

Determination of wind pressure coefficients on cylindrical roofs (Barrel roofs)

Vahid Bani¹, Hossein Sadeghi^{2*}, Alireza Tousi³

1- MS.c Student, Department of civil engineering, shahrood non-profit and non-government higher education institute, shahrood, iran

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Damghan Branch, Islamic Azad University, Damghan, Iran

3- Bachelor Graduated, Department of Civil Engineering, Damghan Branch, Islamic Azad University, Damghan, Iran

ABSTRACT

Cylindrical (Barrel) roofs are a type of space structure that are used to cover large openings. In these structures, due to low dead load, wind load has a greater effect on this type of structure. In calculating wind force, one of the coefficients related to the geometry of the structure is the C_p coefficient, which is provided for a number of common structures in the codes. If these coefficients are not present in the codes, the method can be Wind tunnel testing should be used by constructing a structural model and placing it in the wind tunnel and obtaining the wind pressure coefficients. Another solution is to model the wind tunnel using software. Computational fluid dynamics (CFD) method can be used to calculate the load effect. In recent decades, this method has become a powerful tool for wind flow modeling as the computing power of hardware increases. In this research, numerical modeling of wind flow on the surface of a cylindrical structure (Barrel) has been done and the determination of wind pressure coefficients has been done with the used of Ansys software. Wind pressure coefficients for Barrel roof with three height to span ratios of 0.1, 0.3 and 0.5 are presented. Also, the equation these wind pressure coefficients is obtained.

ARTICLE INFO

Receive Date: 20 September 2021

Revise Date: 08 January 2022

Accept Date: 01 February 2022

Keywords:

Wind pressure coefficient;
Computational fluid dynamics;
Wind force;
Wind tunnel;
Barrel vault.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.304086.2567>

*Corresponding author: Hossein Sadeghi.
Email address: H.Sadeghi@damghaniau.ac.ir

تعیین ضرایب فشار باد بر روی سقف‌های استوانه‌ای (چلیک)

وحید بانی^۱، حسین صادقی^{۲*}، علیرضا طوسی^۳

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

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

۳- کارشناس، گروه مهندسی عمران، واحد دامغان، دانشگاه آزاد اسلامی، دامغان، ایران

چکیده

سقف‌های نیمه استوانه‌ای (چلیک) نوعی سازه فضاکار هستند که به منظور پوشش دهانه‌های بزرگ مورد استفاده قرار می‌گیرند، در این سازه‌ها به دلیل بار مرده کم، بار باد اثر بیشتری بر روی این نوع سازه‌ها خواهد داشت. در محاسبه نیروی باد یکی از ضرایبی که به هندسه سازه ارتباط دارد ضریب C_p است که این ضریب برای تعدادی از سازه‌های متداول در آیین‌نامه‌ها ارائه شده است، در صورت عدم وجود این ضرایب در آیین‌نامه‌ها میتوان از روش آزمایش تونل باد با ساخت مدل سازه و قرار دادن در تونل باد و به دست آوردن ضرایب فشار باد استفاده کرد. راه حلی دیگر مدل‌سازی تونل باد با استفاده از نرم‌افزار است، از روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) می‌توان برای محاسبه تأثیر بار باد بر سازه و محاسبه ضرایب آن استفاده کرد. در دهه‌های اخیر، این روش هم‌زمان با افزایش توان محاسباتی سخت‌افزارها، به ابزاری قدرتمند برای مدل‌سازی جریان باد تبدیل شده است. در این تحقیق مدل‌سازی عددی جریان باد بر سطح سازه‌ای نیمه استوانه (چلیک) صورت گرفته است و تعیین ضرایب فشار باد، به کمک نرم‌افزار Ansys انجام شده است. ضرایب فشار باد برای چلیک با سه نسبت ارتفاع به دهانه ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ ارائه شده و معادله حاکم بر ضرایب فشار باد به دست آمده است.

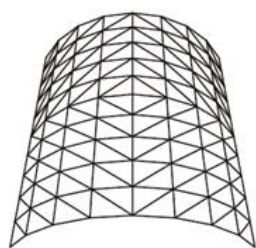
کلمات کلیدی: ضریب فشار باد، دینامیک سیالات محاسباتی، نیروی باد، تونل باد، چلیک

سابقه مقاله:		شناسه دیجیتال:			
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	doi:
۱۴۰۰/۰۶/۲۹	۱۴۰۰/۱۰/۱۸	۱۴۰۰/۱۱/۱۲	۱۴۰۰/۱۱/۱۲	۱۴۰۱/۰۸/۳۱	https://doi.org/10.22065/jsce.2022.304086.2567
*نویسنده مسئول:		حسین صادقی			
پست الکترونیکی:		H.Sadeghi@damghaniau.ac.ir			

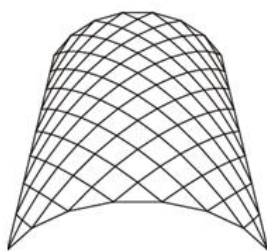
۱- مقدمه

سازه‌های چلیک، یکی از سازه‌های مرسوم مورد استفاده برای پوشش دهانه‌های بزرگ است با توجه به اینکه اغلب برای این سازه‌ها با توجه به دهانه‌های بزرگی که دارند از سقف‌های سبک استفاده می‌گردد در نتیجه بار باد به‌عنوان بار جانبی غالب در نظر گرفته می‌شود. در شکل (۱)، چند نمونه از این سقف‌ها مشاهده می‌شود. این سازه‌ها به‌صورت تک دهانه و چنددهانه ساخته می‌شوند، جهت محاسبه بار باد در آیین‌نامه، ضرایب فشار برای بعضی از سازه‌های مرسوم ارائه شده است، برای طراحی سازه‌هایی که ضریب فشار آن‌ها در آیین‌نامه وجود ندارد باید از روش مدل‌سازی عددی یا آزمایش تونل باد بهره گرفت، در این مقاله با استفاده از مدل‌سازی عددی (CFD)، ضرایب فشار باد برای چلیک تک دهانه، دو و سه دهانه با سه نسبت ارتفاع به دهانه ۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷ ارائه شده است.

