

## تحلیل کماتش پوسته استوانه‌ای شیاردار تحت بار محوری

امین رحمت نژاد<sup>۱</sup>، سید محمد مهدی نجفی زاده<sup>۲</sup>، حمید محسنی منفرد<sup>۳</sup>

\* نویسنده مسئول: m.najafizadeh2009@gmail.com

### چکیده

### واژه‌های کلیدی

کمانش، پوسته استوانه‌ای، شیار مارپیچ،  
بار بحرانی

در این مقاله کمانش پوسته‌های استوانه‌ای شیار دار تحت بار محوری به روش تئوری و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. پوسته‌ها از جنس فولاد با استاندارد (USA/API – X42 5L) در نظر گرفته شده‌اند که یکی از پر کاربردترین مواد استفاده شده در صنایع گاز، نفت و پتروشیمی می‌باشند. اثر شیار مارپیچ بر روی پوسته استوانه‌ای مورد تحلیل قرار گرفته است و در ادامه نتایج به دست آمده از نرم افزار Abaqus با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردیده‌اند. جوابهای تئوری و آزمایشگاهی تطابق مناسبی را نشان می‌دهند. لذا می‌توان از نتایج عددی مشروط به مدل سازی و تحلیل صحیح به خوبی استفاده کرد. همچنین مشخص شد که تعداد شیار بر روی بار بحرانی کمانش نقش مهمی دارد به طوری که با افزایش شیار بار بحرانی کمانش کاهش پیدا می‌کند.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک

۲- دانشیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک

۳- دانشیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک

## ۱ - مقدمه

پوسته های استوانه ای به صورت رایج در صنایع مختلف از جمله صنایع هوا و فضا، سازه های دریایی، خودرو سازی، سدهای بزرگ، سقف ها پوسته‌ای، خطوط لوله کشی کاربرد دارند. این سازه ها در طول عمر خود تحت انواع نیروها قرار می گیرند و به دلیل داشتن ناپیوستگی های هندسی شامل حفره، شیار و... به صورت فزاینده ای مستعد داشتن تنش، کمانش و ناپایداری در سازه هستند.

بررسی اثرات این ناپیوستگی ها روی ظرفیت باربری یکی از شرایط ضروری در طراحی این سازه ها هستند.

تغییر شکل پوسته های استوانه ای که تحت بار محوری هستند نیز مورد بررسی بسیاری از محققان در دهه های اخیر بوده است.

میرزاوند و اسلامی [۱] به بررسی کمانش حرارتی پوسته های استوانه ای ناقص تابعی مدرج براساس مدل وان-دانل پرداختند.

هیوشن<sup>۱</sup> و نودا [۲] به بررسی تحلیل پس کمانش برای پوسته های استوانه ای تابعی مدرج تغییر شکل یافته ناقص تحت ترکیب بارگذاری محوری و شعاعی و حرارت محیطی پرداختند.

گاین<sup>۲</sup> و داوهی [۳] به بررسی تحلیل کمانش خطی غیرمعمول پوسته های استوانه ای نازک تابعی مدرج سخت شده بابرگذاری فشاری محوری و بارگذاری فشاری پیچشی پرداختند.

درویزه<sup>۳</sup> و همکاران [۴] به بررسی تحلیل کمانش حرارتی پوسته های استوانه ای کامپوزیتی نسبتا ضخیم تحت بارحرارتی متقارن محوری پرداختند. در این پژوهش روش

نیمه تحلیلی المان محدود برای مطالعه رفتار کمانش حرارتی پوسته های نسبتا ضخیم ارائه شده است.

شریعتی و همکاران [۵] به بررسی تاثیر کمانش برمنحنی های هیستریزس پوسته های استوانه ای پرداختند و رفتار کمانشی پوسته ها تحت بارگذاری های بارکنترلی و جابجایی کنترلی بررسی کرده اند. پوسته ها تحت بارگذاری بار کنترلی متقارن محوری پس از چند چرخه به کمانش می رسند و تحت تاثیر این کمانش کرنش پلاستیک باقیمانده در ناحیه فشاری هیستریزس با سرعت بیشتری انباشت می شود.

