

Determining wind pressure coefficients on a shed with an arched roof using wind tunnel tests and numerical modeling

Amir Kazem Najafi¹, Hossein Sadeghi^{2*}

1- Master's student, Department of Civil Engineering, Shahrood Non-Profit University, Shahrood, Iran

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Damghan Branch, Islamic azad university, Damghan, Iran

ABSTRACT

Structures with large opening roofs are vulnerable to wind, in these structures due to the low dead load, the wind load has a greater effect on these types of structures. In the calculation of wind force, one of the coefficients related to the geometry of the structure is the pressure coefficient (C_p), which is provided for some common structures in the loading regulations. Arch opening of 0.1, 0.2 and 0.3 was done using wind tunnel test and numerical modeling based on Computational Fluid Dynamics (CFD) method using ANSYS software and wind pressure coefficients on these structures are presented, it can be seen that with increasing The ratio of the height to the opening of the arch of the maximum coefficients of negative wind pressure (suction), increased in such a way that on the middle axis of the structure in the state of $\alpha = 90^\circ$, the maximum negative pressure in the structure S-1, S-2, 3-S, is equal to -2 and It is -1.7 and -1.6. The pressure coefficients on the sides facing the wind show a positive number, which indicates the pressure on these surfaces, the maximum positive pressure occurs at $\alpha=90^\circ$ (the state where the direction of the wind is perpendicular to the shed) and in this case the pressure coefficient is equal to +1. In structure S-1 (height-to-opening ratio 0.3), the maximum deformation created for the wind application angle is $\alpha=40^\circ$, which is 20% more than $\alpha=90^\circ$.

ARTICLE INFO

Receive Date: 12 March 2023

Revise Date: 23 May 2023

Accept Date: 28 May 2023

Keywords:

wind tunnel

wind pressure coefficients

arc shed

computational fluid dynamics

ANSYS

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2023.387693.3052>

*Corresponding author: Hossein Sadeghi

Email address: H.Sadeghi@damghaniau.ac.ir

تعیین ضرایب فشار باد بر سوله های با سقف قوسی با استفاده از آزمایش تونل باد و مدل سازی عددی

امیرکاظم نجفی^۱، حسین صادقی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه غیرانتفاعی شاهرود، شاهرود، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد دامغان، دانشگاه آزاد اسلامی، دامغان، ایران

چکیده

سازه‌هایی با سقف‌های دهانه بزرگ در برابر باد آسیب پذیر هستند، به دلیل بار مرده کم، بار باد بر روی این نوع سازه‌ها اثر بیشتری دارد. در محاسبه نیروی باد یکی از ضرایب که به هندسه سازه ارتباط دارد ضریب فشار (C_p) می‌باشد. این ضریب برای برخی از سازه‌های متداول در آیین‌نامه‌های بارگذاری ارائه شده است، در این تحقیق بررسی جریان باد بر سطح سوله های با سقف قوسی شکل با سه نسبت ارتفاع به دهانه قوس ۰/۱ و ۰/۲ و ۰/۳ با استفاده از آزمایش تونل باد و همچنین مدل سازی عددی بر مبنای روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) با استفاده از نرم‌افزار ANSYS صورت گرفته و ضرایب فشار باد بر روی این سازه‌ها ارائه شده است، مشاهده می‌شود با افزایش نسبت ارتفاع به دهانه قوس بیشینه ضرایب فشار باد منفی (مکش)، افزایش یافته به نحوی که بر روی محور میانی سازه در حالت $\alpha=90^\circ$ ، بیشینه فشار منفی در سازه ۱- S ۲- S ۳- S به ترتیب برابر ۲- و ۱/۷- و ۱/۶- است. ضرایب فشار در اضلاع رو به باد عدد مثبت را نشان می‌دهد که بیانگر فشار در این سطوح است، حداکثر فشار مثبت در $\alpha=90^\circ$ (حالتی که جهت باد بر سوله عمود است) رخ می‌دهد که در این حالت ضریب فشار برابر ۱+ است. در سازه ۱- S (نسبت ارتفاع به دهانه ۰/۳)، بیشینه تغییر شکل ایجاد شده به ازای زاویه اعمال باد $\alpha=40^\circ$ است که این میزان ۲۰ درصد بیشتر از حالت $\alpha=90^\circ$ است.

کلمات کلیدی: تونل باد، ضرایب فشار بار باد، سوله قوسی، دینامیک سیالات محاسباتی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2023.387693.3052	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2023.387693.3052	۱۴۰۲/۱۱/۳۰	۱۴۰۲/۰۳/۰۷	۱۴۰۲/۰۳/۰۷	۱۴۰۲/۰۳/۰۲	۱۴۰۱/۱۲/۲۱
حسین صادقی					*نویسنده مسئول:	
H.Sadeghi@damghaniau.ac.ir					پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

یکی از سازه‌های مرسوم که معمولاً دارای دهانه‌های بلند است سازه سوله می‌باشد، یکی از ویژگی‌های بارز چنین سازه‌هایی وزن کم آن‌هاست که این ویژگی مهم، این سازه‌ها را نسبت به سایر سازه‌ها متمایز ساخته ولی این وجه تمایز، عملاً چنین سازه‌هایی را در برابر بار باد بسیار آسیب‌پذیر نموده است. برای محاسبه بار باد بر روی تمامی سازه‌ها یکی از مهم‌ترین ضرایب مورد نیاز، ضریب فشار باد (Cp) است که این ضریب در واقع تأثیر شکل سازه را در محاسبه بار باد وارد بر سازه در نظر می‌گیرد و به عوامل مختلفی از جمله شکل هندسی سازه، زاویه قرارگیری سطح بادگیر نسبت به جهت اعمال باد بستگی دارد. استفاده از آزمایش تونل باد یکی از روش‌های مناسب برای تعیین ضریب فشار می‌باشد. در این تحقیق اثر بار باد بر سازه‌های سوله قوسی شکل در حالتی که زیر سقف باز است و باد از زیر سقف نیز جریان دارد مورد ارزیابی قرار گرفته است. از این رو نمونه‌هایی از سازه‌های مذکور با نسبت ارتفاع قوس به دهانه ۰/۱ و ۰/۲ و ۰/۳ در تونل باد مورد آزمایش قرار گرفته و نتایج حاصل از آزمایش ارائه شده است، همچنین باهدف ارائه الگوی بارگذاری مناسب این نوع از سازه‌ها، از روش مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار ANSYS نیز بهره‌گیری شده است. در شکل ۱، دو نمونه از سازه‌های مورد بحث در این تحقیق نشان داده شده است.



شکل

۱: دو نمونه از سقف‌های قوسی شکل مشابه مدل‌های مورد بررسی در تحقیق

سقف‌های دهانه بزرگ به‌طور گسترده در انواع مختلف گنجانده شده‌اند سیستم‌هایی مانند سالن‌های کنفرانس، سالن‌های ورزشی، مراکز نمایشگاهی، انبارها، فرودگاه‌ها و ایستگاه‌های راه‌آهن نمونه‌هایی از کاربرد این نوع از سقف‌ها است. اگرچه، دهانه بزرگ سقف‌ها ممکن است دارای ویژگی‌هایی همچون وزن کم، انعطاف‌پذیری بالا، فرکانس طبیعی کم و نسبت میرایی کوچک، که در نتیجه منجر به افزایش حساسیت به بارهای باد می‌شود [۱-۳]. یاسویی و همکاران [۴] تأکید کردند که با توجه به بار مرده معمولی سقف‌های با دهانه بزرگ، باد معمولاً به عنوان یک عامل بارگذاری تعیین‌کننده در نظر گرفته می‌شود و تخمین کافی واکنش ناشی از باد باید به‌طور کامل انجام شود در فرآیند طراحی سازه در نظر گرفته شده است. در عمل، به‌طور خاص، آسیب ناشی از باد می‌تواند موضعی یا کلی باشد و باعث خرابی در سازه شود، عمدتاً بیشینه تأثیر باد در گوشه‌ها و لبه‌های سقف‌های با دهانه بزرگ است به این معنی است که این مناطق نسبت به سایر قسمت‌های سقف به‌شدت به بارهای باد وابسته هستند [۵]. چندین دستورالعمل در آیین‌نامه‌ها جهت طراحی سازه‌ها در برابر باد ارائه شده است [۶-۸]. مطالعات مختلفی در مورد تأثیر بار باد بر روی سازه‌ها انجام شده است، صادقی و همکاران [۹] ضریب فشار باد بر روی گنبد‌های اسکالپ را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد ایجاد شیار بر روی گنبد‌های کروی باعث تغییرات ناگهانی ضریب فشار باد (Cp) در مجاورت شیارها خواهد شد، همچنین معادلات حاکم بر ضرایب فشار باد بر روی گنبد‌های اسکالپ را ارائه دادند. پارک و همکاران [۱۰] با استفاده از آزمایش تونل باد، فشار باد بر روی سقف‌های کروی ناشی از تغییر ارتفاع به دهانه گنبد را با وجود بازشوی سقف مورد مطالعه قرار دادند. یافته‌های آنها نشان داد فشار منفی (مکش) تقریباً در همه مناطق سقف حاکم بوده است، در نهایت ضریب فشار خالص برای طراحی رویه گنبد در یک نسبت خاص ارتفاع به دهانه نیز پیشنهاد دادند. جانگ و همکاران [۱۱] در پژوهشی تحت عنوان ویژگی‌های

