



## تعیین ضرایب فشار باد بر روی گنبدهای کروی موسوم به گنبد پیازی (تعریف شده در استاندارد ۴۰۰)

رضا قلی زاده، حسین صادقی\*

گروه مهندسی عمران، واحد دامغان، دانشگاه آزاد اسلامی، دامغان، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۲۸

بازنگری: ۱۴۰۱/۰۲/۱۱

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۱۹

ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۷/۲۴

### کلمات کلیدی:

ضریب فشار باد

دینامیک سیالات محاسباتی

نیروی باد

تونل باد

گنبدهای پیازی

**خلاصه:** نیروی باد یکی از بارهای جانبی در طراحی سازه‌ها محسوب می‌شود، یکی از پارامترهای محاسبه نیروی باد بر روی سازه‌ها، ضریب فشار (CP) نام دارد که به هندسه ساختمان مرتبط است، در آیین‌نامه‌ها ضریب فشار ساختمان‌های متعارف ارائه شده است، در صورت عدم وجود این ضرایب در آیین‌نامه‌ها باید از آزمایش تونل باد یا مدل‌سازی عددی بهره گرفت، در این تحقیق ضرایب فشار باد (CP) بر روی گنبدهای کروی موسوم به گنبد پیازی که در آیین‌نامه سازه‌های فضاکار (نشریه ۴۰۰) تعریف شده است پرداخته می‌شود، در مدل‌سازی از روش عددی مبتنی بر دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) برای شبیه‌سازی جریان باد استفاده شده است. مدل مورد استفاده دینامیک سیالات محاسباتی در این تحقیق، مدل  $K-\epsilon$  (Standard) می‌باشد. همچنین به منظور انجام صحت‌سنجی نتایج، ابتدا گنبد کروی با قطر ۲۰ سانتی‌متر مدل‌سازی می‌شود و نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی با نتایج حاصل از آزمایش تونل باد ارائه شده در مرجع [۲] مقایسه شده است. پس از حصول اطمینان از نتایج، مدل‌سازی عددی، بر روی چهار گنبد با نسبت ارتفاع به دهانه مختلف انجام شده است، با افزایش نسبت ارتفاع به دهانه ماکزیمم فشار منفی (مکش) که در زاویه  $\theta=90^\circ$  حاصل می‌شود، افزایش می‌یابد به صورتی که در گنبد ۱۲۲ این مقدار به  $-2/24$  می‌رسد، همچنین مشاهده می‌شود که در زاویه  $15^\circ$  تا  $18^\circ$  درجه ضریب فشار برای تمامی گنبدها ثابت است و در نهایت معادله حاکم بر ضرایب فشار باد این نوع گنبدها ارائه شده است.

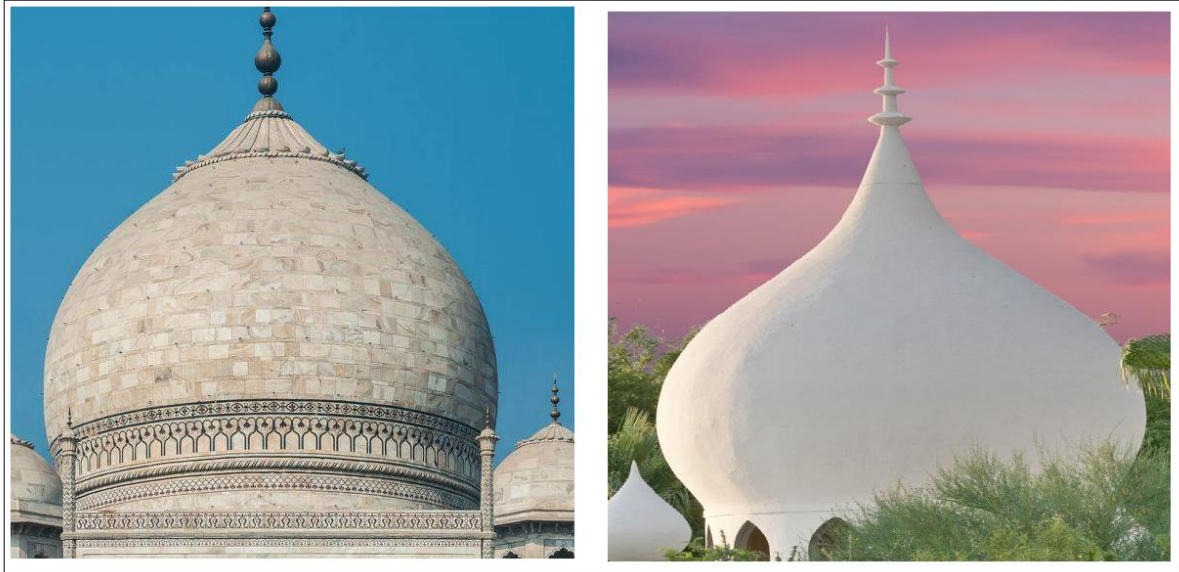
### ۱- مقدمه

بلوکن (۲۰۱۴) خلاصه‌ای از پیشینه ۵۰ ساله مهندسی باد و پیشرفت‌هایی که در این زمینه رخ داده است پرداخته است، همچنین گذشته، حال و آینده این زمینه از مهندسی را بررسی کرده است. در این مقاله، چندین مطالعه در مورد سازه‌های مختلف در زمینه‌ی محاسبه ضرایب فشار باد با استفاده از روش عددی مورد بررسی قرار گرفته شده است [۱]. چنگ و فو (۲۰۱۰) ضرایب فشار باد بر روی گنبدهای کروی را با استفاده از آزمایش تونل باد مورد بررسی قرار داده و تغییرات این ضرایب را با توجه به تغییرات عدد رینولدز بررسی کردند در این تحقیق مشاهده شد که ضرایب فشار باد در گنبدهای با قطر ۵۰ و ۱۲۰ سانتی‌متر وابستگی کمی به عدد رینولدز وجود دارد [۲]. چوولا و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از آزمایش تونل باد تغییرات ضرایب فشار باد بر روی سقف‌های استوانه‌ای را مورد ارزیابی قرار دادند [۳]. کاترین و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از روش‌های عددی، ضرایب فشار باد را بر روی سقف‌های استوانه‌ای تک دهانه و چند دهانه به صورت دو بعدی بررسی کردند [۴]. لین ژائو و همکاران (۲۰۱۶) ضرایب فشار باد بر روی سازه

استفاده گنبد برای پوشش انواع سقف‌ها، به ویژه برای پوشش ورزشگاه‌ها و سالن‌های اجتماعات مرسوم می‌باشد، یکی از انواع گنبدهای رایج، گنبد پیازی (مطابق استاندارد ۴۰۰) است. شکل ۱، نمای خارجی دو گنبد پیازی را نشان می‌دهد. از دیرباز، در سراسر دنیا گنبدهای کروی با مصالح بنایی مثل آجر و سنگ نیز ساخته شده است، در تعیین ضرایب فشار باد بر روی این گنبدها با توجه به اینکه هندسه این گنبدها نزدیک به گنبد کروی می‌باشد معمولاً از ضرایب فشار باد گنبدهای کروی در تعیین ضرایب فشار باد در طراحی این گنبدها بهره گرفته می‌شود، با توجه به عدم وجود ضرایب فشار باد برای این نوع گنبدها در آیین‌نامه‌ها در این مقاله ضرایب فشار باد با استفاده از تحلیل دینامیکی سیالات و مدل‌سازی در نرم‌افزار ANSYS استفاده می‌شود. در آیین‌نامه سازه‌های فضا کار ایران، (نشریه شماره ۴۰۰ سازمان برنامه و بودجه کشور)، مثال‌هایی از این نوع گنبد ارائه شده است.