در سال ۱۳۸۶ شریعتی و یاقوتیان [۶] به بررسی کمانش استاتیکی پوسته های استوانه ای پیزو الکتریک برپایه تئوری مرتبه بالا پرداختند.

حسینی و همکاران [۷] به بررسی تحلیل کمانش پیچشی میل گردان کامپوزیتی خودرو براساس تئوری مرتبه بالا با در نظرگرفتن تغییرشکل اولیه پرداختند. با استفاده از روش اجزای محدود به تحلیل عددی مسئله پایداری میل گردانهای کامپوزیتی خودرو تحت بار پیچشی پرداخته می شود.

براش<sup>۴</sup> و آلمرس [۸] بار کمانش پوسته های استوانه ای تحت بار فشاری یکنواخت را با استفاده از رابطه زیر (۱)

$$N_{crit} = \frac{E}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \frac{t^2}{r} \quad (1)$$

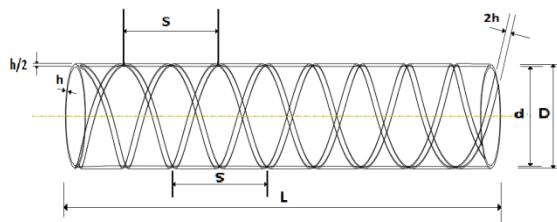
پیش بینی کردند. آنها رابطه (۱) را فقط برای پوسته هایی که از مواد الاستیک و ایزوتروپیک ساخته شده باشند بیان کردند. همچنین این معادله برای صفحات بدون حفره و در محدوده  $\frac{L}{R} \leq 5$  قابل قبول بوده که یک قید مهم برای محاسبات آزمایشگاهی است. مقدار نیروی کمانشی که برای صفحات استوانه ای جدار ضخیم  $\frac{L}{R} > 5$  از معادله (۱) به دست می آید، بسیار بالاتر از مقدار آزمایشگاهی نیروی کمانشی می باشد. در معادله (۱) L معرف طول و R شعاع پوسته هستند.

<sup>1</sup> - Hui-ShenShen

<sup>2</sup> - Nguyen Thi Phuong

<sup>3</sup> - Darvizeh M

<sup>4</sup> - Brush D.O

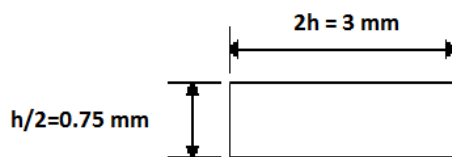


شکل (۱-ب) پوسته استوانه ای با دو شیار



شکل (۲) شمای کلی از پوسته ها

در شکل (۳) سطح مقطع شیار های ایجاد شده بر روی پوسته قابل مشاهده است. سطح مقطع شیارها یک مستطیل به طول ۳ میلیمتر و عرض ۰/۷۵ میلیمتر می باشد.



شکل (۳) سطح مقطع شیار

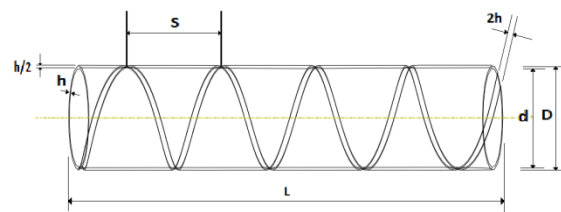
### ۳ - خواص مکانیکی پوسته فولادی

پوسته استوانه ای مورد مطالعه ابتدا توسط آزمایش کوانتومتری مورد بررسی قرار گرفته است این آزمایش در محدوده الزامات ISO/IEC 17025 و استاندارد مرجع ASTM E415-08 است. سپس پوسته استوانه ای، تعیین استاندارد شد.

معادله (۱) تنها برای صفحات با مواد الاستیک و ایزوتروپیک کاربرد دارد. در این تحقیق رفتار کمانشی پوسته های استوانه ای از جنس فولاد X42 5L مورد بررسی قرار گرفته است. سپس به بررسی و تحلیل اثر شیار های مارپیچ با طول گام یکسان بر روی این پوسته ها پرداخته شده است. چندین پوسته با جرم یکسان طراحی و در نهایت به کمک نرم افزار Abaqus و دستگاه سرو هیدرولیک GOTECH-AL7000LA20 به صورت تئوری و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته اند. در ادامه نتایج تئوری و آزمایشگاهی با هم مقایسه شده اند.

