

## بررسی رفتار پوسته های بتنی مخروطی تحت اثر وزن خود به روش اجزای محدود

مهدي شادمند<sup>1\*</sup>، آزاد فائز<sup>2</sup>، ارسطو هدايت نسب<sup>3</sup>

1- دانشجوی دکتری مهندسی عمران- سازه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سنندج، ([shadmandmahdi90@gmail.com](mailto:shadmandmahdi90@gmail.com))

2- دانشجوی دکتری مهندسی عمران- سازه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سنندج، ([Azadfl400@yahoo.com](mailto:Azadfl400@yahoo.com))

3- استادیار و عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد سنندج، ([Arastoo762@yahoo.com](mailto:Arastoo762@yahoo.com))

### چکیده

ساختارهای پوسته ای مخروطی به میزان قابل توجهی در کاربرد های مهندسی و صنعتی از جمله صنایع هوافضا، پتروشیمی، مکانیکی، نظامی، کشتی سازی و غیره استفاده می شوند. بررسی رفتار این سازه ها به منظور بهبود خواص ارتعاشی و مکانیکی آنها در طراحی های دینامیکی از اهمیت بالایی برخوردار است. در این مطالعه دو پوسته بتن مسلح مخروطی شکل به دو روش تحلیلی – تقریبی و روش اجزاء محدود با نرم افزار Abaqus تحت اثر نیروی وزن مورد تحلیل و بررسی قرار گرفتند. برای تقویت پوسته های بتنی از میلگردهایی به صورت مارپیچ در محیط آن استفاده شده است. در روش تحلیلی – تقریبی، مجموعه تقویت کننده ها با یک پوسته که از نظر سفتی معادل با یکدیگر هستند، با دو ابعاد مختلف، محاسبه گردیدند. در روش دوم با استفاده از روش اجزاء محدود و نرم افزار عددی Abaqus پوسته مخروطی مدلسازی و تحلیل گردید. خروجی های حاصل نشان می دهد که نتایج حاصل از روش تحلیلی – تقریبی و مدلسازی عددی با نرم افزار از تطابق نسبتاً خوبی یکدیگر برخوردار می باشند.

واژه های کلیدی: پوسته مخروطی، روش تحلیلی – تقریبی، Abaqus

## 1- مقدمه

ساختارهای پوسته ای مخروطی به میزان قابل توجهی در کاربردهای مهندسی و صنعتی از جمله صنایع هوافضا، پتروشیمی، مکانیکی، نظامی، کشتی سازی و غیره استفاده می شوند. بررسی ارتعاشات آزاد و اجباری این سازه ها به منظور بهبود خواص ارتعاشی و مکانیکی آنها در طراحی های دینامیکی از اهمیت بالایی برخوردار است. پوسته یک سطح قوسی و منحنی است که ضخامت آن، در مقایسه با شعاع و سایر ابعادش، کوچک می باشد. براساس آیین نامه ساختمان پوسته ها در کشور هند IS:2210 پوسته ها بطور کلی به دو گروه اصلی تقسیم بندی می کنند که عبارتند از:

1- پوسته های دارای انحنای یکطرفه که قابل گسترش می باشند.

2- پوسته های دارای انحنای دو طرفه که قابل گسترش نمی باشند.

پوسته های مخروطی و استوانه ای جزء پوسته های با انحنای یکطرفه می باشند. گنبد های مستدیر، سهموی، بیضوی، سهموی هذلولی گون و سهموی بیضی گون را می توان به عنوان پوسته های با انحنای دو طرفه به شمار می رود. پوسته ها را عموماً به سه رده تقسیم می کنند که به ترتیب عبارتند از: پوسته های دورانی، پوسته های انتقالی و سطوح خطی. همچنین پوسته ها را می توان به پوسته های نازک و ضخیم تقسیم بندی نمود. اگر نسبت شعاع به ضخامت پوسته بزرگتر از 20 باشد می توان آن را به عنوان پوسته نازک در نظر گرفت (IS:2210, 2003).

## 2- مشخصات عمومی پوسته ها

### 1-2- ضخامت

ضخامت کل یک پوسته بتن آرمه نباید در پوسته های دارای انحنای یکطرفه کمتر از 50 میلیمتر، در پوسته های دارای انحنای دو طرفه کمتر از 40 میلیمتر و در پوسته های پیش ساخته کمتر از 25 میلیمتر باشد.

