

## بررسی عملکرد کمانش پوسته های استوانه ای متخلخل تحت بار متمرکز

محمد جواد خوش گفتار<sup>1</sup>، معصومه عزیزی<sup>2\*</sup>

1- استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه اراک، m-khoshgoftar@araku.ac.ir

2- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک، دانشگاه اراک، masoomehazizi77@gmail.com

### چکیده

پوسته‌های استوانه‌ای در بسیاری از کاربردهای مهندسی مانند مخازن تحت فشار، مخازن ذخیره، سازه‌های دریایی و موشک‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. تجربه نشان داده است که عملکرد این سازه‌های پوسته‌ای در صنعت نشانگر آسیب‌پذیری این سازه‌ها در برابر انواع بارگذاری‌ها می‌باشد، این در حالی است که این آسیب‌دیدگی موجب ایجاد خسارات مستقیم و غیرمستقیم می‌گردد. در این مقاله اثر کمانش پوسته‌های استوانه‌ای متخلخل تحت بار متمرکز به کمک نرم‌افزار المان محدود آباکوس (ABAQUS) مورد بررسی قرار گرفته است. تأثیر پارامترهای هندسی نظیر طول استوانه و تعداد تخلخل بر روی بار بحرانی کمانش در این پوسته‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است و نتایج این بررسی نشان داده است که با افزایش طول استوانه و کاهش میزان تخلخل بار بحرانی کمانش کاهش می‌یابد و همچنین برای نمونه (c) بیشترین مقدار مدول (نسبت تنش به کرنش) و مقدار بار بحرانی کمانش به دست آمده است. برای نمونه (b) از میان سه هندسه مورد بررسی با کاهش تعداد تخلخل بار کمانش افزایش یافته است.

واژه‌های کلیدی: کمانش - استوانه متخلخل - المان محدود

### 1- مقدمه

پوسته‌های استوانه‌ای به صورت رایج در صنایع مختلف مانند هوافضا، مخازن تحت فشار، مخازن ذخیره، خودروسازی و خطوط لوله کشی کاربرد دارند. یکی از مهم‌ترین مسائلی که هنگام طراحی این سازه‌ها باید مورد بررسی قرار گیرد، پدیده کمانش است. کمانش یکی از انواع ناپایداری‌هاست که عضوهای تحت فشار دچار آن می‌شوند و معمولاً پدیده کمانش به طور ناگهانی در پوسته‌ها رخ می‌دهد. بررسی اثرات این ناپیوستگی‌ها روی ظرفیت باربری یکی از شرایط ضروری در طراحی این سازه‌ها هستند. فلوگه [1] تحقیقات گسترده‌ای در زمینه کمانش پوسته‌های استوانه‌ای و نظریه کلاسیک مرتبه بالا انجام داده است. میرفخرایی و همکاران [2] تحلیل کمانش پوسته‌های استوانه‌ای جدار نازک را با استفاده از روش حل عددی کوادریچر تفاضلی (DQM) بررسی کرده‌اند. ساطوری و همکاران [3] در سال 2015 بررسی کمانش پوسته استوانه‌ای از ماده FG با تقویت‌کننده‌های طولی را بر مبنای نظریه تغییر شکل برشی مرتبه سوم مورد مطالعه قرار داده‌اند. دنیلسون و سیموند [4] تحقیقات گسترده‌ای را برای مواد همسانگرد تحت بار فشاری محوری انجام دادند. همچنین آن‌ها به تحلیل سه‌بعدی پوسته‌های جدار ضخیم ارتوتروپ پرداختند که علاوه بر در نظر گرفتن یک ساختار ارتوتروپی کلی برای مواد، یک فرمولاسیون کلاسیک دیگر یعنی فرمولاسیون

