



اثر ارتفاع قوس بر بار باد سازه‌های گنبدی شکل

سعید خسروجردی، حامد سرکرده*

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران،

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۰۵

بازنگری: ۱۳۹۸/۱۰/۲۶

پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۱۴

ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۱۲/۲۰

کلمات کلیدی:

گنبد

دینامیک سیالات محاسباتی

بار باد

سازه فضاکار

قوس

خلاصه: در طراحی بهینه‌ی گنبد که معمولاً برای پوشش فضاهای وسیع و بدون استفاده از تکیه‌گاه داخلی ساخته می‌شود، فرم پوسته خارجی گنبد از جهت رویکرد معماری، ظرفیت باربری و سازه‌ای در بارهای ثقلی و بارهای جانبی نقش اساسی دارند. بنابراین طراح برای طراحی بهینه، علاوه بر زیبایی باید به تاثیر فرم سازه در ظرفیت باربری بارهای ثقلی و جانبی به صورت توأم، با توجه به منطقه احداث سازه توجه نماید. در این مقاله اثر ارتفاع قوس بر بار باد سازه‌های گنبدی شکل بصورت عددی شبیه سازی و مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. از این رو گنبدها با نسبت ارتفاع به دهانه ثابت و ارتفاع قوس‌های مختلف در زمین نوع C و با سرعت و شدت آشفتگی مطابق آیین‌نامه‌ی ASCE7، شبیه سازی عددی شده است. همچنین مقادیر ضرایب فشار (Cp) بر روی خط مرکزی گنبد در راستای جهت وزش باد، و بر روی حلقه‌های دور گنبد در ارتفاع‌های ۰، ۰/۲۵h، ۰/۵h، ۰/۷۵h و h ارائه شده است. نتایج این مطالعه تاثیر ارتفاع قوس بر توزیع ضریب فشار روی سطح خارجی گنبد، تاثیر تیزی راس گنبد در مقدار حداقل ضریب فشار و تاثیر ارتفاع قوس بر درصد سطح تحت فشار و کشش در گنبدها را نشان می‌دهد.

۱- مقدمه

شده در بین بارهای جانبی، توجه بیشتری به بار باد معطوف شود. برای طراحی صحیح و بهینه گنبدها به اطلاعات دقیق قابل اعتمادی از چگونگی توزیع بار باد بر روی سطح خارجی آن‌ها احتیاج است؛ که با توجه به شکل تقریباً متفاوت گنبدها نسبت به سایر ساختمان‌های معمول، اطلاعات دقیق و کاملی در آیین‌نامه‌ها درباره توزیع بار باد ارائه نشده است. طی سالیان متمادی مطالعات متعددی بر روی جریان لایه مرزی عبوری به خصوص در گنبدها با استفاده از شبیه سازی عددی و تونل باد صورت گرفته است، و در آن‌ها تاثیر عدد رینولدز، زبری و صافی سطح گنبد، ناهمواری‌های بالادست جریان، بررسی فرم‌های مختلف گنبد پرداخته شده است، اما تاثیر ارتفاع قوس در میزان بار باد وارده بر گنبدها کمتر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. این موضوع از این منظر حائز اهمیت است که در تعیین مقدار نیروی باد وارده بر سازه متغیرهای متعددی وجود دارند که بر میزان این نیرو تاثیر می‌گذارد لذا شناخت نحوه رفتار جریان لایه مرزی در

در طراحی بهینه‌ی گنبد که معمولاً برای پوشش فضاهای وسیع و بدون استفاده از تکیه‌گاه داخلی ساخته می‌شود، فرم پوسته خارجی گنبد از جهت رویکرد معماری، ظرفیت باربری در بارهای ثقلی و بارهای جانبی نقش اساسی دارد. به طوری که طراح برای یک طراحی بهینه علاوه بر زیبایی باید به تاثیر فرم سازه در ظرفیت باربری بارهای ثقلی و جانبی به صورت توأم، با توجه به منطقه احداث سازه توجه نماید. مطالعات نشان می‌دهد که گنبدها علی‌رغم پایداری بسیار بالای آن‌ها در مقابل بارهای متقارن در مقابل بارهای نامتقارن مانند برف و باد حساس می‌باشند، به طوریکه چندین مورد خرابی این سازه‌ها در مقابل بارهای نامتقارن گزارش شده است [۱]. بنابراین پرداختن به این مقوله اهمیت به‌سزایی دارد. استفاده روز افزون از سازه‌های فضاکار در ساخت گنبدها با توجه به سبکی آن‌ها باعث

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: sarkardeh@hsu.ac.ir



مقابل قوس های مختلف می تواند دید مناسبی به طراح برای طراحی بهینه بدهد. علاوه بر این با توجه تاثیر توام بار ثقلی (بار مرده و برف) و بار جانبی باد در بهینه یابی فرم گنبد، طراح نیازمند داشتن آگاهی لازم در خصوص تاثیر فرم در میزان بار باد وارده بر سازه می باشد، تا با توجه به موقعیت جغرافیایی سازه و میزان بار برف و باد منطقه، بهینه ترین فرم را انتخاب کند. از این رو در این مقاله ارتفاع قوس در گنبدها مورد بررسی قرار گرفته است. یکی از اولین مطالعات در تونل باد در سال ۱۹۶۵ توسط ماهر [۲] روی اشکال پایه گنبدها انجام شده است. لتچفورد و سرکر [۳] نیز مطالعاتی بر روی گنبدهای صاف و زبر انجام دادند؛ در این مقاله اثر بار باد بر روی یک گنبد پارابولیک با نسبت ارتفاع به دهانه ۰/۳۱ بر روی یک زمین باز نوع C بر اساس آیین نامه ی 98-ASCE7 [۴] در آزمایشگاه تونل باد مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۲). و یکی از آخرین آن ها نیز مطالعه ی چنگ و فو [۵] می باشد که به بررسی اثر عدد رینولدز بر روی مشخصات آیرودینامیکی گنبدهای کروی در جریان آرام و جریان لایه مرزی آشفتگی پرداخته است. در زمینه بررسی جریان باد بر روی سازه ها بصورت عددی، مطالعات زیادی صورت گرفته است که از آن جمله مطالعه ی کونستل [۶] که به بررسی اثر موقعیت قرارگیری ساختمان بر میزان بار باد روی سازه پرداخته است. که در آن برای مدل ساختمان ساده که در سه حالت روی زمین قرار گرفته، بیان می دارد که فشار منفی حداکثر در لبه های بین دیواره اطراف و سقف رخ می دهد. که در حالت دوم مکش حداکثر در سطح زیرین ساختمان رخ می دهد؛ و همچنین با مقایسه ی بین سه حالت قرارگیری سازه نیز مشخص گردید که با قرارگیری ساختمان در بالای سطح شیب دار زمین سازه تحت بار باد بزرگتری نسبت به دو حالت دیگر قرار خواهد گرفت که این امر با نتایج قبلی ناشی از تست تونل باد هم خوانی مناسبی داشت. تحقیق هور و همکاران [۷] به تعیین توزیع فشار روی مدل های نسبتا پیچیده گنبدها در سه مدل گنبد، دایره ای، سهموی و نوع تاریخی شرقی برای به دست آوردن فشار دینامیکی باد پرداخته است. در این تحقیق برای تعیین فشار باد روی سطح گنبدها از تونل باد محاسباتی دو بعدی در نرم افزار اجزاء محدودی انسیس برای مدل سازی و شبکه بندی گنبدها استفاده شده است. آن ها در تحقیقاتشان مدل های مورد نظرشان را تحت جریان بادی مصنوعی با سرعت ثابتی برابر 35 m/s که در ورودی تونل باد محاسباتی

