ماهنامه علمى پژوهشى



mme.modares.ac.ir

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

فتحاله طاهری بهروز^{1*}، میلاد امیدی²، محمود مهرداد شکریه³

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 پستى 16846-13114، taheri@iust.ac.ir

اطلاعات مقاله

استوانههای جدارنازک به علت وجود نواقصی که به طور ناخواسته و البته اجتنابناپذیر در حین ساخت قطعه، جابجایی یا در هنگام نصب بهوجود	مقاله پژوهشی کامل
م آبد و با در طبعت مواد سازنده قطعه محمد دارد تحت بارهای فشاری محمری در باری کمتر از بار شکست بحرانی دجار کمانش می شمند.	دریافت: 12 دی 1394
می به دور با در سید او به سارد. در در در در می سازی مرزی در زای ساز با در سید بازی بازی ساز د. از مان از	پذيرش: 04 فروردين 1395
امروره برای طراحی استوادهای چدار نارک از گرارس IMASA 3E-0007 استفاده می سود که استخراج آن خاصل از ارمونهای کماس	ارائه در سایت: 23 تیر 1395
استواندهای فلزی است و برای استواندهای کامپوزیتی طراحی نشده گرچه در زمینه استواندهای کامپوزیتی نیز از آن استفاده میشود و علاوه بر	کلید واژگان:
آن نتایجی بسیار محتاطانه را پیش بینی می کند. روش های اعمال نواقص هندسی شامل روش اصلاح شده استفاده از شکل مودهای حاصل از حل	كمانش
خطی کمانش (M-LBMI) و اعمال بار تحریک کننده عرضی (SPLI) برای استوانههای بدون سوراخ و با سوراخ دایروی در این مقاله انجام	استوانەھاى كامپوزيتى
شده است. برای تایید نتایج عددی استوانههای کامپوزیتی جدار نازک با لایه چینی [23/90-/23+/90] ساخته شده و تحت بار فشاری محوری	نواقص هندسی
أزمون كمانش شدند. نتایج تجربی بهدست آمده دقت نتایج عددی را تایید میكنند. 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 Omidi, 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 ABSTRACT When a cylindrical shell subject to a compressive load, because of various imperfections happened Original Research Paper Received 02 January 2016 Accepted 23 March 2016 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 Available Online 13 July 2016 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 Keywords: (M-LBMI) and Single Perturbation Load Imperfections (SPLI) for composite cylindrical shell with and Buckling without cutout are investigated. In order to evaluate the numerical results composite cylinder with Composite cylindrical shell Geometric imperfections 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.

فشاری محوری بالاتری نسبت به سایر مقاطع هندسی دارد و همچنین به

1- مقدمه

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. Omidi, 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)



کی تھینیسی میندسی مکانیکمدرس

^{.}

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 عکس العمل بار محوری در تکیه گاه همراه است که به آن کمانش می گویند.

روابط تحليلي خطى اوليه در زمينه كمانش استوانههاي جدارنازك 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]، دانل [3]، كويتر [4] بسط داده شد. فرضيات فلوجه و دانل بهعلت اين كه كمانش را بهصورت رفته رفته و یکنواخت مدلسازی می کردند در ابتدا با شکست مواجه شد زیرا در واقع پدیده کمانش به صورت ناگهانی رخ می دهد. پس از آن دانل و ون [5] روابط دانل را که قبلا انجام شده بود بر پایه فرضیات کویتر 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. تئوری کویتر برای تحلیل کمانش در استوانههای کامپوزیتی دارای نواقص هندسی توسط کارد در سال 1969 [7] استفاده شده است. او از این تئوری 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/پوکسی، بورون/پوکسی و بورون/ألومینیوم 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 تئوری کویتر مودهای 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 می شد. به منظور کاهش اختلاف نتایج تئوری 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 1 واقعی کمانش به بار حاصل از نتایج تئوری (
ho) بهعنوان ضریب کاهش برحسب نسبت R/t ارائه می شود (شکل 1 [9]). این نمودار براساس آزمون های کمانش بر روی استوانه های فلزی به دست آمده است و به علت 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-³² که توسط باشنل [14-12]

شكل 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 روش های 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 می کردند. 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 جزیی بررسی کردهاند. همچنین تاثیر 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 تاثیر نواقص هندسی، بارگذاری و مواد را انجام داده است و متوجه شده است که نواقص هندسی بیشترین تاثیر 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 تاثیر 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 روش های 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/پوکسی با 3 لایه چینی et45/092]s, [±45/02]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.