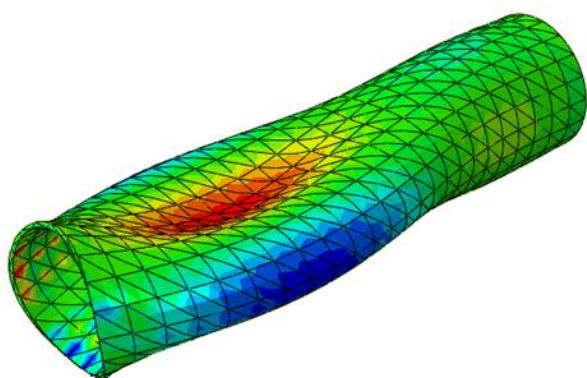
### ۲ - هندسه نمونه ها

در این تحقیق پوسته های استوانه ای با دو هندسه متفاوت، پوسته های بدون شیار و پوسته های شیاردار با ضخامت یکسان ۱,۵ میلیمتر طراحی شده اند. در شکل (۱-الف) هندسه نمونه شیار دار با یک شیار مارپیچ و در شکل (۱-ب) هندسه نمونه با دو شیار مارپیچ نشان داده شده است. در کلیه نمونه ها طول، ضخامت، قطر داخلی و قطر خارجی یکسان می باشد. پارامترهای  $D$  قطر بزرگ،  $d$  قطر کوچک،  $h$  ضخامت،  $S$  گام شیار و  $L$  طول قطعه هستند. مقادیر فوق در استوانه بدون شیار  $D55.5-d52.5-L220-h1.5$  و در استوانه تک شیار و دو شیار  $D55.5-d52.5-L220-S50-h1.5$  میلیمتر می باشند. در شکل (۲) پوسته های استوانه ای ایجاد شده در هر سه نوع هندسه آورده شده است.



شکل (۱-الف) پوسته استوانه ای با یک شیار

نتایج بدست آمده از تحلیل نرم افزار در شکل‌های (۴ و ۵ و ۶)، جدول (۴) و نمودار (۱) آمده‌اند. که این نتایج نشان می‌دهند که با افزایش تعداد شیار بار بحرانی کمانش کاهش پیدا می‌کند. در تمامی نمونه‌ها ابتدا تعداد مُد مورد بررسی را مشخص کرده تا بتوانیم در نتایج نرم‌افزار کوچکترین مقدار ویژه را به عنوان بار بحرانی در نظر بگیریم. در غیر اینصورت نرم‌افزار خود مُد ویژه را معین می‌کند که عدد دقیقی است. تحلیل عددی کمانش پوسته‌ها در نرم‌افزار از دویخس تشکیل شده است بخش اول تحلیل کمانش و بخش دوم تحلیل استحکام نهایی می‌باشد برای تحلیل کمانش از Abaqus/Standard و برای تحلیل استحکام نهایی از Abaqus/Explicit استفاده می‌شود اصولاً بخش دوم یعنی تحلیل استحکام نهایی زمانی استفاده می‌شود که پوسته استوانه‌ای مرجع<sup>۱</sup> موجود نیست. در این مقاله از بخش اول استفاده شده است.



EigenValue = 6.95538E+09

شکل (۴) بار بحرانی پوسته استوانه‌ای بدون یک شیار

در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) بار بحرانی برای پوسته استوانه‌ای با یک شیار و دو شیار بیان شده است.

کلیه آزمایش‌های تجربی بر روی پوسته استوانه‌ای مورد بررسی که در این تحقیق در محدوده استاندارد – USA/API X42 5L قرار دارد انجام شدند. نتایج حاصل از آزمایش‌ها در جداول (۱) و (۲) آورده شده است.