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Hossein\_sadeghi1984@yahoo.com



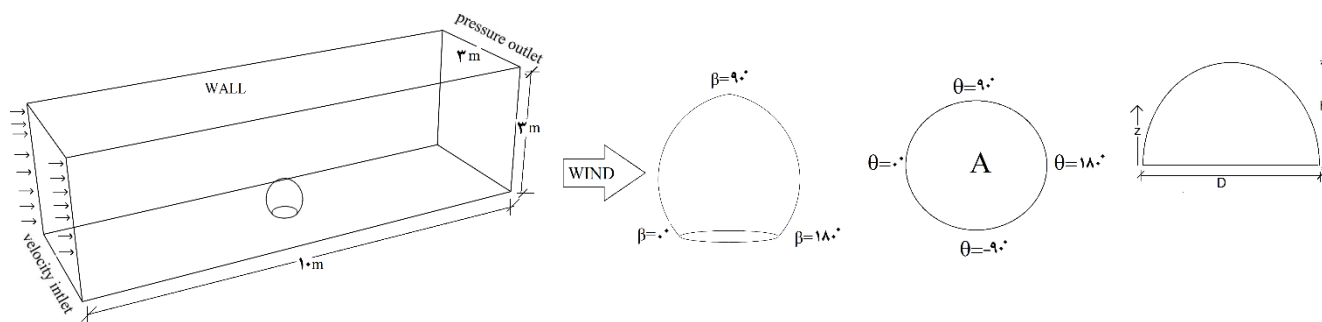


شکل ۱. دو نمونه از گنبد‌های کروی موسوم به گنبد پیازی

Fig. 1. Two examples of spherical domes known as onion domes

کیم و همکاران (۲۰۱۹) ضرایب فشار باد بر روی گلخانه‌های تک دهانه با استفاده از آزمایش تونل باد به دست آوردند [۱۳]. هیو و همکاران (۲۰۱۹) اثر Uplift و همچنین کماتش مخازن ذخیره را تحت اثر بار باد مورد بررسی قرار دادند [۱۴]. چن و همکاران (۲۰۱۹) به تحقیق در مورد اثر فشار خارجی و فشار داخلی بر روی گنبد‌های با دهانه زیاد و ضخامت کم پرداخت و در این تحقیق همچنین اثر هم‌جواری سازه‌ها نیز مورد مطالعه قرار گرفت [۱۵]. کیم و همکاران (۲۰۱۹) ضرایب بیشینه فشار باد بر روی سقف‌های گنبدی برای طراحی پوشش سقف به دست آوردند [۱۶]. اناجار و همکاران (۲۰۲۱) یک روش محاسباتی مناسب برای انجام تحلیل غیرخطی سقف‌ها برای تعیین نیروی اتصال سقف در مقابل بار باد ارائه داده است [۱۷]. بانی و همکاران (۲۰۲۲) ضریب فشار باد بر روی چلیک‌ها را مورد بررسی قرار داده و معادله حاکم بر این ضرایب را ارائه دادند [۱۸]. داورزنی و همکاران (۲۰۲۲) با استفاده از آزمایش تونل باد و مدل‌سازی عددی ضرایب فشار باد بر روی مخازن ذخیره استوانه‌ای با چهار نسبت ارتفاع به قطر ۰/۲۵، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ را بررسی کردند و معادله حاکم بر این ضرایب را ارائه دادند [۱۹]. مطابق مبحث ششم مقررات ملی ساختمان ایران، در ساختمان‌ها و سازه‌های مشابه که در آن‌ها نسبت ارتفاع به کوچک‌ترین بعد سازه بیشتر از ۵ است و در ساختمان‌ها و سازه‌های مشابه که فرکانس طبیعی مود اول آن‌ها کمتر از ۱ هرتز است،

برج‌های خنک‌کن با استفاده از آزمایش تونل باد ارائه دادند، همچنین در این بررسی اثر هم‌جواری برج‌ها نسبت به هم مورد بررسی قرار گرفت [۵]. کیو و همکاران (۲۰۱۴) در یک بررسی جامع مقادیر ضرایب فشار باد را با استفاده از آزمایش تونل باد بر روی سقف‌های استوانه‌ای با توجه به تغییرات عدد رینولدز به دست آوردند و همچنین روابط حاکم بر این ضرایب فشار را نیز ارائه شده است [۶]. ریزو (۲۰۱۲) ضرایب فشار باد بر روی سقف‌های هذلولوی با پلان بیضی شکل را به دست آورد [۷]. صادقی و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از مدل‌سازی عددی ضرایب فشار باد بر روی گنبد‌های اسکالپ را ارائه داده‌اند، همچنین در این تحقیق معادله حاکم بر ضرایب فشار باد گنبد‌های کروی و گنبد‌های اسکالپ ارائه شده است [۸]. صادقی و همکاران (۲۰۱۸) با در نظر گرفتن اثر هم‌جواری، شکل‌پذیری گنبد‌های کروی ضرایب فشار باد بر روی گنبد‌های کروی را ارائه داده‌اند [۹]. ویزوتو (۲۰۱۵) ضرایب فشار باد بر روی سقف‌های شش ضلعی با استفاده از آزمایش تونل باد را به دست آورده‌اند [۱۰]. رجبی و همکاران (۲۰۲۲) ساختمان‌های با پلان Y شکل را تحت اثر بار باد با استفاده از روش آزمایش تونل باد و مدل‌سازی عددی مورد بررسی قرار دادند [۱۱]. لیو و همکاران (۲۰۱۱) اثرات بار باد را بر روی یک سازه با دهانه زیاد بررسی کردند در این مطالعه از نتایج آزمایش تونل باد و اندازه‌گیری در محل بهره گرفته شده است [۱۲].



شکل ۲. شرایط مرزی به همراه ابعاد تونل باد جهت مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار ANSYS

Fig. 2. Boundary conditions and wind tunnel dimensions for numerical modeling in ANSYS software

از سازه (خارج از لایه مرزی) اندازه‌گیری می‌شود. بنابراین ضریب فشار بدون بعد  $C_p$  به صورت معادله (۲) تعریف می‌شود.

$$C_p = \frac{P - P_0}{\frac{1}{2} \rho u^2} \quad (2)$$

در معادله (۲)،  $P - P_0$  نشان دهنده‌ی اختلاف بین فشار محلی و فشار در نقطه‌ای دور از جسم در بالادست  $P_0$  است و  $\frac{1}{2} \rho U^2$  فشار دینامیکی متوسط در فاصله دور از بالادست جریان می‌باشد. در ۵۰ سال گذشته، روش محاسباتی در مهندسی باد (CWE) به عنوان یکی از شاخه‌های دینامیک سیالات محاسباتی برای تخمین اثر متقابل بین باد و سازه‌ها به صورت روشی عددی در برنامه‌های کاربردی پیشرفت چشمگیری داشته است، روش‌هایی از قبیل شبیه‌سازی عددی مستقیم (DNS) روش مبتنی بر معادلات ناویر-استوکس میانگین‌گیری شده از روش رینولدز (RANS) و در نهایت شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES)<sup>۲</sup> به عنوان روش‌های حل معادلات محسوب می‌شود.

## ۲- راستی آزمایی مدل‌سازی عددی

در این بخش با هدف راستی آزمایی نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی، نتایج حاصل از آزمایش تونل باد بر روی گنبد کروی گزارش شده از مرجع [۲] مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی با نتایج مرجع مذکور مقایسه شده‌اند. سازه مذکور دارای قطر ۲۰۰ میلی‌متر می‌باشد.