¹ Knock-Down Factor (*KDF*) ² POSTOP

² POSTOP ³ PANDA-2

 $[\]rho = \mathbf{P} / \mathbf{P}_{cr}$ $0.5 - \frac{1}{0} + \frac{1}{100} + \frac$

هیلبرگر و همکارانش [26] کمانش 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. اوریفیثی 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 کمانش و بررسی میزان صحت نتایج نبوده است.

در این مقاله تحلیل کمانش 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 مودهای خطی کمانش به عنوان نواقص (M-LBMI³) و روش بار تحریک کننده عرضی (PLI⁴) و برای بررسی میزان صحت هر کدام از روشها آزمونهای کمانش انجام گرفته است. و نتایج با یکدیگر مقایسه شده و در مورد علل اختلاف نتایج بحث شده است.

2- آزمون تجربی کمانش

1-2- مشخصات هندسی نمونهها

براساس نیازهای این پژوهش 4 عدد استوانه مشابه بدون سوراخ با طول 700 mm، قطر mm 189 و ضخامت 2.2 mm و 3 عدد استوانه دارای سوراخ به ترتیب با قطر سوراخ mm 100 mm, 50, 80, 100 mm زمایف 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- تعيين خواص مكانيكي مواد

رزین مورد استفاده در ساخت این نمونهها رزین اپوکسی کد LY556 تولید شده توسط شرکت هانتسمان است. الیاف استفاده شده الیاف شیشه روینگ⁵ از نوع E با تکس 2400 است. نحوه ساخت استوانهها به روش پیچش الیاف و ASTM D3171 [30] 5 است. براساس استاندارد [30] ASTM D3171 بی با سوزاندن نمونهها کسر حجمی الیاف بین 55% تا 57% و زاویه پیچش

جدول 1 مشخصات هندسی نمونهها (ابعاد برحسب میلیمتر)

Table I Geo	able I Geometrical properties of samples (dimensions in mm)						
قطر سوراخ	طول استوانه	ضخامت متوسط	قطر داخلی	نام نمونه			
	700±2	2.1±0.1	378	A2		3	
	700±2	2.1±0.1	378	A3	بلون	لى مۇر 1	
	700±2	2.1±0.1	378	A4		10	
50±1	700±2	2.1±0.1	378	B50	з		
80±1	700±2	2.1±0.1	378	B80	ول.	يار	
100±1	700±2	2.1±0.1	378	B100	٠Ŋ		

¹ STructural Analysis of General Shells

² ABAQUS

³ Modified – Linear Buckling Modeshaped Imperfections
⁴ Single Perturbation Load Imperfections

5 Roving



Fig. 2 Geometrical properties and stacking sequence شكل 2 مشخصات هندسي و لايه چينې

 2 ± 22 درجه بهدست آمده است. برای استخراج خواص مکانیکی در راستای الیاف و عمود بر الیاف ابتدا صفحات mm 300×300 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 سنتام⁶، خواص مکانیکی در جهت الیاف، عمود بر الیاف و ضریب پواسون بدست آمده است. برای استخراج مدول برشی، صفحات [0/90] ساخته شده و نمونه های 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.

