



بررسی پایداری سازه‌های گنبدی شکل تحت بار متمرکز در نوک گنبد و فشار یکنواخت در سطح خارجی گنبد

آرش یوسفی^{۱*}، محسن طالب زاده^۲، علیرضا قریب^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشکده فنی و مهندسی عمران، دانشگاه بجنورد
Arash.yousefi1390@gmail.com

۲- استادیار گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی عمران، دانشگاه بجنورد

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشکده فنی و مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

چکیده

یکی از برجسته ترین طراحی های سازه که از دیر باز بخصوص در احداث مساجد و سازه های فرهنگی مورد توجه بوده است، سازه های پوسته ای گنبدی شکل می باشد. پایداری و دوام این سازه ها پس از گذشت قرن ها این اژه را از دیگر سازه ها ممتاز کرده است. به طوری که حتی در طراحی معماری حال حاضر نیز استفاده از فرم هندسی گنبد ها جایگاه ویژه ای دارد البته با این تفاوت که به شکل سنتی این سازه ها با مصالح بنایی، خشت و گل ساخته می شدند، اما امروزه با توجه به پیشرفت تکنولوژی مصالح از مصالح نوین در ساخت این سازه استفاده می شود. در این مقاله بار کمانشی بحرانی سازه های گنبدی شکل را برای قطاع های مختلفی از یک کره که دارای سطح مقطع دایره ای یکسان با قطر فرضی ۱۰ متر می باشند را با هم مقایسه شده است. نمونه ها توسط نرم افزار Abaqus مدل شده اند که شامل ۲ حالت بارگذاری هستند. حالت اول بارگذاری متمرکز در نوک گنبد می باشد و در حالت دوم فشار یکنواخت که به سطح گنبد اعمال می شود. تحلیل به صورت استاتیکی انجام شده است. نتایج مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است، در حالت کلی می توان چنین نتیجه گرفت که گنبد به دلیل هندسه منحصر به فرد خود دارای مقاومت فشاری مطلوب و مقاومت فشاری ضعیف می باشد، همچنین بهترین شکل هندسی گنبد از نظر پایداری و مقدار تنش و کرنش و جا به جایی مینیمم گنبد ۹۰ درجه می باشد.

واژگان کلیدی: سقف های گنبدی شکل، بار بحرانی، پایداری کمانشی، آباکوس.



The analysis of stability under load concentrated at the tip of the dome-shaped structures and uniform pressure on the outer surface of the dome

Abstract

One of the most striking structural designs which have long been considered especially in the construction of the mosques is the dome-shaped shell structures. Stability and durability of these structures over the centuries has made these structures distinctive from other structures. So that even now using architectural design dome geometry has special place, the only difference is that these structures were traditionally made by building materials, clay and mud. But today, due to technological advances new material are used in the construction of buildings. In this paper, the critical buckling load of dome-shaped structures for different sectors of a sphere that has the same circular cross section with a hypothetical diameter of ۱۰ m are compared. The samples are modeled by Abaqus software which consists of ۲ loading models. In the first one the load is concentrated at the tip of the dome and in the second case a uniform pressure is applied to the dome. Static analysis is done. The results were compared, in general it can be concluded that due to its unique geometry the dome has high and weak compressive strength, also the best geometric shape of the dome from stability and the amount of stress and strain and minimum displacement is ۹۰ degrees .

Keywords : Domed roofs , Load of crisis , Buckling stability , Abaqus

۱- مقدمه

سقفهای گنبدی شکل در ایران و کشورهای بسیار دیگر در ساخت مساجد، کلیساها و سالنهای کنفرانس برای پوشاندن سطوح وسیع استفاده شده است. شکلهای ۱ و ۲ دو ساختمان مشهور را که در آنها از سقف گنبدی استفاده شده است را نشان می دهد. [۱]