جدول (۱) ترکیب خواص شیمیایی

C	Mn	P	S
۰/۲۸	۱/۲۵	۰/۰۳	۰/۰۳

جدول (۲) خواص مکانیکی

Elasticity modulus (Gpa)	Poisson's ratio	Yield stress (Mpa)	Ultimate strength (Mpa)
۲۰۷	۰/۳	۳۰۱/۷۲۵	۴۲۱/۶۳۶

جدول (۳) نام گذاری نمونه‌ها

نام نمونه	تعداد شیار
L-S-0	۰
L-S-1	۱
L-S-2	۲

#### ۴- شرایط مرزی

در این تحقیق شرایط تکیه گاهی ساده برای نمونه‌ها در نظر گرفته شده است. همچنین همه درجات آزادی لبه پایینی مقید شده و لبه بالایی نیز در همه جهات مقید گشته ولی در جهت محور اعمال نیرو بدون قید است تا بتواند در این جهت حرکت کند.

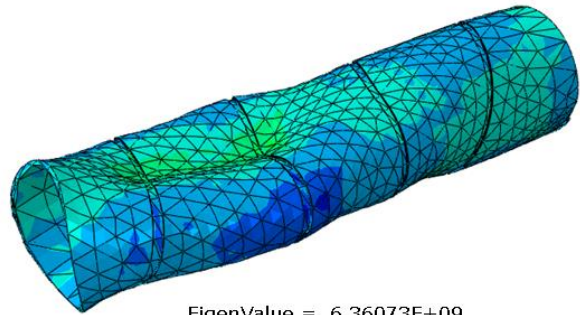
#### ۵- نتایج عددی

نتایج بدست آمده برای پوسته استوانه‌ای شیاردار در ادامه آمده است و اثر شیارهای مارپیچ بر بار بحرانی کمانش در نمودارها ترسیم و مقایسه شده‌اند. تحلیل‌های اجزاء محدود برای ورق مورد نظر با استفاده از نرم‌افزار Abaqus انجام گرفته است برای تحلیل پوسته استوانه‌ای مورد نظر در نرم‌افزار آباکوس از المان C3D10 که یک المان مرتبه دو غیر خطی با ده گره می‌باشد استفاده شده است.

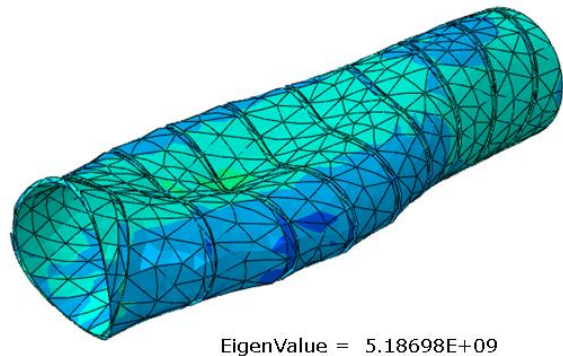
<sup>1</sup>- Reference

۶- نتایج تجربی

با توجه به هندسه طراحی شده جنس نمونه ها یکسان و از جنس X42 5L می باشد، به کمک دستگاه سرو هیدرولیک GOTECH – AL7000 LA 20 شکل (۷) نمونه ها به صورت تجربی مورد آزمایش قرار می گیرند. تمام نمونه ها بین دو فک دستگاه قرار گرفته و با سرعت ثابت پنج میلیمتر بر دقیقه تحت فشار قرار می گیرند. این سرعت برای همه نمونه ها ثابت است. فک بالا متحرک و فک پایین در همه آزمایشات ثابت است. نتایج تجربی بدست آمده از آزمایشها نشان دهنده ی کاهش بار بحرانی کماتش پوسته استوانه ای در اثر افزایش تعداد شیار می باشد این نتایج در نمودارهای (۲ و ۳ و ۴) آورده شده اند.