3-2- روش انجام آزمون كمانش

دستگاه مورد استفاده برای آزمایش استوانه بدون سوراخ، دستگاه زویک روئل ⁷ با ظرفیت بارگذاری tons 50 و دستگاه استفاده شده برای آزمایش استوانههای سوراخدار، دستگاه سنتام با ظرفیت بارگذاری tons 15 است. نتایج استخراج شده از دستگاههای استفاده شده برای آزمون کمانش نمودار بار برحسب کوتاه شدگی طول استوانه است. انجام آزمون کمانش به روش کنترل جابجایی و سرعت حرکت فک متحرک به منظور بارگذاری mm/s است. سرایط مرزی دو انتهای استوانه به صورت گیردار است. در استوانههای سوراخدار و بدون سوراخ به منظور کنترل یکنواخت بودن بارگذاری در دوطرف استوانه کرنش سنج 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، کرنش سنجهایی 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 کسرحجمی 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			
$\boldsymbol{\vartheta}_{xy}$	0.3	ضريب پواسون			
V_{f}	56%	كسر حجمي الياف			

⁶ SANTAM

7 Zwic Roell



Fig. 3 Location of strain gages cylinder, $\boldsymbol{A}.$ without cutout and $\boldsymbol{B}.$ with cutout

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

کرنش سنجها 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 می گیرد تا صفحهای که بر روی استوانه بارگذاری می کند قابلیت دوران و پوشش سطح را داشته باشد. "شکل 4" شماتیک کلی این فیکسچر را نمایش می دهد. بر روی سطوح ارگذاری فیکسچر شیارهایی ایجاد شده است که از هر انتها پوسته استوانه به اندازه 3mm درون آن می رود و به منظور جلوگیری از خرابی لبه های بارگذاری و انتقال بار به پوسته استوانه دو انتهای استوانه با نوارهایی به عرض 5cm ضخامت 1.5 mm دو انتهای استوانه و انتهای سرایط تقویت دو انتهای استوانه و قرارگیری لبه های بارگذاری درون فیکسچر را نمایش می دهد.

پس از انجام آمادهسازی نمونهها، نصب فیکسچرها بر روی دستگاه و نصب کرنشسجها 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





فیکسچر بر روی نمونه یک پیشبار بین 2 kN تا 3 kN بر روی نمونهها قرار داده می شود و دستگاه سپس شروع به ضبط نتایج می کند.

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 برحسب کوتاه شدگی طول استوانه در این سه نمونه را نمایش میدهد. در ابتدای بارگذاری به دلیل وجود اصطکاک در اجزاء فیکسچر و گریپ ها 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 کاملا ناگهانی و همراه با یک صدای شدید و بلند رخ می دهد، در هنگام کمانش بار به صورت ناگهانی کاهش می یابد به طور مثال در نمونه A3 بار از حدود kN او1 در لحظه کمانش به kN 9 در لحظه پس از کمانش کاهش می یابد. مطابق "شکل 6" ملاحظه می شود 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 نمونه های متفاوت از حدود kN تا 170 تا kN ما90 متفاوت است. جدول 3 بارهای کمانش در هر سه نمونه را نشان می دهد.

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



شکل 6 نتایج آزمون کمانش استوانههای بدون سوراخ

	, سوراخ	بدون	استوانه	های	نمونه	کمانش در	مقادیر بار	جدول 3
Table 3 Buckling lo	ad in c	vlin	ders w	ithou	if cut	out		

Tuble 5 Duckning load in cylinders without cutout					
کاهش طول در هنگام کمانش (mm)	بار کمانشی (kN)	شماره نمونه			
3.02	170.991	A2			
3.52	191.803	A3			
3.23	184.356	A4			
3.22	182.383	ميانگين			



Fig. 7 Cylinder after buckling

شکل 7 استوانه پس از کمانش

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

نحوه آمادهسازی آزمون استوانه های سوراخ دار و بدون سوراخ یکسان است، "شكل 9" نمودار بار برحسب جابجايي 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 كمانش يكسان است ولي با افزايش اندازه قطر سوراخ ميزان بار كمانش و کاهش طول در هنگام کمانش کاهش می یابد. مشابه استوانه های بدون سوراخ رفتار نمودار در ابتدا غیرخطی است و سپس تا لحظه کمانش بهصورت خطی ادامه می یابد. برخلاف استوانه های بدون سوراخ که تا لحظه کمانش هیچ آثاری از ناپایداری و اعوجاج در استوانه مشاهده نمی شود، در استوانههای سوراخدار در حین انجام آزمون پوسته استوانه در اطراف سوراخ بهطور مشهودی دچار اعوجاج می گردد و اطراف سوراخ در محل ساعتهای 3 و 9 به سمت بیرون شروع به حرکت میکند ولی رفتار نمودار بار-کوتاه شدگی 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 كرنش سنجها بررسي 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