شکل ۱: گنبد تاج محل در آگرا، هند شکل ۲: گنبد مسجد شیخ لطف الله در اصفهان، ایران

گنبدها گروهی از سازه های فضایی هستند که دارای سطحی با انحناء در دو راستا بوده و علاوه بر پلان دایره، قابلیت پوشاندن سطوح مربعی، مستطیلی و شش ضلعی را دارند. همچنین انحنای این سازه ها می تواند علاوه بر کمان دایره، بصورت کمائی از بیضی، سهمی، سیکلوئید و سایر منحنی های دلخواه و یا حتی ترکیبی از دو انحناء به شرط پایداری لازم باشد. [۴]

این گونه سازه ها را می توان به شکل یک کمان که با چرخش حول محور عمودی مرکزی آن به وجود می آید تصور کرد. همچنین گنبدهای قوسی شکل، اگر درست طراحی شوند دارای استحکام زیادی هستند و می توانند فضای زیادی را بدون ستون محافظ پوشش دهند. [۳]

بررسی رفتار سازه ای بناهای تاریخی نشانگر آن است که رابطه نزدیکی میان تئوری سقف های پوسته ای گنبدی با عملکرد گنبدهای سنتی وجود دارد. از آنجا که در گذشته مصالحی که در ساختمان ها مورد استفاده قرار می گرفته است قابلیت تحمل کشش و خمش بالا را نداشته و فقط مصالحی مانند خشت و آجر که صرفاً تحمل نیروی فشاری را دارند شناخته شده بودند، طراحان مجبور به احداث بناهایی بودند که فقط تحت فشار باشند و لذا مهار نیروی فشاری بدون خروج از مرکزیت مورد توجه سازندگان و مهندسين در گذشته بوده و کارهای انجام شده در دوره های قدیم که شامل گنبدها و قوس ها می باشند نمونه ای از این تلاش ها است. [۲]



امروزه تکنولوژی بتن در امر ساختن گنبد می تواند بسیار مفید واقع گردد . بتن آرمه به دو دلیل می تواند راه حل مناسبی برای استفاده در فرمهای گنبدی شکل باشد، اول اینکه بتن قابلیت تحمل فشار بالا را دارد و دیگر آنکه قابلیت شکل پذیری مطلوبی دارد. [۲] بررسی رفتار سطح خارجی گنبد بتن آرمه کاملاً صیقلی بوده و به راحتی تمیز می گردد و بنابراین هیچگونه خوردگی یا زدگی نمی تواند روی این گنبد بتن آرمه ایجاد شود. بجز بخشی از مزایای سازه های گنبدی که عنوان شد، زیبایی و ظرافت این سازه ها نیز از دیگر مزایای قابل ذکر است. گنبد های بتن آرمه در مقایسه با دیگر سازه های قدیمی با ابعاد محیطی یا حجم یکسان، سریع تر اجرا می شوند. سه دلیل اصلی چنین سرعتی در اجرا به شرح ذیل می باشد:

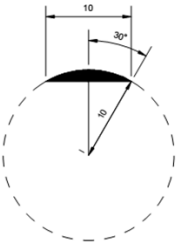
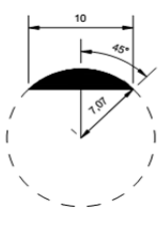
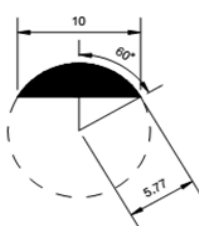
۱. استفاده از بالن پر شده از گاز هزینه و زمان اجرا را در مقایسه با روش قدیمی به نصف تقلیل می دهد.
۲. یکی از دلایل خوب پائین آوردن هزینه نیروی انسانی، استفاده از shotcrete (پاشیدن بتن) می باشد.
۳. چون اجرای پروژه در داخل بالن انجام می شود، تاثیرات آب و هوایی در زمان بندی اجرای پروژه تاثیر ندارد.

۲- روش آنالیز و مشخصات نمونه های مدل شده

شیوه تحلیل سازه باید متناسب با ویژگی های هندسی و مصالح سازه و خصوصیات بار های موثر و بر اساس فر ضیات واقع گرایانه و با بهره گیری از مدل های ریاضی گویا رفتار سازه و شرایط مرزی باشد. به گونه ای که رفتار طراحی مربوطه ، قابل پیش بینی باشد. بر این اساس نوع ، روش و ابزار تحلیل متناسب با شرایط واقعی و معیار های طراحی اختیار خواهند شد.

