص ظرفیت بار کمانش را پایین‌تر از بار کمانشی به‌دست آمده در آزمون پیش‌بینی می‌کنند. اما نتایج NASA SP-8007 در مقایسه با دو روش غیرخطی اعمال بار انحرافی و استفاده از مودهای خطی کمانش به‌عنوان نواقص بسیار محتاطانه‌تر است. برای تحلیل سازه‌هایی که در آن وزن سازه دارای اهمیت فراوانی است بهتر است برای پیش‌بینی بار کمانش از یکی از دو روش غیرخطی اعمال نواقص هندسی که ارائه شده است استفاده شود. نتایج ارائه شده نشان دهنده تطابق نتایج آزمون کمانش و نتایج حل عددی غیرخطی با اعمال نواقص هندسی است. "شکل 22" استوانه پس از کمانش در حالت تجربی و مدل‌سازی غیرخطی به روش‌های SPLI و M-LBMI را نمایش می‌دهد.

"شکل 23" نمودار بار برحسب کوتاه‌شدگی دو سر استوانه سوراخ‌دار با قطر سوراخ 50 mm را در روش‌های عددی غیرخطی متفاوت، حل خطی مقدار ویژه که کمانش را به صورت محلی در اطراف سوراخ پیش‌بینی می‌کند و نتایج آزمون کمانش نمایش داده شده است. به مانند استوانه بدون سوراخ ابتدای نمودار آزمون کمانش به‌علت این که در ابتدای آزمون بار به‌طور کامل در استوانه پخش نشده، به‌صورت غیرخطی است و پس از آن تا لحظه کمانش به صورت خطی ادامه می‌یابد و شیب نمودارهای روش‌های متفاوت عددی و

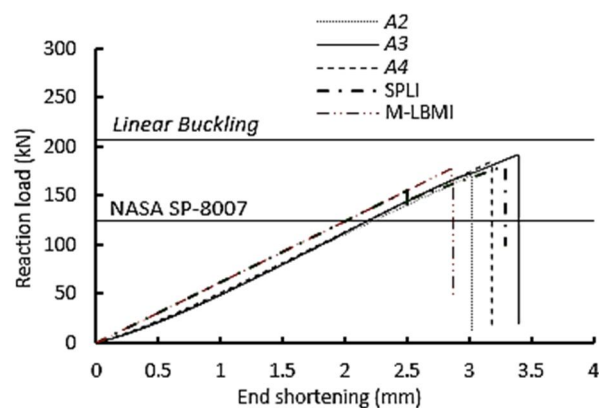


Fig. 21 Reaction load – End shortening for cylinder without cutout in different method

شکل 21 نمودار بار برحسب کوتاه‌شدگی دو سر استوانه بدون سوراخ به ازای روش‌های متفاوت

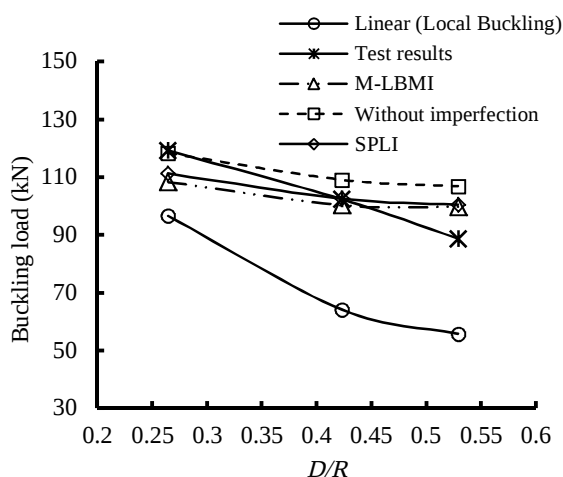


Fig. 24 Buckling load in different methods and D/R ratio

شکل 24 بار کمانش در روش‌های متفاوت به ازای D/R متفاوت

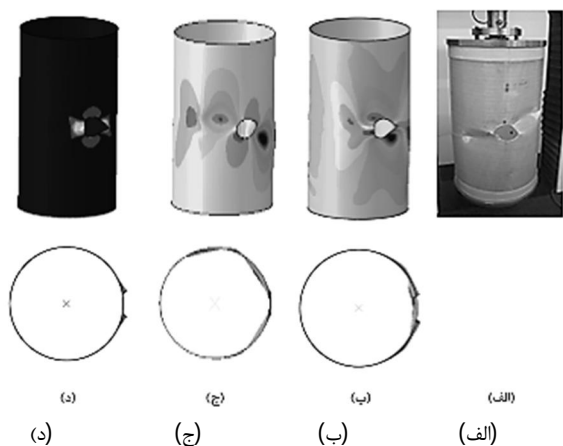


Fig. 25 Cylinder after buckling, A. Buckling test B80 B. M-LBMI method C. SPLI method D. Linear - Local buckling