اعمال شده است، قرار داده اند. همچنین فرض کرده اند هیچ مانعی نیز در تونل قرار نگرفته و سطح زمین کاملا صاف و هموار باشد. آن ها برای هر یک از گنبدهای مذکور، سه دسته گراف که نشان دهنده تغییرات فشار، سرعت حداکثر و مکش بیشینه بر حسب ارتفاع گنبدها، روی خط مرکزی گنبدها می باشد را بعنوان منحنی تعیین بار طراحی، ارائه نموده اند. تحقیق لین و همکاران [۸] که در آن به بررسی اثر موانع محیطی در ناحیه بالادستی، بر جریان باد روی گنبدها پرداخته شده است. در این تحقیق سه محدوده محاسباتی با توجه به وجود یا عدم وجود سازه های محیطی در راستای وزش باد به گنبدها ایجاد گردیده است، تا اثرات موانع محیطی مورد مطالعه قرار گیرد. در این تحقیق از نرم افزار حجم محدود فلونتت برای مدل سازی و شبکه بندی گنبدها و محیط اطراف آن ها و نیز از مدل آشفتگی k-ε استاندارد استفاده شده است. با توجه به نوع منطقه که گنبدهای مورد نظر در آن قرار می گیرند و موانع محیطی و شرایط تست تونل باد، پروفیل سرعت متوسط باد، طبق قانون توانی و با نمای ۰/۱۴، به گونه ای که سرعت و شدت آشفتگی در ارتفاع راس گنبدها مدل شده به ترتیب 18 m/s و ۱۵٪ باشد، تعیین گشته اند. خارا و خزار [۹] به بررسی اثر صافی و زبری بر فشار باد وارد بر گنبدها به روش شبیه سازی گردابه های بزرگ (LES) پرداخته اند. ویزوتو و فریرا [۱۰] اثر نیروی باد بر پوسته های با فرم آزاد شش ضلعی را بررسی کرده اند. در این تحقیق به بررسی نیروی باد وارد بر جداره داخلی پوسته و نیروی باد وارده بر روی پوسته پرداخته شده است. صادقی و همکاران [۱۱] به بررسی اثر باد بر روی گنبدهای شیاردار و اسکالپ با استفاده از نرم افزار انسیس فلونتت برای مدل سازی و شبکه بندی گنبدها پرداخته اند و برای مدل سازی آشفتگی از معادلات RANS استفاده شده است. نتایج این تحقیق نشان می دهد که برای گنبد دارای شیار، فارغ از تعداد شیارها بیشترین نوسان زمانی رخ می دهد که شیار زاویه ای ۹۰ درجه با جهت باد دارد. ژو و همکاران [۱۲] به مدل سازی عددی یک گنبد پرداخته و دقت مدل های آشفتگی k-ε realizable و k-ε RNG با مدل آزمایشگاهی مورد بررسی قرار داده و سپس تاثیر ۵ نوع زمین را جریان لایه ی مرزی از دامنه عبوری بررسی کرده است. ابراهیمی و یحیایی [۱۳] به بررسی تاثیر بازشوها در راس گنبدها پرداخته اند. در این تحقیق از نرم افزار انسیس و از مدل اغتشاشی k-ε استفاده شده است. مدل سازی عددی گنبدها تحت جریان لایه

گرفته اند، بصورت زیر می‌باشند [۷] و [۱۷]:

$$\frac{\partial \rho U_x}{\partial t} + \frac{\partial (\rho U_x U_x)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho U_y U_x)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho U_z U_x)}{\partial z} = \rho g_x - \frac{\partial P}{\partial x} + R_x + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial U_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_e \frac{\partial U_x}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_e \frac{\partial U_x}{\partial z} \right) + T_x \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho U_y}{\partial t} + \frac{\partial (\rho U_x U_y)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho U_y U_y)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho U_z U_y)}{\partial z} = \rho g_y - \frac{\partial P}{\partial y} + R_y + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial U_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_e \frac{\partial U_y}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_e \frac{\partial U_y}{\partial z} \right) + T_y \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho U_z}{\partial t} + \frac{\partial (\rho U_x U_z)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho U_y U_z)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho U_z U_z)}{\partial z} = \rho g_z - \frac{\partial P}{\partial z} + R_z + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial U_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_e \frac{\partial U_z}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_e \frac{\partial U_z}{\partial z} \right) + T_z \quad (3)$$

که g_x, g_y, g_z مولفه‌های شتاب گرانشی، ρ چگالی، μ_e ویسکوزیته موثر، R_x, R_y, R_z مقاومت‌های توزیع شده بوده که برای اعمال کردن اثرات بعضی موانع هندسی روی جریان سیال بدون مدل هندسی آن‌ها، به معادلات اضافه می‌شوند. T_x, T_y, T_z عبارت نشان دهنده اتلاف انرژی ویسکوزیته بوده و با رابطه زیر تعریف می‌گردند. البته در سیال تراکم ناپذیر حذف می‌شوند.

$$T_x = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial U_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial U_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial U_z}{\partial x} \right) \quad (4)$$

برای دو مولفه دیگر رابطه ای مشابه حل می‌گردد. قانون بقای انرژی نیز به صورت رابطه‌ی زیر تعریف می‌شود [۷] و [۱۷].

$$\rho C \frac{DT}{Dt} = -\nabla \cdot q + Q + \phi \quad (5)$$

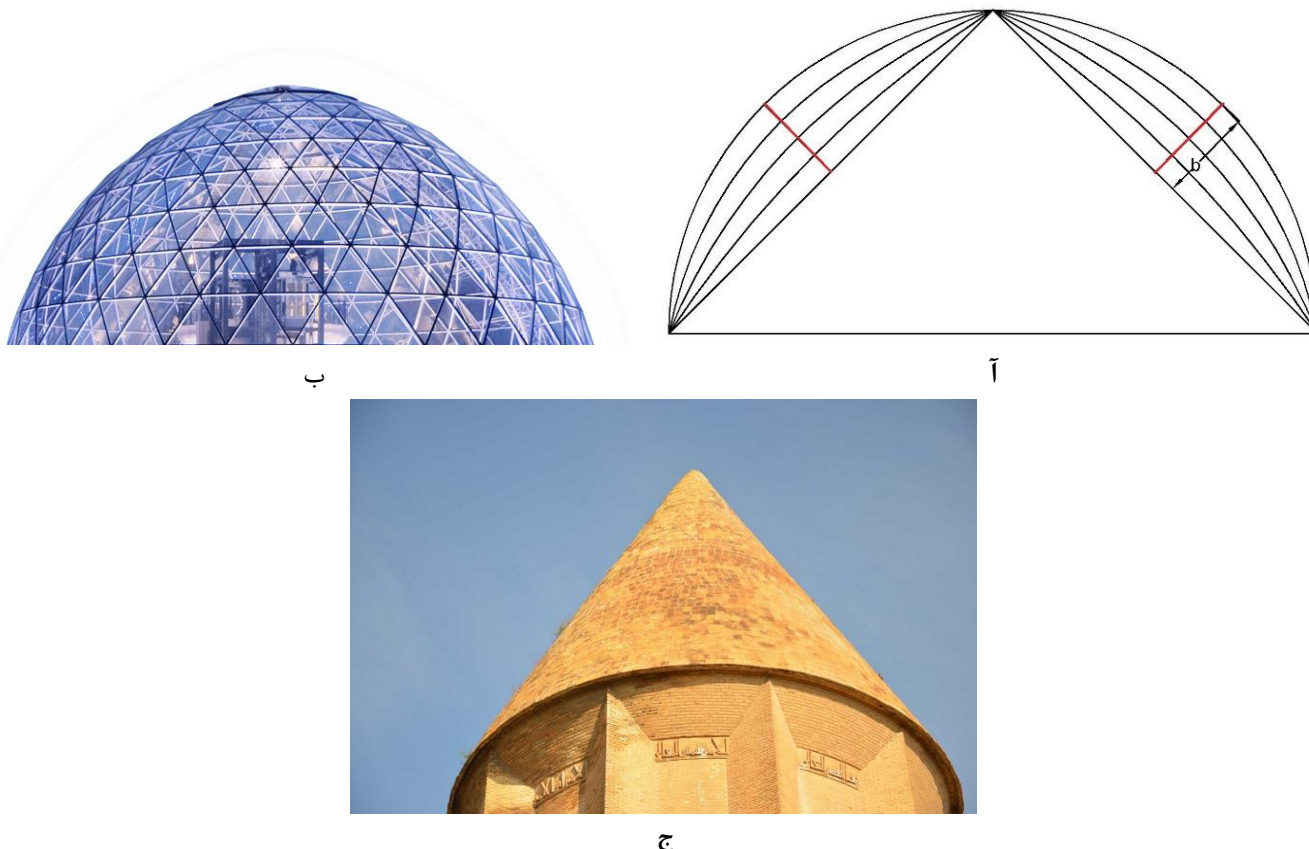
معادله مذکور را می‌توان در مختصات کارتزین و به صورت رابطه زیر نیز بیان نمود:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho C_p T_o) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho U_x C_p T_o) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho U_y C_p T_o) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho U_z C_p T_o) = \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T_o}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial T_o}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial T_o}{\partial z} \right) + W^v + E^k + Q_v + \phi + \frac{\partial P}{\partial t} \quad (6)$$