فشار باد بر روی سقف‌های گنبدی جمع شونده بیضوی، به وسیله آزمایش تونل باد، ضرایب فشار اوج منفی و مثبت برای طراحی روکش سقف‌های گنبدی جمع شونده بیضوی ارائه دادند. ورما و همکاران [۱۲] با استفاده از روش تجربی فشار ناشی از باد بر روی انواع سازه‌های با ارتفاع کم را مورد کاوش قرار دادند. در این تحقیق و در حالت‌های متفاوت، گنبد تکی، دو، سه و چهار تایی که به صورت موازی پشت سر هم قرار گرفته و ضرایب فشار در حالت‌های مختلف محاسبه شد و کانتورهای مربوطه جهت مقایسه شرایط متفاوت ترسیم گردید و نتایج نشان داد زمانی که بار باد در زاویه ۹۰ درجه بر سازه‌ها اعمال شود تغییرات بسزایی در ضرایب فشار وجود نخواهد داشت و در مقابل تأثیرات بار باد در زاویه ۰ درجه بر روی ضرایب فشار قابل توجه خواهد بود. خسرو جردی و همکاران [۱۳] در پژوهشی تأثیر بار باد بر روی گنبد‌های دو طاقی با ارتفاع‌های مختلف قوس را مورد بررسی قرار داده‌اند. بدین منظور، گنبد‌های دو قوسی با نسبت ارتفاع به دهانه ثابت در نرم‌افزار المان محدود شبیه‌سازی عددی گردید و مقادیر ضریب فشار (C_p) در خط مرکزی موازی با جهت باد و همچنین بر روی حلقه‌های اطراف گنبد‌ها با ارتفاع‌های مختلف تحلیل شد. مقایسه نتایج عددی با داده‌های تجربی حاکی از آن است که ارتفاع قوس‌ها، شکست در محل اتصال دو قوس و سطح اتصال دو قوس بر روی ضرایب فشار تأثیرگذار خواهد بود. سون و همکاران [۱۴] با استفاده از آزمایش تونل باد سازه‌هایی غشایی با قوس بیضی‌شکل را مورد بررسی قرار دادند. داورزنی و همکاران [۱۵] ضرایب فشار باد را بر روی مخازن ذخیره استوانه‌ای با استفاده از آزمایش تونل باد مورد بررسی قرار دادند. نینگسو و همکاران [۱۶] در تحقیقات خود اثر عدد رینولدز بر مخازن کروی با در نظر گرفتن اثر زبری سطح با استفاده از تونل باد را مورد بررسی قرار دادند. بانی و همکاران [۱۷] با استفاده از مدل‌سازی عددی ضرایب فشار باد بر روی چلیک‌های تعریف شده در استاندارد سازه فضا کار را ارائه دادند. نجاتی و صادقی [۱۸] با استفاده از آزمایش تونل باد ضرایب فشار باد را بر روی گنبد گل ختمی (تعریف شده در استاندارد ۴۰۰) را ارائه دادند. شیخ الاسلامی و صادقی [۱۹] با استفاده از آزمایش تونل باد و مدل‌سازی عددی اثر باد بر روی سازه برج میلاد را مورد بررسی قرار دادند. رجبی و همکاران [۲۰] اثر بار باد بر روی سازه با پلان Y شکل را مورد بررسی قرار داده و الگوی بار بحرانی باد مربوط به این نوع از سازه‌ها را ارائه دادند. یکی از پارامترهای تأثیرگذار در محاسبه اثر بار باد همجواری سازه‌ها نسبت به هم است، داورزنی و همکاران [۲۱] اثر بار باد بر مخازن ذخیره نفت را با تمرکز بر اثر همجواری این نوع از سازه‌ها مورد بررسی قرار دادند.

۲- مواد و روش‌ها

در راستای انجام مطالعات پژوهش حاضر از آزمایش تونل باد، همچنین مدل‌سازی بر مبنای روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) از نرم افزار Ansys بهره‌گرفته شده است. لازم به ذکر است که مدل‌ها با مقیاس یک صدم ساخته شده است.

۲-۱- محاسبه بار باد بر اساس مبث ششم مقررات ملی ساختمان

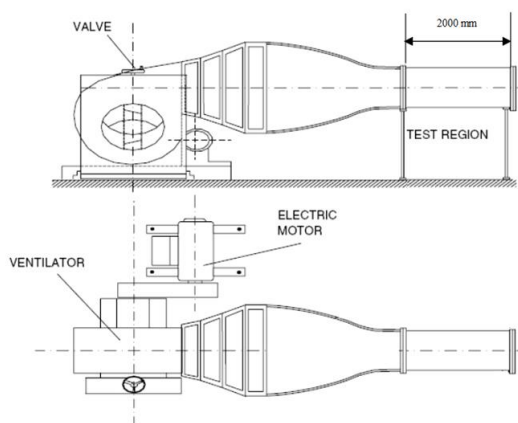
مطابق مبث ششم مقررات ملی ساختمان، فشار یا مکش ناشی از باد بر یک جزء یا تمام سطح یک سازه یا ساختمان از معادله (۱) به دست می‌آید.

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

در معادله ۱، P : فشار بیرونی 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 مبنا، C_e : ضریب اثر تغییر سرعت، C_t : ضریب پستی و بلندی، C_g : ضریب اثر تندباد، C_p : ضریب فشار و C_d : ضریب هم راستایی باد است.

۲-۲- آزمایش تونل باد

یکی از ابزار مناسب جهت بررسی تأثیر باد بر سازه‌ها استفاده از آزمایش تونل باد است، استفاده از این روش در اکثر آیین‌نامه‌ها پیشنهاد شده است. در آئودینامیک تجربی یکی از ابزارهای که کارایی خود را به صورت کامل به نمایش گذاشته است تونل باد می‌باشد. این وسیله از آن جهت مورد استفاده قرار می‌گیرد، که می‌توان توسط آن مدلی از اجسام را با شرایط دلخواه آزمایشگاهی مورد تحلیل و بررسی قرارداد. از آنجایی که آئودینامیک، علمی است که پدیده عبور جریان یک سیال را در اطراف اجسام مختلف بررسی می‌کند، تونل باد به عنوان مهم‌ترین ابزار تحقیقاتی در مسائل مختلف آن از دید تجربی و عملی شناخته می‌شود. در شکل ۲، جزئیات تونل باد مورد استفاده نشان داده شده است. تونل باد مورد استفاده، در محل دانشگاه صنعتی شاهرود قرار دارد، این تونل باد دارای طول تقریبی ۱۸ متر و ابعاد اتاق آزمایش، مقطع مربعی برابر با ۱۲۰ سانتی‌متر و طول ۲۰۰ سانتی‌متر بوده که مجهز به یک فن سانتریفوژ و موتور سه فاز ۴۵ کیلو وات است. حداکثر سرعت این تونل باد برابر با ۳۵ متر بر ثانیه بوده و با استفاده از یک کنترل کننده سرعت جریان باد قابل تنظیم است.



(الف)



(ب)



(ج)

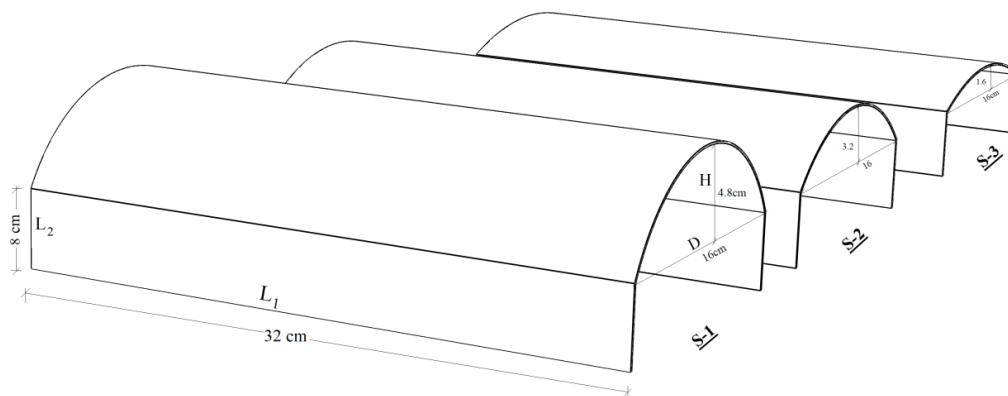


(د)

شکل ۲: (الف) تصویر شماتیک از تونل باد استفاده شده، (ب) تونل باد دانشگاه صنعتی شاهرود، (ج) قرارگیری مدل در تونل باد، (د) اتصال شیلینگ‌های اندازه‌گیری فشار باد به حسگرها