جهت بررسی پایداری فرض شده است یک سازه با سطح مقطعی به قطر ۱۰ متر موجود است که گنبد آن را مشابه مدل ها در جدول زیر در قطاع های مختلفی از یک کره در نرم افزار آباکوس مدل شده است. همچنین در تمامی مدل ها ضخامت پوسته گنبد ۵ سانتی متر، چگالی $1700 \frac{kg}{m^3}$ ، مدول الاستیسیته $180 \times 10^9 \text{ pa}$ و ضریب پواسون 0.35 در نظر گرفته شده است.

جدول ۱ : مدل های مورد بررسی

انواع مدل ها	اشکال مدل شده	توضیحات
مدل اول		قطاعی از یک نیمکره است که شعاع کره ۱۰ متر و شعاع سطح مقطع ۵ متر می باشد و از چرخش کمانی با زاویه ۳۰ درجه حول محور عمود ایجاد شده است.
مدل دوم		قطاعی از یک نیمکره است که شعاع کره ۷.۰۷ متر و شعاع سطح مقطع ۵ متر می باشد و از چرخش کمانی با زاویه ۴۵ درجه حول محور عمود ایجاد شده است.
مدل سوم		قطاعی از یک نیمکره است که شعاع کره ۵.۷۷ متر و شعاع سطح مقطع ۵ متر می باشد و از چرخش کمانی با زاویه ۶۰ درجه حول محور عمود ایجاد شده است.

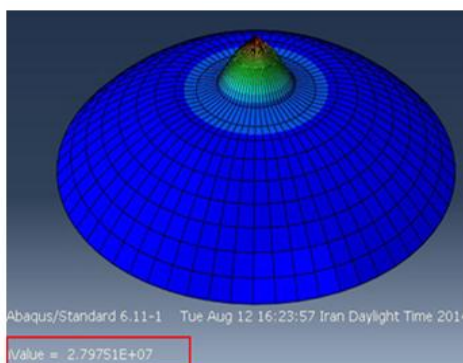


مدل چهارم		<p>قطاعی از یک نیمکره است که شعاع کره و شعاع سطح مقطع ۵ متر می‌باشد و از چرخش کمانی با زاویه ۹۰ درجه حول محور عمود ایجاد شده است.</p>
مدل پنجم		<p>قطاعی از یک نیمکره است که شعاع کره ۵.۷۷ متر و شعاع سطح مقطع ۵ متر می‌باشد و از چرخش کمانی با زاویه ۱۲۰ درجه حول محور عمود ایجاد شده است.</p>

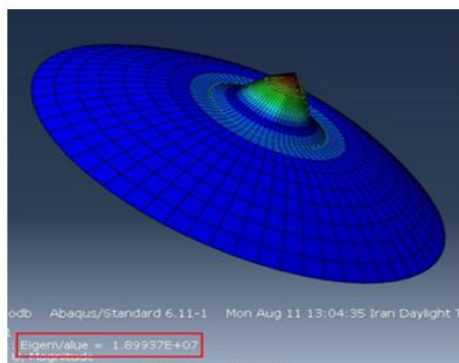
۳- باربهرانی کمانش در حالت بار متمرکز و فشار یکنواخت در سطح خارجی گنبد

با توجه به این که در مود اول با کمترین حالت بار بحرانی رو به رو هستیم به همین دلیل نتایج برای مود اول محاسبه و با هم مقایسه می‌شوند. برای باربهرانی کمانش در حالت بار متمرکز، بار متمرکز به نوک این گنبدها اعمال شده است و سپس نتایج حاصل را به دست آمده شد. سپس در حالت باربهرانی فشار یکنواخت در سطح خارجی گنبد، فشار یکنواختی به سطح این گنبدها اعمال می‌کنیم و برای مود اول بارهای بحرانی را بدست می‌آوریم.