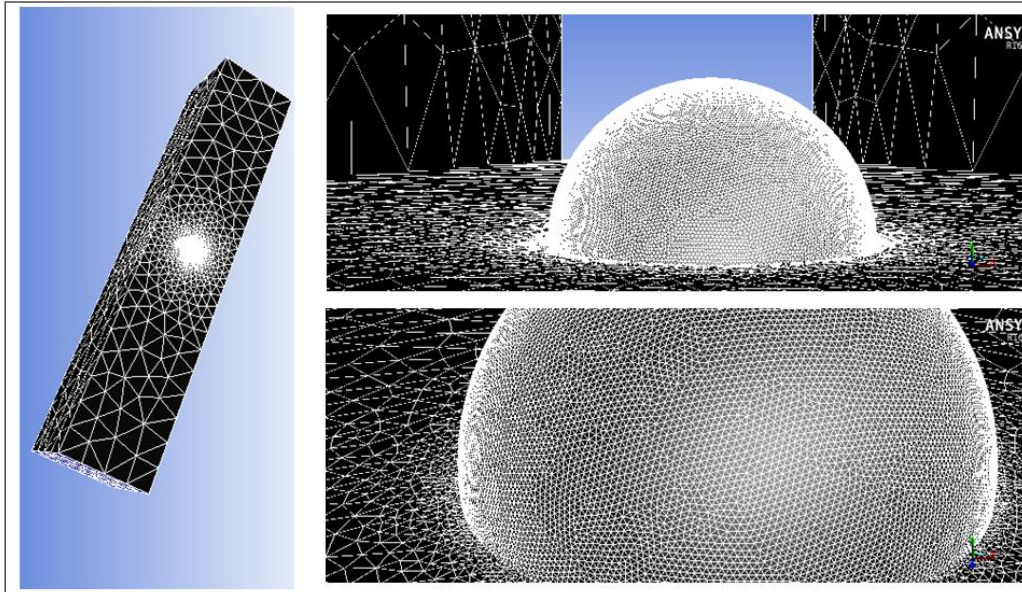
انجام آنالیز دینامیکی سازه الزامی است. بر اساس مبحث ششم مقررات ملی ساختمان نیروی باد با استفاده از معادله (۱) به دست می‌آید، ضریب فشار ( $C_p$ ) وابسته به هندسه ساختمان می‌باشد که مقادیر این ضریب در آیین‌نامه‌های مختلف موجود است. این ضریب توسط تحلیل‌های دینامیکی رفتار جریان باد به دست می‌آید.

$$P = I_w q C_e C_g C_p \quad (1)$$

در معادله ۱،  $P$ : فشار خارجی است که به صورت استاتیکی و عمود بر سطح وارد می‌شود که می‌تواند به صورت فشار وارده بر سطح یا مکش در جهت خارج از سطح باشد.  $I_w$ : ضریب اهمیت ساختمان،  $q$ : فشار متناظر با سرعت مبنای  $C_e$ : ضریب بادگیری،  $C_g$ : ضریب تندباد،  $C_p$ : ضریب فشار بیرونی میانگین‌گیری شده در سطح مورد نظر می‌باشد. فشار خالص باد وارد بر کل ساختمان یا سازه از جمع جبری فشار بر سطوح رو به باد و پشت به باد و یا در بعضی موارد از جمع فشار و مکش سطوح حاصل می‌شود. در صورت عدم وجود ضرایب فشار باد مربوط به سازه مورد بررسی در آیین‌نامه، ضرایب فشار باد ( $C_p$ ) منوط به انجام روش‌های تجربی است. در مواردی که نیاز به استفاده از آزمایش تونل باد باشد، در شبیه‌سازی جریان باد در تونل باید دقت شود و جریان باد را به نحو واقع‌گرایانه‌ای شبیه‌سازی نمود. برای این منظور، سرعت، شدت و مقیاس اغتشاش باید شبیه‌سازی شوند. برای به دست آوردن نیروها و فشارهای استاتیکی از مدل‌های صلب سازه استفاده می‌شود. به طور معمول فشاری که روی جسم وارد می‌شود، به وسیله فشار دینامیکی متوسط در فاصله‌ای دور از بالادست جریان و یا، در جریان آزاد و بلافاصله

1 1 Direct Numerical Simulation

2 2 Large Eddy Simulation



شکل ۳. ساختار مش بندی ناحیه محاسباتی مدل صحت‌سنجی به صورت سه بعدی

Fig. 3. The meshing structure of the computational domain of the verification model

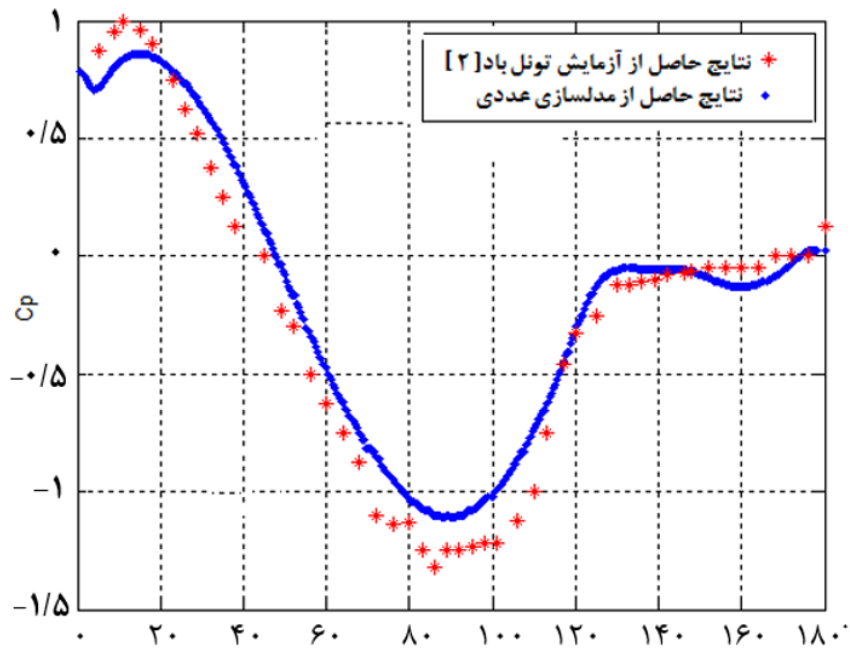
در تولید شبکه برای ناحیه محاسباتی مانند ناحیه محاسباتی بخش صحت‌سنجی از شبکه غیرسازمان یافته استفاده شده است. از مزایای این نوع مش می‌توان به کاربردی بودن آن پیرامون اجسامی که در هندسه خود دارای نامنظمی هستند اشاره کرد. شکل ۷ جزئیات شبکه‌بندی در صفحات ناحیه محاسباتی مدل گنبد پیازی را نشان می‌دهد. تعداد کل المان‌های ایجاد شده در شبکه تولید شده برابر با ۱۶۷۳۰۰۱۴ المان می‌باشد. در شکل ۸، کانتور سرعت باد در مجاورت گنبدها، نشان داده شده است. سرعت ورودی برابر با ۲۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. در شکل ۹، خطوط جریان در مجاورت گنبدهای ۱۲۰ و ۱۲۱ رسم شده است، کم شدن فاصله خطوط جریان نشان دهنده افزایش سرعت می‌باشد، در قسمتهایی از مدل‌ها جریان گردابه‌ای مشاهده می‌شود که این جریان به علت جدایی جریان از سطح گنبد رخ می‌دهد، جدایش جریان<sup>۲</sup> به این معنی است که دیگر جریان باد از شکل گنبد تبعیت نکرده و به جای عبور از روی سطح از آن جدا می‌شود، که این پدیده باعث کاهش نیروی لیفت می‌گردد، البته شروع این پدیده به عوامل مختلفی بستگی دارد که به غیر از زاویه اعمال باد شامل سرعت و هندسه نیز می‌باشد، در قسمتهایی که جریان گردابه‌ای ایجاد می‌شود ضریب فشار به علت خلأ ایجاد شده به صورت مکش (منفی) در می‌آید.