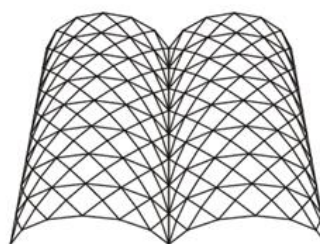
اسمیت و هانسون (۱۹۸۲) در زمینه شبیه‌سازی باد جزو اولین کسانی هستند که ساختمان آئرو دینامیک را به‌صورت عددی بررسی نمودند [۱]. هوکسی و ریچاردسون (۱۹۸۳) نیروهای ناشی از باد بر روی نمونه‌های واقعی گلخانه‌های قوسی شکل، با نسبت ارتفاع به دهانه ۰.۵ مورد آزمایش و بررسی قرار دادند [۲]. تی و طهوری (۱۹۸۸) مدل‌هایی را به شکل نیم استوانه با نسبت خیز به دهانه ۰.۵، در تونل باد با جریان مرزی جدار صاف و عدد رینولدز پایین بررسی کردند که از نتایج کاربردی این تحقیق می‌توان به بررسی تأثیر نسبت طول به عرض بر شدت فشار باد میانگین وارد بر تاج چلیک اشاره کرد [۳]. هولمز و پترسون (۱۹۹۳) به محاسبه نیروهای میانگین باد بر سطوح قوسی شکل پرداختند. از نتایج این تحقیق می‌توان به تعیین ضریب فشار باد در راستاهای ۰ و ۴۵ درجه نسبت به محور چلیک اشاره کرد. همچنین از این نتایج برای صحت‌سنجی و بررسی دقت مدل‌سازی عددی جریان باد پیرامون همان ساختمان‌ها در هر دو راستای ۰ و ۴۵ درجه استفاده کردند [۴]. لتچفورد و سارکار (۲۰۰۰) به‌طور تجربی بر اساس آزمایش تونل باد اثر Rough and smooth parabolic نحوه توزیع فشار روی گنبد بررسی و آن را با نتایج توزیع فشار در گنبدهای کره‌ای مقایسه کردند [۵]. گولساو بالباسترو (۲۰۰۷) به بررسی نیروهای ناشی از جریان باد وارد بر سقف چلیکی یک ساختمان در ابعاد واقعی پرداخت، او در این پژوهش مدل‌سازی‌هایی در تونل باد انجام داده و نتایج را به‌صورت ضرایب فشار خارجی، داخلی و برآیند ارائه و از این نتایج برای مقایسه کمی و کیفی با نتایج مدل‌سازی عددی جریان باد اطراف آن ساختمان استفاده کرد [۶]. چنگ و فو (۲۰۱۰) با استفاده از آزمون تونل باد، اثر عدد رینولدز را بر خصوصیات آئرو دینامیکی گنبدهای نیم‌کره‌ای در جریان‌های لایه‌مرزی آرام و آشفته بررسی کردند [۷]. ویزوتو و فریرا (۲۰۱۵) با استفاده از روش CFD و آزمایش‌های تونل باد تحقیقاتی را برای بررسی ضرایب نیروی باد روی پوسته‌های شش‌ضلعی انجام دادند [۸]. صادقی و همکاران (۲۰۱۷) اثر بار باد بر گنبدهای اسکالپ را مطالعه کرده و معادلاتی را برای تعیین فشار باد در شیارهای گنبدهای صدفی پیشنهاد نمودند [۹]. همچنین صادقی و همکاران (۲۰۱۸) با شبیه‌سازی گنبدهای نیم‌کره‌ای، مطالعاتی را با تمرکز بر اثر ضریب انعطاف‌پذیری بر ضریب شکل (C_p) انجام داده و با نتایج آزمایش تونل باد مقایسه نمودند [۱۰]. کائو و تامورا یک مطالعه LES، در مورد جریان‌ات اطراف Wall-mounted hemisphere غوطه‌ور در یک جریان لایه‌مرزی با $Re = 7$ انجام داده که شامل جریان‌های بحرانی و فوق بحرانی می‌شود [۱۱]. کیو و همکاران (۲۰۱۴) تحقیق گسترده‌ای را بر روی سقف‌های استوانه‌ای با ابعاد مختلف انجام داده و ضرایب فشار باد بر روی این سازه‌ها را گزارش نمودند [۱۲]. لیو و همکاران (۲۰۱۱) اثرات بار باد را بر روی یک سازه با دهانه زیاد بررسی کرده که در این مطالعه از نتایج آزمایش تونل باد و اندازه‌گیری در محل بهره گرفته شده است [۱۳]. کیم و همکاران (۲۰۱۹) ضرایب فشار باد بر روی گلخانه‌های تک دهانه را با استفاده از آزمایش تونل باد به دست آورده‌اند [۱۴]. هیو و همکاران (۲۰۱۹) ضمن بررسی اثر بلند شدگی (Uplift) بر روی مخازن ذخیره در اثر بار باد، همچنین اثر کماتش بر پوسته‌های مخازن را نیز بررسی نمودند [۱۵]. چن و همکاران (۲۰۱۹) به تحقیق در مورد اثر فشار خارجی و فشار داخلی بر روی گنبدهای با دهانه زیاد و ضخامت کم پرداخته‌اند، در این تحقیق همچنین اثر هم‌جواری سازه‌ها نیز مورد مطالعه قرار گرفت [۱۶]. کیم و همکاران (۲۰۱۹) ضرایب بیشینه فشار باد را بر روی سقف‌های گنبدی برای طراحی پوشش سقف به دست آوردند [۱۷]. اناجار و همکاران (۲۰۲۱) روش محاسباتی مناسبی برای انجام تحلیل غیرخطی سقف‌ها برای تعیین نیروی اتصال سقف در مقابل بار باد ارائه نمودند [۱۸].



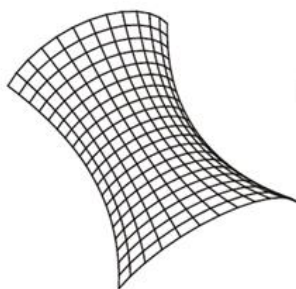
چلیک دوراچه با هموتدهای قطری اضافی



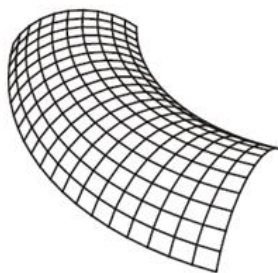
چلیک با نقش لمللا (ریبی)



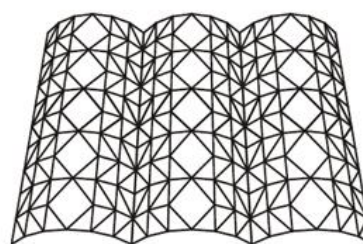
چلیک مرکب با نقش لمللا و دنده های اضافی



چلیک زین اسبی سهموی با نقش دو راهه



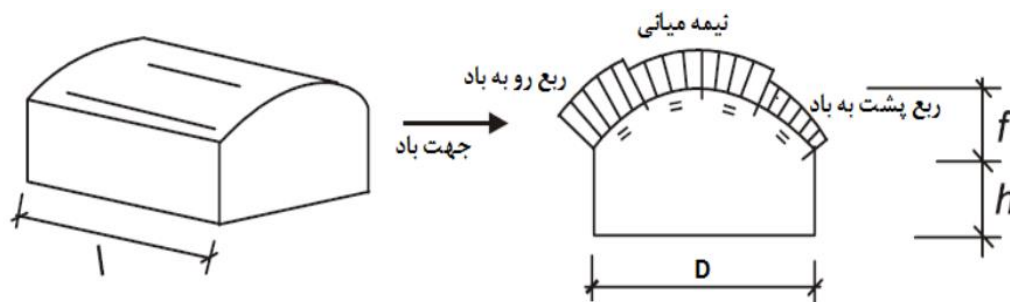
چلیک چنبره ای پهلوی خمیده با نقش دو راهه



چلیک مرکب با نقش دوراچه

شکل ۱: نمونه‌هایی از سازه چلیک تک دهانه و دو دهانه و سه دهانه

در آیین‌نامه سازه‌های فضاکار (نشریه شماره ۴۰۰) [۱۹]. روش استاتیکی محاسبه بار باد ارائه شده است. شکل (۲)، سازه با رویه چلیکی در ارتفاع (امتداد وزش باد عمود بر محور استوانه) را نشان می‌دهد که به سه قسمت مجزا تقسیم شده است. در سازه‌های چلیکی مستقر در ارتفاع نقطه جدایی جریان نسبت به حالتی که بر روی زمین قرار گرفته‌اند زودتر رخ می‌دهد و در نتیجه بخش بیشتری از سازه تحت مکش قرار می‌گیرد.



شکل ۲: سازه‌های چلیکی مستقر در ارتفاع (جهت باد عمود بر محور طولی چلیک)

مطابق آیین نامه فشار یا مکش ناشی از باد بر یک جزء یا تمام سطح یک سازه یا ساختمان از معادله (۱) به دست می آید.

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

در این رابطه، P : فشار بیرونی که به صورت استاتیکی و عمود بر سطح وارد می شود که می تواند به صورت فشار وارده بر سطح یا مکش در جهت خارج از سطح باشد. I_w : ضریب اهمیت ساختمان، q : فشار متناظر با سرعت مینا، C_e : ضریب بادگیری، C_g : ضریب تندباد، C_p : ضریب فشار بیرونی میانگین گیری شده در سطح مورد نظر می باشد.