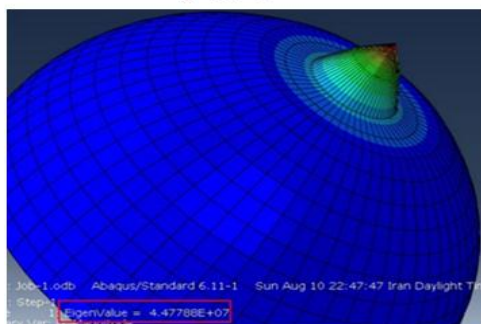
شکل ۳: باربهرانی کمانش در حالت بار متمرکز



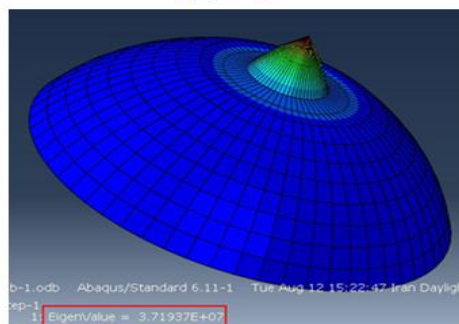
گنبد ۴۵ درجه



گنبد ۳۰ درجه



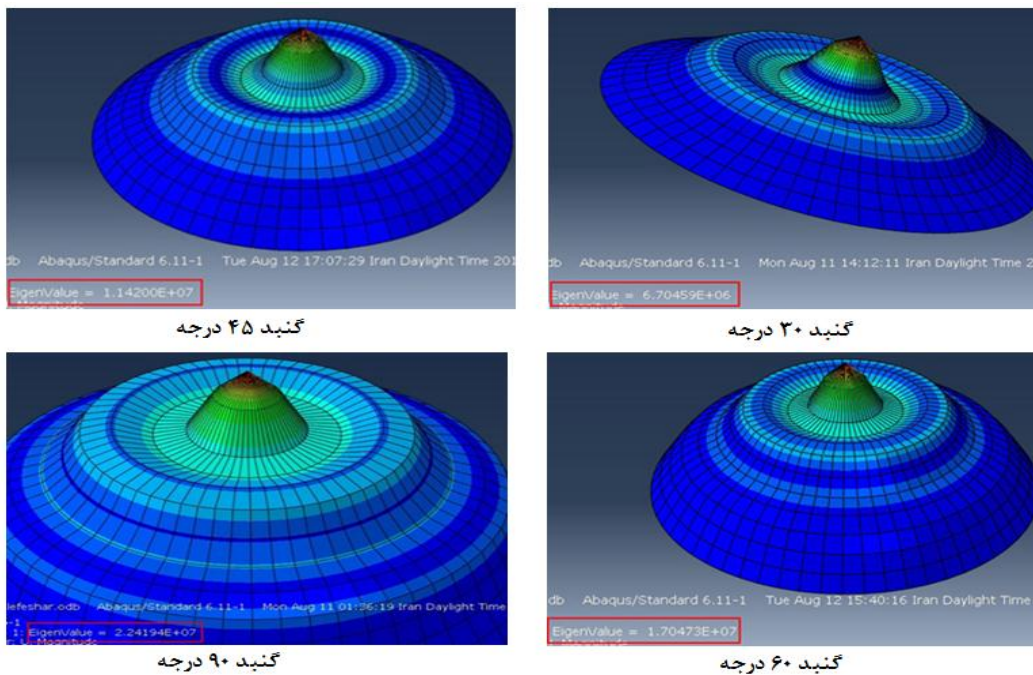
گنبد ۹۰ درجه



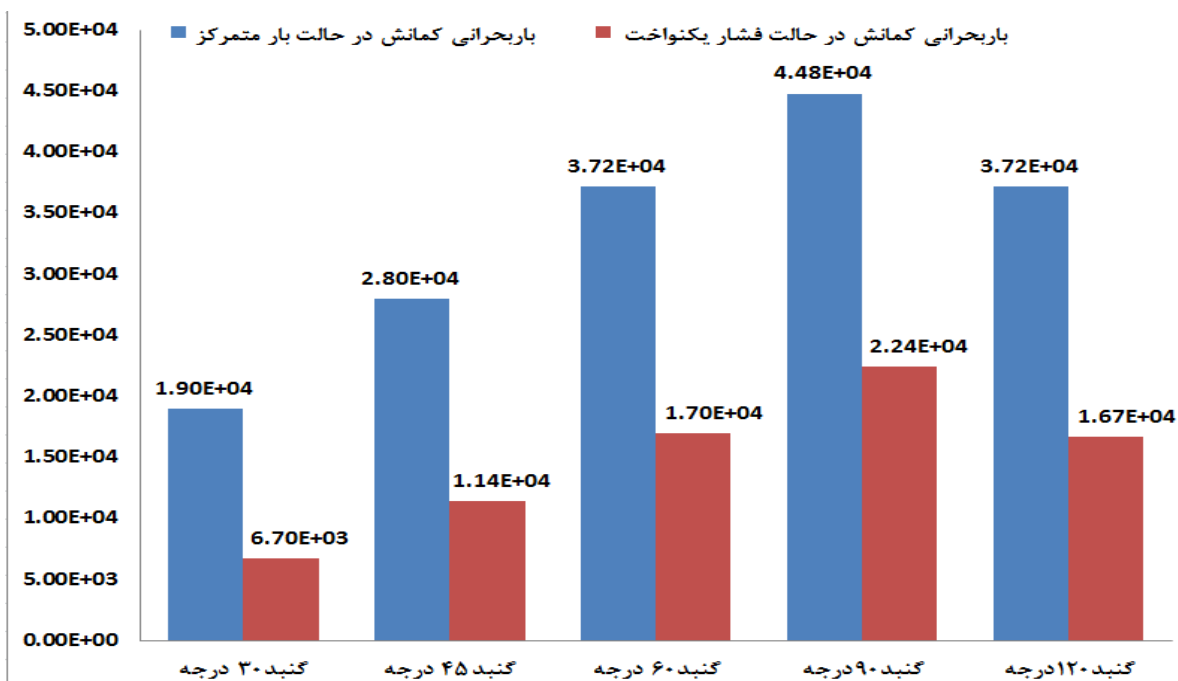
گنبد ۶۰ درجه



شکل ۴: بار بحرانی کمانش در حالت فشار یکنواخت در سطح خارجی گنبد



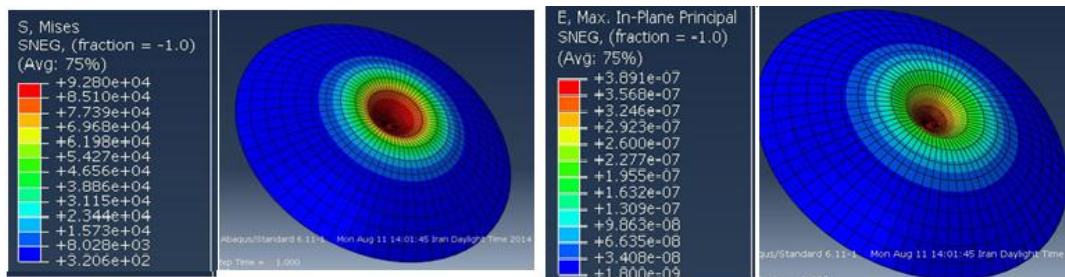
شکل ۵: مقایسه بارهای بحرانی در ۲ حالت مختلف



همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش زاویه از ۳۰ درجه تا ۹۰ درجه، P_{cr} افزایش می‌یابد و سپس از ۹۰ درجه تا ۱۲۰ درجه روند کاهشی دارد. به عبارتی حداکثر فشار بحرانی در زاویه ۹۰ درجه یا نیم‌کره‌ی کامل به وجود می‌آید. همچنین گنبد‌های ۶۰ با ۱۲۰ تقریباً دارای عملکرد کمانشی یکسانی هستند و تقریباً بار بحرانی یکسانی دارند.