به منظور شبکه‌بندی کردن ناحیه محاسباتی، از مش نوع غیرسازمان یافته استفاده شده است و تعداد سلول‌های حاصل برابر با ۲۱۵۵۶۰ می‌باشد. شکل ۳ نشان دهنده نحوه ساختار شبکه تولید شده ناحیه محاسباتی گنبد کروی را نشان می‌دهد. در شکل ۲، ابعاد تونل باد و شرایط مرزی مربوط به مدل‌سازی عددی نشان داده شده است.

بعد از همگرایی شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار که با پایش سرعت و فشار در چندین نقطه از دامنه محاسباتی برای زاویه بین ۰ تا ۱۸۰ بررسی شده است، پارامتر ضریب فشار به منظور مقایسه نتایج حاصل شده مورد بررسی قرار گرفته است. طبق شکل ۴ مشاهده می‌شود که مقادیر به دست آمده از شبیه‌سازی عددی مقادیر محاسبه شده در مرجع [۲] مطابقت دارد.

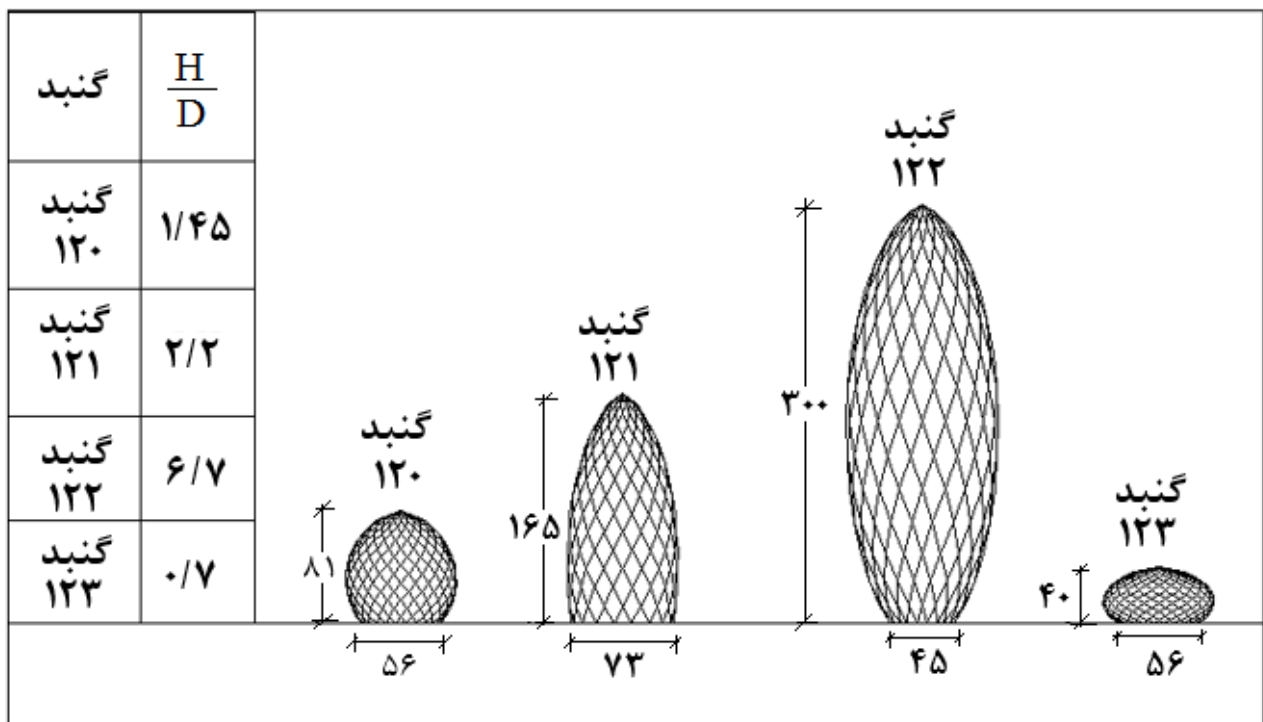
### ۳- بررسی ضرایب فشار باد بر روی گنبدها با نسبت ارتفاع به دهانه متفاوت

مدل دینامیک سیالات محاسباتی مورد استفاده در مدل‌سازی، مدل (Standard)  $K-\epsilon$  می‌باشد. ابعاد مدل گنبدهای پیازی مورد مطالعه بر اساس مشخصات ارائه شده در نشریه ۴۰۰ در نظر گرفته شده است، نحوه قرارگیری گنبد در مقابل جریان مستقیم باد در تونل باد در شکل ۲ نشان داده شده است.



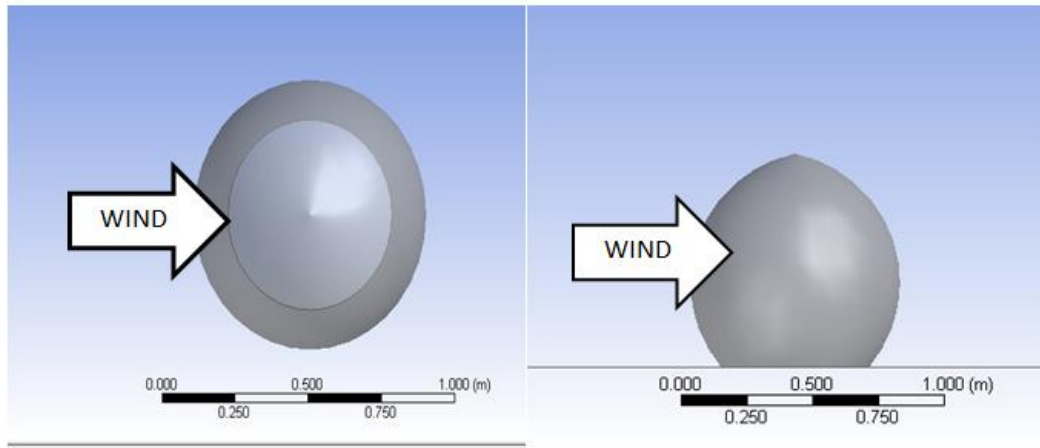
شکل ۴. مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار ANSYS با نتایج حاصل از آزمایش تونل باد [۲]

Fig. 4. Comparing the results of numerical modeling using ANSYS software with the results of wind tunnel testing [2]



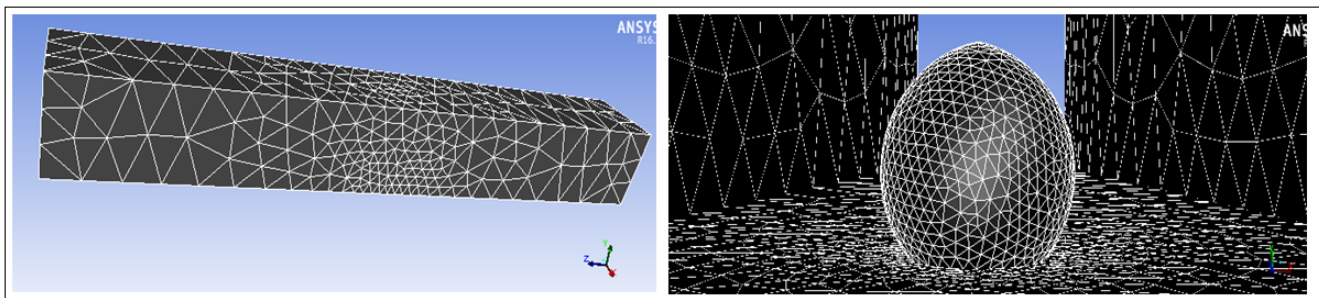
شکل ۵. مشخصات هندسی گنبدهای پیاپی مورد بررسی با نسبت ارتفاع به دهانه مختلف

Fig. 5. The geometrical characteristics of the studied onion domes with different height-to-span ratios



