

بررسی عددی و آزمایشگاهی اثر بار باد بر گنبدهای کروی با تمرکز بر نوع پوشش سقف

حسین صادقی^{۱*}، امیر حسین عبیری^۱، محمد فوادیان^۱، مجتبی شکوهی نیا^۲

۱- گروه مهندسی عمران، واحد دامغان، دانشگاه آزاد اسلامی، دامغان، ایران

۲- گروه مهندسی برق، واحد دامغان، دانشگاه آزاد اسلامی، دامغان، ایران

[*h.sadeghi@iau.ac.ir](mailto:h.sadeghi@iau.ac.ir)

چکیده

در معماری امروزی استفاده از سازه‌های فضاکار بسیار متداول بوده و مورد توجه طراحان قرار گرفته است. اشکال مختلفی از این سازه‌ها در طرح‌ها و سازه‌های معماری به چشم می‌خورد که یکی از این نوع سازه‌ها گنبدهای کروی است. برای محاسبه بار باد روی تمامی سازه‌ها یکی از مهم‌ترین ضرایب مورد نیاز ضریب فشار باد (C_p) است که در واقع تأثیر هندسه سازه را در محاسبه بار باد بر سازه در نظر می‌گیرد. در آیین‌نامه‌های بارگذاری، ضریب (C_p) برای برخی از هندسه‌ها ارائه شده است. در این مقاله تأثیر بار باد بر گنبدهای کروی با سه نسبت ارتفاع به دهانه ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ بررسی شده است. همچنین اثر نوع سطح پوشش در این تحقیق بررسی شده است. بیشینه ضرایب فشار منفی (مکش) برای گنبدهای با نسبت ارتفاع به دهانه ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ به ترتیب برابر ۰/۸۶-، ۱/۰۷- و ۱/۲۲- به دست می‌آید. در گنبدهایی که دارای برآمدگی در پوشش هستند، این برآمدگی‌ها باعث تغییر کلی در ضرایب فشار باد نسبت به ضرایب فشار باد در گنبدهای با پوشش صیقلی می‌شوند؛ لذا تأثیرگذارترین حالت قرارگیری برآمدگی در حالتی است که برآمدگی گنبد در زاویه ۹۰ درجه نسبت به جهت اعمال باد ($\theta=90^\circ$) قرار گیرد که در این صورت پرش ضرایب فشار از مقادیر منفی به سمت مقادیر مثبت به مقدار $C_p=+0.7$ می‌رسد.

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

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، صنعت ساختمان به دلیل مزیت سهولت و سرعت ساخت، استفاده مؤثر از مصالح، سبکی و استحکام سازه‌ها بر توسعه سازه‌های فولادی و مرکب متمرکز شده است [۱]. سازه‌های فضایی (خرپاهای سه‌بعدی) یکی از این نوع از سازه‌ها است. در عمل، سازه‌های فضاکار معمولاً برای پوشش‌های سقف استفاده می‌شود و به دلیل ماهیت ذاتی و ویژگی‌های مختلف سازه‌ای، فاقد تکیه‌گاه داخلی و یا دارای حداقل تکیه‌گاه داخلی می‌باشند، با توجه به اینکه بیشتر این نوع سازه‌ها سازه‌های سبک هستند، بنابراین معمولاً بار باد به عنوان بار جانبی غالب مدنظر قرار می‌گیرد. سازه‌ها باید طوری طراحی شوند که علاوه بر تحمل بارهای ثقلی در برابر بارهای جانبی نظیر باد نیز مقاوم باشند. لازمه طراحی مقاوم تحت تأثیر باد، به دست آوردن دقیق ضرایب توزیع فشار باد بر روی این نوع سازه‌ها است. در مکانیک سیالات، دو راه برای محاسبه پارامترهای مختلف میدان جریان سیال مانند سرعت و فشار وجود دارد. روش اول حل عددی معادلات ناویر استوکس و پیوستگی در علم دینامیک سیالات محاسباتی است که این حل‌های عددی با استفاده از روش‌های مختلف مانند روش تفاضل