تیموشنکو و گر را مورد مطالعه قرار داده‌اند. باژنوف و سولوفی [5] در سال 2009 یک روش حل عددی برای مسائل تغییر شکل کمانش و پساکمانش غیرخطی پوسته‌های مختلف را تحت بارگذاری مکانیکی و حرارتی ارائه نمودند. گاین‌وداوهی [6] به بررسی تحلیل کمانش خطی غیرمعمول پوسته‌های استوانه‌ای نازک تابعی مدرج سخت شده با بارگذاری فشاری محوری و بارگذاری فشاری پیچشی پرداختند. درویزه و همکاران [7] به بررسی تحلیل کمانش حرارتی پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی نسبتاً ضخیم تحت بار حرارتی متقارن محوری پرداختند. در این پژوهش روش نیمه تحلیلی المان محدود برای مطالعه رفتار کمانش حرارتی پوسته‌های نسبتاً ضخیم ارائه شده است. مالکی و همکاران [8] در سال 2018 به بررسی تحلیل کمانش پوسته استوانه‌ای ارتوتروپ با وجود عیب هندسی را با استفاده از روش DQ پرداخته‌اند. هیوشن و نودا [9] به بررسی تحلیل پس کمانش برای پوسته‌های استوانه‌ای تابعی مدرج تغییر شکل یافته ناقص تحت ترکیب بارگذاری محوری و شعاعی و حرارت محیطی پرداختند. حسینی و همکاران [10] به بررسی تحلیل کمانش پیچشی میل گردان کامپوزیتی خودرو بر اساس تئوری مرتبه بالا با در نظر گرفتن تغییر شکل اولیه پرداختند. در بررسی آن‌ها با استفاده از روش اجزاء محدود به تحلیل عددی مسئله پایداری میل‌گردان‌های کامپوزیتی خودرو تحت بار پیچشی پرداخته شده است. با توجه به مطالعات پیشین بررسی‌های زیادی در مورد اثر کمانش پوسته‌های استوانه‌ای سه‌بعدی متخلخل تحت بار متمرکز صورت نگرفته است. در این مقاله به بررسی اثر کمانش پوسته‌های استوانه‌ای سه‌بعدی متخلخل تحت بار متمرکز به کمک نرم‌افزار المان محدود مورد بررسی قرار گرفته است و تأثیر پارامترهای هندسی نظیر طول استوانه و تعداد تخلخل بر روی بار بحرانی کمانش در پوسته‌های استوانه‌ای ایجاد شده مورد مطالعه قرار گرفته است. سه نمونه با طول‌های مختلف و تعداد تخلخل متفاوت و یک نمونه با تعداد تخلخل متفاوت برای یک طول یکسان برای بررسی بار بحرانی و مدول طراحی مورد مطالعه قرار گرفته است و در انتها نتایج برای همه حالت‌های ایجاد شده با یکدیگر مقایسه شده است.

### 2- مدل سازی

#### 2-1- مدل سازی فیزیکی و عددی

در این بررسی پوسته‌های استوانه‌ای با سه طول متفاوت و تعداد تخلخل متفاوت با ضخامت ثابت 2/5 میلی‌متر طراحی شده است. در شکل (1-الف) هندسه نمونه با طول 98/17 میلی‌متر و تعداد تخلخل 16، در شکل (1-ب) هندسه نمونه با طول 104/72 میلی‌متر و تعداد تخلخل 15 و در شکل (1-پ) هندسه نمونه با طول 87/27 میلی‌متر و تعداد تخلخل 18

### 2-2- شرایط مرزی

در این تحقیق شرایط تکیه‌گاهی در یک‌طرف گیردار می‌باشد و در طرف دیگر تمام درجات آزادی به‌جز حرکت طولی مقید شده است تا بتواند در این جهت حرکت کند.