شکل 25 استوانه پس از کمانش، الف. آزمون تجربی نمونه B80 ب. مدل غیرخطی به روش M-LBMI ج. مدل غیرخطی به روش SPLI د. شکل مود مدل خطی کمانش محلی

بررسی یکنواخت بودن بار فشاری محوری اعمال شده در سطح بارگذاری از کرنش‌سنج‌هایی در نزدیکی محل بارگذاری استفاده شده است و بیشترین اختلاف کرنش‌ها در دورتادور استوانه در راستای محوری حدود 3% بوده است که نشان دهنده یکنواختی بارگذاری است. برای بررسی رفتار اطراف سوراخ در استوانه‌های سوراخ‌دار از کرنش‌سنج‌هایی در اطراف سوراخ استفاده شده است که تغییر علامت کرنش‌های محوری از منفی به مثبت در اطراف سوراخ نشان دهنده رفتار خارج از صفحه قبل از کمانش و کرنش‌های محیطی نشان‌دهنده فرو رفتگی یا بیرون زدگی پوسته در اطراف سوراخ را نمایش می‌دهند.

در استوانه‌های بدون سوراخ نتایج حل عددی به علت بدون نقص در نظر گرفتن پوسته نتایج بالاتر از ظرفیت واقعی و غیرواقع بینانه‌ای را نسبت به نتایج تجربی ارائه می‌دهد و روش ارائه شده توسط گزارش NASA SP-8007 نتایج محتاطانه‌ای را ارائه می‌کند که منجر به افزایش وزن سازه می‌گردد. با انجام اصلاحاتی در روش اعمال نواقص به شکل مود خطی (M-LBMI) نتایج این روش به روش اعمال بارانحرافی (SPLI) نزدیک

جدول 6 مقادیر بارهای کمانشی حاصل از روش‌های متفاوت در استوانه با قطر سوراخ 50 mm

Table 6 Buckling load in different method for cylinder with 50 mm cutout

روش	انحراف نسبت به نتیجه آزمایش (%)	بار کمانش kN
نتایج تجربی	----	119.275
حل خطی - کمانش محلی	-19	96.59
حل غیرخطی - بدون نواقص هندسی	-0.7	118.36
حل غیرخطی - روش بار انحرافی	-6.7	111.25
حل غیرخطی - اصلاح شده نواقص با شکل مود خطی	-9.1	108.34

در حالت بدون اعمال نواقص هندسی بالاتر از نتایج بار کمانش در حالت‌های اعمال نواقص هندسی است، در استوانه‌های سوراخ‌دار حل عددی غیرخطی در حالتی که هیچ‌گونه نواقص در سازه اعمال نشده باشد با روش‌هایی که با اعمال نواقص هندسی بار کمانش را محاسبه می‌کنند کمتر از 10% اختلاف دارد.

نتایج کسب شده فقط برای استوانه با قطر سوراخ 50 mm است و برای بررسی پارامتر تأثیر تغییرات اندازه سوراخ بر روی نتایج و صحت آن‌ها، "شکل 24" مقادیر بارهای کمانش حاصل از روش‌ها متفاوت به ازای نسبت قطر سوراخ به شعاع متوسط استوانه را نمایش می‌دهد. روش حل خطی کمانش به علت وجود سوراخ همواره محل شروع ناپایداری و به وقوع پیوستن کمانش را در اطراف سوراخ پیش‌بینی می‌کند و مقادیر بارهای کمانش پیش‌بینی شده توسط این روش نتایج محتاطانه‌ای را نسبت به نتایج تجربی ارائه می‌دهد. نتایج روش‌های SPLI و M-LBMI همواره به یکدیگر نزدیک هستند و در تمامی اندازه‌های سوراخ‌ها مقادیر آن‌ها کمتر از 10% پایین‌تر از نتایج روش غیرخطی بدون اعمال نواقص هندسی است که این پدیده نمایش دهنده تأثیر کم نواقص هندسی بر روی بار کمانش در استوانه‌های بدون سوراخ است، به بیانی دیگر می‌توان نتیجه گرفت که تأثیر وجود سوراخ بر روی کمانش به اندازه‌ای است که تأثیر نواقص هندسی در مقایسه با آن ناچیز است. در نسبت‌های D/R کمتر از 0.4 نتایج روش‌های SPLI و M-LBMI پایین‌تر از نتایج تجربی است ولی با افزایش قطر سوراخ این روش‌ها بار کمانش را بالاتر از نتایج تجربی پیش‌بینی می‌کنند. به علت تمرکز تنش و همراه بودن پدیده خرابی و شروع و رشد ناپایداری در اطراف سوراخ شرایط پیچیده‌ای در آن ناحیه ایجاد می‌شود که مقادیر کرنش‌ها در "شکل 10" نیز این مسئله را به خوبی نمایش می‌دهد. در مدل‌سازی‌های عددی انجام گرفته، خرابی اطراف لایه‌ها در نظر گرفته نشده است و با افزایش قطر سوراخ ناحیه اطراف سوراخ نیز بزرگتر شده و مسئله خرابی در اطراف سوراخ نیز اهمیت بیشتری نسبت به استوانه‌های با قطر سوراخ کمتر پیدا می‌کند و باعث انحراف نتایج غیرخطی عددی از نتایج تجربی می‌گردد. "شکل 25" شکل‌های استوانه در لحظه پس از کمانش را برای استوانه B80 و مدل‌سازی‌های عددی غیرخطی آن و در لحظه کمانش برای مدل‌سازی خطی را نمایش می‌دهد.