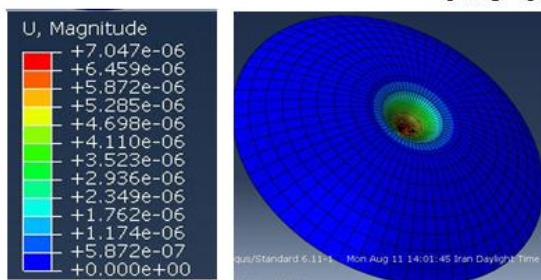


۴- مقایسه حداکثر تنش، کرنش و جابه‌جایی ایجاد شده در پوسته گنبد در حالت بار متمرکز در هر حالت حداکثر تنش فون میسز و حداکثر کرنش و حداکثر جابه‌جایی که توسط نرم‌افزار تحت بار اعمال شده به نوک گنبد محاسبه شده است در زیر آمده است. در ادامه برای چند نمونه از مدل‌های مورد نظر اشکال مدل شده در برنامه آباکوس آورده شده است.
 شکل ۶: مقادیر تنش و کرنش و تغییر مکان برای حالت کمان ۳۰ درجه



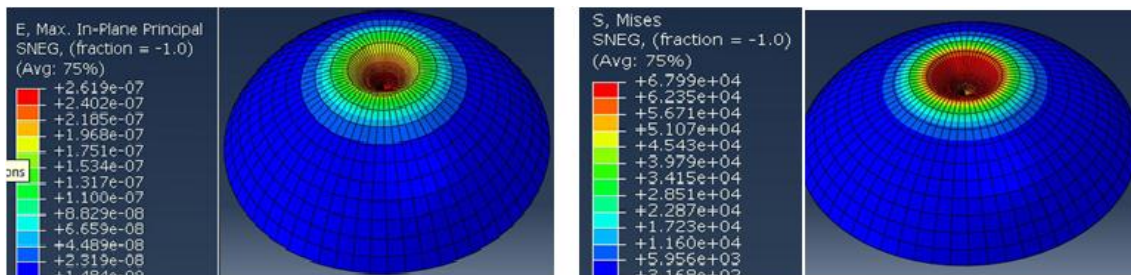
کانتور کرنش

کانتور مقادیر تنش میسز



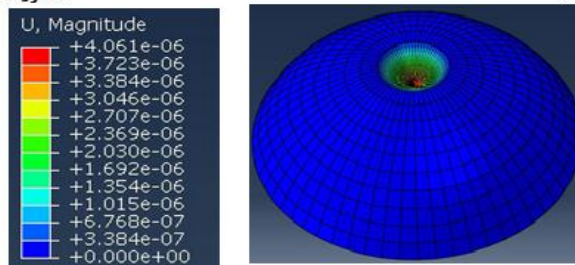
کانتور تغییر مکان

شکل ۷: مقادیر تنش و کرنش و تغییر مکان برای حالت کمان ۶۰ درجه



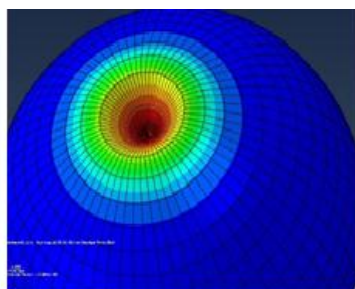
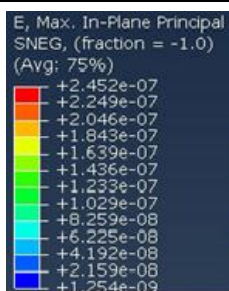
کانتور مقادیر کرنش

کانتور مقادیر تنش میسز

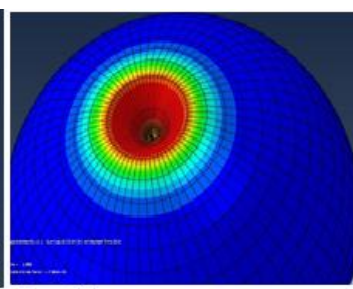


کانتور مقادیر تغییر مکان

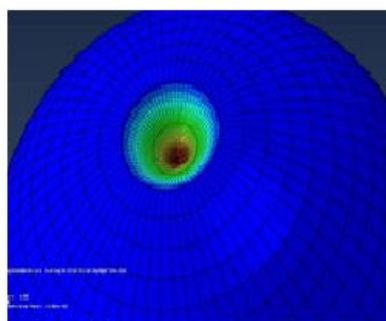
شکل ۸: مقادیر تنش و کرنش و تغییر مکان برای حالت کمان ۹۰ درجه