### 2-3- استقلال از شبکه

ایجاد شبکه‌بندی مناسب در رسیدن به پاسخ‌های دقیق از اهمیت بالایی برخوردار است. برای اینکه نشان دهیم نتایج این مقاله به تعداد شبکه‌بندی بستگی ندارد و مستقل از شبکه‌بندی می‌باشد چهار شبکه‌بندی مختلف با تعداد 43835، 44621، 45920، 51950 شبکه استفاده شده است و در جدول 2 مقدار کمانش برحسب تغییرات شبکه‌بندی نشان داده شده است. مقدار کمانش با تغییرات تعداد شبکه‌بندی تغییر می‌کند و با افزایش تعداد شبکه‌ها حجم شبکه‌ها کوچکتر می‌شود به طوری که این کاهش اندازه شبکه در هر سه جهت  $X, Y, Z$  می‌باشد. در واقع این کوچک کردن تا جایی ادامه داده می‌شود که بعد از آن تغییرات اندکی در مقدار کمانش صورت گیرد. همان‌طور که از نتایج جدول 2 مشخص شده است بالاترین اختلاف مقدار کمانش به‌دست‌آمده در شبکه‌بندی‌های مختلف حدود 3 درصد می‌باشد که خطایی به نسبت کم در مقایسه با سایر شبکه‌بندی‌ها ایجاد کرده است. بنابراین با توجه به بررسی‌های انجام‌شده المان C3D10 با تعداد 43835 مش برای ادامه بررسی‌ها انتخاب شده است.

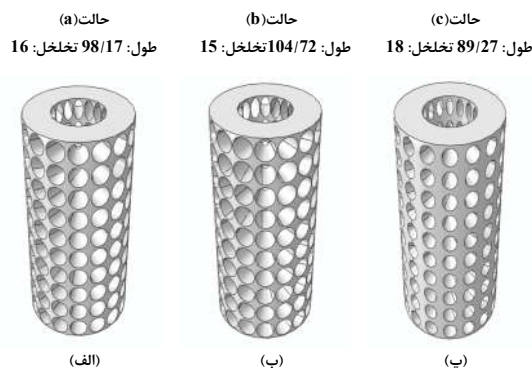
جدول 2- مقدار تغییرات کمانش با تغییرات شبکه بندی

تعداد شبکه	مقدار کمانش
43835	5039780
44621	5098110
45920	5152680
51950	4875810

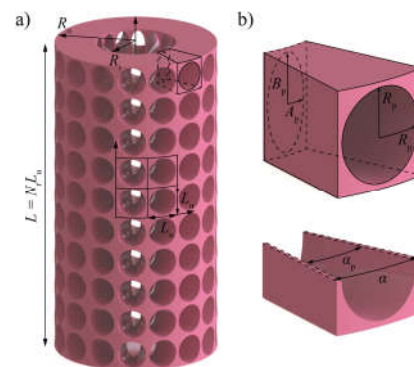
### 3- نتایج

نتایج به‌دست‌آمده برای پوسته استوانه‌ای متخلخل در ادامه آمده است و اثر تخلخل و طول مختلف بر بار بحرانی کمانش در نمودارها ترسیم و مقایسه شده‌اند. تحلیل‌های اجزاء محدود برای ورق مورد نظر با استفاده از نرم‌افزار المان محدود انجام گرفته است. برای تحلیل پوسته استوانه‌ای مورد نظر در نرم‌افزار آباکوس از المان سالیید (SOLID) استفاده شده است. در شکل 3 نتایج مربوط به مقدار بار بحرانی کمانش برای نمونه‌های مختلف که از تحلیل نرم‌افزار به‌دست‌آمده است، نشان داده شده است، که این نتایج نشان می‌دهند که با افزایش طول و کاهش تعداد تخلخل بار بحرانی کمانش کاهش پیدا می‌کند به طوری که به‌عنوان مثال مقدار کمانش برای هندسه حالت (b) نسبت به حالت (a) به مقدار 50/46 درصد کاهش یافته است که علت این امر آن است که با افزایش طول و کاهش تخلخل سختی سازه کاهش می‌یابد. همچنین نتایج برای نمونه (b) با کاهش تخلخل بررسی شد و نتایج نشان داده است که مقدار کمانش به‌طور چشمگیری افزایش داشته است زیرا با کاهش تعداد تخلخل سختی نمونه افزایش یافته است و با زیاد شدن سختی، بار بحرانی کمانش افزایش می‌یابد. برای نمونه (b) با افزایش تعداد تخلخل وزن نمونه کمتر شده است. در واقع با افزایش تخلخل فضای خالی افزایش پیدا می‌کند که این امر طبیعتاً موجب کاهش وزن استوانه می‌شود. در نتیجه این کاهش وزن، موجب کاهش استحکام و صلبیت می‌شود و به تبع آن بار کمانش به‌طور قابل‌توجهی کاهش پیدا می‌کند. همچنین نتیجه شده است که در تمامی نمونه‌ها کمانش در مود اول رخ می‌دهد.