۳-۲- نمونه‌های آزمایش

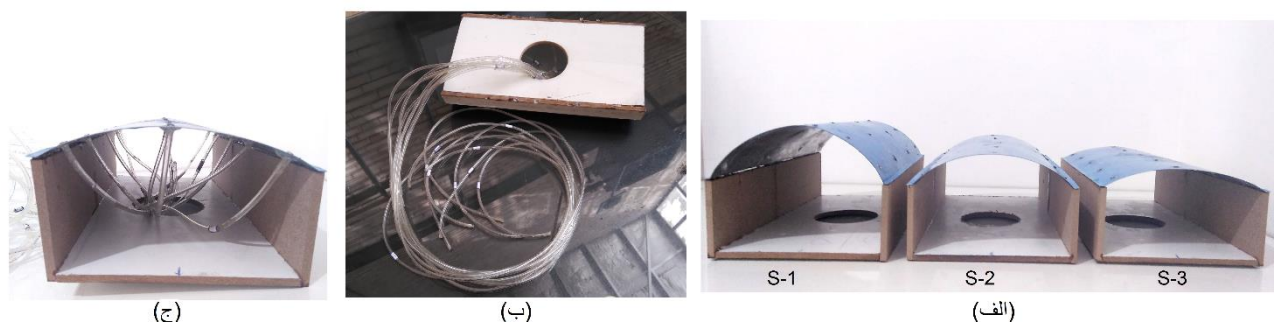
در این پژوهش مجموعاً ۳ مدل آزمایشگاهی با استفاده از آزمایش تونل باد، مورد بررسی قرار گرفته است که مشخصات و نام‌گذاری این مدل‌ها در جدول ۱، ارائه شده است، دهانه و طول سوله در همه نمونه‌ها به ترتیب ۲۰ و ۳۲ سانتیمتر است. در شکل ۳، تصویری شماتیک از مدل‌های مورد بررسی در تحقیق ارائه شده است. مدل‌ها با مقیاس یک صدم ساخته شده است.



شکل ۳: تصویری شماتیک از مدل‌های استفاده‌شده در آزمایش تونل باد

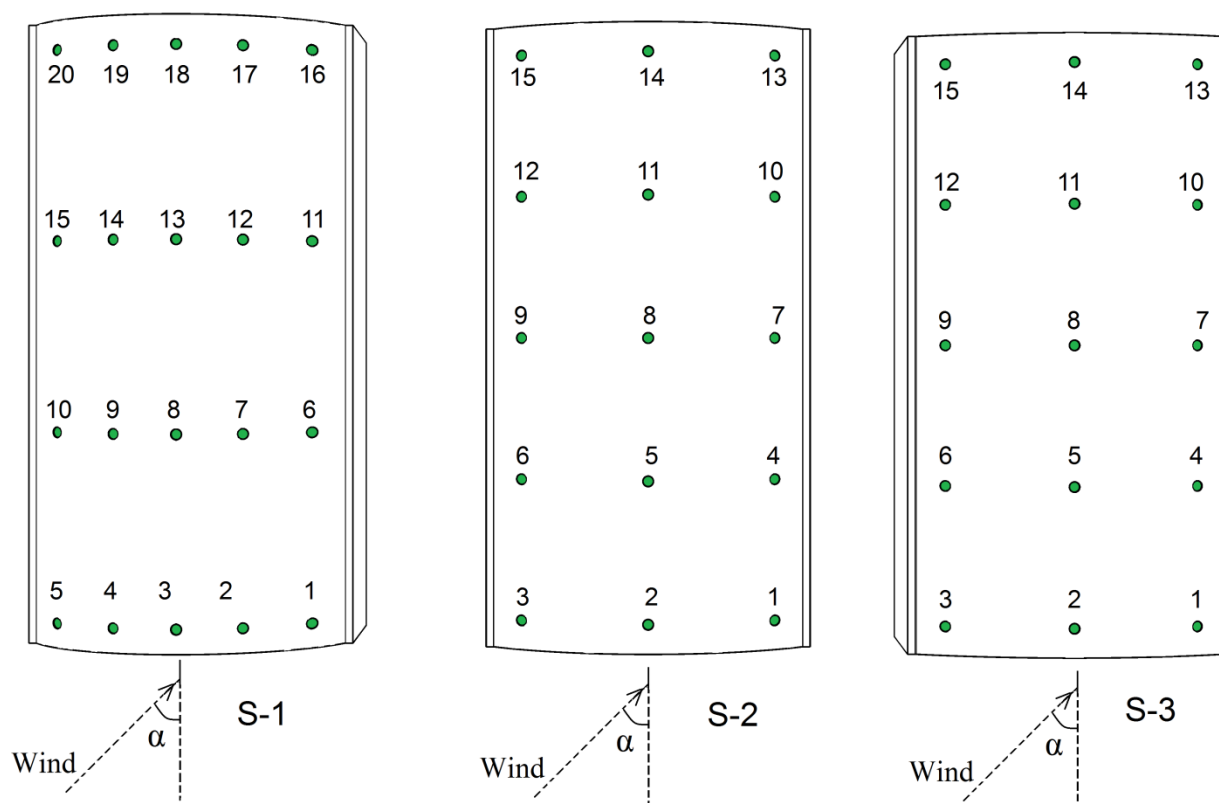
جدول ۱: جزئیات سازه‌های مورد بررسی در این تحقیق

سازه	F=H/D	D(cm)	H(cm)	L ₁ (cm)	L ₂ (cm)
S-۱	۰/۳	۱۶	۴/۸	۳۲	۸
S-۲	۰/۲	۱۶	۳/۲	۳۲	۸
S-۳	۰/۱	۱۶	۱/۶	۳۲	۸



شکل ۴: الف) مدل‌های ساخته‌شده در تونل باد ب) شیلنگ‌های نصب شده بر روی سقف مدل S-3 ج) مدل S-3

همانطور که در شکل (د۲) و شکل (ب۴) نشان داده شده است به هر سوراخ یک شیلنگ جهت اندازه‌گیری فشار نصب شده و شیلنگ از سوی دیگر به سنسورهای اندازه‌گیری فشار متصل شده است. با توجه به محدودیت تعداد سنسورها جهت اندازه‌گیری ضرایب فشار باد، بر روی مدل S-۱ بیست سوراخ در چهار ردیف، و در مدل‌های S-۲ و S-۳ پانزده سوراخ در ۵ ردیف ایجاد شده است، محل قرارگیری سوراخ‌ها در شکل ۵، نشان داده شده است. مدل‌ها در تونل باد بر روی صفحه‌ای مدرج قرار گرفته و هر بار ۵ درجه تا ۹۰ درجه چرخانده شده است و در هر زاویه ضرایب فشار باد اندازه‌گیری شده است. سرعت ورودی باد ۲۰ متر بر ثانیه است.



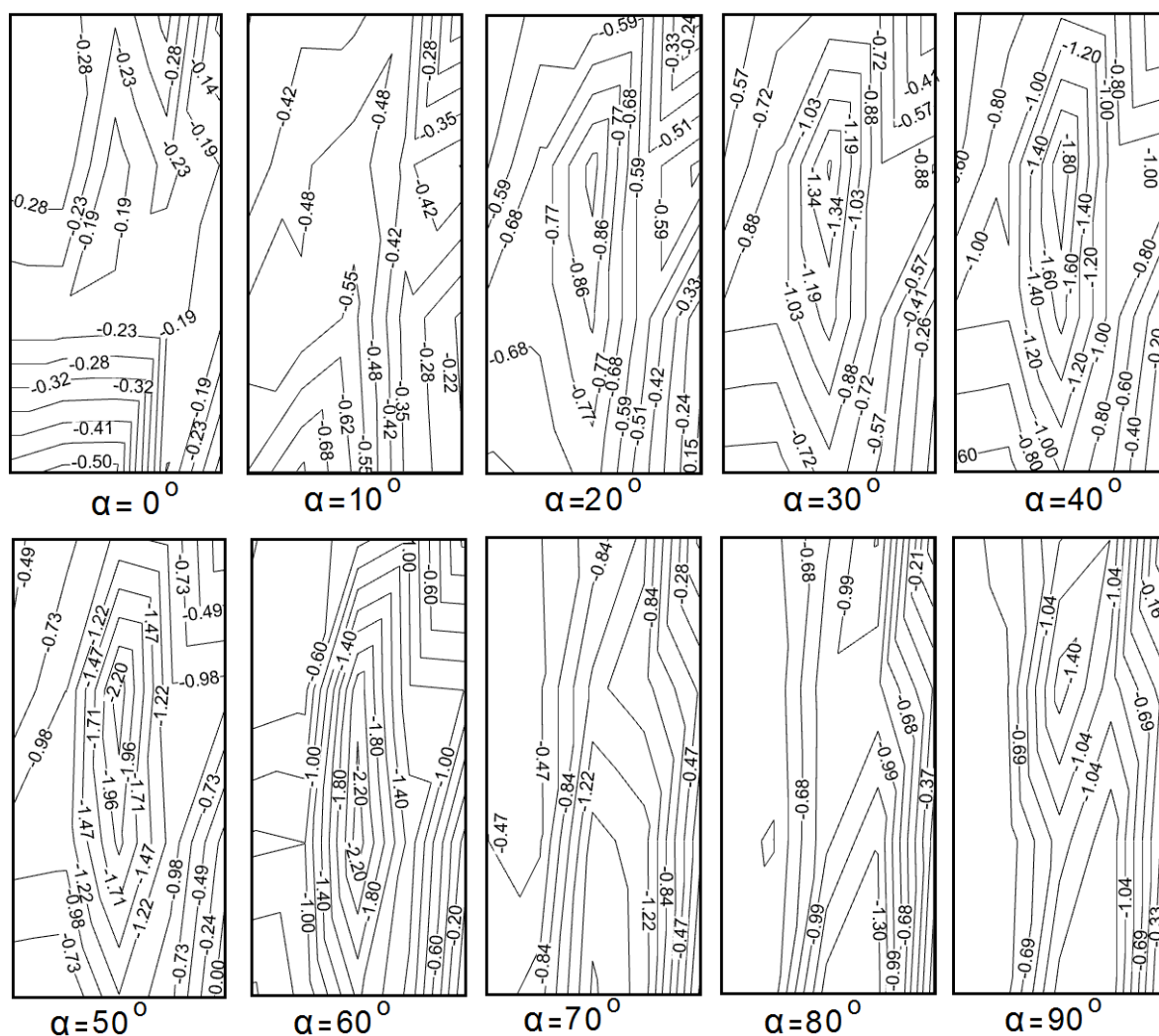
شکل ۵: نقاط ثبت فشار باد در آزمایش تونل باد