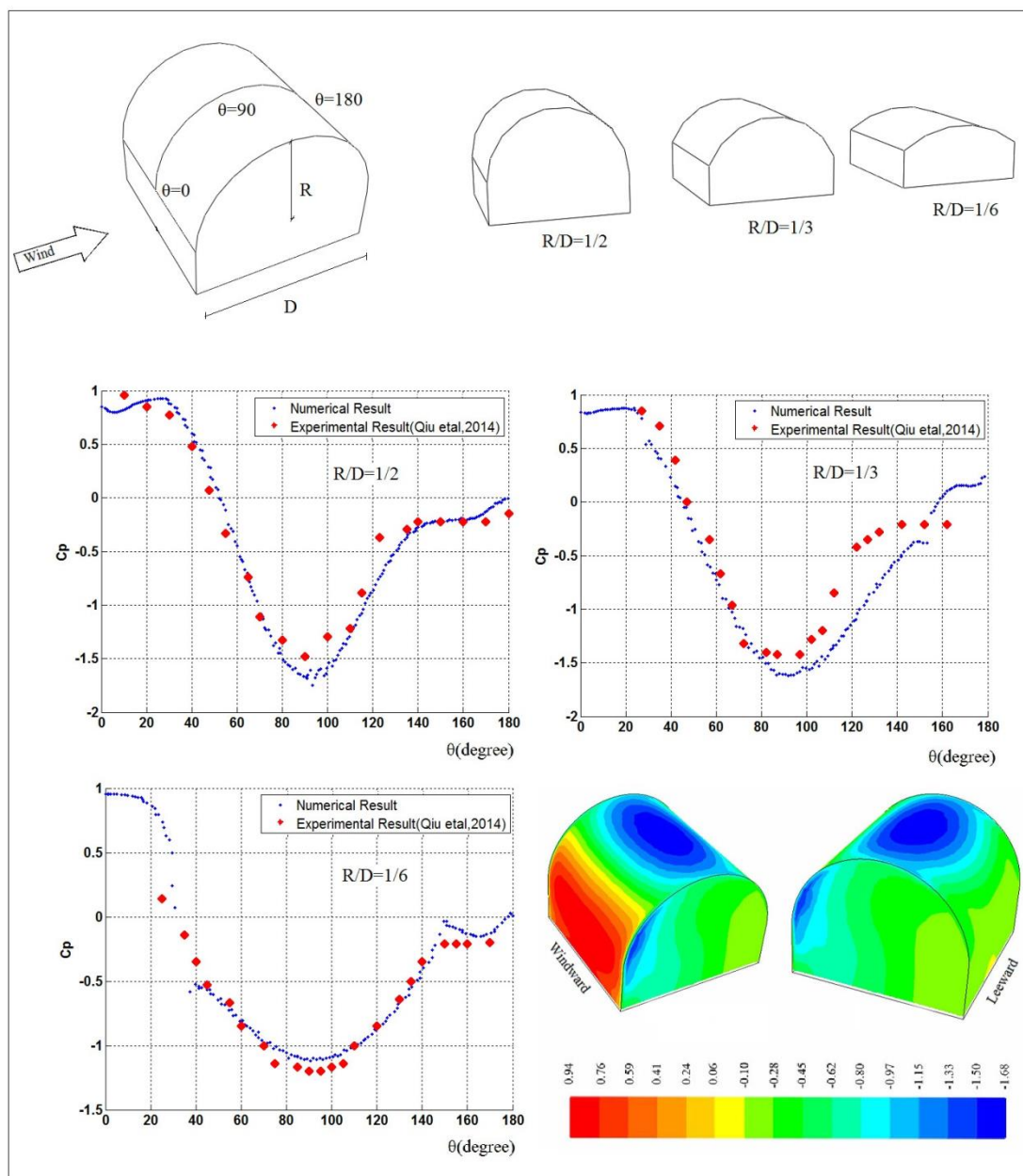
فشار خالص باد وارد بر کل ساختمان یا سازه از جمع جبری فشار بر سطوح رو به باد و پشت به باد و یا در بعضی موارد از جمع فشار و مکش سطوح حاصل می شود. برای سازه هایی که ضرایب فشار باد آن ها در آیین نامه موجود نیست ضرایب فشار باد (C_p) منوط به انجام روش های تجربی است. در مواردی که نیاز به آزمایش در تونل های باد باشد، در شبیه سازی جریان باد در تونل باید دقت زیادی به کار برده و جریان باد را به نحو واقع گرایانه ای شبیه سازی نمود. برای این منظور، سرعت، شدت و مقیاس اغتشاش باید شبیه سازی شوند. برای تعیین ضرایب فشار (C_p) مدل های شبیه سازی شده و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی، از روش تحلیل استاتیکی پیشنهادی آیین نامه های معتبر استفاده می کنیم. برای به دست آوردن نیروها و فشارهای استاتیکی، از مدل های صلب سازه استفاده می شود. به طور معمول فشاری که روی جسم وارد می شود، به وسیله فشار دینامیکی متوسط در فاصله ای دور از بالادست جریان و یا در جریان آزاد و بافاصله از سازه (به طور مثال خارج از لایه مرزی) اندازه گیری می شود. بنابراین ضریب فشار بدون بعد C_p به صورت زیر تعریف می شود:

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

در معادله (۲)، $P - P_0$ نشان دهنده اختلاف بین فشار محلی و فشار در نقطه ای دور از جسم در بالادست P_0 است و $\frac{1}{2} \rho U^2$ فشار دینامیکی متوسط در فاصله ای دور از بالادست جریان می باشد. این بدون بعد بودن، باعث تبدیل بهتر نتایج آزمایشگاهی به نتایج واقعی می گردد.

۲- راستی آزمایی نتایج مدل سازی عددی:

برای محاسبه بار باد روی چلیک ها از شبیه سازی عددی استفاده شده و با نتایج موجود آزمایش تونل باد و آیین نامه های معتبر مقایسه صورت گرفته است جهت راستی آزمایی نتایج حاصل از مدل سازی عددی با نتایج آزمایش تونل باد برگرفته شده از مرجع [۱۲] که مربوط به سقف های چلیکی با نسبت ارتفاع به دهانه که در شکل ۳ نشان داده شده است مقایسه گردید. با توجه به اینکه هرگونه مانع در مسیر سیال بر روی ناحیه ای خاص اطراف خود تأثیرگذار خواهد بود، وجود سازه در مسیر باد، خطوط جریان باد را تغییر داده و مشخصات باد را در نزدیکی خود تغییر خواهد داد. در فاصله دورتر، سازه اثری بر جریان باد نخواهد داشت. اولین گام برای شبیه سازی جریان سیال، معرفی ناحیه تأثیرپذیر است. با انتخاب این ناحیه به عنوان دامنه حل و صرف نظر از فواصل دورتر، می توان از افزایش حجم محاسبات جلوگیری نمود.



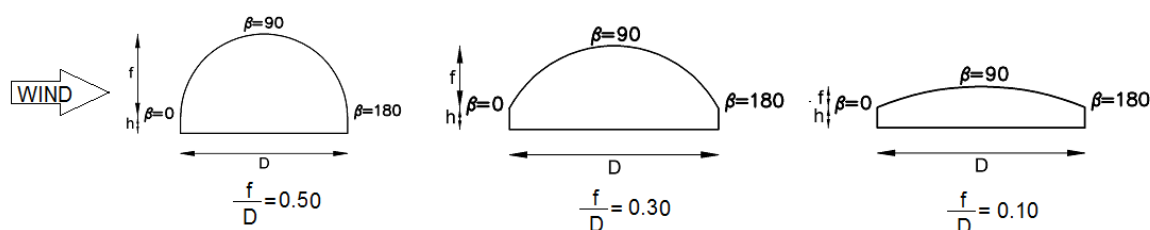
شکل ۳: جزئیات مدل‌سازی آزمایش تونل باد به همراه مقایسه نتایج تونل باد برگرفته از [12] با مدل‌سازی عددی

به منظور افزایش دقت نتایج، اثرات آشفتگی‌ها و تغییرات سرعت در کنار سازه منظور شده، لذا مش اطراف سازه ریزتر از سایر نواحی در نظر گرفته شده است. در این مطالعه، مش بندی از نوع سازمان‌یافته (Structured Mesh) انتخاب و ۴ نوع اندازه مش به برنامه فلونت معرفی شده است. به منظور رعایت $Y^+ < 5$ ، در مجاورت دیواره‌ها (سطح کف و جداره، سازه) نیازمند لایه بندی نزدیک به این سطوح خواهیم بود. به همین منظور ۱۵ لایه در ارتفاع نزدیک دیواره قرار داده شده است. برای لایه اول ارتفاع 0.075 سانتی‌متری معرفی گردید. بر روی سطح چلیک اندازه مش‌ها 0.3 سانتی‌متر، درون باکس داخلی اندازه مش‌ها $1/5$ سانتی‌متر و برای سایر نواحی از حالت fine mesh برنامه استفاده گردید. جهت مدل‌سازی، چلیکی‌هایی، مشابه نمونه‌ی آزمایشگاهی، انتخاب شده است. انتخاب مدل‌های سازه‌ای بر این اساس بوده که بتوان داده‌های نتایج آزمایش تونل باد که قبلاً بر روی این سازه‌ها انجام شده را با نتایج تحلیل عددی و نرم‌افزاری و همچنین

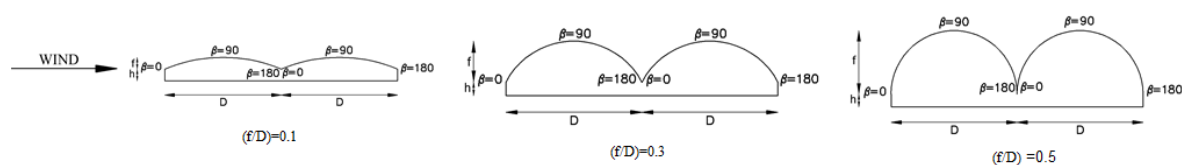
آیین نامه های مربوطه، مورد بحث و بررسی قرار داد. بنابراین چلیک هایی با ابعاد متفاوت و نسبت خیز به دهانه ۰/۵، ۰/۳ و ۰/۱ در نظر گرفته شده است. مشخصات مدل های شبیه سازی شده در جدول ۱ و شکل های ۴ تا ۶ قابل مشاهده است.