جدول 4 مقادیر بار کمانش و کاهش طول تا لحظه کمانش در استوانههای سوراخدار Table 4 Buckling load and corresponded end shortening

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

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 می گردد به صورتی که بخشی از کرنش فشاری در آن ناحیه برداشته می شود ولی بار فشاری تا هنگام کمانش بر روی استوانه باقی می ماند.

رفتار کرنش سنجهای 6 و 7 نشان دهنده پیچیده بودن جاجاییها در اطراف سوراخ است به طوری که مشاهده می شود در ابتدا گرچه کرنش ها به صورت فشاری است ولی مقادیر آنها کمتر از کرنش سنج 4 می باشد که این پدیده تعامل کرنش های غشایی و خمشی (درون و برون صفحهای) در اطراف سوراخ را نمایش می دهد. گرچه در ابتدا مقادیر کرنش های 6 و 7 منفی است ولی در ادامه با ایجاد رفتار برون صفحهای در نقاط متناظر با آن ها مقادیر آن-ها مثبت می شود.

کرنش سنج 5 در نقطه متناظر با قرارگیری کرنش سنج 6 و در راستای محیطی نصب شده است و همواره مقادیر کرنش منفی را نمایش می دهد که نمایش دهنده حرکت رو به داخل پوسته استوانه در محل ساعت 12 است. کرنش سنج 8 در نقطه متناظر با قرارگیری کرنش سنج 7 و در راستای محیطی نصب شده است و همواره مقادیر کرنش مثبت را نمایش می دهد که نمایش دهنده حرکت رو به بیرون پوسته استوانه در محل ساعت 3 است. نرخ بالای کرنش در کرنش سنج طولی 7 و حرکت برون صفحه ای آن ناحیه به سمت بیرون استوانه می تواند 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 بهصورت 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 مش ها در تعداد 56 المان در راستای طولی و 92 المان در راستای محیطی همگرا شده است. برای استوانههای با وجود سورخ علاوه بر همگرایی کلی مش در سرتاسر سازه باید همگرایی مش ها در اطراف سوراخ نیز بررسی شود. در با ضلع mm 200 به مرکزیت سوراخ، در تعداد 30 المان در راستای محیطی با ضلع mm 200 به مرکزیت سوراخ، در تعداد 30 المان در راستای محیطی استوانه با سوراخی به قطر mm 50 پس از جداسازی یک مربع از کل استوانه با ضلع mm 200 به مرکزیت سوراخ، در تعداد 30 المان در راستای محیطی با سرتان موراخ 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.



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



Fig. 11 B80 cylinder **A.** Before buckling **B.** After buckling **شكل 11** استوانه B80 الف. قبل از كمانش ب. پس از كمانش



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] ABQAQUS - 6.12 [33] است. در این مقاله دو نوع روش حل استفاده شده است. برای حل عددی به اروش خطی کمانش از روش حل مسئله مقدار ویژه استفاده میشود که میتواند مقادیر بارهای کمانش و شکل مودهای 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. مناز با روی تمامی نودهای متناظر با هر کدام را ویژا بار -جابجایی در حین بارگذاری از حل غیرخطی استاندارد ضمنی استفاده میشود. مناز بار -جابجایی در حین بارگذاری از حل غیرخطی استاندارد ضمنی استفاده میشود. در آزمون تجربی، بر روی تمامی نودهای سطح بارگذاری اعمال میشود. در مسائلی مانند کمانش که سطح انرژی کرنشی در لحظه اعمال میشود. در مسائلی مانند کمانش که سطح انرژی کرنشی در حظه با براید فیرمحتاطانه با بررسی همگرایی نتایج با باید فاکتور دمپینگ را تنظیم کرد، در این مسئله با بررسی همگرایی نتایج با باید فاکتور دمپینگ را تنظیم کرد، در این مسئله با بررسی همگرایی نتایج با باید فاکتور دمپینگ را تنظیم کرد، در این مسئله با بررسی همگرایی نتایج با باید فاکتور دمپینگ را