۲-۴- معادلات تبدیل فشار دینامیکی سیال

نیروی باد یک ساختمان از جمع جبری بارهای وارده بر سطوح رو به باد و سطوح پشت به باد (فشار و مکش) به دست می‌آید. فشار خالص ناشی از باد در یک جزء یا تمام سطوح ساختمان از جمع جبری فشار و یا مکش ناشی از بار باد به دست می‌آید. ضریب فشار با استفاده از معادله ۲، بدست می‌آید.

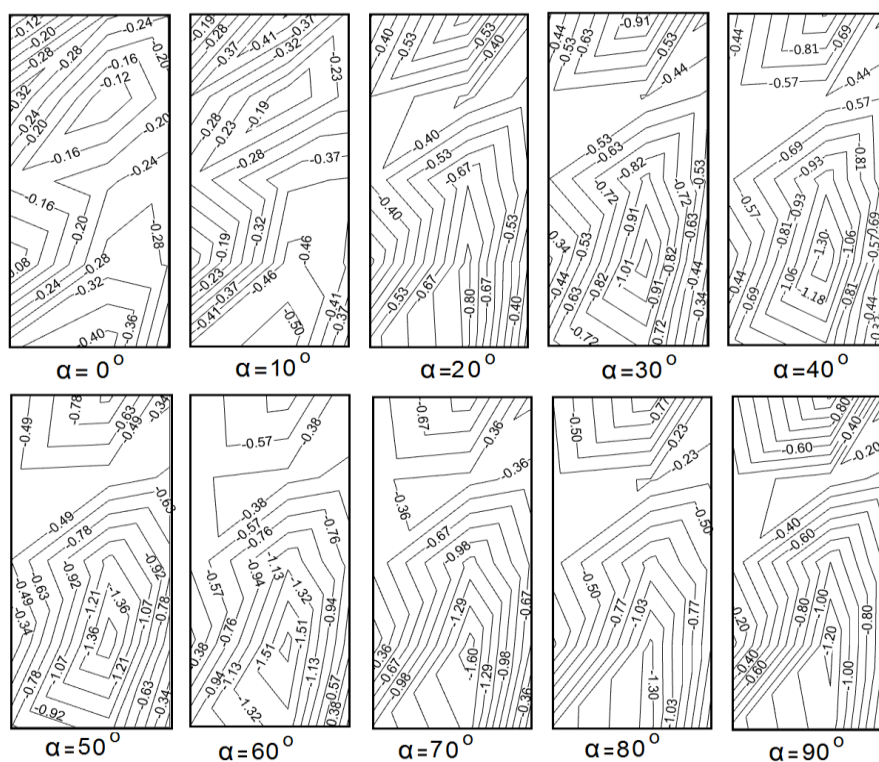
$$C_P = \frac{P - P_0}{\frac{1}{2} \rho U^2} \quad (2)$$

در معادله (۲)، $P - P_0$ نشان‌دهنده اختلاف بین فشار محلی و فشار در نقطه‌ای دور از جسم P_0 است و $\frac{1}{2} \rho U^2$ فشار دینامیکی متوسط می‌باشد. P میزان فشار در نقطه ثبت شده و ρ بیانگر چگالی هوا است.

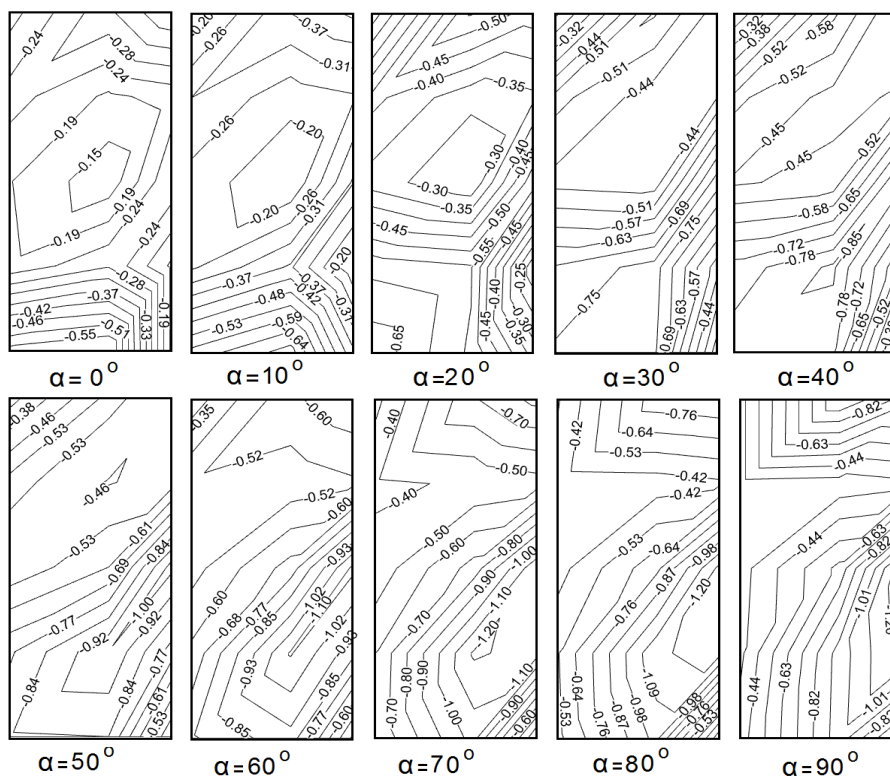


شکل ۶: کانتور ضرایب فشار باد سقف مدل S-1 به دست آمده آزمایش تونل باد

پس از اندازه‌گیری فشار بر روی سقف سوله‌ها (نقاط نشان داده شده در شکل ۵) فشارهای به دست آمده از آزمایش با استفاده از معادله ۲، به ضریب فشار تبدیل می‌شود، با استفاده از نرم‌افزار Tecplot می‌توان کانتور ضرایب فشار را بر روی سازه رسم کرد، کانتور ضرایب فشار بر روی سقف مدل S-1 در شکل ۶، رسم شده است، در این شکل کانتور ضرایب فشار به ازای زاویه اعمال باد رسم شده است. در حالت $\alpha = 0^\circ$ (حالتی که باد در جهت ضلع کوچک‌تر سوله اعمال می‌شود) کمترین ضرایب فشار باد مشاهده می‌شود، بیشینه ضریب فشار منفی در $\alpha = 60^\circ$ برابر $2/2$ قابل مشاهده است. زاویه $\alpha = 90^\circ$ حالتی است که باد به صورت عمود بر سوله وارد می‌شود. در شکل ۷، کانتور ضرایب فشار باد برای سازه S-2 رسم شده است، بیشینه ضریب فشار منفی در $\alpha = 60^\circ$ برابر $1/51$ است. شکل ۸، کانتور ضرایب فشار سازه S-3 را نشان می‌دهد، مشاهده می‌شود با افزایش نسبت ارتفاع به دهانه قوس بیشینه فشار منفی (مکش) نیز افزایش می‌یابد.