مرزی به روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) با اعمال صحیح شرایط ورودی به محدوده محاسباتی، فشار داخلی و خارجی بر روی گنبد‌های ناقص به دست آمده، که با مقایسه نتایج عددی با آزمایشات تونل باد بخوبی نشان دهنده دقت تحلیل عددی می‌باشد. این تحقیق در دو حالت کلی استقرار بر روی زمین و بر روی ارتفاع، مقادیر ضریب فشار متوسط داخلی و خارجی باد محاسبه و سپس با تعریف چهار ناحیه روی سطح گنبد، منحنی‌هایی جهت تعیین ضریب فشار باد با توجه به میزان بازشو در راس گنبد‌ها ارائه شده‌است. سان و همکاران [۱۴] آزمایشاتی برای محاسبه تاثیر تغییرات عدد رینولدز و شرایط وابسته به سقف‌های نیمه استوانه‌ای در بادهای آرام و جریانات آشفته یک دست مورد بررسی قرار داده‌اند. سلاجقه و سلاجقه [۱۵] به محاسبه بار باد روی چلیک‌ها با استفاده از شبیه‌سازی عددی بر روی سه مدل پرداخته‌اند. آن‌ها در این تحقیق بیان می‌دارند که به منظور یافتن ضرایب فشار خارجی برای چلیک، می‌توان روش‌های شبیه‌سازی عددی را با دقت مناسب جایگزین مدل آزمایشگاهی کرد. مجموعه روش‌های CFD، همگی تقریب مناسبی و بهتری نسبت به ضرایب آیین‌نامه Eurocode [۱۶] دارا می‌باشند. آن‌ها مدل BSL K- ω را به عنوان کاراترین روش به منظور یافتن ضرایب فشار چلیک انتخاب نمودند. در تحقیق عددی حاضر با استفاده از CFD تاثیر ارتفاع قوس در سازه‌های گنبدی شکل در مقابل بار باد بررسی شده‌است. همان‌گونه که اشاره شد، تحقیقات پراکنده‌ای در این زمینه انجام شده‌است ولی تاکنون تحقیق جامعی که در برگیرنده تاثیر بار باد بر گنبد‌های با نسبت ارتفاع به دهانه ثابت و ارتفاع قوس‌های مختلف باشد انجام نشده‌است، تا تاثیر آن مورد تحلیل و بررسی قرار گیرد. از این رو پس از صحت‌سنجی مدل عددی با استفاده از نتایج آزمایشگاهی محققین قبلی، گنبد‌ها با نسبت ارتفاع به دهانه ثابت و ارتفاع قوس‌های مختلف در زمین نوع C و با سرعت و شدت آشفستگی مطابق آیین‌نامه ASCE7، شبیه‌سازی عددی شده و مقادیر ضرایب فشار (C_p) بر روی خط مرکزی گنبد در راستای جهت وزش باد، و بر روی حلقه‌های دور گنبد در ارتفاع‌های ۰، ۰/۲۵h، ۰/۵h، ۰/۷۵h و h ارائه شده‌است.

۲- مواد و روش‌ها

معادلات ناور-استوکس که در این شبیه‌سازی مورد استفاده قرار



شکل ۱-آ- گنبد با نسبت ارتفاع به دهانه ۰.۵ با ارتفاع قوس‌های ۰، ۰/۲۵b، ۰/۵b، ۰/۷۵b و b -ب- نمونه‌ی گنبد ساخته شده با ارتفاع قوس کوچکتر از b -ج- نمونه گنبد ساخته شده با قوس صفر

Fig. 1.a. Dome with height – diameter proportion of 0.5 with arch heights of 0.25 ,0b, 0.5b, 0.75b and b. Fig. 1.b. Sample dome made with an arch height of less than b. Fig. 1.c. Sample dome made with zero arch height

عبارت بیان‌کننده‌ی اتلاف ویسکوز نیز توسط معادله زیر و به صورت تانسوری در زیر آمده است.

$$\varphi = \mu \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_j} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \varphi = \mu \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_j} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \quad (9)$$

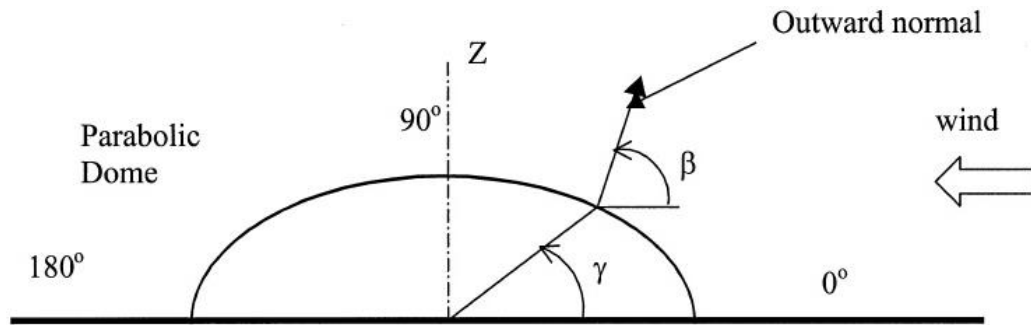
شکل غیرتانسوری معادلات فوق در مرجع [۱۸] موجود است. در این مقاله پنج گنبد با ارتفاع قوس‌های متفاوت و نسبت ارتفاع به دهانه ثابت در مقابل باد مورد تحلیل قرار گرفته است. در این گنبدها ارتفاع قوس به نحوی انتخاب شده‌اند که بازه کاملی، از گنبد با قوس صفر (خط راست) تا نیم دایره را با فواصل یکسان پوشش دهد (شکل ۱-آ). در شکل ۱-ب نمونه‌ای از گنبد واقعی ساخته شده با استفاده از سازه فضاکار و شکل ۱-ج نمونه‌ای از گنبد ساخته شده با قوس صفر ارائه شده است.