نشان داده شده است. در کلیه نمونه‌ها ضخامت، قطر داخلی و قطر خارجی یکسان می‌باشد. پارامترهای  $R_0, R_i, L, N_c$  و  $N_r$  به ترتیب نشان‌دهنده قطر بزرگ استوانه، قطر کوچک استوانه، طول استوانه، تعداد تخلخل و تعداد منافذ در هر ردیف که برابر تعداد 10 در طول بررسی در نظر گرفته شده است. در شکل 2 شماتیک کلی از پوسته استوانه‌ای نشان داده شده است و پارامترهای هندسی مربوط به شماتیک کلی و پارامترهایی نظیر مدول یانگ ضریب پواسون و نیروی متمرکز بر هر نمونه در جدول 1 آورده شده است.



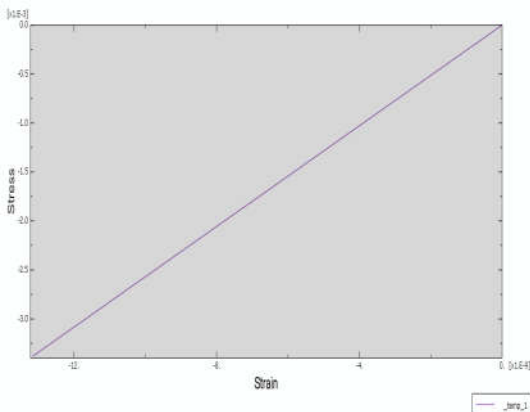
شکل 1: شماتیک پوسته‌های استوانه‌ای با ابعاد مختلف



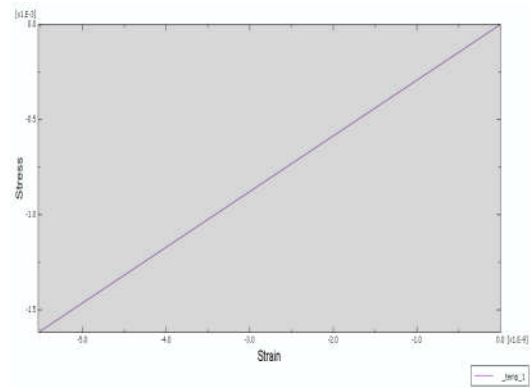
شکل 2: شماتیک کلی پوسته استوانه‌ای

جدول 1- پارامترها و خواص استفاده‌شده در شبیه‌سازی

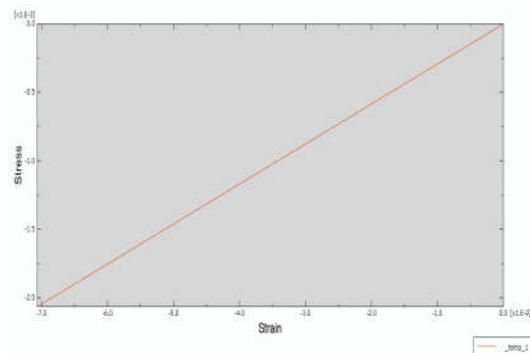
پارامتر و خواص	هندسه (a)	هندسه (b)	هندسه (c)
$R_0$ (mm)	25	25	25
$R_i$ (mm)	12/5	12/5	12/5
$N_c$	16	15	18
$L$ (mm)	98/17	104/72	87/27
$\alpha$	0/393	0/419	0/349
$L_u$ (mm)	9/81	10/47	8/72
$\alpha_p$	0/353	0/377	0/271
$A_p$ (mm)	2/21	2/36	1/69
$B_p, R_p$ (mm)	4/41	4/71	3/39
Elasticity Modulus (pa)	247335/1	247335/1	247335/1
Poisson's ratio	0/49	0/49	0/49
Force (N)	1	1	1



(ب): نمودار تنش برحسب کرنش نمونه 104/72 میلی متری با تخلخل 15 عددی برای حالت (b)