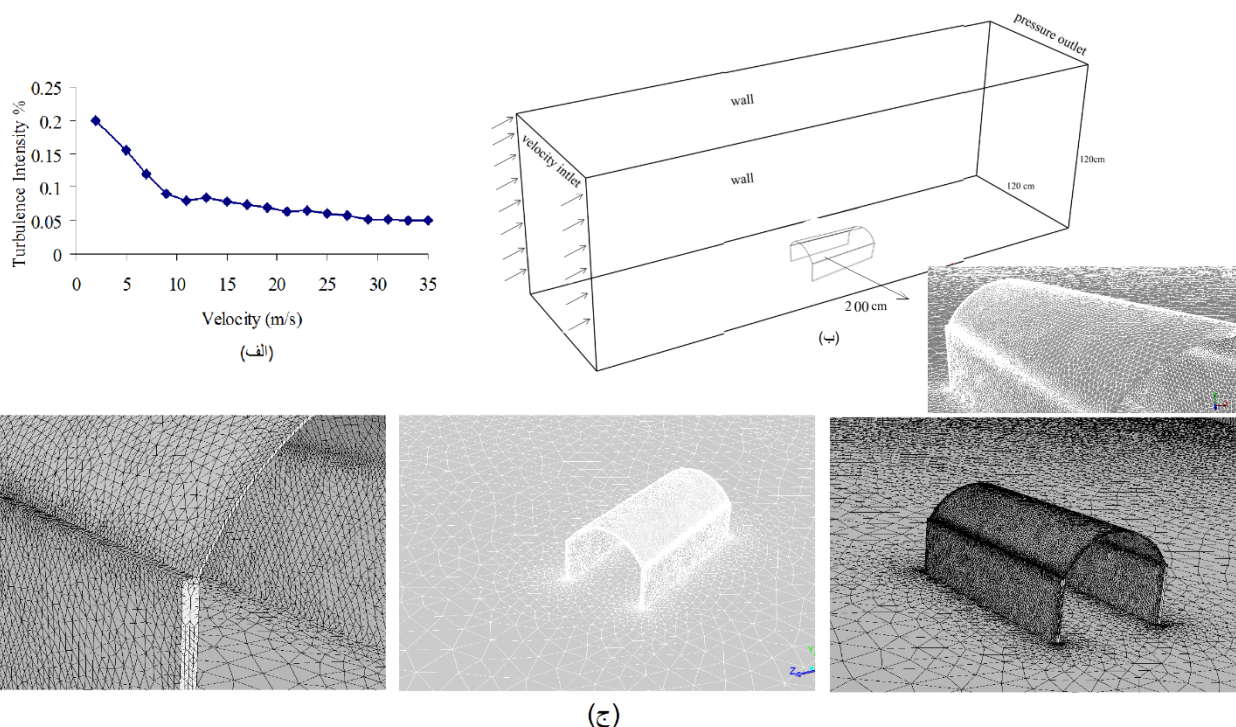
شکل ۷: کانتور ضرایب فشار باد سقف مدل S-۲ به دست آمده آزمایش تونل باد



شکل ۸: کانتور ضرایب فشار باد سقف مدل S-۳ به دست آمده آزمایش تونل باد

۵-۲- مدل سازی عددی

باهداف یافتن الگوی بارگذاری بحرانی بر روی کل سازه (دیواره و سقف) از روش مدل سازی عددی مبتنی بر روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) از نرم افزار ANSYS بهره گرفته شده است. در شکل ۹، نمودار تغییرات شدت اغتشاش و همچنین شرایط مرزی تونل باد و مدل مش بندی سازه نشان داده شده است، شدت اغتشاشات جریان آزاد در ماکزیمم سرعت تونل باد برابر 0.0005 بوده که این مقدار با کاهش سرعت تونل باد افزایش پیدا کرده و مینیمم سرعت تونل باد که سرعت تقریبی آن ۲ متر بر ثانیه می باشد به مقدار 0.002 می رسد.



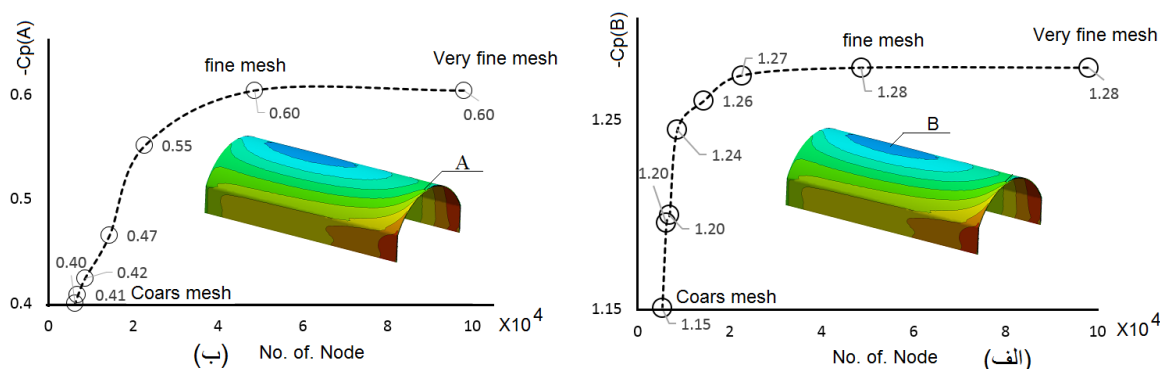
شکل ۹: نمودار تغییرات شدت اغتشاشات بر حسب سرعت در مرکز اتاق آزمون، (ب) شرایط مرزی تونل باد در مدل سازی عددی، (ج) مش بندی مدل در تحلیل عددی

شرایط مرزی تونل باد که در مدل سازی عددی در نظر گرفته شده است در شکل (۹ب) نشان داده شده است، شرط مرزی سرعت ورودی Velocity inlet بیشتر برای جریان های تراکم ناپذیر (با اعداد ماخ کمتر از یک) استفاده می شود، در زمانی که مقادیر فشار ورودی مشخص باشد می توان از شرط مرزی فشار ورودی Pressure inlet استفاده کرد، این مرز برای جریان تراکم پذیر و تراکم ناپذیر استفاده می گردد. شرط مرزی دیواره (Wall) در مرزهایی که نواحی سیال یا جامد محصور می گردد، بکار گرفته می شود. در جریان های لزج، شرط غیر لغزشی بودن (No-Slip) جریان چسبیده به دیواره، پیش فرض نرم افزار است. البته می توان با تعیین میزان تنش برشی، سرعت جریان چسبیده به دیوار را مشخص نمود. در مدل سازی عددی جریان باد به صورت یکنواخت در ارتفاع تونل در نظر گرفته شده است.

۱-۵-۲- تحلیل استقلال شبکه

باهداف یافتن ابعاد مش بهینه که ضرایب فشار باد به دست آمده مستقل از ابعاد مش باشد، تحلیل با چند اندازه مختلف مش انجام می گیرد و تغییرات ضرایب فشار باد در دو نقطه A و B با تغییرات اندازه مش، رسم شده است، که این نتایج در شکل ۱۰، ارائه شده است، مشاهده می شود با انتخاب ابعاد مش که در شکل با مش (FINE MESH) نشان داده شده است ضرایب فشار در این دو نقطه بدون تغییر

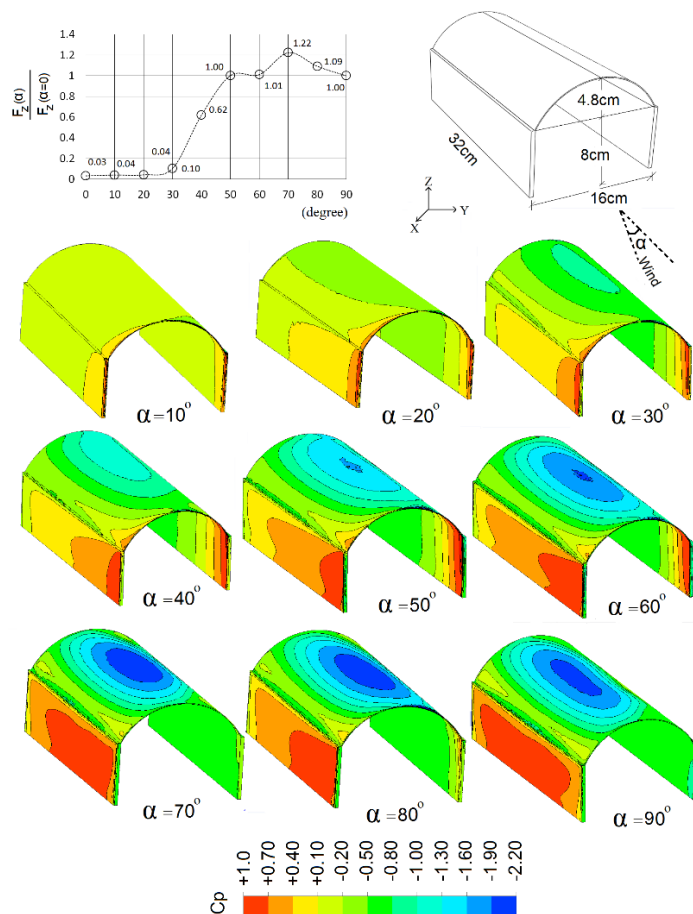
باقی می ماند، و بدین ترتیب ابعاد مش مناسب به دست می آید. لازم به ذکر است مدلی که در آنالیز حساسیت مش استفاده شده است، ارتفاع دیواره و ضخامت دیواره و سقف با مدل های مذکور متفاوت است.