در این رابطه C_p گرمای ویژه و T_o دمای کل و K انتقال حرارت، W^V کار ویسکوز، Q_V منبع حرارتی داخلی، φ عبارت بیان‌کننده اتلاف ویسکوز و E^K انرژی جنبشی است. دمای استاتیکی در صورتی که لازم باشد از دمای کل و انرژی جنبشی با رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

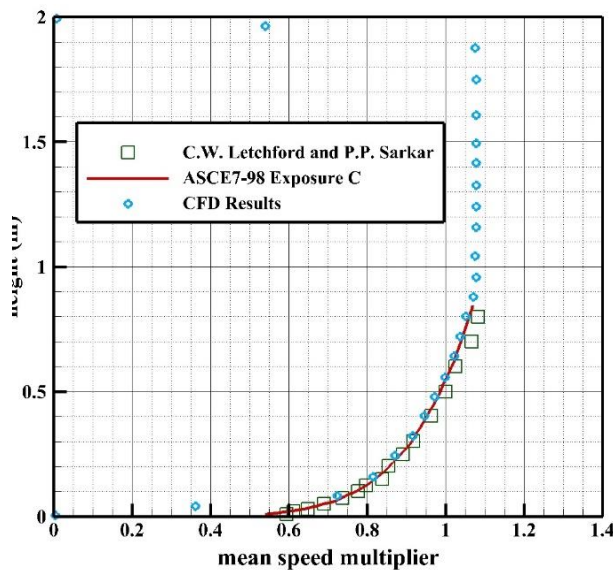
$$T = T_o - \frac{U^2}{2C_p} \quad (7)$$

که در آن U مقدار بردار سرعت سیال می‌باشد. عبارت کار ویسکوز بیانگر کار انجام شده توسط نیروی لزجت بوده و از رابطه زیر که شکلی تانسوری دارد محاسبه می‌شود:

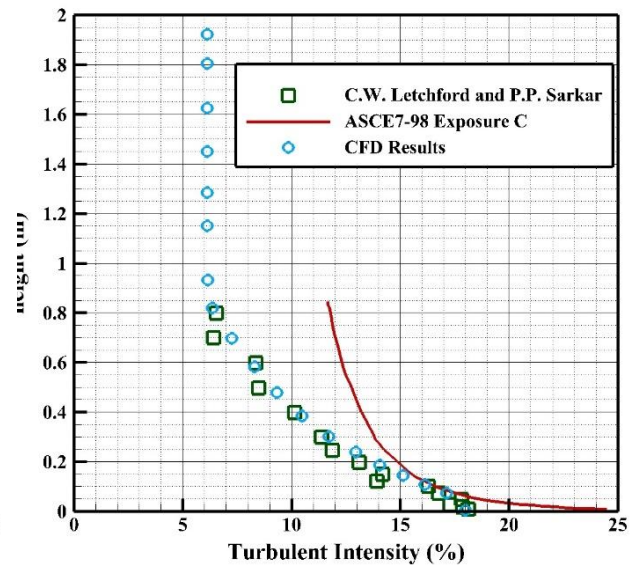
$$W^V = U_j \mu \left[\frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\partial u_j}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_k} \frac{\partial u_k}{\partial x_j} \right] \quad (8)$$



شکل ۲. گنبد مدل آزمایشگاهی لتچفورد و سرکر [۳]
Fig.2. Parabolic dome of Letchford and Sarkar



(۳-ب)



(۳-آ)

شکل ۳. (۳-آ) پروفیل شدت آشفته‌گی ورودی اعمالی و نمودار (۳-ب) پروفیل سرعت ورودی اعمالی، استخراج شده از مدل عددی در مقایسه با پروفیل شدت آشفته‌گی ورودی و پروفیل سرعت ورودی مدل آزمایشگاهی [۳] و آیین‌نامه 98-ASCE7 برای زمین نوع C.

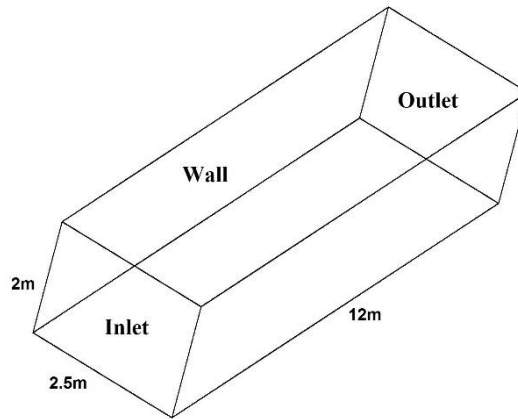
Fig.3. Different numerical inlet profile compared to the wind tunnel measurements and target ASCE 98-7 Exposure C code profiles

۳- شبیه‌سازی عددی و اعتبارسنجی

متر و سرعت باد و میزان آشفته‌گی در نوک گنبد به ترتیب m/s و ۱۸٪ و با مقیاس ۱:۳۰۰ می‌باشد. در این مقاله از زمین نوع C بر اساس آیین‌نامه 98-ASCE7 [۴] استفاده شده‌است. پروفیل سرعت متوسط باد براساس ارتفاع در تونل باد و آیین‌نامه ASCE7-98 و پروفیل سرعت ورودی در نرم افزار در شکل ۳-آ و پروفیل شدت آشفته‌گی در تونل باد و آیین‌نامه 98-ASCE7 و پروفیل شدت آشفته‌گی اعمالی به نرم افزار در شکل ۳-ب نشان داده شده‌است. قابل ذکر است که در نرم افزار امکان اعمال مستقیم پروفیل شدت آشفته‌گی وجود ندارد؛ لذا برای این منظور از پروفیل انرژی جنبشی

در این مطالعه برای مدل سازی از نرم‌افزار ANSYS18.2 و مدل آشفته‌گی RANS-RNG و برای صحت‌سنجی CFD از مقاله‌ی لتچفورد و سرکر [۳] استفاده شده‌است.

برای این‌که از اعتبار محاسبات CFD اطمینان حاصل شود و بتوان از این نتایج استفاده کرد باید نتایج محاسبات CFD با نتایج عملی و آزمایشگاهی مطابقت داده شود تا در صورت کم بودن خطا از آن‌ها استفاده گردد. در این مطالعه برای صحت‌سنجی CFD از مقاله‌ی لتچفورد و سرکر [۳] استفاده شده‌است. قطر پایه گنبد ۰/۴۸



شکل ۴. دامنه جریان شبیه سازی عددی

Fig. 4. Numerical simulation flow amplitude

که S سطح جسم در مقابل جریان و C سطح مقطع تونل باد محاسباتی می‌باشد. از این رو ابعاد دامنه مطابق شکل ۴، $۱۲ \times ۲/۵ \times ۲$ متر در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است با توجه به اینکه هدف این پژوهش بررسی وضعیت بارگذاری سازه‌های گنبدی شکل است و به پاسخ سازه به این بارگذاری پرداخته نمی‌شود و همچنین با در نظر داشتن این مطلب که سازه‌های فضاکار (به طور اخص گنبدها) به صورت گسترده‌ای شامل سازه‌های شبکه‌ای تک لایه و چند لایه و سازه‌های پوسته‌ای می‌شود و ویژگی مشترک تمام این سازه‌ها سختی زیاد آن‌ها بوده و این امر خودش باعث تغییر شکل‌های به طور نسبی کم در این نوع از سازه‌ها می‌گردد؛ از طرفی با توجه به اینکه توزیع فشار سیال روی یک جسم علاوه بر سرعت و خصوصیات آن سیال، به شکل سطح آن جسم وابسته است؛ مدل گنبدها را می‌توان به صورت یک سطح صلب در نظر گرفت. شرایط مرزی در نظر گرفته شده در این شبیه‌سازی در شکل ۴ ارائه شده است.