شکل (۵) بار بحرانی پوسته استوانه ای با یک شیار



شکل (۶) بار بحرانی پوسته استوانه ای با دو شیار

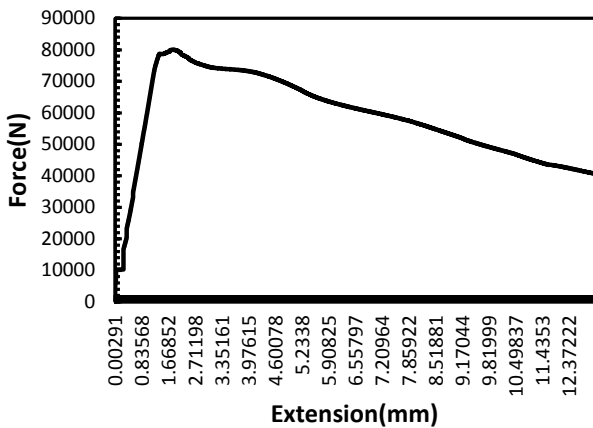
جدول (۴) نتایج عددی Abaqus

نام نمونه	Eigen Value	P critical(N)
L-S-0	6.95538E+9	76717.35255
L-S-1	6.36073E+9	70158.40483
L-S-2	5.18698E+9	57212.0484

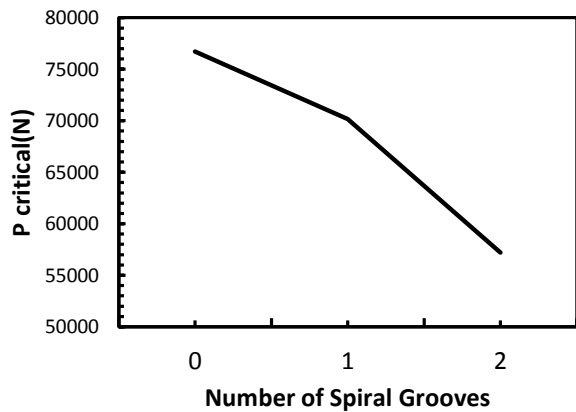


شکل (۷) یک دستگاه GOTECH – AL7000 در حال بار گذاری روی

پوسته استوانه ای با یک شیار مارپیچ

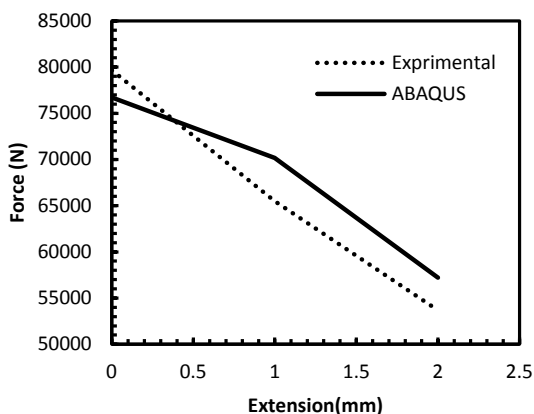


نمودار (۲) بار کماتش پوسته استوانه ای بدون شیار

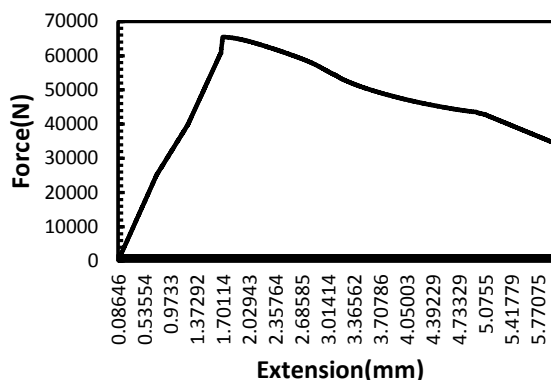


نمودار (۱) بار بحرانی بدست آمده از نرم افزار آباکوس

از شکل (۱) در می یابیم که بار بحرانی با افزایش تعداد شیار بر روی پوسته نسبت به پوسته استوانه ای بدون شیار افت می کند.



نمودار (۵) مقایسه نتایج آزمایشگاهی و نرم افزاری

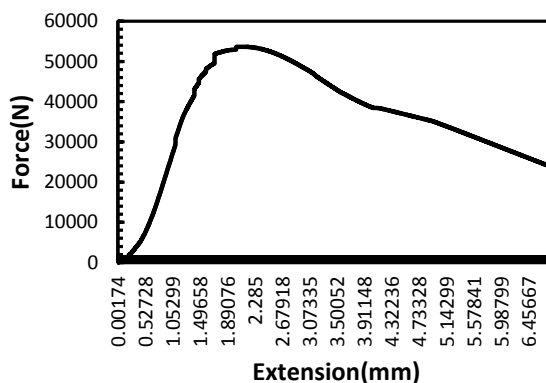


نمودار (۳) بار کمانش پوسته استوانه‌ای با یک شیار

### ۸- نتیجه گیری

در این تحقیق با انجام مطالعات عددی و تجربی بر روی کمانش پوسته استوانه‌ای شیاردار با توجه به نمودارهای بدست آمده، می‌توان نتایج زیر را استخراج کرد:

۱- نتایج عددی با نتایج تجربی نزدیکی نسبتاً خوبی با هم دارند لذا می‌توان از نتایج عددی مشروط به مدل سازی و تحلیل صحیح به خوبی استفاده کرد.