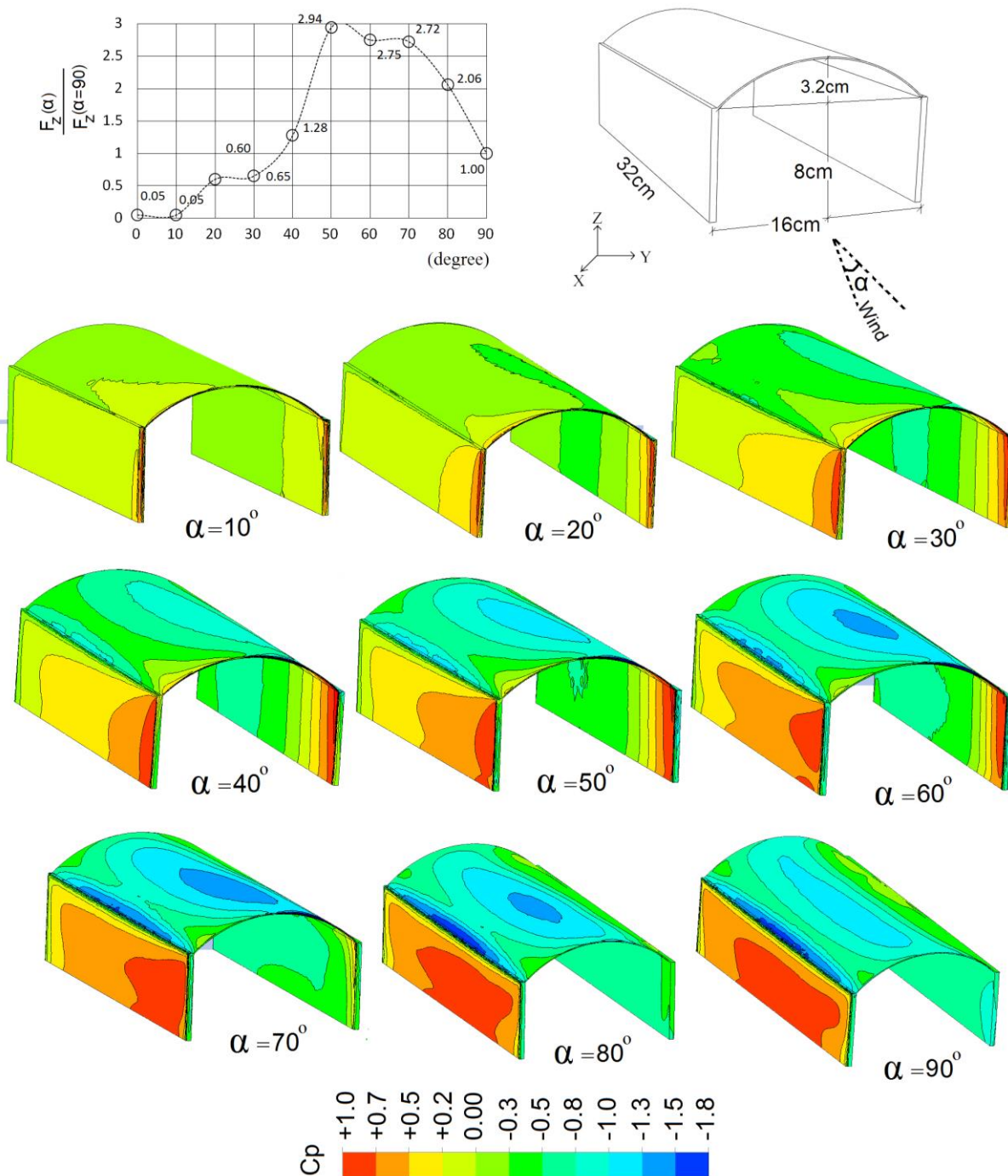
شکل ۱۰: تغییرات ضرایب فشار باد با تغییرات اندازه مش، الف) نقطه B، ب) نقطه A

۲-۵-۲- کانتور ضرایب فشار باد بر روی سه سازه S-1، S-2، S-3

کانتور ضرایب فشار باد مربوط به سازه S-1، S-2، S-3 به ترتیب در شکل های ۱۱ تا ۱۳ به ازای تغییرات زاویه اعمال باد رسم شده است.