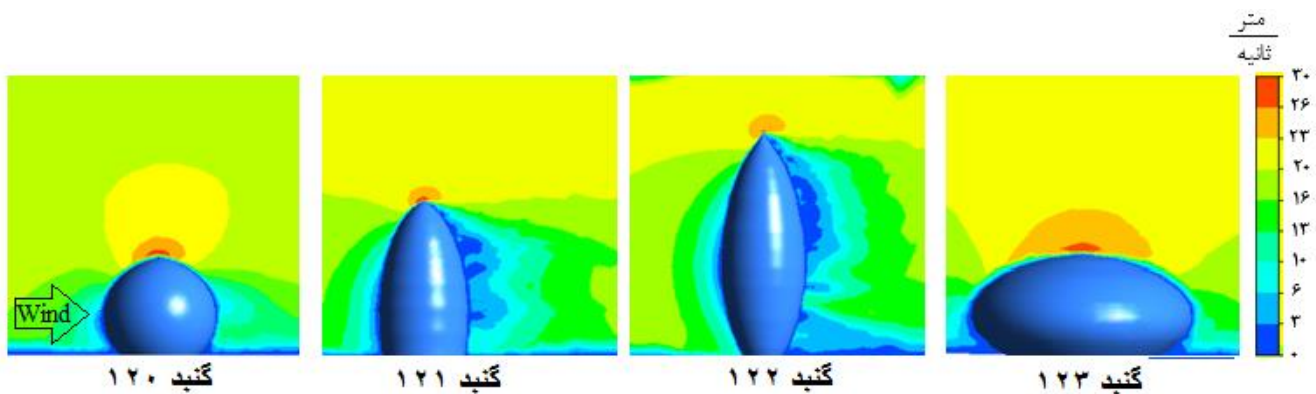
شکل ۶. پلان و نمای جانبی گنبد ۱۲۰ و نحوه قرارگیری سازه در مقابل جریان باد

Fig. 6. The plan and side view of the 120 dome



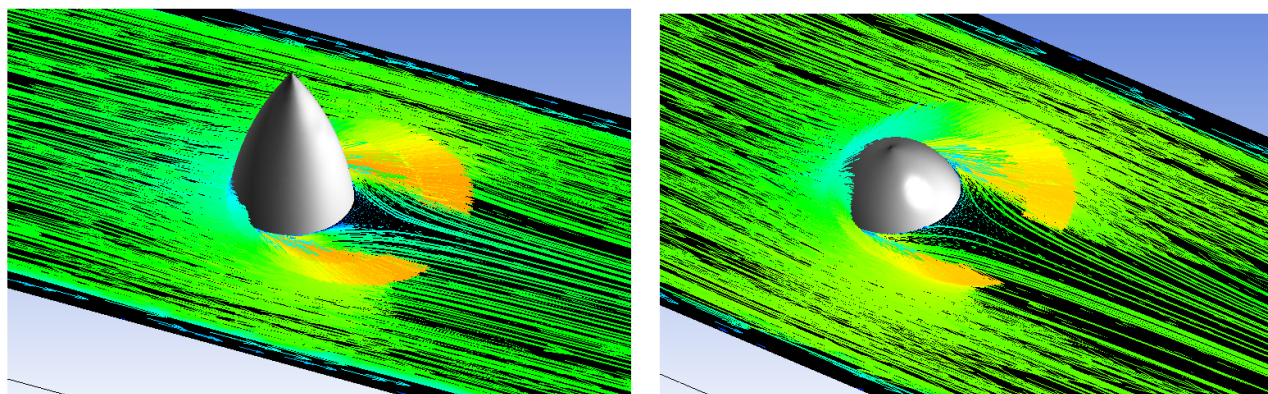
شکل ۷. مش تولید شده برای ناحیه محاسباتی اطراف گنبد ۱۲۰ به صورت ۳ بعدی

Fig. 7. The generated mesh for the computational domain around the dome 120



شکل ۸. کانتور سرعت در صفحه گذرنده از محور تقارن سازه در راستای جهت جریان باد

Fig. 8. Velocity contour in the plane passing through the axis of symmetry of the structure



شکل ۹. بردارهای سرعت جریان باد در مجاورت گنبدهای ۱۲۰ و ۱۲۱

Fig. 9. Wind velocity vectors in the vicinity of domes 120 and 121

در شکل ۱۰، کانتور ضرایب فشار بر روی گنبدهای مورد بررسی مشاهده می‌شود، شکل ۱۱ بیانگر تغییرات ضرایب فشار باد بر روی گنبدهای ۱۲۰ و ۱۲۱ در ترازهای مختلف ارتفاعی است، تقارن در ضرایب فشار به علت تقارن گنبد مشهود است، با افزایش نسبت ارتفاع به دهانه گنبد ضریب فشار منفی در زاویه ۹۰ درجه افزایش می‌یابد.

در شکل ۱۲، کانتور ضرایب فشار باد بر روی گنبدها با نسبت ارتفاع به دهانه مختلف نشان داده شده است، مشاهده می‌شود قسمتی از گنبد که مقابل باد قرار دارد فشار مثبت است و با افزایش نسبت ارتفاع به دهانه ماکزیمم فشار منفی (مکش) افزایش می‌یابد.

در شکل ۱۳ نمودار ضرایب فشار باد بر روی گنبدها در تراز ۰/۱ و ۰/۴ ارتفاع و در شکل ۱۴، این ضرایب در ترازهای ارتفاعی ۰/۸ و بالاترین تراز ارتفاعی رسم شده است.

در این بخش معادله حاکم بر ضریب فشار باد بر روی گنبدهای مورد مطالعه ارائه شده است، معادله با فرم کلی یکسان برای تمامی مدل‌ها ارائه شده است تا ضرایب فشار برای انواع این نوع از سازه‌ها ارائه شده به سادگی برای هر نقطه قابل محاسبه باشد. این معادله با استفاده از نرم‌افزار

#### ۴- معادله حاکم بر ضرایب فشار باد

در این بخش معادله حاکم بر ضریب فشار باد بر روی گنبدهای مورد مطالعه ارائه شده است، معادله با فرم کلی یکسان برای تمامی مدل‌ها ارائه شده است تا ضرایب فشار برای انواع این نوع از سازه‌ها ارائه شده به سادگی برای هر نقطه قابل محاسبه باشد. این معادله با استفاده از نرم‌افزار