### 2-2- دهانه و طول وتر قوس

به منظور آنکه ابعاد تیرهای لبه و آرماتور بندی آن در محدوده قابل اجرا قرار داشته باشند، دهانه پوسته های آرماتور نباید بیشتر از 30 متر باشد. برای دهانه های بزرگتر، می توان از تیرهای لبه پیش تنیده استفاده نمود. عرض عضو لبه به 2 تا 3 برابر ضخامت پوسته محدود می شود.

### 3-2- ارتفاع مقطع پوسته ها

در پوسته های با دهانه بزرگ،  $\frac{1}{6}$  تا  $\frac{1}{12}$  طول دهانه است. از ارقام بزرگتر می توان در دهانه های کوچکتر استفاده نمود. در

پوسته های بدون اعضای لبه، ارتفاع مقطع نباید از  $\frac{1}{10}$  طول دهانه کوچکتر باشد. در پوسته های که طول وتر قوس خیلی

بزرگتر از طول دهانه است، ارتفاع مقطع نباید از  $\frac{1}{10}$  طول وتر قوس کوچکتر باشد.

#### 4-2- نیم زاویه مرکزی (نصف زاویه مرکزی)

نیم زاویه مرکزی باید بین 30 تا 45 درجه باشد. اگر این زاویه از 45 درجه کمتر باشد می توان از تأثیر بار باد چشم پوشی کرد.

#### 5-2- آرماتور گذاری پوسته

در پوسته با ضخامت 50 میلیمتر، قطر میلگردها نباید از 10 میلیمتر بیشتر باشد. این قطر در پوسته های با ضخامت 65 میلیمتر نباید از 12 میلیمتر و در پوسته های دارای ضخامت بیش از 65 میلیمتر از 16 میلیمتر بیشتر باشد. در نواحی اتصال یعنی در جاهایی که ضخامت پوسته بیشتر می شود، استفاده از میلگردهای با قطر بیشتر مجاز است. فاصله میلگردها نباید از 5 برابر ضخامت پوسته بیشتر باشد. پوشش بتن روی میلگرد می باید حداقل برابر 12 میلیمتر و یا برابر بعد اسمی آرماتور باشد. بطور کلی در سازه های پوسته ای نازک حداقل آرماتور به میزان 0/15 درصد سطح مقطع ناخالص در جهت اصلی توصیه می شود.

#### 6-2- تعبیه درز پوسته ها

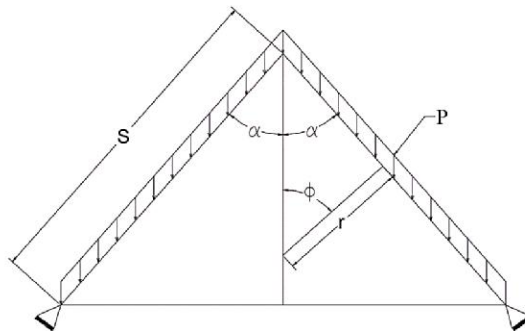
در پوسته هایی که طول آنها از 40 متر تجاوز کند، تعبیه درزهای انبساط ضروری است. در امتداد طولهای خمیده پوسته، یعنی در جاهایی که نیروهای برشی حداقل می باشند، درزهای اجرائی در نظر گرفته می شوند.

#### 7-2- ضوابط قالب بندی پوسته ها

قبل از برداشتن داربست پوسته ها، می باید آنها را حداقل به مدت دو هفته به خوبی عمل آورد. تیرها و دیافراگم های انتهایی نیز می باید بین 3 تا 4 هفته به خوبی مراقبت شده و پس از آن اقدام به برداشتن قالبها و داربستهای آنها گردد.

#### 3- تحلیل پوسته مخروطی

تئوری غشایی که به وسیله دیشینگر فرمولبندی شده است مبتنی بر این فرضیه می باشد که پوسته دارای ابعاد نامحدود بوده و بصورت یک غشاء کاملاً انعطاف پذیر عمل می کند و فقط نیروهای مستقیم درون صفحه اش را انتقال می دهد (شاکری، بیگلر، 1391).