جدول ۱: مشخصات مدل های چلیک تک دهانه

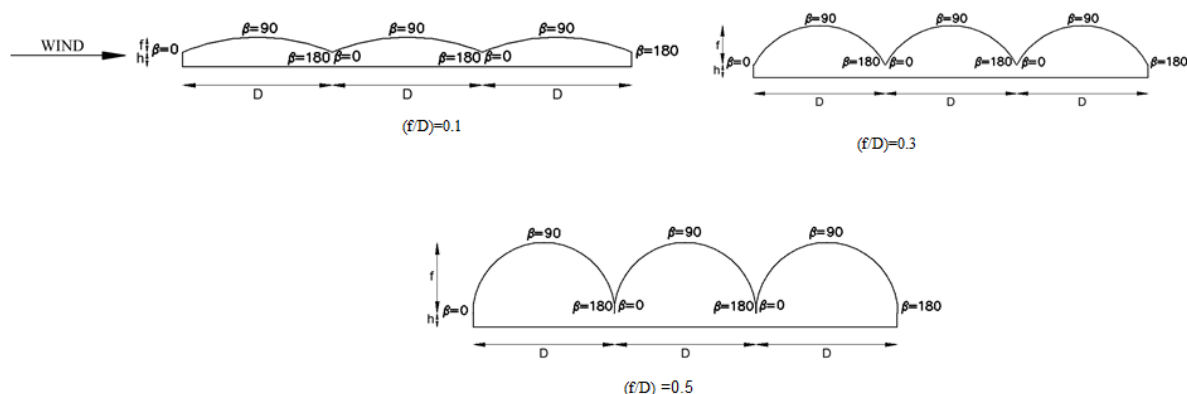
تعداد دهانه	نام مدل	نسبت خیز به دهانه f/d	قطر (d)	ارتفاع (f)	طول (D)
1	1	0.5	0.6	0.3	0.6
1	2	0.3	0.68	0.18	0.6
1	3	0.1	1.56	0.06	0.6
2	4	0.5	0.6	0.3	0.6
2	5	0.3	0.68	0.18	0.6
2	6	0.1	1.56	0.06	0.6
3	7	0.5	0.6	0.3	0.6
3	8	0.3	0.68	0.18	0.6
3	9	0.1	1.56	0.06	0.6



شکل ۴: مشخصات مدل های چلیک یک دهانه با پلان مستطیلی

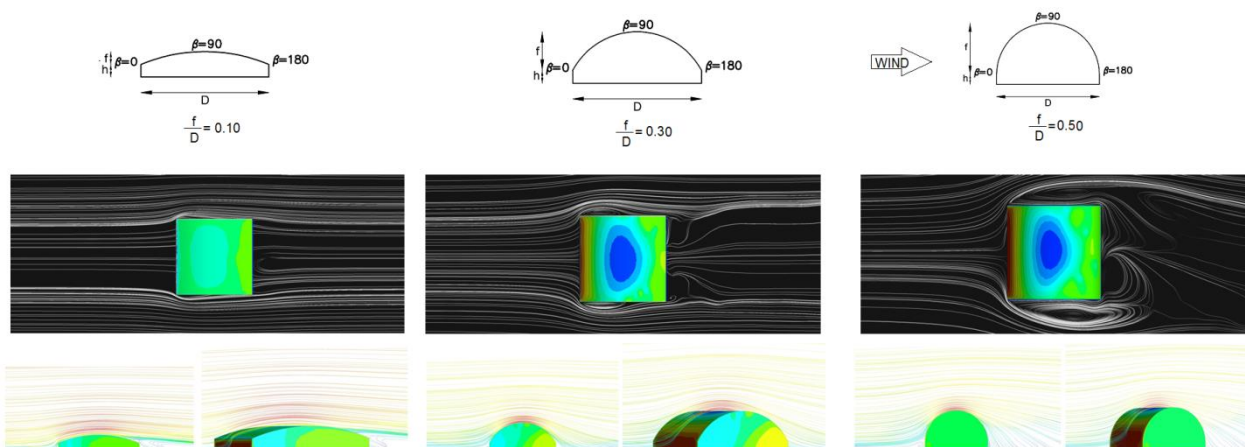


شکل ۵: مشخصات مدل های چلیک دو دهانه با پلان مستطیلی



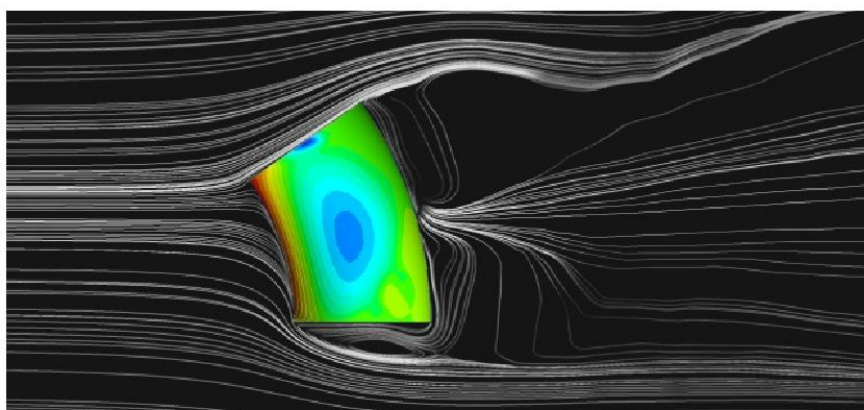
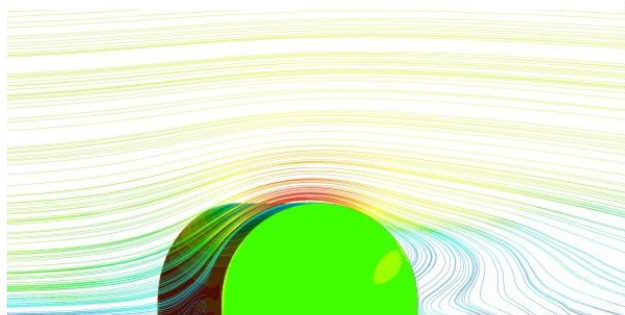
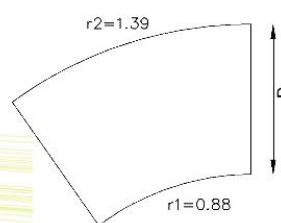
شکل ۶: مشخصات مدل‌های چلیک سه دهانه با پلان مستطیلی

جهت شبیه‌سازی، از برنامه Fluent نرم‌افزار Ansys استفاده شده و در اطراف سازه‌ها هیچ مانع دیگری به منظور تغییر در پروفیل سرعت وجود نداشته است. در تمامی مدل‌ها، شبیه‌سازی عددی با روش CFD و از میان روش‌های متفاوت روش پرکاربرد $k-\epsilon$ turbulence model از مجموعه RNAS یا Reynolds-averaged Navier-Stokes equations انتخاب شده است. همچنین سرعت ورودی برابر با ۲۰ متر بر ثانیه انتخاب شده است. در شکل‌های ۷ و ۸، جریان سیال اطراف سازه، روی صفحه‌ای که از خط تقارن چلیک می‌گذرد قابل مشاهده است.



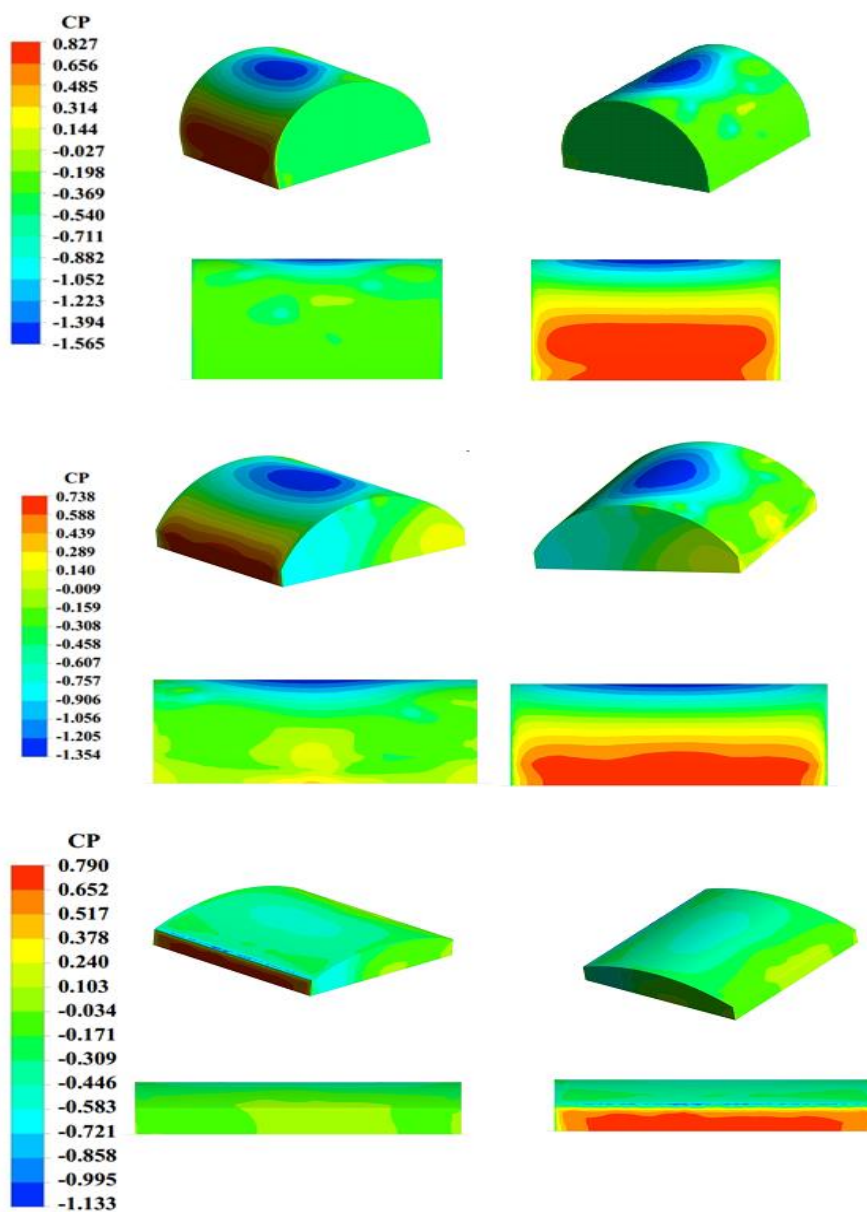
شکل ۷: کانتور به همراه خطوط جریان بر روی چلیک‌های با $f/D=0.1$ و $f/D=0.3$ و $f/D=0.5$