تغییر فاکتور دمپینگ، مقدار 7-16 افت ناگهانی عکسالعمل بار را در حل به خوبی نمایش میدهد. انتخاب نامناسب فاکتور دمپینگ باعث میشود که در هنگام کمانش عکسالعمل بار به صورت یکنواخت افت پیدا کند. در این مقاله حلهای خطی کمانش و روشهای اعمال نواقص هندسی به روش اعمال بار انحرافی و روش اصلاح شده استفاده از شکلمودهای کمانش خطی به عنوان نواقص که توسط نویسنده اصلاح شده است در دوحالت استوانههای سوراخدار و بدون سوراخ ارائه می گردد.

1-3- حل عددی برای استوانههای بدون سوراخ

حل خطی عددی در پوستههای استوانهای تبدیل به یک مسئله مقدار ویژه می شود که مقادیر ویژه آن بارهای کمانش و بردارهای ویژه متناظر با آنها شکل مودهای کمانش را نمایش می دهد. در استوانه های 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 شکلمودهای کمانش در لحظه كمانش بر روى استوانه ظاهر مى گردد مى توان آن ها را با يك ضريبى از اندازه ضخامت بر روی پوسته ایدهآل استوانه قرار داد. تغییرات شکل مود به صورت نامنظم بارکمانش را در یک محدود با اختلاف کم ثابت نگه میدارد همچنین رفتار سفتی استوانه قبل از کمانش را تغییری نمیدهد ولی افزایش اندازه نواقص باعث کاهش هم در رفتار سفتی قبل از کمانش و هم بار کمانشی میشود. به علت این که شکل نواقص در استوانه به صورت کاملا اتفاقی است و در نتیجه بارهای بهدست آمده از شکل مودهای متفاوت نتایج متفاوت ولی نزدیک به یکدیگری را پیش بینی می نماید از بین انواع شکل مودهای متفاوت، شکل مودی که بار کمانشی متناظر با آن بیشترین احتمال به وقوع پیوستن در تابع چگالی نرمال احتمال را دارد بهعنوان شکل نواقص برای اعمال بر روی استوانه انتخاب می شود. همچنین برای انتخاب اندازه نواقص با توجه به "شكل 13" در اندازه نواقص بيشتر از 0.2 برابر ضخامت افت محسوس عكس العمل بار در لحظه پس از كمانش مشاهده نمى شود 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 اين بازه يعنى 0.18 برابر ضخامت بهعنوان اندازه نواقص استفاده مىشود.

"شکل 14" 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 مودهای متفاوت نمایش میدهد. شکل مود انتخاب شده بهعنوان الگوی اعمال نواقص هندسی بر روی استوانه شکل مودی است که بار کمانش متناظر با آن نزدیکترین عدد به مقدار میانگین



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 شکل مودهای 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 [17,16] 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. 15 Probability density function for buckling load شکل 15 توزیع نرمال احتمال بارهای کمانش