5- نتیجه‌گیری

بار کمانش با اعمال نواقص هندسی متفاوت به روش المان محدود برای استوانه‌های بدون سوراخ و سوراخ‌دار محاسبه شده است و برای سنجش میزان صحت روش‌ها آزمون‌های تجربی کمانش انجام گرفته است. به‌منظور

- [14] D. Bushnell, W. Bushnell, Minimum-weight design of a stiffened panel via PANDA2 and evaluation of the optimized panel via STAGS, *Computers and Structures*, Vol. 50, No. 4, pp. 569-602, 1994.
- [15] C. Hühne, R. Rolfes, J. Tessler, A new approach for robust design of composite cylindrical shells under axial compression, *Proceedings of the international ESA conference*, Noordwijk, Netherlands, June 5-7, 2005.
- [16] C. Hühne, R. Rolfes, E. Breitbach, J. Tessler, Robust design of composite cylindrical shells under axial compression — simulation and validation, *Thin-Walled Structures*, Vol. 46, pp. 947-962, 2008.
- [17] M. Esslinger, *Hochgeschwindigkeitsaufnahmen vom Beulvorgang dünnwandiger, axialbelasteter Zylinder*, Köln: Der Stahlbau, 1970.
- [18] S. G. P. Castro, M. A. Arbelo, R. Zimmermann, R. Degenhardt, Exploring the constancy of the global buckling load after a critical geometric imperfection level in thin-walled cylindrical shells for less conservative knock-down factors, *Thin-Walled Structures*, Vol. 72, pp. 76-87, 2013.
- [19] R. Degenhardt, A. Kling, A. Bethge, J. Orf, L. Karger, R. Zimmermann, et al, Investigations on imperfection sensitivity and deduction of improved knockdown factors for unstiffened CFRP cylindrical shells, *Composite Structure*, Vol. 92, No. 8, pp. 1939-1946, 2010.
- [20] S. G. P. Castro, et al, Geometric imperfections and lower-bound methods used to calculate knock-down factors for axially compressed composite cylindrical shells, *Thin-Walled Structures*, Vol. 74, pp. 118-132, 2014.
- [21] M. W. Hilburger, Jr. JH. Starnes, Effects of imperfections on the buckling response of compression-loaded composite shells, *International Journal of Non-Linear Mechanics*, Vol. 37, pp. 623-643, 2002.
- [22] C. H. Bisagni, Composite cylindrical shells under static and dynamic axial loading: An experimental campaign, *Aerospace Sciences*, Vol. 78, pp. 107-115, 2015.
- [23] F. A. Brogan, B. O. Almroth, Buckling of cylinders with cutouts, *Journal of American Institute of Aeronautics and Astronautics*, Vol. 8, No. 2, pp. 236-240, 1970.
- [24] R. C. Tennyson, The effects of unreinforced circular cutouts on the buckling of circular cylindrical shells, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 90, No. 4, pp. 541-546, 1968.
- [25] Jr. JH. Starnes, *The effect of a circular hole on the buckling of cylindrical shells*, Ph.D. Dissertation, California Institute of Technology, Pasadena, CA, 1970.
- [26] M. W. Hilburger, A. M. Waas, Jr. JH. Starnes, Response of composite shells with cut-outs to internal pressure and compression loads, *Journal of American Institute of Aeronautics and Astronautics*, Vol. 32, No. 2, pp. 232-237, 1999.
- [27] A. Tafreshi, Buckling and post-buckling analysis of composite cylindrical shell with cut-outs subjected to internal pressure and axial compression load, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 79, pp. 351-359, 2002.
- [28] A. C. Orifici, C. H. Bisagni, Perturbation-based imperfection analysis for composite cylindrical shells buckling in compression, *Composite Structures*, Vol. 106, pp. 520-528, 2013.
- [29] M. A. Arbelo, A. Herrmann, S. G. P. Castro, R. Khakimova, R. Zimmermann, R. Degenhardt, Investigation of Buckling Behavior of Composite Shell Structures with Cutouts, *Composite Materials*, Vol. 21, No. 6, pp. 623-636, 2014.
- [30] ASTM D-3171. Standard Test Methods for Constituent Content of Composite Materials.
- [31] ASTM D-3039, *Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*, 2008.
- [32] ASTM D7078/7078M-05, *Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Rail Shear Method*, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA., 2005.
- [33] Abaqus, D.S. User's manual, *Abaqus analysis user's manual*, 2012; <http://www.3ds.com/products-services/simulia>.