برای تحلیل حساسیت نتایج به اندازه شبکه، دامنه تحت تعداد شبکه‌های متفاوت مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که دامنه با تعداد $2.49E+06$ شبکه، نزدیکترین جواب را به مدل آزمایشگاهی دارد و پس از آن افزایش تعداد شبکه‌ها تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر نتایج نمی‌گذارد (شکل ۵-ج). در شکل ۵-ب، نمودار C_p مربوط به شبیه‌سازی عددی مدل آزمایشگاهی [۳] و نتایج CFD با تعداد $2.49E+06$ حجم کنترل نشان داده شده است. مقدار C_p از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$C_p = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2}\rho U^2} \quad (14)$$

آشفتگی (K) و نرخ هدرروی انرژی جنبشی آشفتگی (ε) استفاده شده است، که برای تک تک control volume های صفحه ورودی دامنه (Inlet) (شکل ۴) با توجه به ارتفاع آن‌ها اعمال شده است؛ که K از معادله‌ی ۱۰ و ε از معادله‌های ۱۱ و ۱۲ به دست می‌آیند [۱۹].

$$K = \frac{3}{2}(u_{avg}l)^2 \quad (10)$$

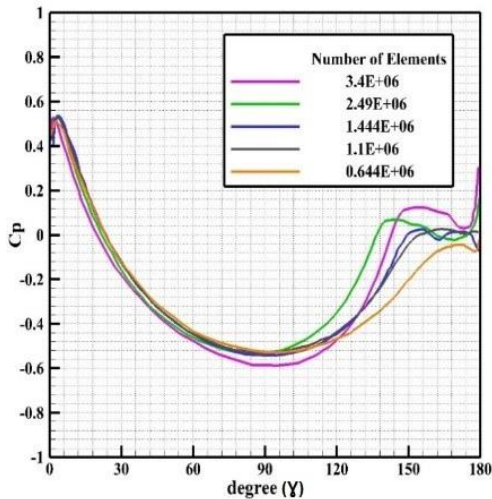
$$\varepsilon = \frac{K^{3/2}}{l} \quad (11)$$

$$l = \frac{0.07L}{C_\mu^{3/4}} \quad (12)$$

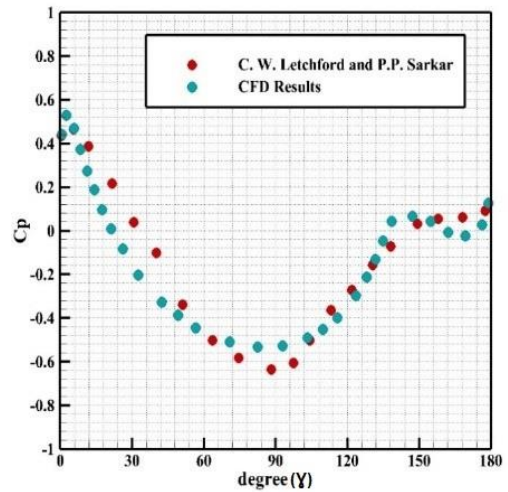
که u_{avg} سرعت متوسط جریان، l شدت آشفتگی، L قطر دامنه، C_μ ثابت ضریب آشفتگی است که توسط لاندر مقدار 0.09 برای این ثابت ارائه شده است [۱۳].

یکی از نکاتی که بایستی در مدل‌سازی یک محیط مورد توجه قرار گیرد، ابعاد دامنه بلوک محاسباتی می‌باشد. این ابعاد بایستی به نحوی انتخاب شود که دیواره‌های جانبی دامنه تاثیری بر جریان عبوری نداشته باشد و همچنین طول دامنه بایستی به نحوی انتخاب شود که شرایط مرزی ورودی و خروجی را ارضا نماید. همچنین نسبت گرفتگی در سطح مقطع تونل باد که طبق رابطه‌ی زیر تعریف می‌شود کمتر از ۲٪ باشد.

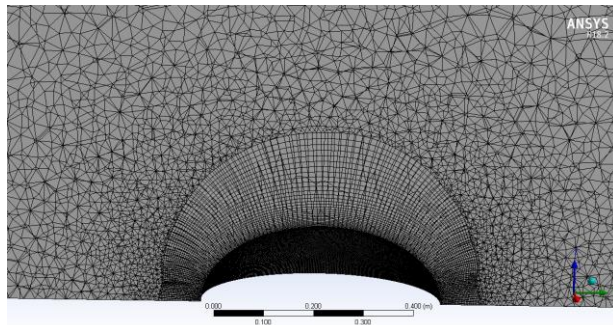
$$\text{نسبت گرفتگی} = \frac{S}{C} \quad (13)$$



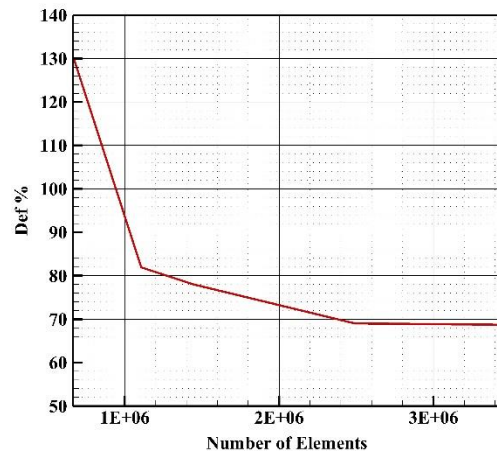
آ-۵



ب-۵



د-۵



ج-۵

شکل ۵- نمودار استقلال از شبکه مربوط به شبیه‌سازی عددی مدل آزمایشگاهی [۳]

Fig. 5. Effect of mesh size on accuracy of the numerical results of dome of Letchford and Sarkar

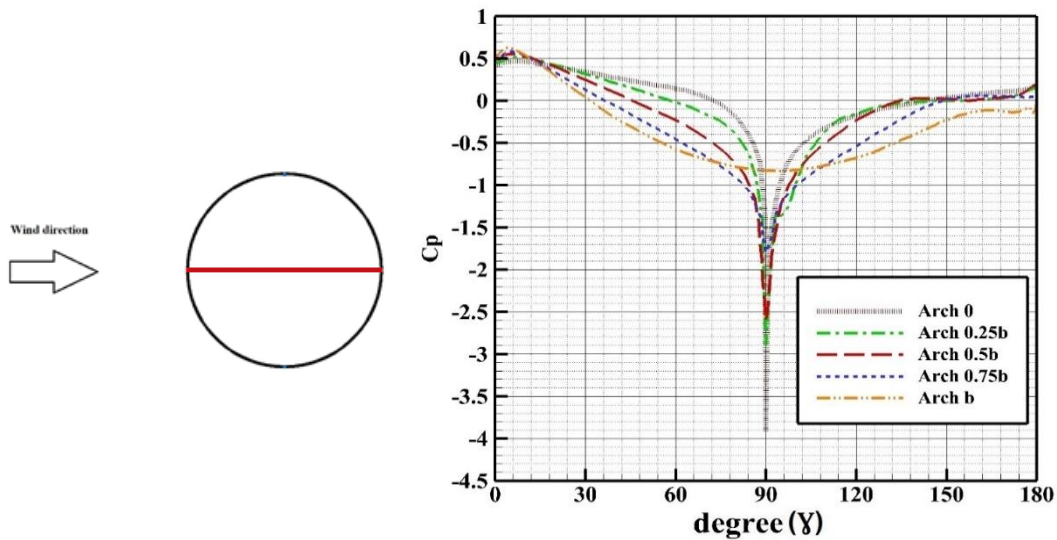
سرعت ورودی، شدت آشفتگی، قطر دهانه، شبکه بندی و سایر متغیرهای ورودی، همانند شبیه سازی گنبد پارابولیک بخش ۳ در نظر گرفته شده‌است. همان‌طور که در شکل ۱-آ مشاهده می‌شود، جهت بررسی دامنه کاملی از گنبدها با ارتفاع قوس‌های مختلف و نسبت ارتفاع به دهانه ثابت، حد فاصل گنبد نیم دایره با گنبد تشکیل شده از خط صاف متصل کننده راس گنبد به پایه گنبد به چهار قسمت مساوی تقسیم شده و در نتیجه پنج گنبد با نسبت ارتفاع به دهانه ثابت و قوس‌های متفاوت تشکیل شده‌است. استفاده از این روش بازه کامل گنبدها را پوشش می‌دهد. گنبدهای ساخته شده با این روش را با توجه به ارتفاع قوس به ترتیب ۰/۲۵b، ۰/۵b، ۰/۷۵b