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 می می مود. روش LBMI نیز در گذشته بر مبنای همگرایی نتایج بوده است و همان گونه که در "شکل 15" مشهود است نتایج محتاطانهای را پیش بینی می کند ولی با اصلاح این روش [34] مشخص شده است که انتخاب بار کمانش در روش LBMI بدین صورت مناسب نمی باشد و اندازه نواقص باید در محدوده کمتر از 0.2 برابر ضخامت باشد که برای یک انتخاب محتاطانه اندازه 8.10 برابر ضخامت انتخاب 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" شکلمودهای کمانش و بارکمانش متناظر با آنها را در استوانه سوراخدار با قطر سوراخ mm 50 نمایش میدهد. حل خطی کمانش استوانههای سوراخدار بارهای کمانش پایین را متناظر با شکلمودهایی نمایش میدهد که پوسته استوانه را در اطراف سوراخ دچار اعوجاج کردهاند و بارهای کمانشی متناظر با شکل مودهایی 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 می کند و بنابراین خود سوراخ بهعنوان یک نقص در بدنه استوانه عمل کرده و باعث شروع کمانش می شود.

برای استفاده از روش اعمال نواقص هندسی به شکل مودهای خطی باید این فرضیه را درنظر گرفت که نواقص هندسی در سرتاسر استوانه وجود دارد و همان گونه 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 شکلمودهایی استفاده کرد که



Fig. 16 Comparison M-LBMI and SPLI methods شكل 16 مقايسه روش هاى M-LBMI و SPLI

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





شكل 17 سى شكل مود اول كمانش خطى استوانه سوراخدار با قطر سوراخ mm 50 mm

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 مودهای 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 MX 108.34 و با الگوی نواقص هندسی مشابه شکل مود 30 می باشد.



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

شکل 18 بارکمانش در نواقص به شکل مودهای 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 mm 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 mm 50 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 را نمایش میدهد. در هر دو حالت محل اعمال بار انحرافی، نتایج در قسمت درصد برای حالتی که بار انحرافی در لبه سوراخ باشد، کمتر از روش بدون اعمال نواقص هندسی است که این پدیده نشاندهنده تاثیر ناچیز بار انحرافی بر روی بار کمانش در استوانه با وجود سوراخ است. مقدار بار کمانش در حالت بدون اعمال نواقص هندسی Radi k این پدیده نشاندهنده تاثیر ناچیز بار انحرافی بدون اعمال نواقص هندسی SPLI معرفی دور از سوراخ باشد در حالت بدون اعمال نواقص هندسی SPLI این پدیده نشاندهنده تاثیر ناچیز بار انحرافی پیش بینی بار کمانش به روش SPLI است و برای احتیاط بیشتر در سوراخ در نظر گرفته میشود که مقدار آن Asc ای 2 از ۲/2 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 mm 50, 80 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

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 می گردد و در این قسمت فقط نتایج آنها ارائه می گردد.

"شکل 21" نمودار بار برحسب کوتاه شدگی دو سر استوانه در روش های 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 كمانش به روش خطى و روش NASA SP-8007 نيز 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 می کند و همچنین نتایج NASA SP-8007 و دو روش غیر خطی اعمال بار انحرافی (SPLI) و استفاده از مودهای خطی کمانش (M-LBMI) به عنوان نواقص ظرفیت بار کمانش را پایین در از بار کمانشی بهدست آمده در آزمون ییش بینی، می کنند. اما نتایج NASA SP-8007 در مقایسه با دو روش غیرخطی اعمال بار انحرافی و استفاده از مودهای خطی کمانش بهعنوان نواقص بسیار محتاطانه تر 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 غيرخطى با اعمال نواقص هندسي است. "شكل 22" استوانه يس از كمانش 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 mm 50 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 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 cuout in different method

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

انحراف از نتایج آزمایش (%)	نسبت بار کمانش به بار کمانش در حل خطی (<i>KDF</i>)	بار کمانش (kN)	روش
13	1	207.32	حل خطی
	0.88	182.38	ميانگين نتايج آزمايش
-0.4	0.87	181.57	حل غیرخطی (بار انحرافی)
-2.7	0.85	177.4	حل غیرخطی (اصلاح شدہ
		1//.4	نواقص با شکل مود خطی)
-31	0.6	124.39	NASA SP-8007



(ج) (ب) (لافت) Fig. 22 Cylinder atter 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 می کند 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 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 21 نمودار بار برحسب کوتاه شدگی دو سر استوانه بدون سوراخ به ازای روشهای متفاوت