محدود، روش حجم محدود و المان محدود انجام می‌شوند [۲]. روش دوم نیز انجام آزمایش‌های تجربی در تونل‌های باد است که یکی از کارآمدترین روش‌ها محسوب می‌شود. گنبد‌های کروی یکی از انواع متداول گنبد‌ها هستند، در این نوع گنبد‌ها با تغییر نسبت ارتفاع به دهانه ضرایب فشار باد تغییر می‌یابد. در این تحقیق ضرایب فشار باد بر روی گنبد‌های کروی با ۳ نسبت ارتفاع به دهانه ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ بررسی شده است و ضرایب فشار باد با استفاده از آزمون‌های تونل باد و مدل سازی عددی بر اساس دینامیک سیالات محاسباتی با استفاده از نرم افزار Ansys به دست آمده است. در شکل ۱ نمونه هایی از گنبد‌های کروی با نسبت های ارتفاع به دهانه و پوشش های مختلف دیده می شود، پوشش این نوع از سازه ها مانند آنچه در شکل ۱، دیده می شود می تواند شامل بتن، چوب، ورق های فلزی موج دار و.. باشد.



شکل ۱: چند نمونه از گنبد‌های کروی با پوشش های متفاوت

Fig 1. Some examples of spherical domes with different coatings

به طور کلی شکل هندسی سازه یکی از پارامترها تأثیرگذار بر اثر باد بر روی سازه است. در این میان با توجه به فقدان اطلاعات مربوط به هر نوع شکل هندسی در آیین‌نامه‌های طراحی، استفاده از آزمایش تونل باد یا مدل سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار امری اجتناب‌ناپذیر است. در مدل سازی عددی، یکی از روش‌ها، روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) است که در این تحقیق نیز از همین روش با استفاده از نرم‌افزار ANSYS بهره گرفته شده است. تحقیقات زیادی در مورد ضرایب فشار باد بر روی سازه‌ها انجام گرفته است؛ لذا در ادامه به چند نمونه از این تحقیقات اشاره می‌شود. رضائی نامدار و همکاران (۲۰۲۲) ضرایب فشار باد بر روی گنبد‌های اسکالپ با استفاده از روش‌های عددی و تجربی را مورد محاسبه و بررسی قرار دادند و با مقایسه ضرایب حاصل از هر روش، روش محاسبات عددی مبتنی بر روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) را معیار مناسبی برای محاسبه ضرایب فشار در گنبد‌های اسکالپ معرفی نمودند [۳]. صادقی و همکاران (۲۰۱۷) ضریب فشار باد بر روی گنبد‌های شیاردار دار را مورد مطالعه قرار دادند، در این مطالعه با استفاده از روش‌های عددی، اثر باد بر روی گنبد‌های شیاردار را مورد بررسی قرار گرفته و نتایج نشان دادند ایجاد شیار بر روی گنبد‌های کروی باعث تغییرات ناگهانی ضریب فشار باد (CP) در مجاورت شیارها خواهد شد، این پژوهش معادلاتی را برای توزیع (CP) بر روی سطوح گنبد‌های کروی و شیاردار ارائه داده است [۴]. Min Jae Park و همکاران (۲۰۲۲) با استفاده از آزمایش تونل باد فشار باد ایجاد شده بر روی سقف‌های کروی ناشی از تغییر ارتفاع به دهانه گنبد را با وجود باز شو روی سقف مورد مطالعه قرار دادند، یافته‌ها نشان دادند فشار منفی تقریباً در همه مناطق سقف وجود دارد. در این مطالعه ضریب فشار باد برای طراحی رویه گنبد برای یک نسبت خاص ارتفاع به طول دهانه پیشنهاد شده است [۵]. Jong Ho Lee و همکاران (۲۰۲۲) در پژوهشی به بررسی ویژگی‌های فشار باد بر روی سقف‌های گنبدی جمع‌شونده بیضوی، با نسبت‌های مختلف ارتفاع به دهانه، با استفاده از آزمایش تونل پرداخته و ضرایب فشار را ارائه دادند [۶]. Astha Verma و همکاران (۲۰۲۲) با استفاده از روش تجربی فشار ناشی از باد بر روی انواع سازه‌های دارای ارتفاع کم را مورد ارزیابی قرار دادند. در این تحقیق و در حالت‌های متفاوت، گنبد تکی، دو، سه و چهار تایی که به صورت موازی پشت سرهم قرار گرفته است در تونل باد مورد آزمایش قرار گرفتند و ضرایب فشار در حالت‌های مختلف محاسبه شده و کانتورهای مربوطه جهت مقایسه شرایط متفاوت ترسیم گردید، نتایج نشان دادند 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 صفر درجه بر روی ضرایب فشار قابل توجه