شکل 1- تصویری شماتیک از یک پوسته مخروطی و نمایش پارامترهای آن

#### 4- تعیین نیروهای غشائی

مقادیر نیروی محیطی ( $N_q$ ) و نیروی نصف النهاری ( $N_f$ ) یک پوسته مخروطی به ترتیب از روابط (1) و (2) بدست می آید (شاگری، بیگلو، 1391).

$$N_q = -P.S.\sin a.\tan a \quad (1)$$

$$N_f = N_s = -\frac{P.S}{2\cos a} \quad (2)$$

در این روابط  $P$  وزن واحد سطح پوسته،  $S$  طول یال پوسته مخروطی،  $a$  نیم زاویه مرکزی پوسته می باشد.

#### 5- طراحی پوسته مخروطی

در صورتیکه دو شرط زیر برقرار باشد بایدست از حداقل آرماتور در پوسته ها جهت میلگرد گذاری استفاده نمود. روابط (3) و (4) به ترتیب به منظور کنترل تنش حلقوی و کنترل تنش نصف النهاری مورد استفاده قرار می گیرد.

$$\frac{N_q}{A_c} \leq S_{cc} \quad (3)$$

$$\frac{N_f}{A_c} \leq S_{cc} \quad (4)$$

در صورتیکه هریک از نیروهای وارده پاسخگوی تنش مجاز بتن نباشد می بایدست از میلگردهای محاسباتی استفاده نمود. با استفاده از روابط (5) و (6) می توان به ترتیب آرماتور محاسباتی محیطی و آرماتور محاسباتی نصف النهاری یا طولی را بدست آورد (شاگری، بیگلو، 1391).

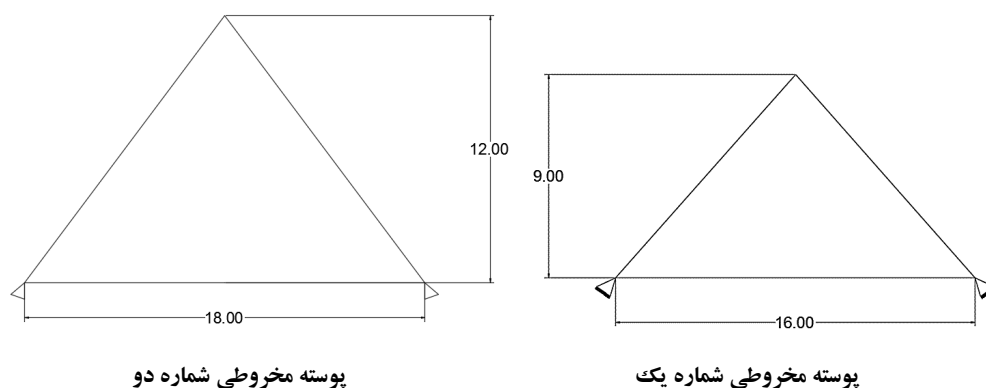
$$A_{st} = \frac{N_q}{S_{st}} \quad (5)$$

$$A_{st} = \frac{N_f}{S_{st}} \quad (6)$$

#### 6- تحلیل و طراحی پوسته مخروطی شکل

##### 6-1- تحلیل و طراحی پوسته مخروطی شکل به روش تحلیلی - تقریبی

در این بخش دو پوسته مخروطی شکل که در لبه خود دارای تکیه گاه مفصلی (لولا) است و تحت تأثیر وزنشان قرار گرفته اند، تحلیل و طراحی خواهند شد. مشخصات مکانیکی بتن و فولاد مورد استفاده در پوسته ها در جدول (1) ارائه شده است. همان طور که مشاهده می شود، وزن مخصوص بتن برابر 25 کیلونیوتن بر مترمکعب، تنش تسلیم فولاد 400 مگاپاسکال، مدول الاستیسیته بتن برابر 25743 مگاپاسکال و  $S_{cc}$  و  $S_{ct}$  نیز به ترتیب برابر 5 و 1/2 مگاپاسکال می باشند. شکل (2) نمایی از دو پوسته مخروطی شکل مورد مطالعه را نشان می دهد.