شکل	تعداد دهانه	نام مدل	نسبت خیز به دهانه	شعاع داخلی	شعاع خارجی	ارتفاع	طول
پلان خمیده	1	10	0.5	0.88	1.39	0.3	0.6

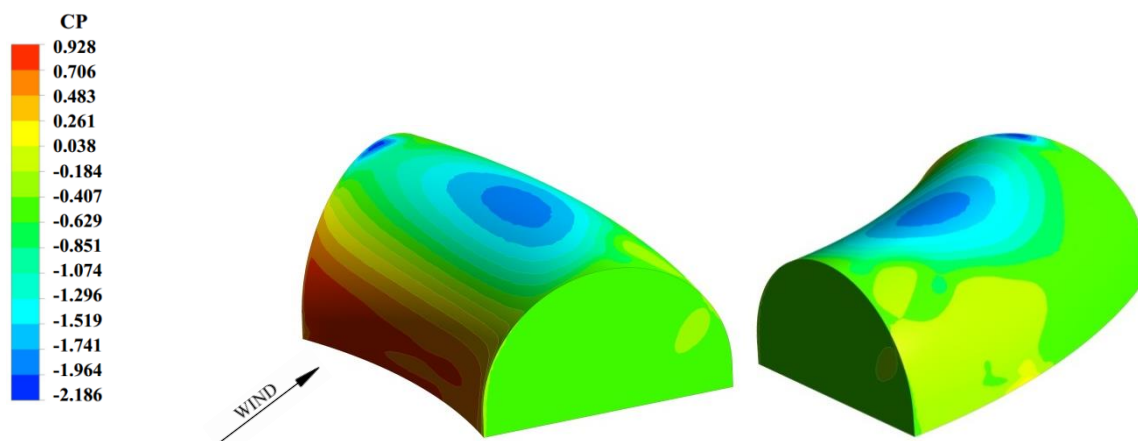


شکل ۸: خطوط جریان به همراه مشخصات چلیک چنبره‌ای پهلو خمیده با نسبت خیز به دهانه ۰/۵

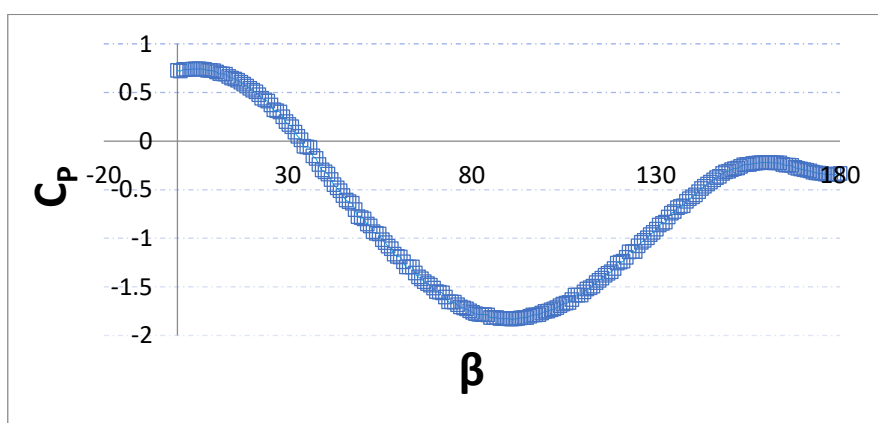
در ادامه نحوه تغییرات ضرایب فشار باد (C_p) برای چلیک با نسبت‌های خیز به دهانه‌های مختلف، با کمک تصاویر حاصل از نتایج نرم‌افزار، مورد بررسی قرار داده شده است.



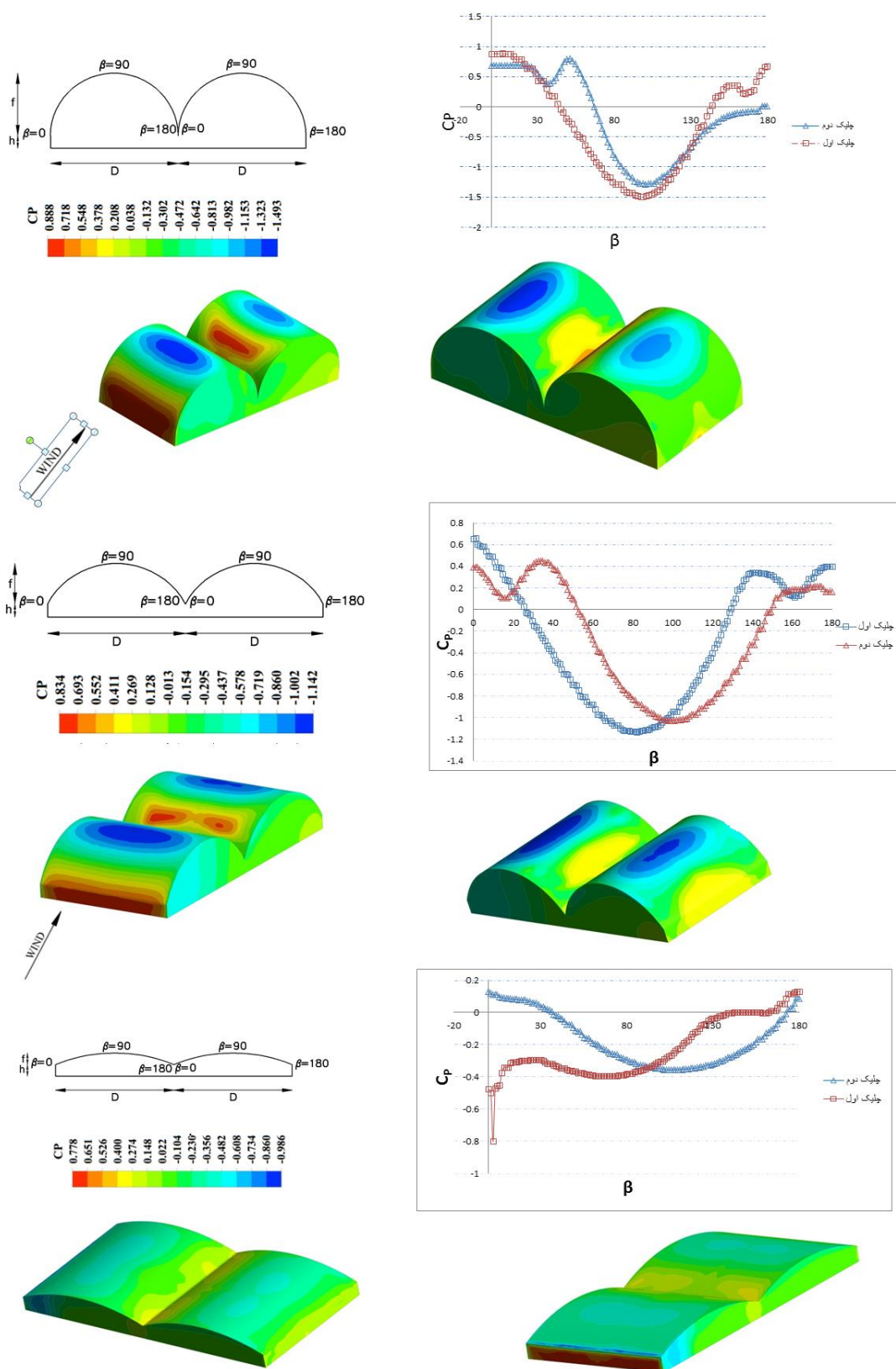
شکل ۹: کانتور ضرایب فشار باد (C_p) بر روی چلیک تک دهانه