(پ): نمودار تنش برحسب کرنش نمونه 87/27 میلی متری با تخلخل 18 عددی برای حالت (c)



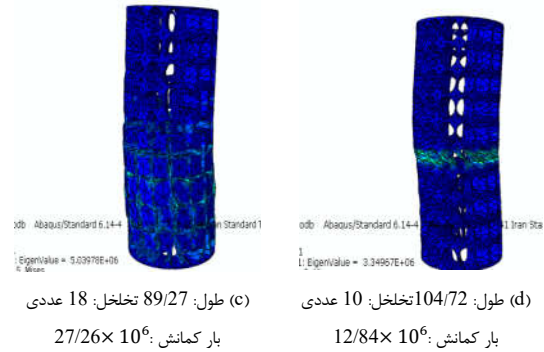
(ج): نمودار تنش برحسب کرنش نمونه 104/72 میلی متری با تخلخل 10 عددی برای حالت (d)

شکل 4: نمودار تغییرات تنش برحسب کرنش

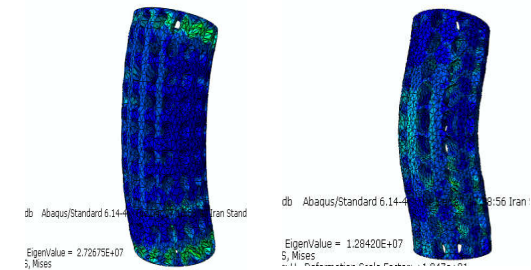
#### 4- نتیجه گیری و جمع بندی

در این مقاله به بررسی عددی اثر کمناش پوسته‌های استوانه‌ای سه بعدی متخلخل تحت بار متمرکز به کمک نرم افزار المان محدود مورد بررسی قرار گرفته است. تأثیر پارامترهای هندسی نظیر طول استوانه و تعداد تخلخل بر روی بار بحرانی کمناش در این پوسته‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است. در طول شبیه سازی سه هندسه مختلف برحسب تغییرات هندسی طول

(a) طول: 104/72 تخلخل: 15 عددی بار کمناش:  $3/349 \times 10^6$   
(b) طول: 98/17 تخلخل: 16 عددی بار کمناش:  $5/039 \times 10^6$

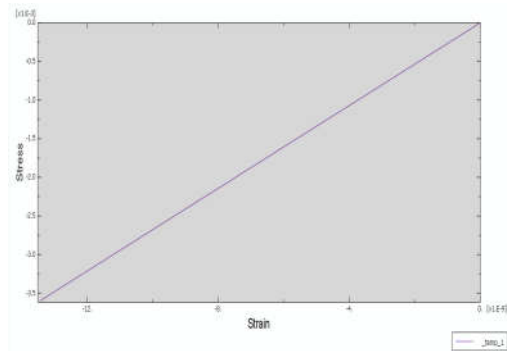


(c) طول: 89/27 تخلخل: 18 عددی بار کمناش:  $27/26 \times 10^6$   
(d) طول: 104/72 تخلخل: 10 عددی بار کمناش:  $12/84 \times 10^6$



شکل 3: بار بحرانی کمناش نمونه‌های (a), (b), (c), (d)

در شکل 4 نیز نمودار تغییرات تنش برحسب کرنش برای حالت‌های مختلف (a), (b), (c) و (d) نشان داده شده است. همان طور که از نتایج شکل 4 مشخص شده است با افزایش مقدار تنش مقدار کرنش برای همه حالت‌ها افزایش یافته است و بیشترین افزایش تنش برحسب کرنش مربوط به نمونه‌ی (c) می‌باشد و با مقایسه‌ی نمودارهای به دست آمده، نمونه (c) با بیشترین مقدار مدول (نسبت تنش به کرنش) و بیشترین سختی می‌باشد، که این امر موجب می‌شود که در تنش‌های یکسان حالت (c) بیشترین مقدار جذب انرژی را داشته و به تبع آن بالاترین مقدار استحکام را دارد. همچنین بالاترین مقدار بار کمناش مربوط به نمونه‌ی (c) با طول 87.27 و تعداد تخلخل 18 نتیجه شده است.