شکل 2 - نمایش ابعاد و تکیه گاه پوسته های مخروطی شکل مورد بررسی

جدول 1 - مشخصات مصالح پوسته مخروطی شکل مورد مطالعه

$g_c (KN/m^3)$	$S_{cc} (Mpa)$	$S_{ct} (Mpa)$	$f_y (Mpa)$	$E_c (Mpa)$	h (mm)
25	5	1/2	400	25743	50

در ادامه وزن واحد سطح پوسته (P)، نیم زاویه مرکزی ( $\alpha$ )، طول یال پوسته مخروطی (S)، شعاع دایره موازی در هر لبه (r) مطابق محاسبات جدول (2) تعیین می گردند. همچنین مقادیر نیروی محیطی ( $N_q$ ) و نیروی نصف النهاری (NF) نیز که با استفاده از روابط (1) و (2) محاسبه گردید، در جدول (2) ارائه شده است.

جدول 2 - محاسبه مقادیر P،  $\alpha$  و S برای پوسته های مخروطی شکل مورد بررسی

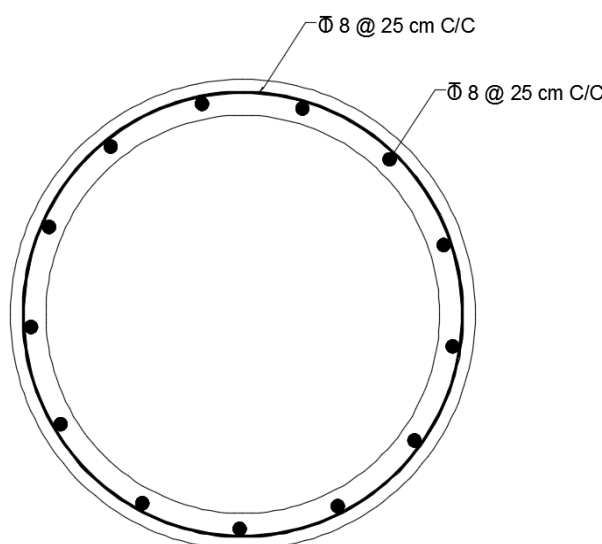
پوسته مخروطی شماره یک		
$p = g_c \cdot h = 25 \times 0/05 = 1/25 KN/m^2$	$a = \tan^{-1} \frac{8}{9} = 41/63$	$S = \sqrt{9^2 + 8^2} = 12.04 \text{ m}$
$N_q = -1/25 \times 12/04 \sin 41/63 \cdot \tan 41/63 = -8/89 KN/m$		
$Nj = N_s = -\frac{1/25 \times 12/04}{2 \cos 41/63} = -10/07 KN/m$		
پوسته مخروطی شماره دو		
$p = g_c \cdot h = 25 \times 0/05 = 1/25 KN/m^2$	$a = \tan^{-1} \frac{9}{12} = 36/87$	$S = \sqrt{12^2 + 9^2} = 15 \text{ m}$
$N_q = -1/25 \times 15 \sin 36.87 \cdot \tan 36.87 = -8/44 KN/m$		
$Nj = N_s = -\frac{1/25 \times 15}{2 \cos 36.87} = -11.72 KN/m$		

پس از محاسبه پارامترهای مربوط به  $S, \alpha, P, N_q$  و  $N_f$  تنش های حلقوی و نصف النهاری محاسبه گردیدند و در جدول (3) ارائه شدند. همان طور که در این جدول مشاهده می شود، مقدار تنش حلقوی و تنش نصف النهاری برای پوسته شماره یک به ترتیب برابر  $0/1778$  و  $0/2014$  شده و برای پوسته شماره 2 نیز به ترتیب برابر  $0/1688$  و  $0/2344$  شده است. از آنجا که مقادیر این تنش ها از مقدار  $S_{cc}$  کمتر شده و روابط (4) و (5) برای آنها برقرار می باشد، می بایست از حداقل آرماتور در پوسته ها جهت میلگرد گذاری استفاده نمود.