خواهد بود [۷]. Luisa Pagnini و همکاران (۲۰۲۲) اندازه‌گیری فشار باد روی سقف سایبان را مورد بررسی قرار دادند، با بررسی نتایج، بر اهمیت باز تولید هندسه صحیح سازه و جزئیات آن، مانند لبه‌ها و نورگیرها، برای ایجاد شرایط مطمئن در هنگام اعمال بارهای باد تأکید شد [۸]. در تحقیقی دیگر که جزء اولین مطالعات در این زمینه نیز است T.J.Taylor (۱۹۹۲) فشار باد بر روی یک گنبد نیمکره را مورد بررسی قرار داد، در این تحقیق توزیع فشار آیرودینامیکی بر روی گنبدهای نیمکره‌ای در جریان‌های لایه‌مرزی، تعیین میانگین، انحراف معیار، حداقل و حداکثر و ضرایب فشار متوسط ناحیه با اشاره به فشار استاتیکی جریان آزاد بر روی نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. در این تحقیق، آثار عدد رینولدز و شدت تلاطم مساحت مورد بحث قرار گرفته و نواحی و فشارهای بحرانی برای اهداف طراحی تعریف شدند [۹]. Kharoua و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابی جریان‌های آشفته اثر بار باد اطراف گنبدهای صاف و ناهموار را مورد مطالعه قرار دادند [۱۰]. Peng Zhou و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی توزیع بار باد بر روی سطح سازه‌های گنبدی بر اساس شبیه‌سازی عددی CFD پرداختند، در این تحقیق مدل آشفتگی RNG برای محاسبه ضرایب جریان در اطراف ساختمان و توزیع ضریب فشار در اطراف سقف در ۷ زاویه مختلف از صفر درجه تا ۹۰ درجه مورد استفاده قرار گرفت. [۱۱]. NIE Shaofeng و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از آزمایش تونل باد تأثیر بار باد بر روی سقف شیروانی ساختمان‌های کوتاه را مورد بررسی قرار دادند، تغییرات ضرایب فشار باد و نوسان پارامترهای مختلف که ناشی از شکل هندسی سقف، جهت اعمال باد، شیب سقف و طول برآمدگی سقف بود، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت [۱۲]. Khosrowjerdi و همکاران (۲۰۲۲) در پژوهشی تأثیر بار باد بر قوس‌های ترکیبی در ساختمان‌های گنبدی را مورد مطالعه قرار دادند. این تحقیق، تأثیر بار باد بر روی گنبدهای دو قوسی با ارتفاعات مختلف قوس مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، گنبدهای دو قوسی با نسبت ارتفاع به دهانه 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 [۱۳]. XiaoyingSun و همکاران (۲۰۲۰) تأثیر بار باد بر روی سازه‌های غشایی با پایه قوسی بیضوی شکل را با استفاده از آزمایش تونل باد بررسی نمودند، در این پژوهش ویژگی‌های توزیع فشار باد بر ساختارهای غشایی قوس‌دار بیضوی شکل ارائه شده است و همچنین تأثیر عوامل مختلف از جمله نسبت افزایش طول دهانه، جهت اعمال نیروی بار باد بر توزیع میانگین، نوسان و ضریب فشار بیشینه بار باد را مورد بحث قرار گرفته است [۱۴]. NingSu و همکاران (۲۰۲۱) در تحقیقات خود اثر عدد رینولدز بر مخازن کروی با در نظر گرفتن اثر زبری سطح با استفاده از آزمایش تونل باد را مورد بررسی قرار دادند [۱۵]. شیخ‌الاسلامی و همکاران (۲۰۲۳) با استفاده از آزمایش تونل باد و مدل‌سازی عددی اثر بار باد بر روی سازه برج میلاد مورد بررسی قرار دادند [۱۶]. Rajabi و همکاران (۲۰۲۲) با استفاده از آزمایش تونل باد و مدل‌سازی عددی الگوی بحرانی بار باد را بر روی ساختمان‌های با پلان Y شکل را ارائه دادند [۱۷]. همچنین Sadeghi و همکاران (۲۰۱۸) تأثیر هم‌جواری گنبدها را بر روی تغییرات ضرایب فشار باد بر روی گنبدهای کروی مورد بررسی قرار دادند در این تحقیق مشاهده شد زمانی که فاصله گنبدها بیش از سه برابر قطر گنبد باشد، مجاورت گنبدها تأثیری بر روی بار باد وارد بر گنبدها نخواهد داشت [۱۸]. نوآوری این تحقیق در مقایسه با تحقیقات ذکر شده در بررسی اثر پوشش سقف بر روی تغییرات ضرایب فشار باد است.