$$C_p = f \times \cos(2.6\theta) + g \times \sin(\theta)$$

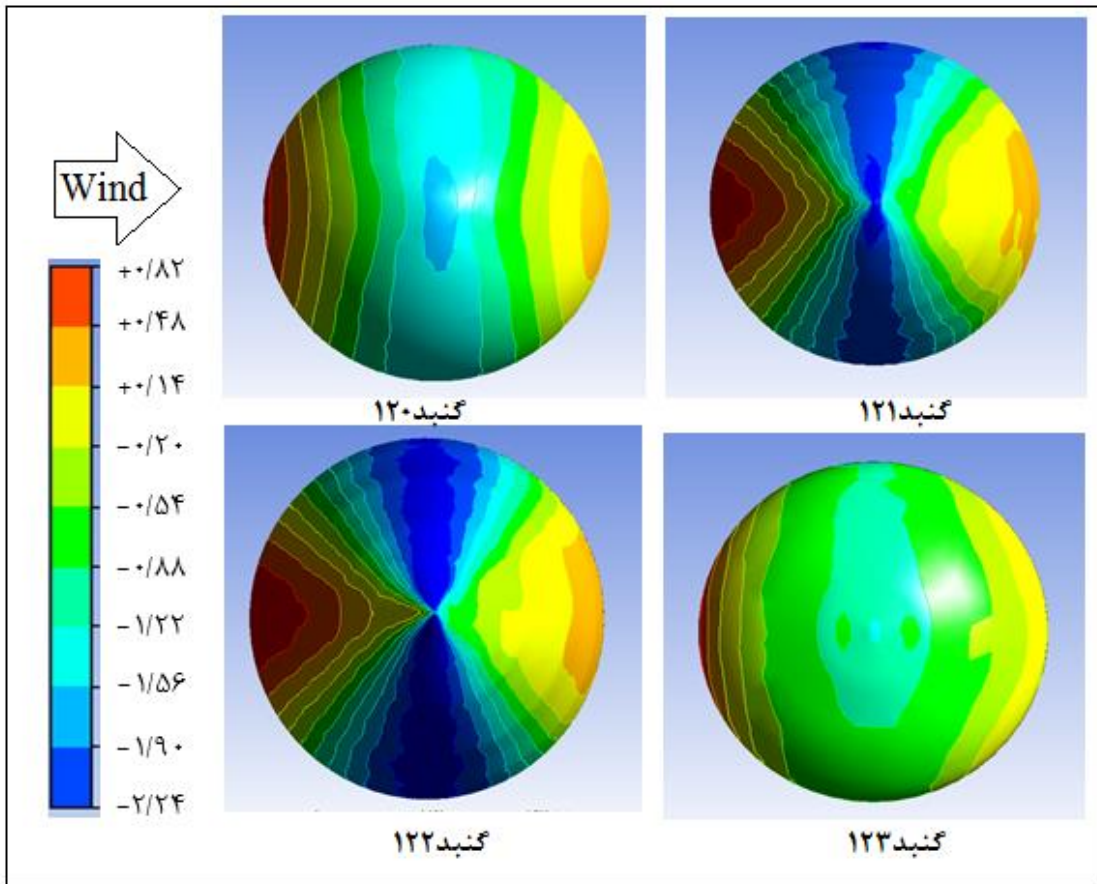
$$f = Ah^2 + Bh + C$$

$$g = Dh^2 + Eh + F \quad (3)$$

$$h = \frac{z}{H}$$

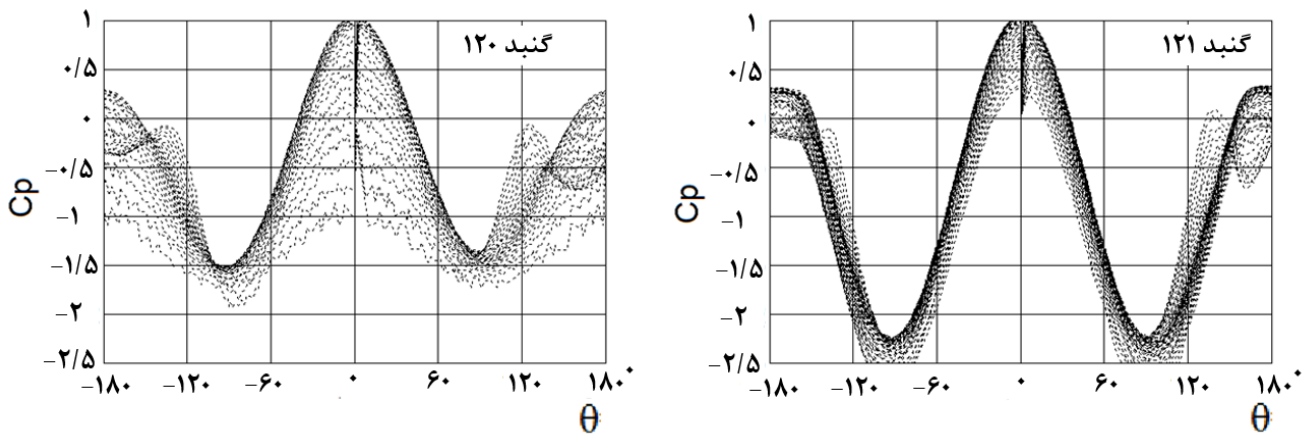
MATLAB با داشتن ضرایب فشار بر روی گنبدها به دست آمده است.

حال با قرار دادن ضرایب (A, B, C, D, E, F) مربوط به هر نمونه گنبد در هر تراز ارتفاعی، در معادله درجه ۲، (g,f) محاسبه می‌شود، با قرار دادن مقادیر (g,f) در معادله ۳، مقدار ضریب فشار (Cp) را برای هر ۴ مدل از گنبدهای پیاپی در هر ارتفاع و در هر زاویه به دست می‌آید. در معادله ۳، ضرایب فشار در محیط گنبد در ترازهای ارتفاعی متفاوت قابل دستیابی است. حال با به دست آوردن ضرایب فشار در موقعیت‌های دلخواه از معادله ۳، و نتایج خروجی از ANSYS، نمودارهای مقایسه بین ضرایب فشار حاصل از معادله ۳ و ضرایب فشار به دست آمده از مدل‌سازی عددی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در شکل ۱۵، ضرایب فشار حاصل از معادله ۳ و نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی برای هر ۴ نمونه گنبد پیاپی، رسم شده است.



شکل ۱۰. کانتور ضرایب فشار باد بر روی گنبدها با نسبت ارتفاع به دهانه مختلف (دید از بالا)

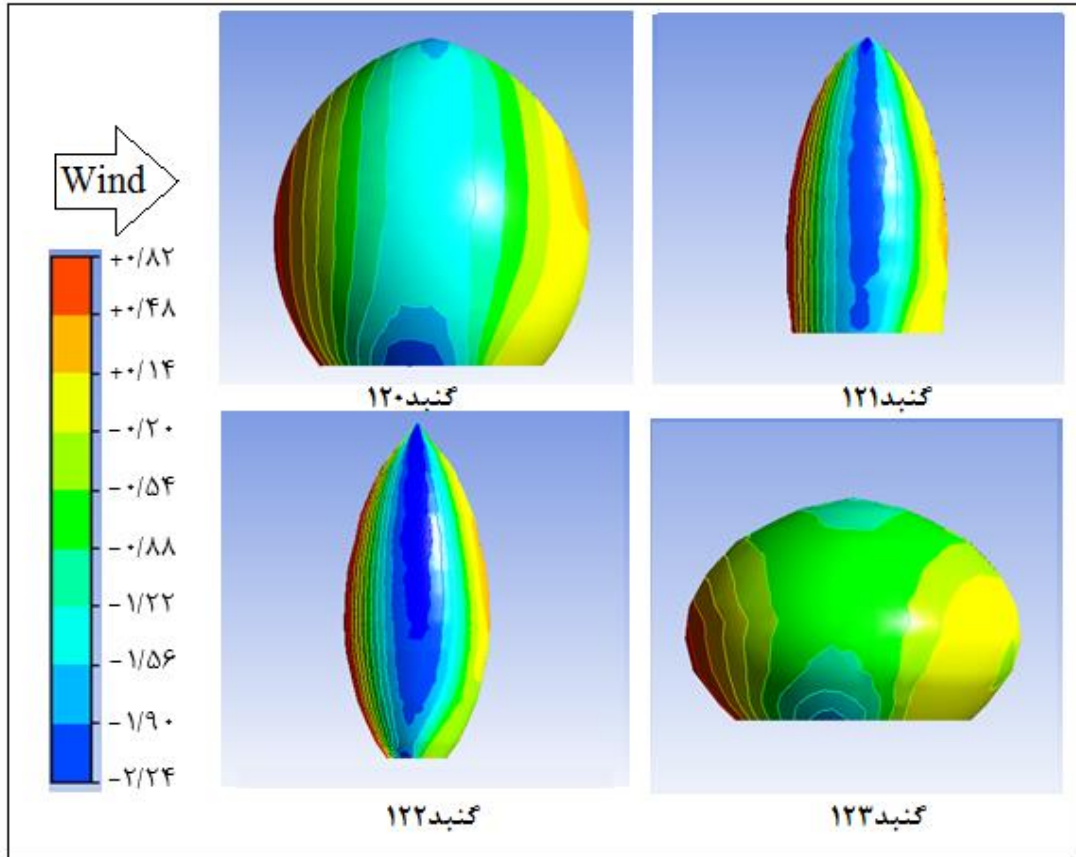
Fig.10. Contour of wind pressure coefficients on domes with different height to opening ratio (view from above)