کانتور مقادیر کرنش



کانتور مقادیر تنش مسیض




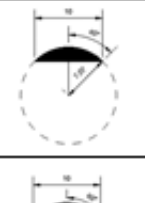
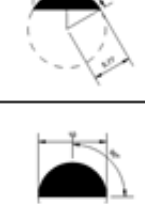
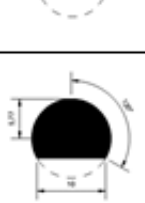
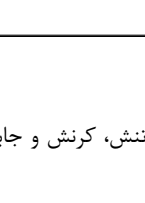
کانتور مقادیر تغییر مکان

جدول ۲- حداکثر تنش و کرنش و جابه‌جایی تحت بار متمرکز 1KN

	حداکثر جابه‌جایی (m)	حداکثر کرنش	حداکثر تنش (kpa)	
	3.96E-08	-3.36E-07	1.23E+02	گنبد 30 درجه
	2.36E-08	-2.55E-07	8.93E+01	گنبد 45 درجه
	1.60E-08	-2.10E-07	7.07E+01	گنبد 60 درجه
	1.21E-08	-1.83E-07	6.02E+01	گنبد 90 درجه
	1.59E-08	-2.07E-07	7.00E+01	گنبد 120 درجه

جدول ۳- حداکثر تنش و کرنش و جابه‌جایی تحت فشار یکنواخت 1Kpa



	حداکثر جابه‌جایی (m)	حداکثر کرنش	حداکثر تنش (kpa)	
	7.05E-08	3.89E-07	9.28E+01	گنبد 30 درجه
	5.13E-08	3.02E-07	7.63E+01	گنبد 45 درجه
	4.08E-08	2.62E-07	6.80E+01	گنبد 60 درجه
	3.49E-08	2.45E-07	6.44E+01	گنبد 90 درجه
	4.12E-08	2.62E-07	6.80E+01	گنبد 120 درجه

همانطور که مشاهده می‌شود در حالت گنبد ۹۰ درجه در حالت بار متمرکز و در حالت فشار یکنواخت مقادیر حداکثر تنش، کرنش و جابه‌جایی ایجاد شده نسبت به سایر حالت‌ها کمتر است.



۹- نتیجه‌گیری

با بررسی نتایج به دست آمده می‌توان به نتایج زیر رسید :

- طبق جدول‌های ۱ تا ۳ مشاهده می‌شود که گنبدی که در اثر چرخش کمان ۹۰ درجه حول محور قائم ایجاد می‌شود بیشترین بار بحرانی را دارد و حداکثر پایداری در این حالت رخ می‌دهد.
- در گنبد ۹۰ درجه حداکثر تنش و کرنش و جابه‌جایی مقدار مینیمم نسبت به سایر گنبدها را دارند که مطلوبترین حالت است.
- گنبدهای ۶۰ با ۱۲۰ تقریباً دارای عملکرد کمانشی یکسانی هستند و تقریباً بار بحرانی یکسانی دارند. همچنین در این گنبدها حداکثر تنش و کرنش و جابه‌جایی تقریباً مشابه هم می‌باشد.

۹- مراجع

[۱] شوازی، آ، بهار (۱۳۸۱)، تاریخ معماری، ترجمه دکتر لطیف ابوالقاسمی، موسسه چاپ و انتشار دانشگاه تهران، چاپ اول.

[۲] آیین نامه سازه های فضاکار، (۱۳۸۳)، نشریه ۴۲۲، معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور، تهران،

[۳] Dodge, Hazel (۱۹۸۴). Building Materials and Techniques in the Eastern Mediterranean from the Hellenistic Period to the Fourth Century AD (PhD Thesis ed.). Newcastle University.

[۴] پیرنیا، ۱۳۸۲، سبک شناسی معماری ایران، ناشر پژوهنده.