جدول 3 - محاسبه مقادیر تنش های حلقوی و نصف النهاری برای پوسته های مخروطی شکل مورد بررسی

پوسته مخروطی شماره یک	تنش حلقوی $= -\frac{8/89 \times 10^3}{50 \times 1000} = 0/1778 \text{ N/mm}^2 \text{ p S}_{cc}$	$A_{st} = \frac{0/3 \times 1000 \times 50}{100} = 150 \text{ mm}^2$
	تنش نصف النهاری $= -\frac{10/07 \times 10^3}{50 \times 1000} = 0/2014 \text{ N/mm}^2 \text{ p S}_{cc}$	
پوسته مخروطی شماره دو	تنش حلقوی $= -\frac{8/44 \times 10^3}{50 \times 1000} = 0/1688 \text{ N/mm}^2 \text{ p S}_{cc}$	
تنش نصف النهاری $= -\frac{11/72 \times 10^3}{50 \times 1000} = 0/2344 \text{ N/mm}^2 \text{ p S}_{cc}$		

حداقل آرماتور در پوسته ها جهت میلگرد گذاری برابر  $150$  میلیمتر مربع می باشد (جدول 3). بنابراین در هر دو امتداد نصف النهاری و محیطی از میلگردهای با قطر  $8$  میلیمتر با فواصل مرکز تا مرکز  $250$  میلیمتر استفاده می گردد (شکل 3).