که در آن $\overline{\Delta P}$ تفاوت فشار روی سطح و فشار مرجع در تونل باد، همان فشار نسبی است؛ و \bar{U} سرعت متوسط باد و ρ چگالی می‌باشد.

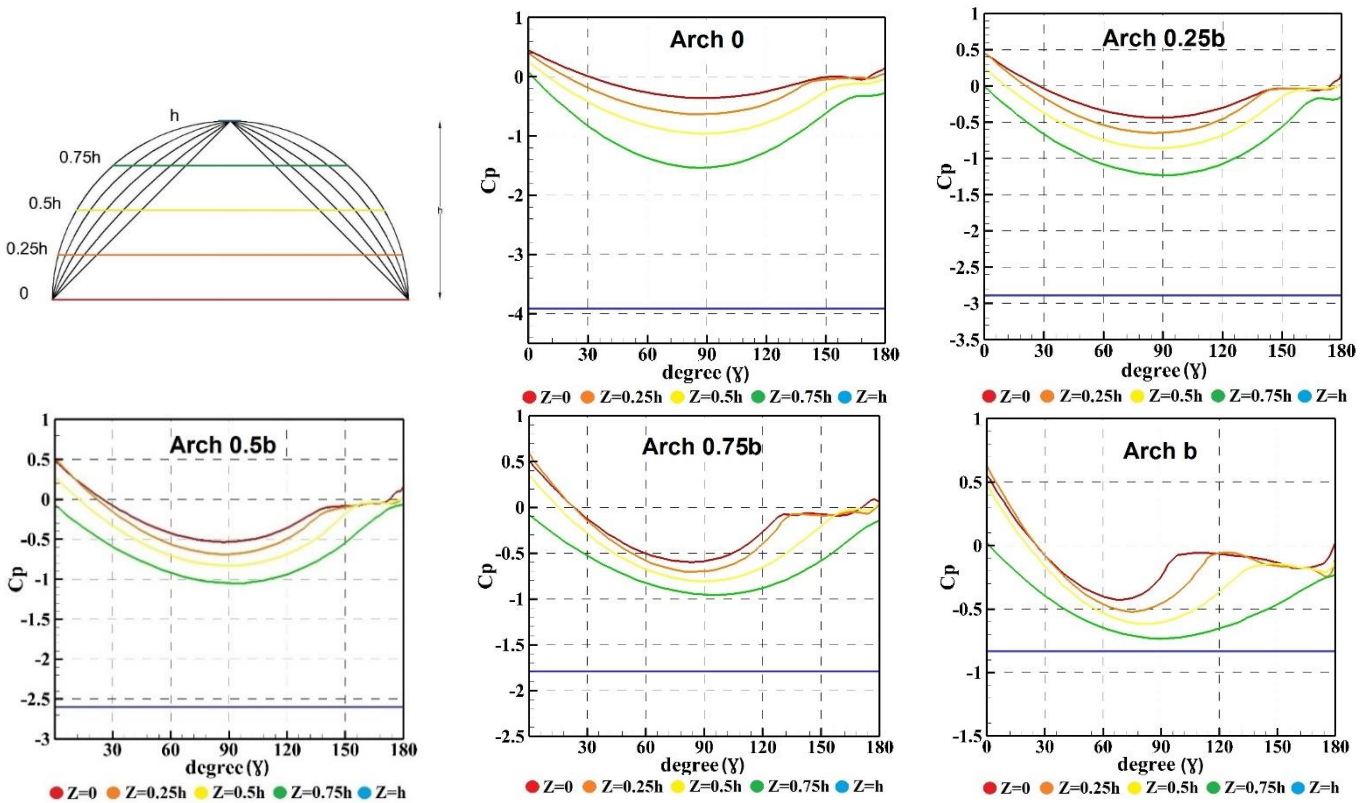
در شکل ۵-د برشی از دامنه مربوط به شبیه سازی عددی ارائه شده‌است. همان‌طور که در شکل ۵-د مشخص است، در اطراف گنبد جهت افزایش دقت محاسبات از مش لایه مرزی استفاده شده‌است.

۴- ارائه و تحلیل نتایج

در این تحقیق، برای بررسی تاثیر قوس بر جریان باد روی گنبدها، از نسبت ثابت ارتفاع به دهانه ۰/۵ استفاده شده‌است. دامنه جریان،



شکل ۶. نمودار ضریب فشار بر روی خط مرکزی در راستای جهت وزش باد برای گنبدهای ۰، ۰،۲۵b، ۰،۵b، ۰،۷۵b و b
 Fig. 6. The polygon for C_p at the central line parallel to the wind direction for domes 0.25, 0b, 0.5b and b.



شکل ۷. نمودارهای ضریب فشار حلقه های دور گنبد در گنبد های ۰، ۰،۲۵b، ۰،۵b، ۰،۷۵b و b
 Fig.-7 C_p related to the height for domes 0.25, 0b, 0.5b and b.

در نمودار دوم C_p در حلقه های دور گنبد در ارتفاع های ۰، ۰،۲۵h، ۰،۵h، ۰،۷۵h و h، به ترتیب با رنگ های قرمز، نارنجی، زرد، سبز و آبی ارائه شده است (شکل ۷). با توجه به متقارن بودن گنبد، در شکل ۷ فقط مقادیر C_p در یک سمت آن نشان داده شده است. جهت وزش

و b نام گذاری شده اند. برای تحلیل جریان باد بر روی گنبدها از نمودار C_p استفاده شده است. مقادیر ضریب فشار برای هر گنبد در دو نمودار ارائه شده است. در نمودار اول C_p برای زوایای ۰ تا ۱۸۰ درجه بر روی خط مرکزی در راستای جهت وزش باد، (شکل ۶) و

جدول ۱. مقادیر حداقل و حداکثر ضریب فشار بر روی خط مرکزی در راستای جهت وزش باد
Table 1. Min and max values of C_p on the central line parallel to the wind direction.