شکل ۱۰: کانتور ضرایب فشار باد (C_p) بر روی چلیک چنبره‌ای پهلو خمیده با نسبت خیز به دهانه ۰/۵

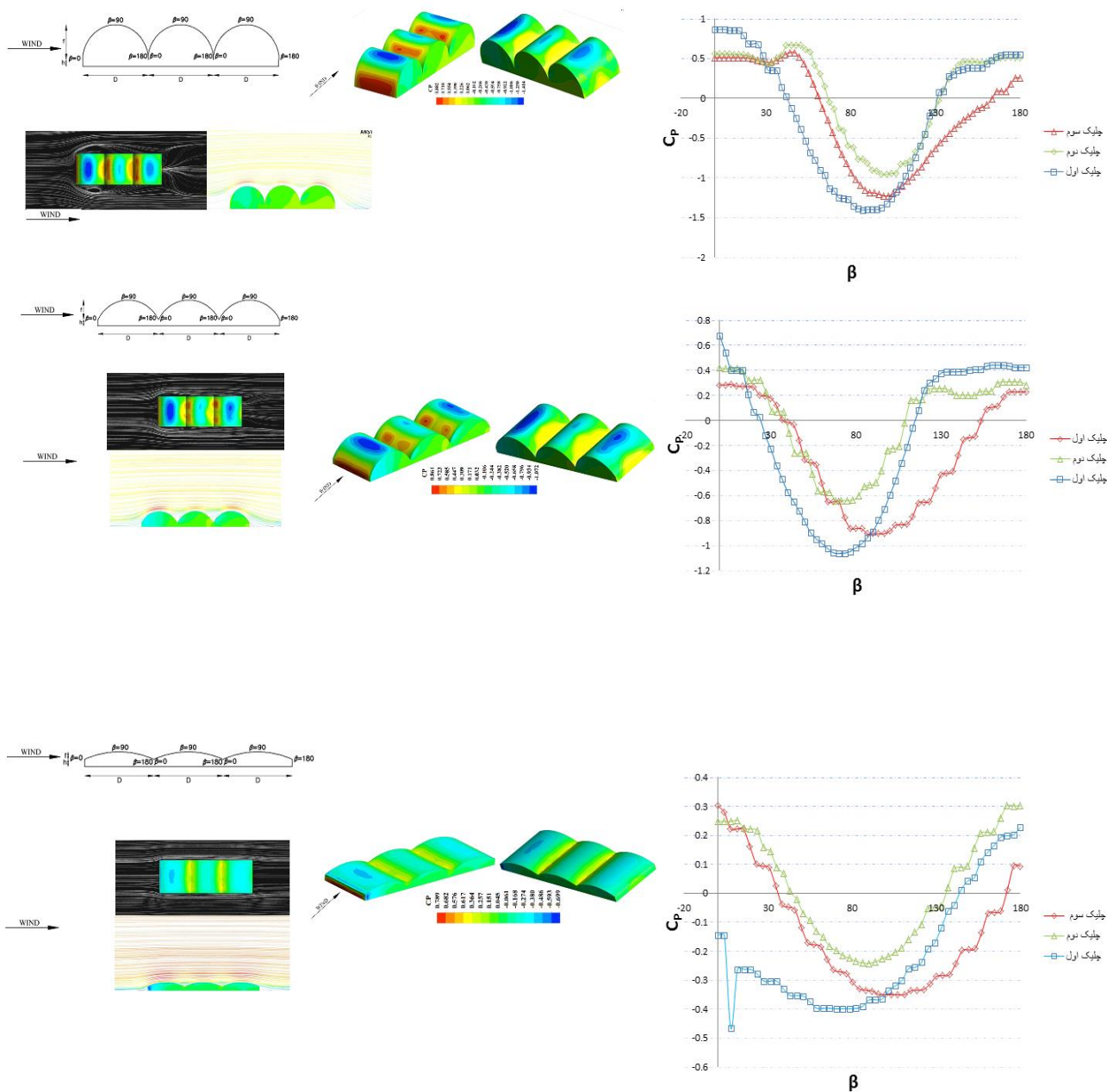


شکل ۱۱: نمودار تغییرات ضرایب فشار باد بر روی چلیک چنبره‌ای پهلو خمیده با نسبت خیز به دهانه ۰/۵



شکل ۱۲: کانتور و نمودار ضرایب فشار باد (C_p) بر روی چلیک دو دهانه

در محل اتصال دهانه‌ها ضرایب فشار مثبت به وجود آمده و توزیع ضرایب فشار در دهانه‌ها تقریباً برابر شده است. همچنین بیشینه ضرایب فشار منفی و مثبت به وجود آمده، مربوط به چلیک در دهانه اول می‌باشد. با بررسی نتایج، جریان گردابی را در قسمت رو به باد کنار پایه و همچنین در پشت سازه مشاهده می‌کنیم. هر چه ارتفاع سازه بلندتر می‌شود (نسبت خیز به دهانه افزایش پیدا می‌کند) جریان گردابی کنار پایه‌ی رو به دیوار، بزرگ‌تر و جریان گردابی پشت سازه، کوچک‌تر می‌شود. با توجه به اینکه در قسمت نزدیک سازه، خطوط جریان از حالت مستقیم منحرف می‌شوند، جهت افزایش دقت محاسبات از مش بندی ریزتری نسبت به سایر نواحی استفاده شده است. مطابق جداول زیر C_p به دست آمده از مدل سازی، نتایج آزمایشگاهی و آیین‌نامه‌های معتبر با یکدیگر مقایسه شده است.



شکل ۱۳: خطوط جریان به همراه کانتور و نمودار تغییرات ضرایب فشار باد بر روی چلیک سه دهانه

در شکل ۱۳، تغییرات کانتور ضرایب فشار باد بر روی چلیکهای سه دهانه با نسبت ارتفاع به دهانه ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ مشاهده می‌شود. همچنین نمودار تغییرات ضرایب فشار باد بر روی قطاعی از چلیک ارائه شده است.

جدول ۲: نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی و مقایسه ضریب فشار C_p و مقایسه نتایج تحلیل عددی با آیین‌نامه‌های ایران، آمریکا و اروپا در چلیک تک دهانه

C_p چلیک سه دهانه					C_p چلیک تک دهانه				
$\theta = 180$	$\theta = 90$	$\theta = 0$	$r = f/D$	نام مدل	$\theta = 180$	$\theta = 90$	$\theta = 0$	$r = f/D$	آیین‌نامه
0.23	-0.37	-0.15	0.1	چلیک	-0.02	-0.48	-0.36		نرم‌افزار انسیس
0.42	-0.89	0.68	0.3	اول در	-0.5	-0.8	0.1		ایران (نشریه ۴۰۰)
0.55	-1.4	0.86	0.5	جهت وزش باد	-0.5	-0.8	-0.9	0.1	آمریکا (ASCE)
0.3	-0.24	0.25	0.1	چلیک	-0.4	-0.8	-0.1		اروپا (Eurocode)
0.28	-0.5	0.42	0.3	دوم در	-0.1	-1.26	0.68		نرم‌افزار انسیس
0.51	-0.82	0.56	0.5	جهت وزش باد	-0.5	-1	0.64	0.3	ایران (نشریه ۴۰۰)
0.09	-0.34	0.3	0.1	چلیک	-0.5	-1	0.15		آمریکا (ASCE)
0.23	-0.91	0.28	0.3	سوم در	-0.4	-1	0.36		اروپا (Eurocode)
0.25	-1.19	0.51	0.5	جهت وزش باد	-0.29	-1.53	0.76		نرم‌افزار انسیس
					-0.21	-1.35	0.87	0.5	آزمایش تونل باد
					-0.5	-1.2	0.7		ایران (نشریه ۴۰۰)
					-0.5	-1.2	0.68		آمریکا (ASCE)
					-0.4	-1.2	0.8		اروپا (Eurocode)

C_p چلیک پهلو خمیده					C_p چلیک دو دهانه				
$\theta = 180$	$\theta = 90$	$\theta = 0$	$r = f/D$	نام مدل	$\theta = 180$	$\theta = 90$	$\theta = 0$	$r = f/D$	نام مدل
-0.33	-1.83	0.73	0.5	چلیک چنبره	0.13	-0.35	-0.48	0.1	چلیک اول در جهت وزش باد
					0.4	-1.09	0.65	0.3	
					0.68	-1.43	0.87	0.5	
					0.09	-0.33	0.13	0.1	چلیک دوم در جهت وزش باد
					0.17	-0.96	0.39	0.3	
					0.01	-1.15	0.69	0.5	

از جدول ۲، می‌توان نتیجه گرفت در چلیک تک دهانه برای ربع رو به باد مقادیری که در آیین‌نامه‌های مختلف ارائه شده است تفاوت‌های قابل توجهی با یکدیگر دارند. برای این قسمت از سازه‌های چلیکی در آیین‌نامه سازه‌های فضاکار ایران، تمام ضرایب مثبت بوده و سازه تحت فشار فرض شده است، درحالی‌که در سایر آیین‌نامه‌ها برای نسبت‌های خیز به دهانه ۰/۱ ضرایب منفی پیشنهاد شده است.