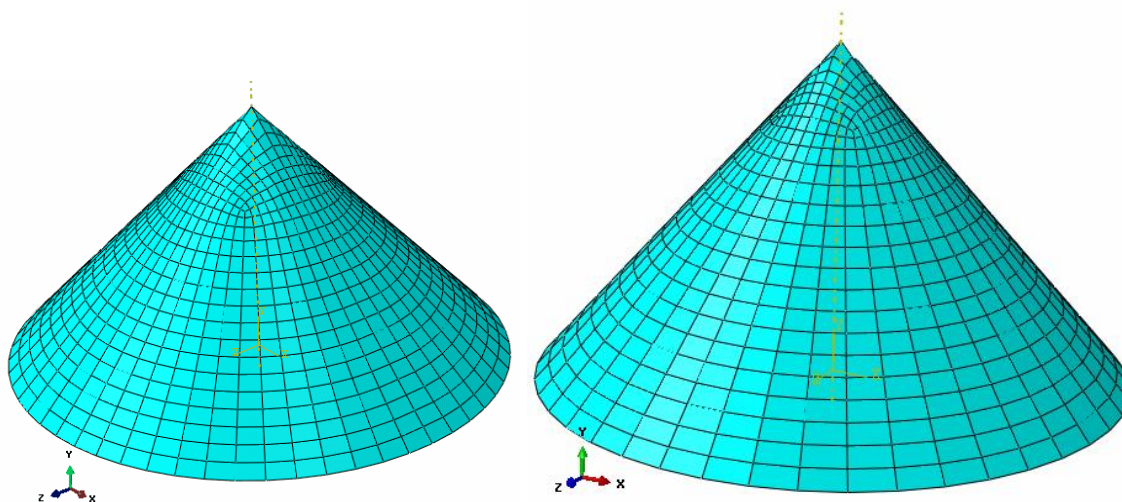


شکل 3 - میلگردگذاری پوسته مخروطی شکل

## 2-6- تحلیل و طراحی پوسته مخروطی شکل به روش اجزای محدود

### 1-2-6- مدلسازی اجزای محدود

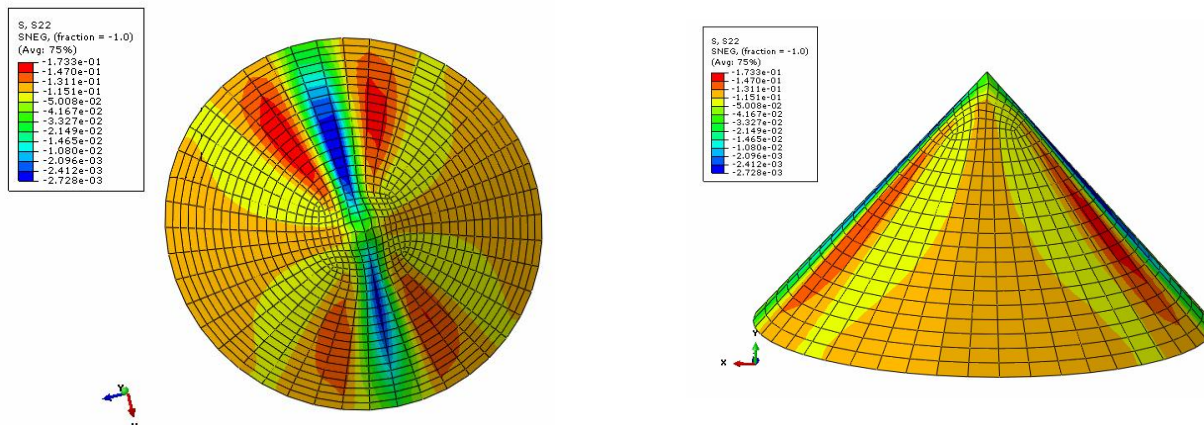
در این بخش، دو پوسته بتنی مخروطی شکل بخش قبلی به روش اجزای محدود شبیه سازی شدند. مطالعه اجزای محدود به کمک نرم افزار اجزای محدود Abaqus انجام گردید. Abaqus توانایی بررسی مدل های عددی ویژه ای را برای پاسخ غیرخطی بتن تحت بارگذاری استاتیکی و دینامیکی دارد. در مدلسازی میلگردها از المان truss استفاده شده است. در مدلسازی پوسته غشایی نیز از المان Shell که خواص یک ناحیه پوسته ای را مشخص می کند، استفاده گردید. یک پوسته Shell عبارتست از ماده ای که یکی از ابعاد آن در مقایسه با دو بعد دیگر قابل صرف نظر کردن بوده و از توزیع تنش در طول آن بعد صرف نظر می شود (Abaqus، 2011). در این مطالعه از مدلسازی ترک خوردگی concrete damage plasticity استفاده شده است، این مدل دو فرض اصلی در مکانیزم گسیختگی در نظر می گیرد که شامل ترک خوردگی کششی و خرد شدگی فشاری می باشد (babu و همکاران، 2014). شکل (4) نیز مش بندی پوسته مخروطی شکل مورد مطالعه را نشان می دهد. مش بندی یا شبکه بندی که به نمایندگی از مدل مورد مطالعه قرار می گیرد، به اندازه کافی خوب می باشد به طوری که این اطمینان را به وجود می آورد که نیروهای اعمال شده به طور دقیق محاسبه شوند. همچنین بعد مش ها در بزرگترین حالت برابر 9 سانتیمتر در نظر گرفته شد (شکل 4).



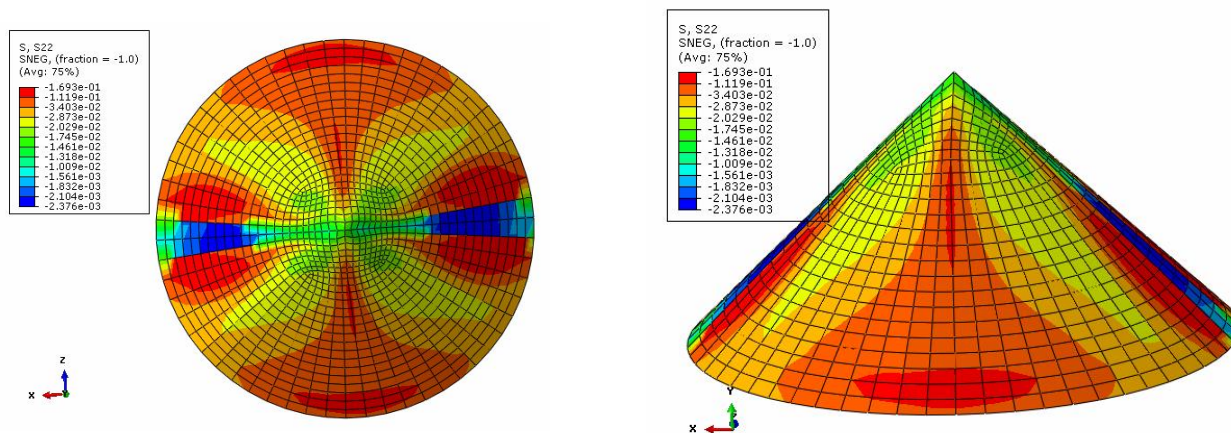
شکل 4 - مش بندی پوسته های مخروطی شکل مورد مطالعه

### 2-2-6- نتایج حاصل از تحلیل اجزای محدود مدل های مورد بررسی

نتایج حاصل از مطالعه اجزای محدودی پوسته های بتنی مخروطی شکل مورد مطالعه در قالب نمودارهای جابجایی پوسته مخروطی شکل در جهت قائم، تنش های حلقوی و تنش های نصف النهاری در نمودارهای شکل های (5) تا (8) ارائه گردید.