نام گنبد	نسبت ارتفاع به دهانه	حداقل ضریب فشار	$Min C_p - Arc0$	حدکثر ضریب فشار	$Max C_p - Arc0$	$180 - C_p(-)$ 180
			Arc0		Arc0	
قوس 0	0.5	-3.91	0	0.473	0	62.22%
قوس 0.25b	0.5	-2.89	26%	0.518	9.51%	52.41%
قوس 0.5b	0.5	-2.6	33.50%	0.558	17.97%	41.66%
قوس 0.75b	0.5	-1.79	54.22%	0.583	23.26%	37.22%
قوس b	0.5	-0.833	78.69%	0.631	33.40%	17.22%

ارتفاع قوس ۰,۷۵b، در زاویه ۳۷ درجه، در گنبد با ارتفاع قوس b در زاویه ۳۱ درجه در جلو گنبد رخ می‌دهد. مقایسه نقطه ضریب فشار صفر در گنبدها نشان می‌دهد که با افزایش قوس گنبدها، این نقطه به سمت جلو گنبد حرکت می‌کند، پس از این نقطه C_p گنبد منفی شده و وارد ناحیه مکش می‌شود. این کاهش ضریب فشار تا راس گنبد ادامه می‌یابد، تا اینکه در راس گنبد به حداقل خود می‌رسد. در پشت گنبد نسبت به جهت باد، با افزایش ارتفاع قوس سطح کمتری از آن تحت فشار قرار می‌گیرد، به طوریکه در گنبد با ارتفاع قوس b، پشت گنبد نسبت به جهت باد، کاملاً تحت مکش قرار می‌گیرد. این مطلب بیانگر آن است که با افزایش ارتفاع قوس گنبد، سطح کمتری از گنبد تحت فشار قرار می‌گیرد. درصد سطح تحت فشار بر روی خط مرکزی در راستای جهت وزش باد و مقادیر حداقل C_p و درصد اختلاف مقادیر حداقل C_p با گنبد پایه (قوس صفر) برای این گنبدها در جدول ۱ ارائه شده‌است. در تمامی گنبدهای تک قوسی حداقل C_p در راس گنبد اتفاق می‌افتد. مقایسه حداقل C_p نشان می‌دهد که کاهش ارتفاع قوس سبب کاهش چشمگیر ضریب فشار و در نتیجه افزایش زیاد مکش در راس گنبدها می‌شود؛ نمودار C_p بر روی خط مرکزی در راستای جهت وزش باد نشان می‌دهد که تغییرات C_p در نزدیکی راس گنبد به طور ناگهانی بوده و با افزایش ارتفاع قوس شیب نمودار ملایم تر می‌شود. در واقع با توجه به کاهش سطح گنبدها با نزدیک شدن به راس گنبد، افزایش ناگهانی مکش در راس گنبد تنها در محدوده کوچکی اتفاق می‌افتد، که سطح بسیار کمی از کل سطح

باد در تمام نمودارها از چپ به راست می‌باشد. بررسی نمودار ضریب فشار بر روی خط مرکزی در راستای جهت وزش باد نشان می‌دهد (شکل ۶)، در هر پنج گنبد، حداکثر و حداقل C_p بر روی خط مرکزی در راستای جهت وزش باد رخ می‌دهد؛ مقادیر حداقل و حداکثر C_p گنبدهای با قوس های متفاوت و درصد اختلاف آن ها نسبت به گنبد پایه (قوس صفر) در جدول ۱ ارائه شده‌است. بررسی این نمودارها نشان می‌دهد، C_p از زاویه ۰ تا حدود ۶ درجه افزایش می‌یابد، و حداکثر C_p در این نقطه رخ می‌دهد؛ که علت این امر تماس زاویه صفر درجه با زمین می‌باشد که باعث کاهش فشار در این نقطه شده‌است. مقایسه حداکثر C_p بر روی خط مرکزی در راستای جهت وزش باد نشان می‌دهد که افزایش ارتفاع قوس سبب افزایش حداکثر C_p در جلو گنبدها، رو به باد، می‌شود. اما از زاویه ۶ درجه تا نزدیکی راس گنبد افزایش ارتفاع قوس گنبد باعث کاهش C_p می‌شود، به طوریکه هر چه ارتفاع قوس گنبد افزایش می‌یابد سطح بیشتری از گنبد تحت مکش قرار می‌گیرد. اما در محدوده کوچکی در نزدیکی راس گنبد که حداقل C_p در آن نقطه رخ می‌دهد، که سطح کمی از گنبد را در بر می‌گیرد، افزایش قوس باعث افزایش C_p می‌شود.

افزایش ارتفاع قوس باعث می‌شود که گنبد در زاویه کمتری تحت مکش قرار گیرد به طوریکه ضریب فشار صفر در گنبد با ارتفاع قوس صفر در زاویه ۷۲ درجه، در گنبد با ارتفاع قوس ۰,۲۵b، در زاویه ۵۷ درجه، در گنبد با ارتفاع قوس ۰,۵b، در زاویه ۴۵ درجه، در گنبد با

جدول ۲. قدرمطلق مقادیر ضریب فشار اصلاح شده در حلقه های دور گنبدها

Table 2. Absolute values of modified C_p relative to the rings around the dome

نام گنبد	0.25h - 0	0.25h - 0.5h	0.5h - 0.75h	h - 0.75h
قوس 0	0.61	0.93	1.52	3.91
قوس 0.25b	0.62	0.85	1.21	2.89
قوس 0.5b	0.69	0.82	1.08	2.60
قوس 0.75b	0.70	0.80	0.94	1.79
قوس b	0.63	0.63	0.74	0.83

حلقه های دور گنبد با ارتفاع صفر تا $0.25h$ بسیار بیشتر از سطح محصور بین حلقه های دور گنبد با ارتفاع های $0.5h$ تا $0.75h$ است. بررسی مقادیر ضریب فشار اصلاح شده نشان می دهد که در گنبد با ارتفاع قوس b کمترین مقدار نیرو از سمت باد به سازه وارد می شود، پس از آن به ترتیب گنبدها با ارتفاع قوس $0.25b$ ، $0.5b$ و $0.75b$ بهینه ترین ارتفاع قوس گنبد در مقابل نیروی باد می باشند.

۵- خلاصه و نتیجه گیری

در این مقاله تحقیق جامع بر روی گنبدهای تک قوسی انجام شد. از این رو جریان لایه مرزی بر روی تمام قوس های ممکن گنبد با نسبت ارتفاع به دهانه ثابت مورد بررسی قرار گرفت و تاثیر ارتفاع قوس گنبد در مقابل باد با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی بررسی شد. صحت سنجی نشان داد که مدل آشفتگی RANS-RNG مدل مناسبی جهت مدل سازی عددی گنبدها می باشد. نتایج این تحقیق نشان داد که ارتفاع قوس نقش بسزایی در میزان بار جانبی باد وارد بر گنبدها دارد. در گنبدها حداکثر و حداقل C_p بر روی خط مرکزی در راستای جهت وزش باد رخ می دهد. در گنبدها حداقل C_p در راس گنبد و حداکثر C_p در جلو گنبد، رو به باد، اتفاق می افتد و هرچه ارتفاع قوس افزایش یابد، حداقل C_p کاهش یافته و حداکثر C_p افزایش می یابد. همچنین با افزایش ارتفاع قوس سطح تحت فشار کاهش می یابد و هرچه ارتفاع قوس افزایش می یابد، حداقل C_p در ارتفاع های مختلف گنبد به سمت جلو گنبد حرکت می کنند. نتایج این مقاله (با توجه به این مهم که هر چه به سمت نوک گنبد نزدیکتر شویم سطح مقطع گنبدها کاهش می یابد) نشان می دهد که در گنبد با ارتفاع قوس b کمترین مقدار نیرو از سمت باد به سازه وارد می شود،

گنبد را در بر می گیرد، به طوریکه در گنبد با ارتفاع قوس صفر این افزایش ناگهانی مکش در فاصله بین زوایای 86° تا 102° درجه اتفاق می افتد، که در گنبد با قوس b با از بین رفتن تیزی راس گنبد، این افزایش ناگهانی مکش در راس نیز حذف می شود. با وجود رخ دادن حداکثر مقادیر نیروی باد بر روی خط مرکزی در راستای وزش باد، اما در انتخاب بهینه ترین گنبد نمی توان از مقادیر C_p در راستای جهت وزش باد به تنهایی استفاده کرد؛ که برای این منظور از مقادیر C_p در حلقه های دور گنبد استفاده می شود.