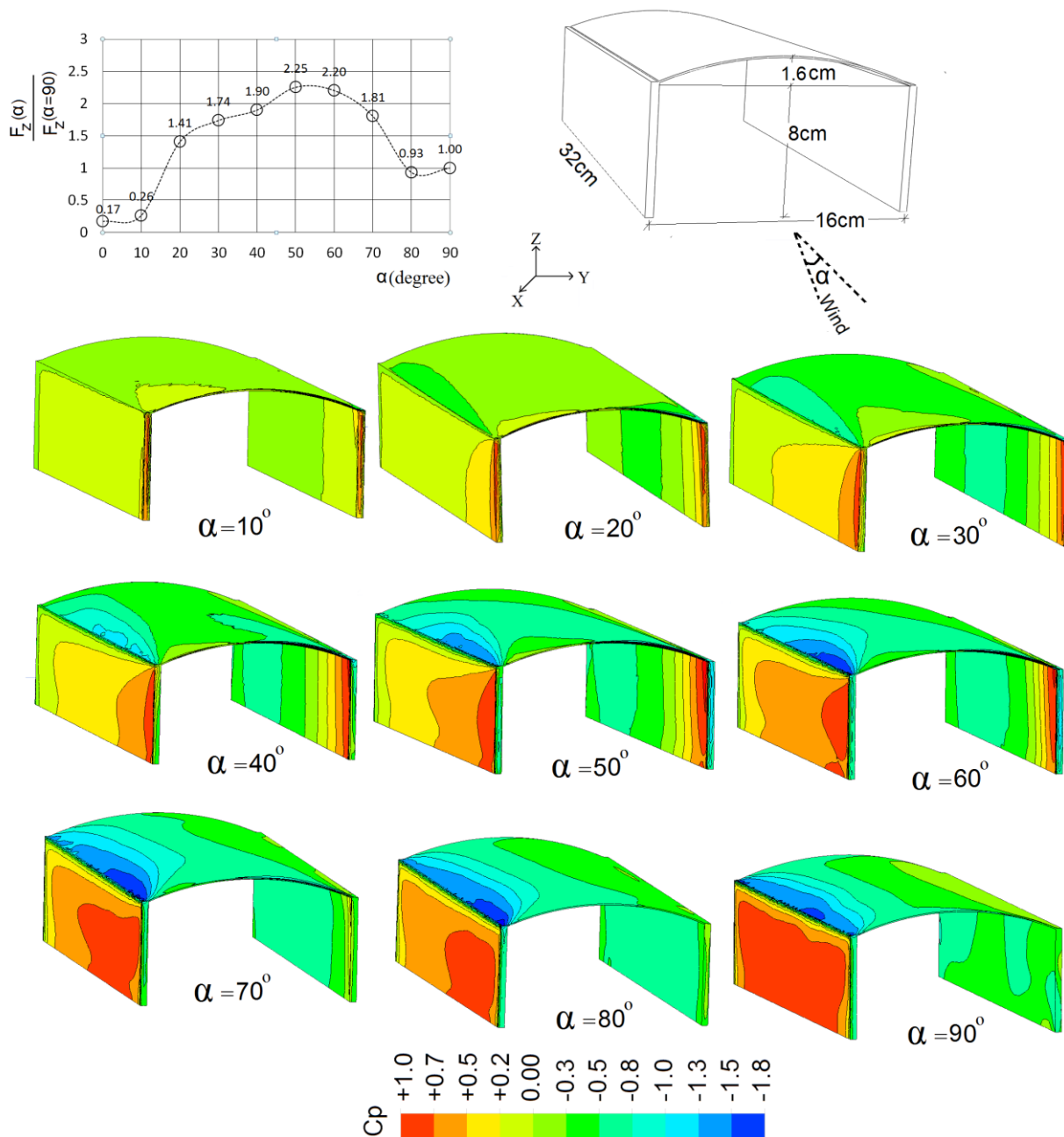


شکل ۱۱: کانتور ضرایب فشار باد بر روی مدل S-1 به دست آمده از مدل سازی عددی



شکل ۱۲: کانتور ضرایب فشار باد بر روی مدل S-۲ به دست آمده از مدل سازی عددی

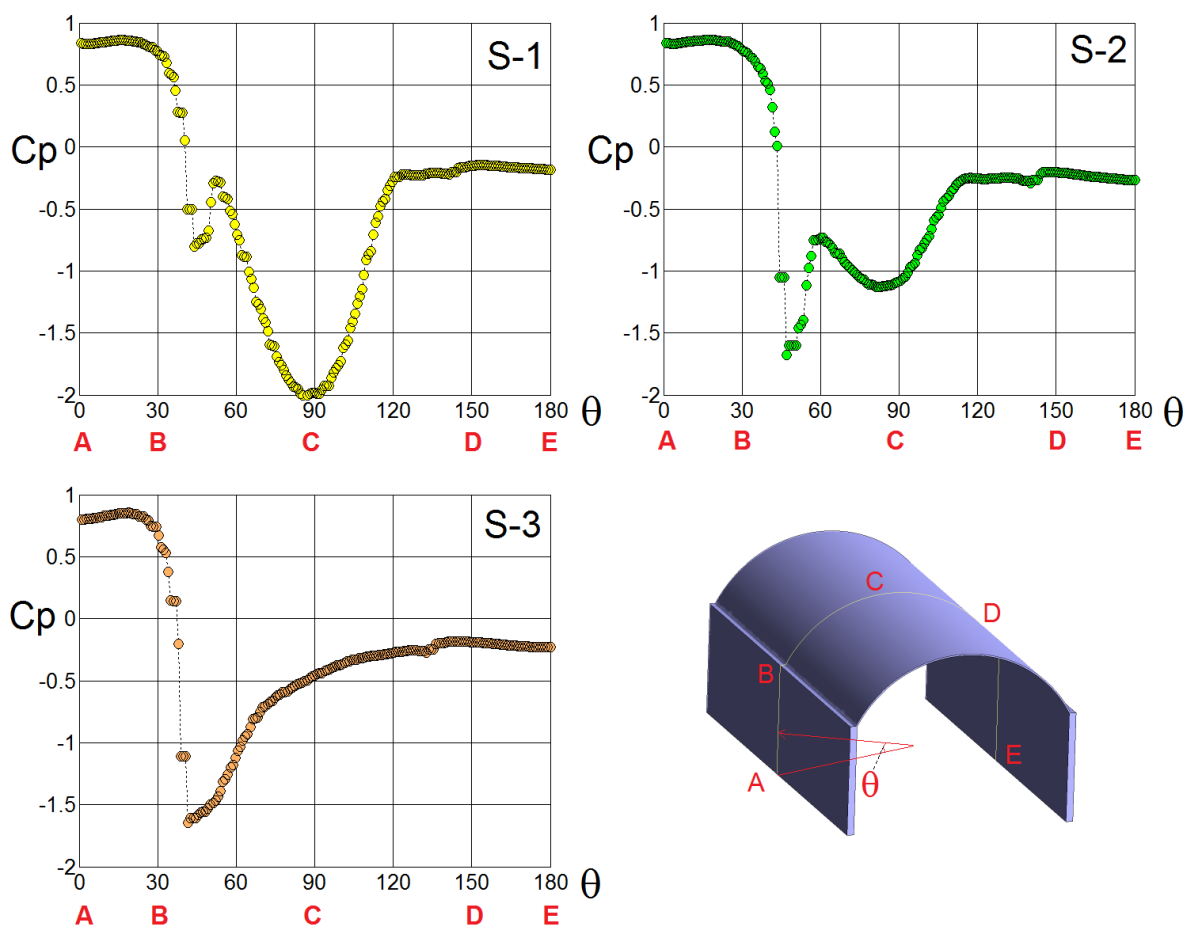
نمودار نشان داده شده در شکل های ۱۱ تا ۱۳ نشان دهنده عکس العمل قائم سازه به علت باد اعمال شده در زوایای مختلف α نسبت به عکس العمل قائم سازه در حالت اعمال باد در $\alpha=0^\circ$ است، در سازه S-۱ بیشینه مقدار $1/22$ در زاویه $\alpha=70^\circ$ را نشان می دهد، همچنین در سازه S-۲ و S-۳ بیشینه مقدار مذکور در $\alpha=50^\circ$ رخ می دهد که این مقادیر به ترتیب برابر $2/94$ و $2/25$ است.



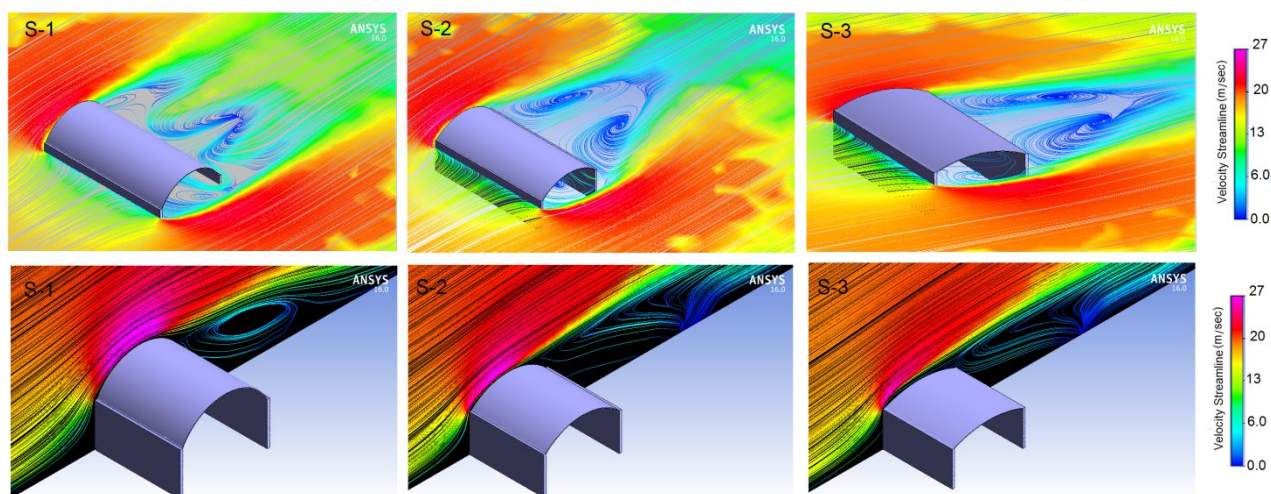
شکل ۱۳: کانتور ضرایب فشار باد بر روی مدل S-۳ به دست آمده از مدل سازی عددی

شکل ۱۳، کانتور ضرایب فشار باد با توجه به تغییرات زاویه اعمال باد α نشان داده شده است، بیشینه ضریب فشار منفی (مکش) در سازه های S-۱ و S-۲ و S-۳ به ترتیب برابر $2/2$ و $1/8$ و $1/8$ است. کمترین ضرایب فشار باد در حالت $\alpha = 0^\circ$ رخ می دهد. که علت این اتفاق در باز بودن زیر سقف است.

در شکل ۱۴، ضرایب فشار باد C_p بر روی محور میانی سازه در حالت $\alpha = 90^\circ$ که در شکل نشان داده، ترسیم شده است. بیشینه فشار منفی در سازه S-۱ و S-۲ و S-۳ به ترتیب برابر 2 و $1/7$ و $1/6$ است. این نتیجه بیانگر این موضوع است که با افزایش نسبت ارتفاع به دهانه قوس بیشینه ضریب فشار منفی افزایش می یابد.



شکل ۱۴: نمودار ضرایب فشار در مقطع میانی سازه‌ها

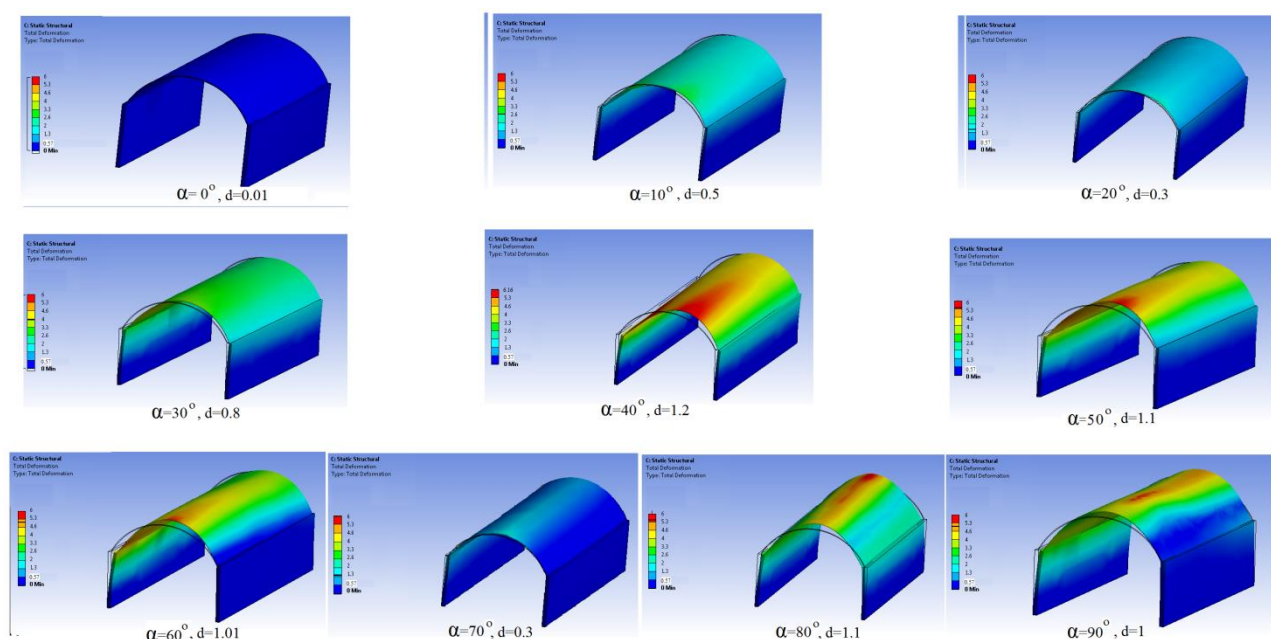


شکل ۱۵: تغییرات خطوط جریان باد در مجاورت سازه

هنگامی که سیال از روی سازه عبور می‌کند، می‌تواند دارای اعداد رینولدز متفاوتی باشد. به‌طور کلی به هر میزان عدد رینولدز بزرگ‌تر باشد، ناحیه‌ای از میدان جریان که در آن اثرات ویسکوزیته مهم هستند، کوچک‌تر است. مشخصه دیگری از جریان نیز مشاهده می‌گردد که