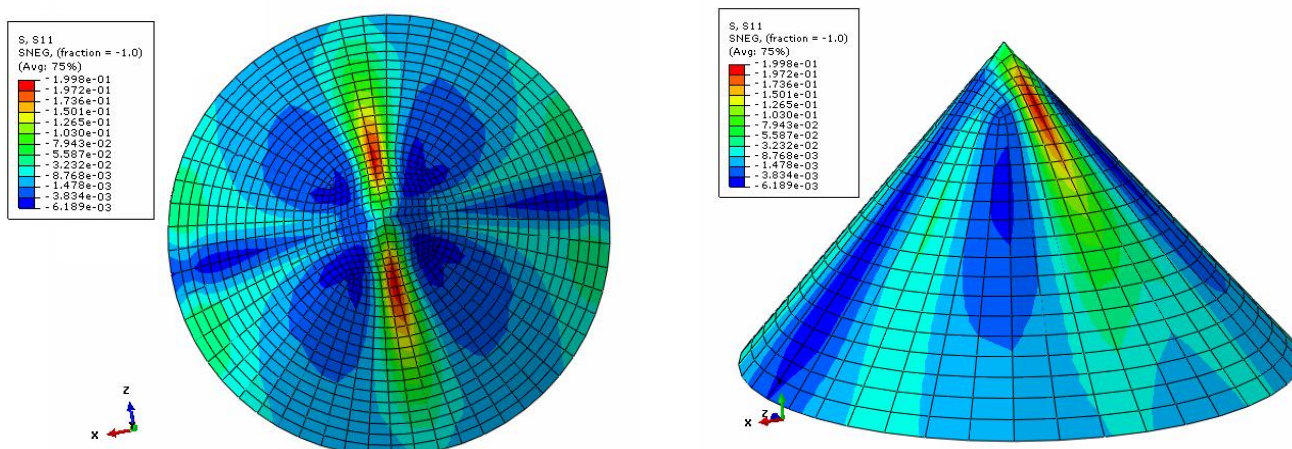


شکل 5 - تنش های حلقوی پوسته مخروطی شکل (مدل 1)



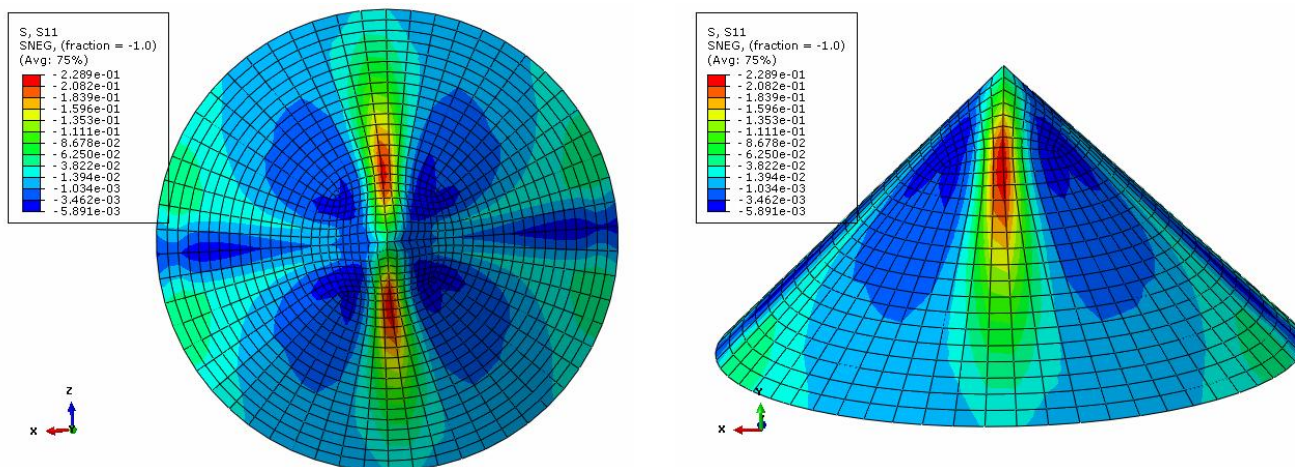
شکل 6 - تنش های حلقوی پوسته مخروطی شکل (مدل 2)