شده است که تطابق خوبی نیز با نتایج تجربی دارد.

در استوانه‌های با وجود سوراخ نتایج حل خطی در اولین مود کمناش محلی را پیش‌بینی می‌کند که به‌ازای قطرهای متفاوت سوراخ نتایجی محتاطانه نسبت به نتایج تجربی دارد. روش‌های M-LBMI و SPLI نتایجی بسیار نزدیک به یکدیگر ارائه می‌دهند و همواره به میزان کمتر از 10% بارهای کمناش را پایین‌تر از نتایج حل غیرخطی بدون اعمال نواقص هندسی پیش‌بینی می‌کنند. این نزدیکی نتایج در حالت‌های بدون و با اعمال نواقص هندسی نشان‌دهنده تاثیر کم نواقص هندسی در مقایسه با تاثیر وجود سوراخ بر روی کمناش است. در استوانه‌های با نسبت قطر سوراخ به شعاع استوانه کمتر از 0.4 نتایج روش‌های غیرخطی عددی تطابق مناسبی با نتایج تجربی دارند ولی با افزایش قطر سوراخ خرابی در اطراف سوراخ و تاثیرات آن بر روی ناپایداری افزایش می‌یابد و باعث می‌شود که نتایج عددی غیرخطی بالاتر از نتایج تجربی پیش‌بینی شوند.

6- مراجع

- [1] R. V. Southwell, On the general theory of elastic stability, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, Vol. 213, pp. 187-244, 1914.
- [2] L. H. Donnell, A new theory for the buckling of thin cylinders under axial compression and bending, *ASME Transactions*, Vol. 56, pp. 795-806, 1934.
- [3] W. Flügge, Die Stabilität der Kreiszyllinderschale, *Ingenieure Architektur*, Vol. 3, 1932.
- [4] W. T. Koiter, *A translation of the stability of elastic equilibrium*, Technische Hooze School at Delft, Department of Mechanics, Shipbuilding and Airplane Building, 1945.
- [5] L. H. Donnell, C. Wan, Effect of imperfections on buckling of thin cylinders and columns under axial compression, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 17, No. 1, 1950.
- [6] R. C. Tennyson, Buckling of laminated composite cylinders: a review, *Journal of composites*, Vol. 6, No. 1, pp. 17-24, 1975.
- [7] M. F. Card, The sensitivity of buckling of axially compressed fiber-reinforced cylindrical shells to small geometric imperfections, *NASA TMX-61*, 1969.
- [8] N. S. Khot, V. B. Venkayya, *Effect of fiber orientation on initial postbuckling behavior and imperfection sensitivity of composite cylindrical shells*, USAF, WPAFB Tech Report AFFDL-TR-70-125, 1970.
- [9] V. I. Weingarten, P. Seide, J. P. Peterson, NASA SP-8007—buckling of thin-walled circular cylinders, *NASA Space Vehicle Design Criteria—Structures*, 1965 (revised 1968).
- [10] J. N. Dickson, R. T. Cole, J. T. S. Wang, Design of stiffened composite panels in the postbuckling range, *Fibrous composites in structural design*, pp. 313-327, 1980.
- [11] J. N. Dickson, S. B. Biggers, *POSTOP: Postbuckled Open-Stiffener Optimum Panels — Theory and capability*, NASA CR-172259, 1984.
- [12] D. Bushnell, Theoretical basis of the PANDA computer program for preliminary design of stiffened panels under combined In-Plane loads, *Computers and Structures*, Vol. 22, No. 4, pp. 541-563, 1987.
- [13] D. Bushnell, PANDA2 — Program for minimum-weight design of stiffened, Composite locally buckled panels, *Computers and Structures*, Vol. 25, pp. 469-605, 1987.