مقایسه ی مقادیر ضریب فشار بر روی نمودار حلقه های دور گنبد در ارتفاع های 0 ، $0.25h$ ، $0.5h$ ، $0.75h$ و h نشان می دهد (شکل ۷) که حداقل C_p در این ارتفاع ها بر روی خط مرکزی در راستای عمود بر جهت وزش باد رخ می دهد، که با افزایش ارتفاع قوس در گنبدها به سمت جلو گنبد، رو به باد، حرکت می کنند.

باید به این نکته توجه کرد که در طبیعت جهت قطعی وزش باد مشخص نیست. لذا بایستی این موضوع در طراحی مد نظر قرار گیرد، لذا جهت استفاده برای طراحی نیاز به اصلاح می باشد؛ این اصلاح به نحوی انجام می شود که قدرمطلق بیشترین مقدار ضریب فشار مربوط به سطح محصور بین حلقه بالا و پایین هر سطح انتخاب می شود. در جدول ۲ مقادیر ضریب فشار اصلاح شده جهت طراحی این گنبدها با ارتفاع های مختلف با نسبت ارتفاع به دهانه 0.5 ارائه شده است. با استفاده از این مقادیر می توان بهترین هندسه برای مناطق مختلف را در ترکیب با بار ثقلی وارده بر سازه به دست آورد. برای انتخاب بهینه ترین گنبد تنها تحت نیروی باد (بدون حضور بارهای ثقلی) باید به این نکته توجه کرد که سطح گنبد در حلقه های دور گنبد با افزایش ارتفاع کاهش می یابد، یعنی به عنوان مثال سطح محصور بین

BAM EARTHQUAKE, ASIAN JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING (BUILDING AND HOUSING), (4-3)5 .- (2004)

- [2] E.J. Maher, Wind loads on basic dome shapes, Journal of the Structural Division. 228-219 (1965) (3)91 ,
- [3] C. Letchford, P. Sarkar, Mean and fluctuating wind loads on rough and smooth parabolic domes, Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, (2000) (1)88 .117-101
- [4] A.S.o.C. Engineers, ASCE98-7 Standard-Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, in, American Society of Civil Engineers Reston, Virginia, .1999
- [5] C. Cheng, C. Fu, Characteristic of wind loads on a hemispherical dome in smooth flow and turbulent boundary layer flow, Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, .344-328 (2010) (7-6)98
- [6] M.W. Kuenstle, Escarpment Study in a Virtual Flow Environment A Comparative Analysis of a Single Building Type Modeled in Varying Topological Situations [Escarpment Study in a Virtual Flow Environment. A Comparative Analysis of a Single Building Type Modeled in Varying Topological Situations], (. (2002
- [7] A. Horr, M. Safi, S. Alavinasab, Computational wind tunnel analyses for large domes using CFD theory, International Journal of Space Structures, .104-85 (2003) (2)18
- [8] J. Lin, C. Chang, N. Shang, Computational Simulation and Comparison of the Effect of Different Surroundings on Wind Loads on Domed Structures, Tamkang Journal of Science and Engineering, .291 (2006) (3)9
- [9] N. Kharoua, L. Khezzar, Large eddy simulation study of turbulent flow around smooth and rough domes, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, .2700-2686 (2013) (12)227
- [10] I. Vizotto, A.M. Ferreira, Wind force coefficients on hexagonal free form shell, Engineering Structures, 83 .29-17 (2015)
- [11] H. Sadeghi, M. Heristchian, A. Aziminejad, H. Nooshin, Wind effect on grooved and scallop domes, Engineering Structures, .450-436 (2017) 148

پس از آن به ترتیب گنبد‌ها با ارتفاع قوس $0.75b$ ، $0.5b$ و $0.25b$ بهینه‌ترین گنبد در مقابل نیروی باد می‌باشند.

فهرست علائم:

$$C_p = \text{ضریب فشار}$$

$$C_{\mu} = \text{ضریب نوع زمین}$$

$$E = \text{مدول یانگ}$$

$$E^k = \text{انرژی جنبشی}$$

$$g_i = \text{شتاب جاذبه زمین}$$

$$G = \text{مدول برشی}$$

$$I = \text{شدت آشفته‌گی}$$

$$K = \text{ضریب انتقال حرارت}$$

$$P = \text{فشار جریان}$$

$$Re = \text{عدد رینولدز}$$

$$R_i = \text{مولفه‌های توزیع مقاومت؛}$$

$$T_i = \text{اجزای افت ویسکوز}$$

$$T_0 = \text{دمای کل}$$

$$V_i = \text{مولفه‌های سرعت}$$

$$U_{\bar{u}} = \text{متوسط سرعت}$$

$$W^V = \text{مولفه‌ی افت ویسکوز}$$

$$\varepsilon = \text{کرنش}$$

$$\Delta P = \text{تفاضل فشار}$$

$$\Phi = \text{گرمای تولید شده در اثر ویسکوزیته}$$

$$\tau_{ij} = \text{تانسور تنش}$$

$$u_i = \text{سرعت‌های متعامد}$$

$$\mu = \text{ویسکوزیته دینامیکی}$$

$$\mu_e = \text{ویسکوزیته موثر}$$

$$\lambda = \text{ضریب دوم ویسکوزیته}$$

$$\sigma = \text{تنش}$$

$$\rho = \text{دانسیته}$$

مراجع

- [1] T. MAHDI, PERFORMANCE OF TRADITIONAL ARCHES, VAULTS AND DOMES IN THE 2003

- on Barrel with use of numerical simulation, in, Shahid bahonar kerman university, .2017
- [16]A. Bond, A. Harris, Decoding eurocode 7, CRC Press, .2006
- [17]O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor, R.L. Taylor, R.L. Taylor, The finite element method: solid mechanics, Butterworth-heinemann, .2000
- [18]J.N. Reddy, D.K. Gartling, The finite element method in heat transfer and fluid dynamics, CRC press, .2010
- [19]A. Fluent, * ANSYS [ANSYS Fluent], 18.2, Help System, User's Guide/Theory Guide, ANSYS, Inc., Canonsburg, PA, accessed Sept, .2019 (2018) 9
- [12]Y. Zhou, Y. Li ,Y. Zhang, A. Yoshida, Characteristics of Wind Load on Spatial Structures with Typical Shapes due to Aerodynamic Geometrical Parameters and Terrain Type, Advances in Civil Engineering, .(2018) 2018
- [13]m. Ebrahimi , m. yahyaei Investigation of opening effect on behavior of domes under the wind load using computational wind tunne, .2007
- [14]Y. Sun, Y. Wu, Y. Qiu, Y. Tamura, Effects of free-stream turbulence and Reynolds number on the aerodynamic characteristics of a semicylindrical roof, Journal of Structural Engineering, .04014230 (2015) (9)141
- [15]F. Salajegheh , E. Salajegheh Computation of wind load

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. Khosrowjerdi, H. Sarkardeh, Effect of arch height on wind load in shape dome structure, Amirkabir J. Civil Eng., 53(2) (2021) 627-638.

DOI: [10.22060/ceej.2020.16424.6220](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.16424.6220)