شکل های (7) و (8) به ترتیب مقادیر تنش حلقوی پوسته مخروطی شکل در نقاط مختلف پوسته ها را در دو مدل 1 و 2 را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، بیشینه تنش حلقوی در مدل پوسته ی یک برابر 0/1733 مگاپاسکال و بیشینه تنش حلقوی در مدل پوسته ی دو 0/1693 مگاپاسکال می باشد.



شکل 7 - تنش های نصف النهاری پوسته مخروطی شکل (مدل 1)





شکل 8 - تنش های نصف النهری پوسته مخروطی شکل (مدل 2)

شکل های (7) و (8) به ترتیب مقادیر تنش نصف النهری در نقاط مختلف پوسته ها را در دو مدل 1 و 2 را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، بیشینه تنش نصف النهری در مدل پوسته ی یک برابر 0/1998 مگاپاسکال و بیشینه تنش نصف النهری در مدل پوسته ی دو 0/2289 مگاپاسکال می باشد.

## 7- نتیجه گیری

هدف اصلی این مطالعه بررسی صحت و دقت روابط مورد استفاده در تحلیل پوسته های مخروطی شکل که تحت اثر وزن خود قرار گرفته اند، می باشد. بدین منظور دو پوسته ی مخروطی شکل بتن مسلح به دو روش تحلیلی - تقریبی و روش اجزای محدود مورد بررسی قرار گرفتند و تنش های حلقوی و نصف النهری در هر دو روش محاسبه گردید و در جدول (4) بایکدیگر مورد مقایسه قرار گرفت. همان طور که در این جدول مشاهده می شود درصد اختلاف بین تنش های حاصل شده از روش تحلیلی - تقریبی نسبت به روش اجزای محدود در جدول ارائه شده است. نتایج حاصل نشان می دهد که مقادیر تنش های حلقوی و نصف النهری حاصل شده از روابط تحلیلی - تقریبی از تطابق نسبتاً خوبی یکدیگر برخوردار می باشند.

جدول 4 - مقایسه مقادیر تنش های حلقوی و نصف النهری برای پوسته های مخروطی شکل مورد بررسی در دو روش تحلیلی - تقریبی و روش اجزای محدود

		مدل شماره دو	مدل شماره یک
تنش حلقوی	روش تحلیلی تقریبی	0/1688 (0/05%)	0/1778 (2/6%)
	روش اجزای محدود	0/1693	0/1733
تنش نصف النهری	روش تحلیلی تقریبی	0/2344 (2/4%)	0/2014 (0/8%)
	روش اجزای محدود	0/2289	0/1998

## 8- مراجع

شاكرى، محمود و بيگلو، على اكبر (1391)، مقدمه اى بر تنورى ورق و پوسته جدار نازك، جلد دوم، ناشر: دانشگاه صنعتى امير كبير.

طراحی سازه های بتن آرمه پیشرفته، پروفیسور ن. کریشنا راجو.

ABAQUS theory manual. Pawtucket, R.I: Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc.:(2011). Version 6.11.

Indian Standard Criteria for Design of Reinforced Concrete Shell Structure and Folded Plates.(2003). IS:2210.

Romanbabu M. Oinam, Dipti Ranjan Sahoo and Rahul Sindhu, (2014). " Cyclic Response of Non-ductile RC Frame with Steel Fibers at Beam-Column Joints and Plastic Hinge Regions".

Ventsel, Eduard; Krauthammer, Theodor, (2001). Ventsel, Eduard; Krauthammer, Theodor (2001). Thin Plates and Shells-Theory, Analysis and Applications, CRC Press. pp. 349–372. doi:10.1201/9780203908723.ch13. ISBN 978-0-8247-0575-6.