۲- روابط آئین‌نامه‌ای محاسبه بار باد

در آئین‌نامه‌های طراحی سازه‌ها، به روش‌های محاسبه بار باد اشاره شده است، یکی از این روش‌ها، روش استاتیکی است با توجه به این روش، نیروی باد برای یک ساختمان از جمع جبری بارهای وارده بر سطوح روبرو و پشت به باد (فشار و مکش) به دست می‌آید. مطابق مبحث 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 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 مبنا، C_e ضریب اثر تغییر سرعت، C_t ضریب پستی

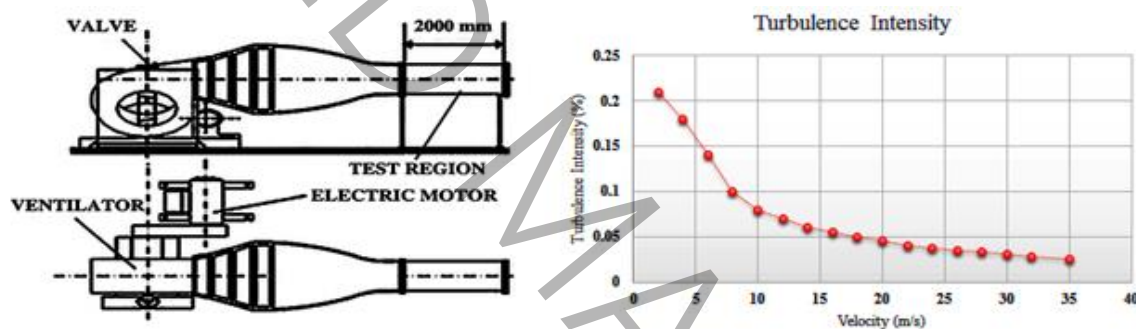
وبلندی، C_g ضریب اثر تندباد، C_p ضریب فشار و C_d ضریب هم راستایی باد است. ضریب فشار با استفاده از معادله ۲، به دست می‌آید.

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

در معادله (۲)، $P - P_0$ نشان‌دهنده‌ی 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.

۳- آزمایش تونل باد

یکی از روش‌های مناسب جهت بررسی تأثیر باد بر سازه‌ها استفاده از آزمایش تونل باد است، استفاده از این روش در اکثر آیین‌نامه‌ها پیشنهاد شده است. علم آئرو دینامیک در ابتدا یک علم آزمایشگاهی و تجربی بوده، در آئرو دینامیک تجربی یکی از وسایلی که کارایی خود را به صورت کامل به نمایش گذاشته است تونل باد است. 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 آئرو دینامیک، 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 این تحقیق، از تونل باد دانشگاه صنعتی شاهرود، با طول تقریبی ۱۸ متر و ابعاد اتاق آزمایش، برابر عرض و ارتفاع ۸۰ سانتیمتر و طول ۲۰۰ سانتیمتر بهره گرفته شده است. در شکل ۲، تصویر شماتیک تونل باد و درصد شدت تلاطم به عنوان تابعی از سرعت در مرکز بخش آزمایش، همچنین نسبت سرعت میانگین U به سرعت در داخل تونل باد در فاصله $X=750$ میلی‌متر از ورودی بخش آزمایش نیز برای موقعیت‌های مختلف سیم داغ نشان داده شده است.