(الف): نمودار تنش برحسب کرنش نمونه 98/17 میلی متری با تخلخل 16 عددی برای حالت (a)

- Technologies in Mechanical Engineering, vol. 7, no. 2, pp. 83-75, 2014.
- [8] A. Maleki and A. Ahmadi, "Buckling analysis of orthotropic thick cylindrical shells considering geometrical imperfection using differential quadrature method (DQM)," *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, vol. 48, no. 4, pp. 45-60, 2018.
- [9] H.-S. Shen and N. Noda, "Postbuckling of FGM cylindrical shells under combined axial and radial mechanical loads in thermal environments," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 42, no. 16-17, pp. 4641-4662, 2005.
- [10] ح. مهدی ش. محمد، "تحلیل کمانش پیچشی میل گاردان کامپوزیتی خودرو بر اساس تئوری مرتبه بالا با در نظر گرفتن تغییر شکل اولیه." سال اول، شماره اول، بهار، 1388 ص. 44-39
- هندسه‌ها و تعداد تخلخل مورد بررسی قرار گرفته است و خلاصه‌ای از نتایج به صورت زیر می‌باشد:
- 1- با افزایش طول یا کاهش تعداد تخلخل بار بحرانی کمانش کم می‌شود، به عبارتی سازه استوانه‌ای زودتر به کمانش می‌رسد که علت این امر این است که با افزایش طول و کاهش تخلخل سختی سازه کاهش می‌یابد.
  - 2- با افزایش تعداد تخلخل سختی نمونه کم شده و با کم شدن سختی، بار بحرانی کمانش کاهش می‌یابد.
  - 3- روند تغییرات تنش برحسب کرنش برای چهار نمونه‌ی (a, b, c و d) افزایش یافته است و به تبع آن بیشترین مقدار مدول برای نمونه‌ی (c) به دست آمده است.
  - 4- در تنش‌های یکسان، نمونه‌ی (c) بیشترین میزان جذب انرژی را داشته و به تبع آن بالاترین مقدار استحکام را دارد.
  - 5- مشاهده می‌شود که کمانش برای تمامی نمونه‌ها در مود اول اتفاق می‌افتد.
  - 6- با افزایش تخلخل فضای خالی افزایش پیدا می‌کند که این امر طبیعتاً موجب کاهش وزن سازه شده که خود باعث کاهش استحکام گردیده و بار بحرانی کمانش کاهش پیدا می‌کند.

#### 5-مراجع

- [1] W. Flügge and J. Gerdeen, "according to the Nakamura yield criterion," in *Applied Mechanics: Proceedings of the Twelfth International Congress of Applied Mechanics, Stanford University, August 26-31, 1968*, 2013, p. 209: Springer Science & Business Media.
- [2] P. Mirfakhraei and D. Redekop, "Buckling of circular cylindrical shells by the differential quadrature method," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 75, no. 4, pp. 347-353, 1998.
- [3] S. Satouri, M. Kargarnovin, F. Allahkarami, and A. Asanjarani, "Application of third order shear deformation theory in buckling analysis of 2D-functionally graded cylindrical shell reinforced by axial stiffeners," *Composites Part B: Engineering*, vol. 79, pp. 236-253, 2015.
- [4] D. Danielson and J. Simmonds, "Accurate buckling equations for arbitrary and cylindrical elastic shells," *International Journal of Engineering Science*, vol. 7, no. 5, pp. 459-468, 1969.
- [5] V. Bazhenov and N. Solovei, "Nonlinear deformation and buckling of elastic inhomogeneous shells under thermomechanical loads," *International Applied Mechanics*, vol. 45, no. 9, pp. 923-953, 2009.
- [6] T. P. Nguyen and H. B. Dao, "Buckling analysis of eccentrically stiffened functionally graded circular cylindrical thin shells under mechanical load," *VNU Journal of Science: Mathematics-Physics*, vol. 29, no. 2, 2013.
- [7] A. Rahmatnezhad, S. Najafzadeh, and H. Mohseni Monfared, "Buckling Analysis of Cylindrical Grooved Shell under Axial Load Discs," *Journal of Simulation and Analysis of Novel*