جداسازی جریان نام دارد، با افزایش بیشتر عدد رینولدز اثرات اینرسی سیال اهمیت پیدا کرده و در بعضی موقعیت‌ها خط جریان روی جسم به گونه‌ای است که نمی‌تواند مسیر منحنی اطراف جسم را دنبال کند و از روی جسم بلند می‌شود. نتیجه این مسئله، گردابه جدا شده پشت استوانه است که در آن مقداری از سیال به سمت بالادست و در واقع مخالف جهت جریان بالادست حرکت می‌کنند. با افزایش عدد رینولدز، ناحیه ویسکوز به پایین دست جریان رانده می‌شود که لایه مرزی نازک روی قسمت جلویی سازه وجود دارد و یک ناحیه جریان‌های حلقوی (*wake*) نامنظم در قسمت پایین دست سازه رخ می‌دهد. جریان در خارج از لایه مرزی و ناحیه جریان‌های حلقوی، مانند جریان بدون ویسکوز است. گرادیان سرعت در لایه مرزی و نواحی جریان‌های حلقوی خیلی بیشتر از بقیه نواحی میدان جریان است. از آنجاکه تنش‌های برشی (اثرات ویسکوزیته) حاصل ضرب ویسکوزیته سیال و گرادیان سرعت هستند، اثرات ویسکوزیته به لایه مرزی و ناحیه جریان‌های حلقوی محدود می‌شوند. افزایش گردابه در پشت سازه باعث افزایش ضرایب منفی در این ناحیه می‌شود. در شکل ۱۵، خطوط جریان در حالت $\alpha=0^\circ$ رسم شده است. شکل ۱۶، تغییر شکل به وجود آمده در سازه S-1 تحت اثر تغییر جهت اعمال باد بر سازه رسم شده است، پارامتر d بیانگر بیشینه تغییر شکل به وجود آمده در سازه به علت بار باد اعمال شده در زاویه α نسبت به بیشینه تغییر شکل به وجود آمده در سازه در زاویه $\alpha=90^\circ$ است. ماکزیمم و می‌نیمم تغییر شکل در سازه به ترتیب مربوط به $\alpha=40^\circ$ و $\alpha=0^\circ$ است.

هدف از ارائه شکل ۱۶، نشان دادن تغییر شکل به وجود آمده در سازه ناشی از تغییر زاویه اعمال باد است، اگر یکی از پارامترهای تعیین کننده در یافتن الگوی بارگذاری باد وارد بر سازه های مورد بررسی را میزان تغییر شکل به وجود آمده در سازه در نظر بگیریم، شکل ۱۶ می‌تواند مفید باشد. در این مدل سازی فرض شده است که دیواره و سقف از ورق فولادی ST37 ساخته شده باشد. جهت بدست آوردن تغییر شکل سازه با استفاده از نرم افزار ANSYS، پس از تحلیل CFD در بخش fluent flow فشار باد بدست آمده بر روی سازه به static Structural انتقال داده شده و تغییر شکل سازه به دست می‌آید.



شکل ۱۶: کانتور تغییر شکل سازه S-1 نسبت به تغییر زاویه اعمال باد

۳- نتیجه گیری

در این تحقیق اثر بار باد بر سوله با سقف قوسی با سه نسبت ارتفاع به دهانه قوس برابر ۰/۱ و ۰/۲ و ۰/۳ با استفاده از آزمایش تونل باد و مدل سازی عددی مورد بررسی قرار گرفته و نتایج ذیل حاصل شده است.

- ۱- ضرایب فشار در وجوه رو به باد عدد مثبت را نشان می دهد که نشان دهنده فشار در وجوه رو به باد است. بیشینه فشار مثبت در حالت $\alpha=90^\circ$ (حالتی که جریان باد عمود بر سوله است) رخ می دهد که در این حالت $C_p=1$ می باشد.
- ۲- با افزایش نسبت ارتفاع به دهانه قوس بیشینه ضرایب فشار باد منفی (مکش) ، افزایش می یابد به نحوی که بر روی محور میانی سازه در حالت $\alpha=90^\circ$ ، بیشینه فشار منفی در سازه ۱-S و ۲-S و ۳-S به ترتیب برابر ۲- و ۱/۷- و ۱/۶- است.
- ۳- در سازه ۱-S (نسبت ارتفاع به دهانه ۰/۳) ، بیشینه تغییر شکل ایجاد شده به ازای زاویه اعمال باد $\alpha=40^\circ$ است که این میزان ۲۰ درصد بیشتر از حالت $\alpha=90^\circ$ است.
- ۴- عکس العمل قائم سازه که نشان دهنده نیروی ایجاد شده در راستای قائم (uplift) است، در حالت های مختلف اعمال باد نسبت به حالت $\alpha=90^\circ$ ، ۱-S و ۲-S و ۳-S به ترتیب برابر بیشینه ۱/۲۲ و ۲/۹۴ و ۲/۲۵ است. کانتورهای ضرایب فشار باد در گوشه ها نشان دهنده مکش ها به صورت موضعی است که باید در طراحی این مسئله به ویژه در طراحی پوشش سقف در نظر گرفته شود.

۴- مراجع و منابع

- [1] Lu, C. L., Li, Q. S., Huang, S. H., Chen, F. B., & Fu, X. Y. (2012). Large eddy simulation of wind effects on a long-span complex roof structure. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 100(1), 1-18.
- [2] Fu, J. Y., Liang, S. G., & Li, Q. S. (2007). Prediction of wind-induced pressures on a large gymnasium roof using artificial neural networks. *Computers & structures*, 85(3-4), 179-192.
- [3] Ding, Z., & Tamura, Y. (2013). Contributions of wind-induced overall and local behaviors for internal forces in cladding support components of large-span roof structure. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 115, 162-172.
- [4] Yasui, H., Marukawa, H., Katagiri, J., Katsumura, A., Tamura, Y., & Watanabe, K. (1999). Study of wind-induced response of long-span structure. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 83(1-3), 277
- [5] Li, D., Liu, B., & Cheng, Y. (2020). Wind pressure coefficients zoning method based on an unsupervised learning algorithm. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020.
- [6] American Society of Civil Engineers. *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures (ASCE/SEI)*
- [7] Architectural Institute of Japan, *Recommendations for Loads on Buildings: AIJ- 2004*, Architectural Institute of Japan, Tokyo, Japan, 2004.
- [8] National Research Council of Canada, *User's Guide: NBC 2005 Structural Commentaries: Part 4 of Division B: NBC- 2005*, National Research Council of Canada, Ottawa, Canada, 2005.

- [9] Sadeghi, H., Heristchian, M., Aziminejad, A., & Nooshin, H. (2017). Wind effect on grooved and scallop domes. *Engineering Structures*, 148, 436-450.
- [10] Park, M. J., Yoon, S. W., Kim, Y. C., & Cheon, D. J. (2022). Wind Pressure Characteristics Based on the Rise-Span Ratio of Spherical Domes with Openings on the Roof. *Buildings*, 12(5), 576.
- [11] Lee, J. H., Kim, Y. C., Cheon, D. J., & Yoon, S. W. (2022). Wind pressure characteristics of elliptical retractable dome roofs. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 21(4), 1561-1577.
- [12] Verma, A., Meena, R. K., Raj, R., & Ahuja, A. K. (2022). Experimental investigation of wind induced pressure on various type of low-rise structure. *Asian Journal of Civil Engineering*, 23(8), 1251-1265.
- [13] Khosrowjerdi, S., & Sarkardeh, H. (2022). Effect of wind load on combined arches in dome buildings. *The European Physical Journal Plus*, 137(2), 227.
- [14] Sun, X., Arjun, K., & Wu, Y. (2020). Investigation on wind tunnel experiment of oval-shaped arch-supported membrane structures. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 206, 104371.
- [15] davarzani, hamidreza, ahmad ganjali, hossein sadeghi, and rasul mohebbi. 2022. Determination of wind pressure coefficients on cylindrical storage tanks, using wind tunnel testing and numerical modeling. *Journal of Structural and Construction Engineering*. 9(9), 87-102
- [16] Su, N., Peng, S., & Uematsu, Y. (2021). Reynolds number effects on the wind pressure distribution on spherical storage tanks. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 208, 104464.
- [17] Bani Vahid, Sadeghi Hossein, and Tousi Alireza. (2022). Determination of wind pressure coefficients on cylindrical roofs (Barrel roofs). *Journal of Structural and Construction Engineering*. 9 (8), 180-197
- [18] Nejati, A., Sadeghi, H., & Heristchian, M. (2023). Wind effect on scallop domes with negative amplitude and prominence using Experimental and Numerical Study. *International Journal of Space Structures*
- [19] Sheikh Aleslami, A. A., & Sadeghi, H. (2023). Effect of Wind Load on Milad Tower and Adjacent Buildings Case study: Shed Adjacent to Tower. *Iranian (Iranica) Journal of Energy & Environment*, 14(3), 289-300.
- [20] Rajabi, E., Sadeghi, H., & Hashemi, M. R. (2022). Wind effect on building with Y-shaped plan. *Asian Journal of Civil Engineering*, 23(1), 141-151.
- [21] Davarzani, H. R., Ganjali, A., Sadeghi, H., & Mohebbi, R. (2023). Numerical and Experimental Study of Wind Effect on the Storage Tanks Based the Tank Adjacency. *Experimental Techniques*, 1-14.