شکل ۱۱. ضرایب فشار باد در محیط گنبدهای ۱۲۰ و ۱۲۱ در ترازهای ارتفاعی مختلف

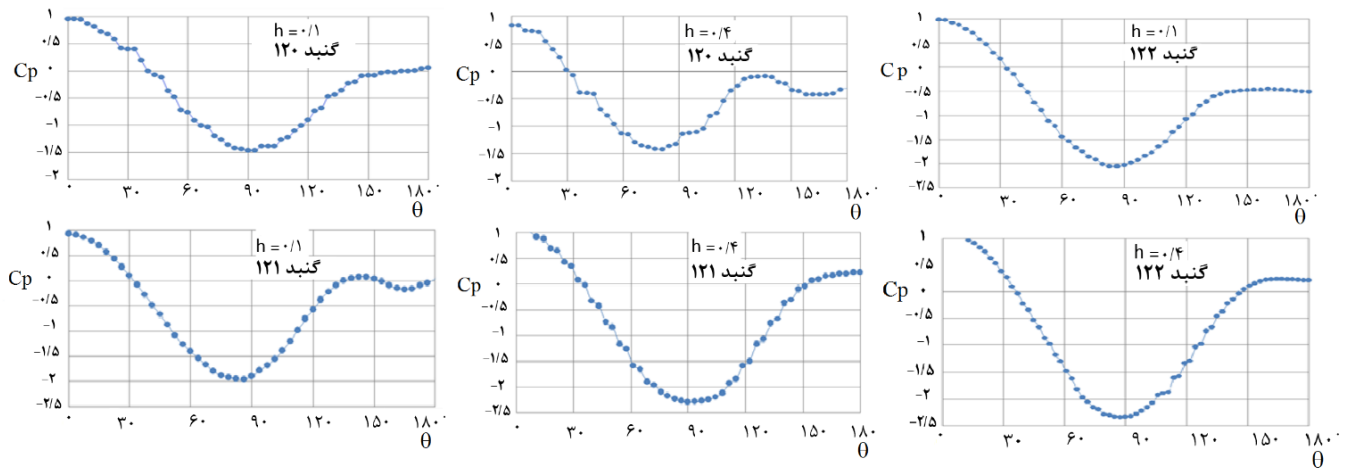
Fig. 11. Variation of  $C_p$  on domes 120 and 121 at different height levels





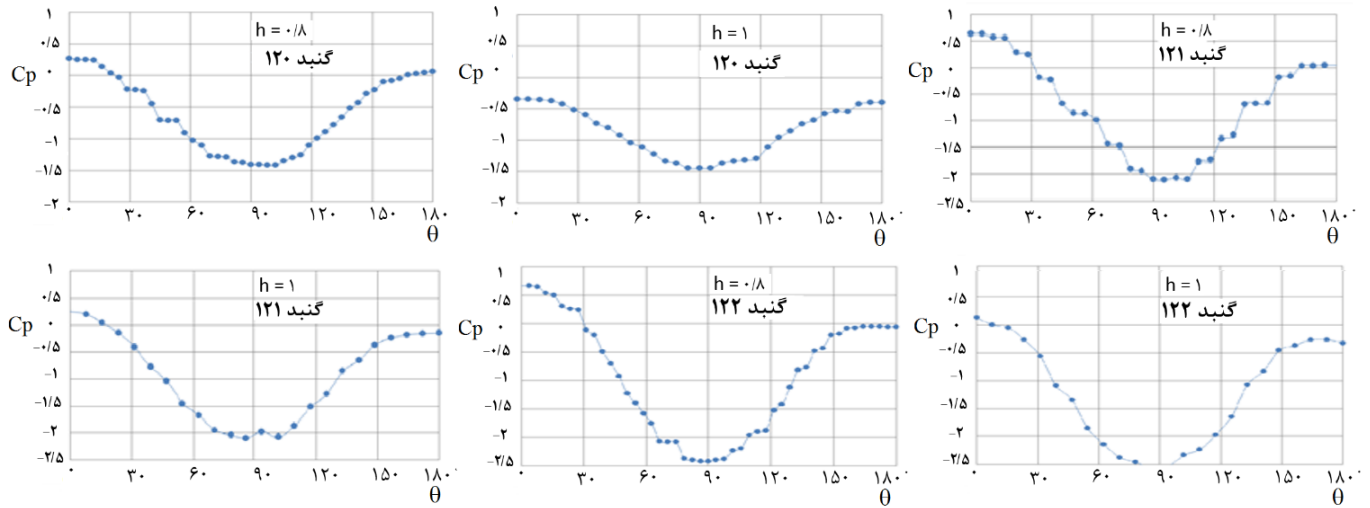
شکل ۱۲. کانتور ضرایب فشار باد بر روی گنبدها با نسبت ارتفاع به دهانه مختلف

Fig. 12. Contour of wind pressure coefficients on domes with different height to span ratio



شکل ۱۳. نمودار ضرایب فشار باد بر روی گنبدها در تراز ۰/۴ و ۰/۱ ارتفاع

Fig. 13. Diagram of wind pressure coefficients on domes at 0.1 and 0.4 height



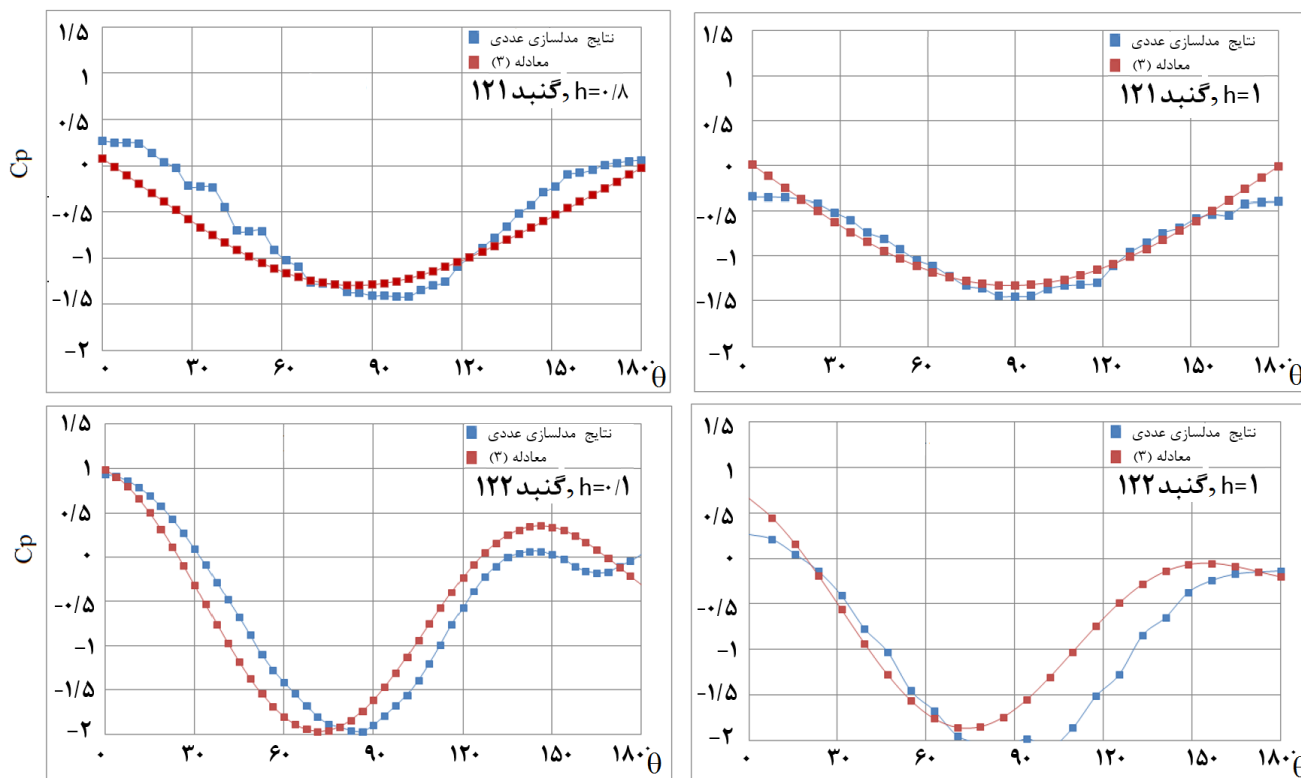
شکل ۱۴. نمودار ضرایب فشار باد بر روی گنبدها در تراز  $0.8H$  و در بالاترین تراز ارتفاعی