همچنین نتایج حاصل از تحلیل عددی نرم افزار نیز برای چلیک با نسبت خیز به دهانه ۰/۱ همانند آیین نامه های آمریکا [۲۰] و اروپا [۲۱] مقداری منفی به دست آمده است که به نظر می رسد به آیین نامه اروپا نزدیک تر باشد. همچنین برای نسبت های خیز به دهانه ۰/۳ مقادیر بسیار نزدیک به آیین نامه ایران بوده و برای نسبت های خیز به دهانه ۰/۵ نیز، تقریباً با تمامی آیین نامه ها برابری می کند. برای نیمه میانی، ضرایب پیشنهاد شده در آیین نامه سازه های فضاکار ایران کاملاً مطابق با آیین نامه های آمریکا و اروپا است که نتایج حاصل از تحلیل عددی نرم افزار برای چلیک با نسبت خیز به دهانه های مختلف نیز تقریباً نزدیک به آنها شده است. برای ربع پشت به باد آیین نامه سازه های فضاکار ایران، مطابق با آیین نامه آمریکا بوده و نسبت به آیین نامه اروپا، مقادیر پیشنهادی بیشتر هستند. تمامی ضرایب پیشنهادی آیین نامه برای این قسمت مقداری منفی ارائه شده، که با نتایج حاصل از تحلیل عددی با نرم افزار برابری می کند ولی مقدار عددی کمتری را در نتایج حاصل از نرم افزار مشاهده شده است. با توجه به نتایج حاصل از تحلیل عددی با نرم افزار می توان نتیجه گرفت که با افزایش نسبت خیز به دهانه برای چلیک، در تمامی ربع های رو به باد، نیمه میانی و ربع پشت به باد، ضریب فشار باد (C_p) نیز افزایش پیدا می کند.

همان طور که قابل مشاهده است برای چلیک با نسبت خیز به دهانه ۰/۵، در ربع رو به باد، ضریب فشار در بالاترین مقدار مثبت خود قرار دارد و هر چه از نیمه میانی چلیک جلوتر می رویم ضریب فشار به بیشترین مقدار منفی خود نزدیک شده و در ربع پشت به باد ضریب فشار منفی بوده و مقادیر آن رو به کاهش است.

برای چلیک با نسبت خیز به دهانه ۰/۳، در ربع رو به باد، ضریب فشار در بالاترین مقدار مثبت خود قرار دارد و مقادیر آن هر چه به نیمه میانی چلیک نزدیک می شود ضریب فشار به بیشترین مقدار منفی خود رسیده و در ربع پشت به باد نیز ضریب فشار هنوز منفی بوده و مقادیر آن رو به کاهش است. همان طور که مشاهده می شود با کاهش نسبت خیز به دهانه، ضرایب فشار در تمامی نقاط کاهش یافته است. برای چلیک با نسبت خیز به دهانه ۰/۱، برخلاف حالت های قبل در ربع رو به باد، ضریب فشار مقداری منفی دارد و هر چه به نیمه میانی چلیک جلوتر می رویم ضریب فشار به بیشترین مقدار منفی خود نزدیک می شود و سپس در ربع پشت به باد نیز ضریب فشار هنوز منفی بوده اما به سمت صفر میل می کند. در این حالت (نسبت خیز به دهانه خیلی کم) تمام سطح چلیک دارای ضریب فشار منفی، و در نیمه میانی دارای بیشترین مقدار ضریب فشار منفی است. با مقایسه ضرایب فشار چلیک های تک دهانه نسبت به دو دهانه و سه دهانه می توان نتیجه گرفت سهم افزایش ضرایب فشار مثبت نسبت به ضرایب فشار منفی، بیشتر است. در چلیک های دو دهانه و سه دهانه، هر چه به جلوتر حرکت می کنیم، ضرایب فشار مثبت و منفی در تمام زوایا نسبت به دهانه اول چلیک کاهش پیدا می کند.

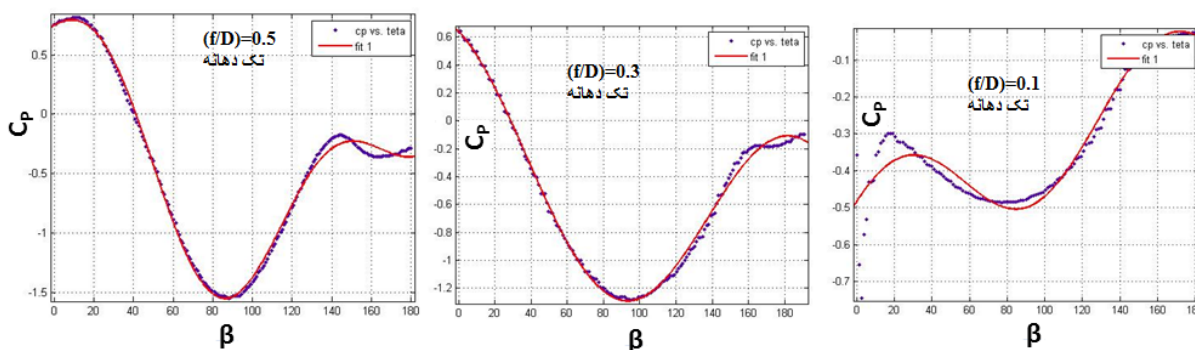
ضرایب فشار باد در چلیک چنبره ای پهلو خمیده در ربع رو به باد و پشت به باد، با حالت چلیک ساده با پلان مستطیلی شکل یکسان است، اما در نیمه میانی دارای ضرایب فشار منفی بزرگتری است. در ادامه ضرایب فشار به دست آمده در چلیک های دو دهانه و سه دهانه و چنبره ای پهلو خمیده به فرم آیین نامه در آمده و مطابق جداول زیر قابل مشاهده است. تدوین چنین ضوابطی برای دسته ی بزرگی از سازه ها می تواند برای امور مهندسی به ویژه برای سازه های سبک و وسیع مانند سازه های چلیک، کاربرد فراوانی داشته باشد.

۳- ارائه رابطه پیشنهادی ضریب فشار چلیک

با توجه به عدم وجود ضرایب فشار سازه های چلیکی دو دهانه و سه دهانه و چنبره ای پهلو خمیده در آیین نامه ها، در این مطالعه با استفاده از مدل های متفاوتی که از این چلیک ها صورت گرفته، رابطه معادلاتی سینوسی با فرم کلی یکسانی برای تمامی مدل ها ارائه می دهیم تا ضرایب فشار برای انواع سازه های چلیکی ارائه شده به سادگی برای هر نقطه قابل محاسبه باشد.

معادله کلی برابر است با $f(x) = a1 \times \sin \sin (b1 \times x + c1) + a2 \times \sin \sin (b2 \times x + c2)$ که در این رابطه با جایگذاری مقدار زاویه به جای x ، مقدار ضریب فشار $f(x)$ برای آن زاویه محاسبه می شود. لازم به ذکر است که فرم کلی معادله برای تمامی چلیک ها یکسان بوده و فقط ضرایب برای هر کدام تغییر پیدا خواهد کرد.