نمودار (۴) کمانش پوسته استوانه‌ای با دو شیار

۲- تعداد شیار بر روی بار بحرانی کمانش نقش مهمی دارد به طوری که با افزایش شیار بار بحرانی کمانش کاهش پیدا می‌کند.

### ۷- مقایسه‌ی نتایج تجربی و عددی:

در این بخش به منظور بررسی صحت و دقت تحلیل‌های عددی انجام شده، نتایج عددی و تجربی برای نمونه‌های مختلف در نمودارهای (۱، ۲، ۳ و ۴) با یکدیگر مقایسه شده‌اند. به طور کلی از عوامل اختلاف بین نتایج عددی و تجربی می‌توان به وجود عیب و نقص درون ماده، خطا در برش پوسته‌ها، شیارها و... اشاره کرد. نمودار (۵) نشان می‌دهد که نتایج عددی و تجربی از نظر بار - جابه‌جایی و تغییر شکل مطابقت خوبی داشته که بیانگر دقت تحلیل‌های عددی می‌باشد.

### ۹- فهرست علائم

$\nu$	ضریب پواسون
$E$	مدول الاستیسیته
$L$	طول پوسته استوانه‌ای
$a$	شعاع پوسته استوانه‌ای
$h$	ضخامت پوسته استوانه‌ای
$d$	قطر داخلی
$D$	قطر خارجی
$S$	طول گام
$N_{cr}$	بار بحرانی

## مراجع

- [1] Mirzavand B.E., Slami M.R., 2013, Thermal buckling of imperfect functionally graded cylindrical shells based on the wan-donnell model, *Thermal Stresses Journal*, Vol. 29, 2006, pp.37-55.
- [2] Hui-ShenShen, Noda N., Postbuckling of FGM cylindrical shells under combined axial and radial mechanical loads in thermal environments, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 42, 2005, pp. 4641-4662.
- [3] Nguyen Thi.P., Dao Huy B., Buckling analysis of eccentrically stiffened functionally graded circular cylindrical thin shells under mechanical load, *VNU Journal of Mathematics, Physics*, Vol. 29, No. 2, 2013, pp. 55-72.
- [4] Darvizeh M., Darvizeh A., Shaterzadeh A.R., Ansari R., Thermal Buckling Analysis of Moderately Thick Composite Cylindrical Shells under Axisymmetric Thermal Loading., *Journal of Mechanics & Aerospace Engineering*, Vol. 3, No. 2, 2007, pp.99-107.
- [۵] شریعتی م.، حاتمی ح.، ایکیچی ح.، تاثیر کماتش بر رفتار منحنی های هیستریزیس پوسته های استوانه ای، دوازدهمین کنفرانس انجمن هوافضای ایران، تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۹۱.
- [۶] شریعتی م.، یاقوتیان.، کماتش استاتیکی پوسته های استوانه ای پیزوالکتریک بر پایه نظریه مرتبه بالاتر، فصل نامه علمی و پژوهشی شریف، ۱۳۸۶، شماره چهارم، ص ۹۳-۱۰۰.
- [۷] حسینی م.، شریعتی م.، تحلیل کماتشی پیچشی میل گاردان کامپوزیتی خودروبر اساس تئوری مرتبه بالا با در نظر گرفتن تغییر شکل اولیه، مجله پژوهش و کاربرد در مکانیک، سال اول، شماره اول، بهار ۱۳۸۸، ص ۳۹-۴۴.
- [8] Brush D.O, Almorth B.O., Buckling of Bars, Plate and Shells, McGraw-Hill, 1975, pp. 142-190.