Fig. 14. Diagram of wind pressure coefficients on domes at  $0.8H$  and  $H$

جدول ۱. ضرایب ثابت تعریف شده در معادله ۳

Table 1. The amount of parameters used in Eq.3

گنبد	۱۲۰	۱۲۱	۱۲۲	۱۲۳
<b>K=H/D</b>	+۰/۷۲۰	+۱/۴۵۰	+۲/۲۳	+۶/۷۸۰
<b>A</b>	-۰/۰۷۸	-۰/۰۹۵	-۰/۲۴	-۰/۲۶۶
<b>B</b>	-۰/۲۷۰	-۰/۲۶۰	-۰/۱۷	-۰/۰۳۷
<b>C</b>	+۰/۲۶۰	+۰/۳۷۰	+۱/۰۱	+۱/۰۱۹
<b>D</b>	-۰/۱۳۰	-۰/۱۵۰	-۰/۱۱	-۰/۳۶۶
<b>E</b>	-۰/۲۷۰	-۰/۲۵۰	-۰/۱۹	-۰/۱۵۹
<b>F</b>	-۰/۴۶۰	-۰/۹۲۰	-۱/۰۱	-۱/۰۳۱



شکل ۱۵. نمودار مقایسه ضرایب فشار باد حاصل از مدل سازی عددی و معادله ۳

Fig. 15. Comparison chart of wind pressure coefficients obtained from numerical modeling and equation 3

در مقادیری از نسبت ارتفاع به دهانه گنبدها که در تحقیق بررسی نشده است می توان با استفاده از درون یابی ضرایب فشار باد را برای گنبد با نسبت ارتفاع به دهانه متفاوت به دست آورد.

### منابع

- [1] Blocken B. 50 years of computational wind engineering: past, present and future, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 129(2014), 69-102.
- [2] Cheng, C. M., & Fu, C. L, Characteristic of wind loads on a hemispherical dome in smooth flow and turbulent boundary layer flow, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 98(6-7) (2010), 328-344.
- [3] Chevula, S., Sanz-Andres, A., & Franchini, S, Aerodynamic external pressure loads on a semi-circular bluff body under wind gusts, Journal of Fluids and

### ۵- نتیجه گیری

در این مقاله جریان باد به کمک روش دینامیک سیالات محاسباتی و با استفاده از مدل آشفتگی standard در یک مدل محاسباتی صحت سنجی شده و در ادامه مدل مذکور برای بررسی چگونگی جریان باد و پارامترهای دینامیکی آن حول گنبدهای پیزی به کار گرفته شد. هدف یافتن معادله حاکم بر ضرایب فشار باد بر روی این نوع از گنبدها است، نتایج زیر از انجام تحقیق حاصل می شود.

با افزایش نسبت ارتفاع به دهانه ماکزیمم فشار منفی (مکش) که در زاویه  $\beta=90$  حاصل می شود، افزایش می یابد به صورتی که در گنبد ۱۲۲ این مقدار به  $-2/24$  می رسد. با مشاهده کانتورهای ضریب فشار مشاهده می شود که در زاویه تقریباً ۱۵۰ درجه تا زاویه ۱۸۰ درجه ضریب فشار برای تمامی گنبدها ثابت است. با مشاهده شکل ۱۶، مطابقت مناسب نتایج حاصل از مدل سازی عددی و نتایج حاصل از معادله ارائه شده مشاهده می شود.

- between wind load by wind tunnel test and in-site measurement of long-span spatial structure, *Wind & structures*, 14(4) (2011), 301-319.
- [13] Kim, R. W., Lee, I. B., Yeo, U. H., & Lee, S. Y, Estimating the wind pressure coefficient for single-span greenhouses using an large eddy simulation turbulence model, *biosystems engineering*, 188(2019), 114-135.
- [14] Hu, W., Bohra, H., Azzuni, E., & Guzey, S, The uplift effect of bottom plate of aboveground storage tanks subjected to wind loading, *Thin-Walled Structures*, 144(2019), 106241.
- [15] Chen, Z., Li, H., Wang, X., Yu, X., & Xie, Z, Internal and external pressure and its non-Gaussian characteristics of long-span thin-walled domes, *Thin-Walled Structures*, 134(2019), 428-441.
- [16] Kim, Y. C., Yoon, S. W., Cheon, D. J., & Song, J. Y, Characteristics of wind pressures on retractable dome roofs and external peak pressure coefficients for cladding design, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 188(2019), 294-307.
- [17] Enajar, A., El Damatty, A., & Nassef, A, Semi-analytical solution for gable roofs under uplift wind loads, *Engineering Structures*, 227(2021), 111420.
- [18] Bani Vahid, Sadeghi Hossein, and Tousi Alireza, Determination of wind pressure coefficients on cylindrical roofs (Barrel roofs), *Journal of Structural and Construction Engineering*. (2022).
- [19] davarzani hamidreza, ahmad ganjali, hossein sadeghi, and rasul mohebbi, Determination of wind pressure coefficients on cylindrical storage tanks, using wind tunnel testing and numerical modelling, *Journal of Structural and Construction Engineering*,(2022).
- Structures*, 54(2015), 947-957.
- [4] Kateris, D. L., Fragos, V. P., Kotsopoulos, T. A., Martzopoulou, A. G., & Moshou, D, Calculated external pressure coefficients on livestock buildings and comparison with Eurocode 1, *Wind & Structures*, 15(6) (2012), 481-494.
- [5] Lin Zhao, Xu Chen, Yao Jun Ge, Investigation of adverse wind loads on large cooling tower for the six – tower combination, *Applied Thermal Engineering*,105 (2016),988-999
- [6] Qiu, Y., Sun, Y., Wu, Y., & Tamura, Y, Modeling the mean wind loads on cylindrical roofs with consideration of the Reynolds number effect in uniform flow with low turbulence, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 129(2014), 11-21.
- [7] Rizzo F, Wind tunnel tests on hyperbolic paraboloid roofs with elliptical plane shapes, *Engineering Structures*; 45(2012), 536-558
- [8] Sadeghi, H., Heristchian, M., Aziminejad, A., & Nooshin, H, Wind effect on grooved and scallop domes, *Engineering Structures*, 148(2017), 436-450.
- [9] Sadeghi, H., Heristchian, M., Aziminejad, A., & Nooshin, H, CFD simulation of hemispherical domes: structural flexibility and interference factors, *Asian Journal of Civil Engineering*, 19(5) (2018), 535-551.
- [10] Vizotto I, Ferreira A M, Wind force coefficient on hexagonal free form shells, *Engineering Structures*, 83 (2015), 17-29
- [11] Rajabi, E., Sadeghi, H., & Hashemi, M. R, Wind effect on building with Y-shaped plan, *Asian Journal of Civil Engineering*, (2022), 1-11.
- [12] Liu, H., Qu, W. L., & Li, Q. S, Comparison

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

R. Gholizadeh, H. Sadeghi, Determination of wind pressure coefficients on spherical domes called onion domes (defined in standard 400), *Amirkabir J. Civil Eng.*, 54(12) (2023) 4697-4708.

DOI: 10.22060/ceej.2022.21115.7626