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

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

یار کمانش	انحراف نسبت به	
kN	نتيجه آزمايش	روش
	(%)	

نتايج تجربى		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 شدہ 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 mm 50 است و برای بررسی پارامتر تاثیر 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% پایین تر از نتایج روش غيرخطى بدون اعمال نواقص هندسي است كه اين پديده نمايش دهنده تاثير کم نواقص هندسی بر روی بار کمانش در استوانههای بدون سوراخ است، به بیانی دیگر میتوان نتیجه گرفت که تاثیر وجود سوراخ بر روی کمانش به اندازهای است که تاثیر نواقص هندسی در مقایسه با آن ناچیز است. در نسبتهای D/R کمتر از 0.4 نتایج روشهای SPLI و M-LBMI پایینتر از نتايج تجربي است ولى با افزايش قطر سوراخ اين روشها بار كمانش 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 می شود که مقادیر کرنش ها 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 استوانه های با قطر سوراخ کمتر پیدا می کند و باعث انحراف نتایج غیرخطی عددی از نتایج تجربی می گردد. "شکل 25" شکل های استوانه در لحظه پس از کمانش را برای استوانه B80 و مدلسازیهای عددی غیرخطی آن و در لحظه كمانش براى مدلسازى خطى را نمايش مىدهد.

5- نتيجەگىرى

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



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

 شكل 25 استوانه پس از كمانش، الف. آزمون تجربى نمونه B80 ب. مدل غيرخطى

 به روش M-LBMI ج. مدل غيرخطى به روش SPLI د. شكل مود مدل خطى

 كمانش محلى

بررسی یکنواخت بودن بار فشاری محوری اعمال شده در سطح بارگذاری از کرنش سنج هایی در نزدیکی محل بارگذاری استفاده شده است و بیشترین اختلاف کرنش ها در دورتادور استوانه در راستای محوری حدود 3% بوده است که نشان دهنده یکنواختی بارگذاری است. برای بررسی رفتار اطراف سوراخ در استوانه های سوراخ دار از کرنش سنج هایی در اطراف سوراخ استفاده شده است که تغییر علامت کرنش های محوری از منفی به مثبت در اطراف سوراخ نشان دهنده رفتار خارج از صفحه قبل از کمانش و کرنش های محیطی نشان دهنده فرورفتگی یا بیرون زدگی پوسته در اطراف سوراخ را نمایش می دهند.

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 منجربه 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

- [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. Tessmer, A new approach for robust design of composite cylindrical shells under axial compression, *Proceedings of the international ESA conference*, Nordwijk, Netherlands, June 5-7, 2005.
- [16] C. Hühne, R. Rolfes, E. Breitbach, J. Tessmer, 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 dunnwandiger, axialbelasteter Zylinder, Koln: 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 کمانش محلی را پیش بینی می کند که بهازای قطرهای متفاوت سوراخ نتایجی محتاطانه نسبت به نتایج تجربی دارد. روشهای M-LBMI و SPLI نتایجی بسیار نزدیک به یکدیگر ارائه می دهند و همواره به میزان کمتر از 10% بارهای کمانش را پایین تر از نتایج حل غیرخطی بدون اعمال نواقص هندسی پیش بینی می کنند. این نزدیکی نتایج در حالتهای بدون و با اعمال نواقص هندسی نشان دهنده تاثیر کم نواقص هندسی در مقایسه با تاثیر وجود سوراخ بر روی کمانش است. در استوانههای با نسبت قطر سوراخ به شعاع استوانه کمتر از 4.0 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 می یابد و باعث می شود که نتایج عددی غیرخطی بالاتر از نتایج تجربی پیش بینی شوند.

6- مراجع

- 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 Kreiszylinderschale, *Ingenieure Architektur*, Vol. 3, 1932.
- [4] W. T. Koiter, A translation of the stability of elastic equilibrium, Technische Hooge 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. P. Card, The sensitivity of buckling of axially compressed fiberreinforced 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 thinwalled 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.