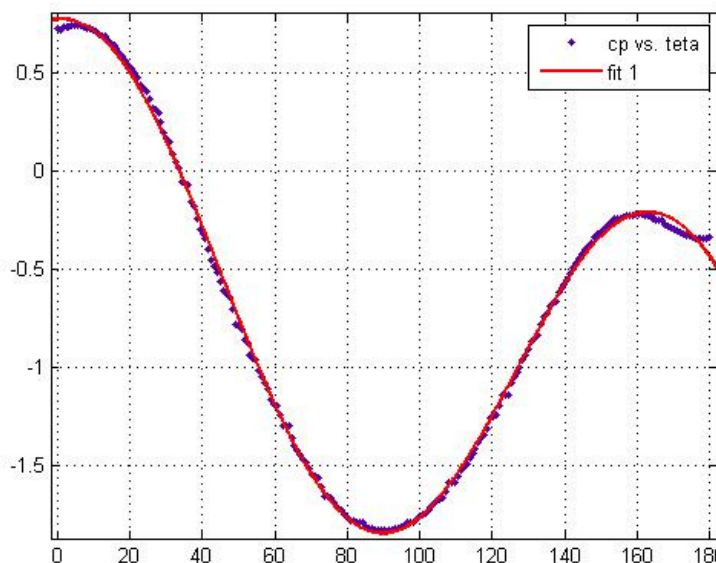
تعداد دهانه	(f/D)	A1			A2			B1			B2			C1			C2		
		left	mid	right	left	mid	right	left	mid	right	left	mid	right	left	mid	right	left	mid	right
1	0.5	0.53			1.11			0.033			1.08			-1.06			-1.85		
	0.3	7.13			0.79			0.014			1.75			-3.06			-1.32		
	0.1	8.47			0.14			2.71			3.96			-0.04			-1.69		
2	0.5	0.39		0.37	1.10		1.02	2.43		2.87	1.31		1.55	-1.66		-2.17	-1.77		-2.22
	0.3	0.44		0.37	0.73		0.71	0.68		0.043	1.10		1.16	-0.91		-2.08	-1.45		-1.86
	0.1	0.40		1.88	0.075		0.33	2.85	2.12	3.55	3.38		1.28	-0.81		-0.03	-1.11		-2.24
3	0.5	0.45	0.78	0.33	1.01	0.27	0.95	2.87	0.03	2.83	1.40	4.28	1.42	-1.27	-2.02	-2.08	-1.60	-2.3	-2.07
	0.3	0.53	0.46	0.34	1.11	0.20	0.76	0.97	1.80	3.56	1.08	0.067	1.41	-1.06	2.15	-0.37	-1.85	-0.03	-1.10
	0.1	0.40	0.26	0.014	0.04	0.036	0.36	0.033			3.02	0.28	1.26	-1.07	-1.59	0.77	-2.32	0.58	-1.90



شکل ۱۴: معادلات ضریب فشار برای چلیک یک دهانه

$$f(x) = a1*\sin(b1*x+c1) + a2*\sin(b2*x+c2)$$

- a1 = 3.425
- b1 = 0.09588
- c1 = -2.903
- a2 = 1.048
- b2 = 2.036
- c2 = -1.41



شکل ۱۵: معادله حاکم بر ضرایب فشار باد چلیک چنبره‌ای پهلو خمیده با نسبت خیز به دهانه ۰,۵

۴- نتیجه گیری

با مشاهده کانتورها و نمودارهای مربوط به C_p چلیک‌های تک دهانه، دو دهانه و سه دهانه نتایج زیر به دست آمده است:

- ۱- با افزایش نسبت ارتفاع به دهانه، مقدار ماکزیمم فشار منفی (مکش) که در زاویه ۹۰ به وجود می‌آید، افزایش یافته، به این صورت که در نسبت ارتفاع به دهانه‌های ۰,۵، ۰,۳، ۰,۱ و به ترتیب ضرایب فشار ۱,۵۵-، ۱,۳- و ۰,۶- به دست آمده است.

- ۲- اثر هم‌جواری چلیک‌ها (چلیک‌های چنددهانه) باعث تغییراتی در ضرایب فشار به نسبت چلیک‌های تک‌دهانه می‌شود به این صورت که با افزایش نسبت ارتفاع به دهانه مقدار مکش ماکزیمم که در زاویه ۹۰ درجه رخ می‌دهد، کاهش می‌یابد.
- ۳- با توجه به تغییر مقادیر ضرایب فشار در چلیک‌های دو و سه دهانه برای طراحی ایمن و یافتن بحرانی‌ترین حالت بارگذاری باید مقادیر ضرایب فشار مربوط به هر چلیک در نظر گرفته شود.
- ۴- برای چلیک یک دهانه با نسبت خیز به دهانه ۰٫۵، مقایسه و صحت‌سنجی آیین‌نامه ایران و مدل شبیه‌سازی شده با نرم‌افزار با نتیجه آزمایشگاهی تونل باد، مشاهده شد که میزان اختلاف مدل شبیه‌سازی شده با نرم‌افزار خیلی کمتر از آیین‌نامه در مقایسه با مدل آزمایشی بوده است. همچنین همپوشانی خوبی بین نتایج آزمایشگاهی تونل باد با نتایج مدل شبیه‌سازی شده نرم‌افزار در نمودار شکل ۱۵ دیده می‌شود که صحتی بر میزان دقت نتایج می‌باشد.

۵- مراجع

- [1] Hanson, T., Smith, F., Summers, D., & Wilson, C. B. (1982). Computer simulation of wind flow around buildings. *Computer-Aided Design*, 14(1), 27-31.
- [2] Hoxey, R. P., & Richardson, G. M. (1983). Wind loads on film plastic greenhouses. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 11(1-3), 225-237.
- [3] Toy, N., & Tahouri, B. (1988). Pressure distributions on semi-cylindrical structures of different geometrical cross-sections. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 29(1-3), 263-272.
- [4] HOLMES, J., & PATERSON, D. (1992). Mean wind pressures on arched-roof buildings by computation. 2nd Int. Colloq. on Bluff-body Aerodynamics and Applications, Melbourne. Proceedings to be published.
- [5] Letchford, C. W., & Sarkar, P. P. (2000). Mean and fluctuating wind loads on rough and smooth parabolic domes. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 88(1), 101-117.
- [6] Balbastro, G. C., & Sonzogni, V. E. (2007). Simulation of wind tunnel experiments using CFD." *Mecánica Computacional* 44: 3779-3787.
- Simulation of a wind tunnel test applying CFD. *Computational Mechanics*, (44), 3779-3787.
- [7] Cheng, C. M., & Fu, C. L. (2010). Characteristic of wind loads on a hemispherical dome in a smooth flow and turbulent boundary layer flow. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 98(6-7), 328-344.
- [8] Vizotto, I., & Ferreira, A. M. (2015). Wind force coefficients on hexagonal free form shell. *Engineering Structures*, 83, 17-29.
- [9] Sadeghi, H., Heristchian, M., Aziminejad, A., & Nooshin, H. (2017). Wind effect on grooved and scallop domes. *Engineering Structures*, 148, 436-450.
- [10] Sadeghi, H., Heristchian, M., Aziminejad, A., & Nooshin, H. (2018). CFD simulation of hemispherical domes: structural flexibility and interference factors. *Asian Journal of Civil Engineering*, 19(5), 535-551.
- [11] Cao, Y., & Tamura, T. (2020). Large-eddy simulation study of Reynolds number effects on the flow around a wall-mounted hemisphere in a boundary layer. *Physics of Fluids*, 32(2), 025109.
- [12] Qiu, Y., Sun, Y., Wu, Y., & Tamura, Y. (2014). Modelling 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, 11-21.
- [13] Liu, H., Qu, W. L., & Li, Q. S. (2011). Comparison between wind load by wind tunnel test and in-site measurement of long-span spatial structure. *Wind & Structures*, 14(4), 301-319.
- [14] Kim, R. W., Lee, I. B., Yeo, U. H., & Lee, S. Y. (2019). Estimating the wind pressure coefficient for single-span greenhouses using a large eddy simulation turbulence model. *biosystems engineering*, 188, 114-135.
- [15] Hu, W., Bohra, H., Azzuni, E., & Guzey, S. (2019). The uplift effect of bottom plate of aboveground storage tanks subjected to wind loading. *Thin-Walled Structures*, 144, 106241.
- [16] Chen, Z., Li, H., Wang, X., Yu, X., & Xie, Z. (2019). Internal and external pressure and its non-Gaussian characteristics of long-span thin-walled domes. *Thin-Walled Structures*, 134, 428-441.
- [17] Kim, Y. C., Yoon, S. W., Cheon, D. J., & Song, J. Y. (2019). Characteristics of wind pressures on retractable dome roofs and external peak pressure coefficients for cladding design. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 188, 294-307.
- [18] Enajar, A., El Damatty, A., & Nassef, A. (2021). Semi-analytical solution for gable roofs under uplift wind loads. *Engineering Structures*, 227, 111420.

- [19] Code of Practice for Skeletal Steel Space Structures No.400 .(2010). Tehran: Islamic Republic of Iran Vice presidency for Strategic Planning and Supervision, Office of Deputy for Strategic Supervision, Bureau of Technical Execution System.
- [20] ASCE 7-10 ,(2010). Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures. American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia ASCE/SEI 7-10
- [21] EC1. (2005), Eurocode 1:Actions on structures. European Committee for Standardisation: Brussels, Belgium, The European Standard EN ,1991-1-4