شکل ۲: تصویری شماتیک از تونل باد به همراه نمودار تغییرات درصد اغتشاش نسبت به سرعت در تونل باد

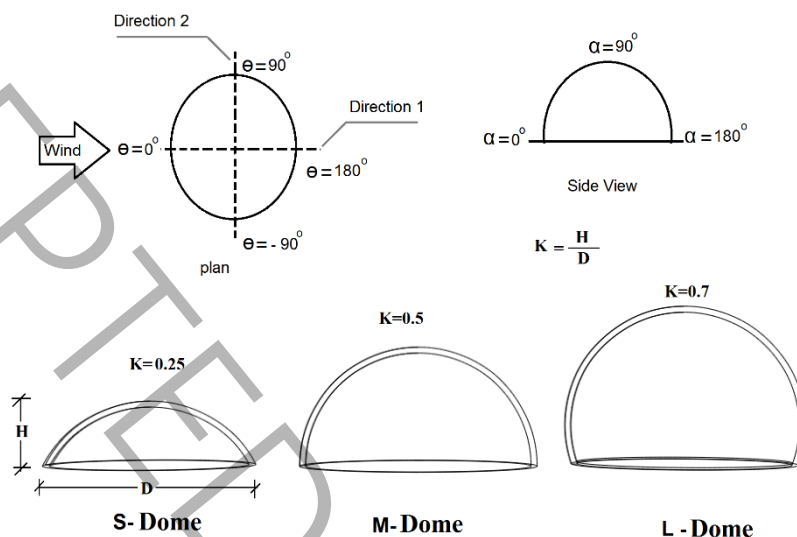
Fig. 2. Schematic of the wind tunnel components and Profile of turbulence intensity percentage based on velocity at the center of the test section



شکل ۳: جزییات مدل های آزمایش شده به همراه اجزا تونل باد

Fig. 3. Details of the tested models with wind tunnel components

در شکل ۳، مدل های گنبد کروی به همراه تصاویری از تونل باد نشان داده شده است، همانطور که در این شکل مشاهده می شود، برای اندازه گیری فشار باد باید در هر نقطه که فشار باد در آن نقطه مدنظر است یک سوراخ ایجاد شده، و به هر سوراخ یک لوله جهت اندازه گیری فشار نصب شده و لوله از سوی دیگر به حسگر اندازه گیری فشار متصل می شود. با توجه به محدودیت تعداد حسگر ها جهت اندازه گیری ضرایب فشار باد، بر روی هر مدل بیست سوراخ ایجاد شده است، مدل ها در تونل باد بر روی صفحه ای مدرج قرار گرفته و هر بار ۵ درجه تا ۹۰ درجه چرخانده شده است و در هر زاویه ضرایب فشار باد اندازه گیری شده است، سرعت ورودی باد در تحلیل های عددی و آزمایش تونل باد ۲۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است.



شکل ۴: جزئیات مدل های گنبد کروی مورد مطالعه

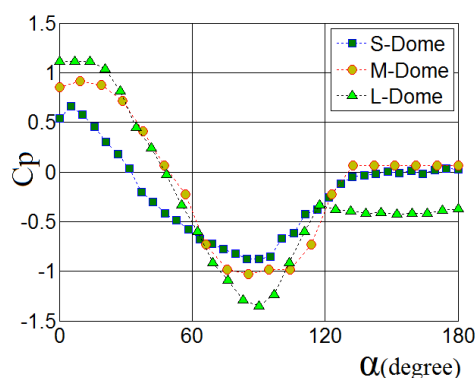
Fig. 4. Details of the spherical dome models studied

شکل ۴، مشخصات هندسی گنبدهای کروی و متغیرهای استفاده شده در این مقاله را نشان می دهد. در این شکل، H ارتفاع تاج از پای گنبد و K نسبت ارتفاع به دهانه گنبد است. زاویه $\theta = 0^\circ$ بیانگر سطح رو به باد و $\theta = 180^\circ$ بیانگر سطح پشت به باد در راستای ۲ است. زاویه $\alpha = 0^\circ$ بیانگر سطح رو به باد در پای قوس و زاویه $\alpha = 90^\circ$ بیانگر تاج قوس و $\alpha = 180^\circ$ پای قوس در قسمت پشت به باد در راستای ۱ می باشد. θ بین 180° تا 180° درجه و α بین 0° تا 180° درجه متغیر است و ضرایب فشار بر اساس این دو پارامتر رسم می شود. مشخصات هندسی گنبدهای بررسی شده در جدول ۱، ارائه شده است، قطر هر سه گنبد ۲۰ سانتی متر است.

جدول ۱: جزئیات گنبدهای بررسی شده در تحقیق

Table 1: Details of the domes examined in the research

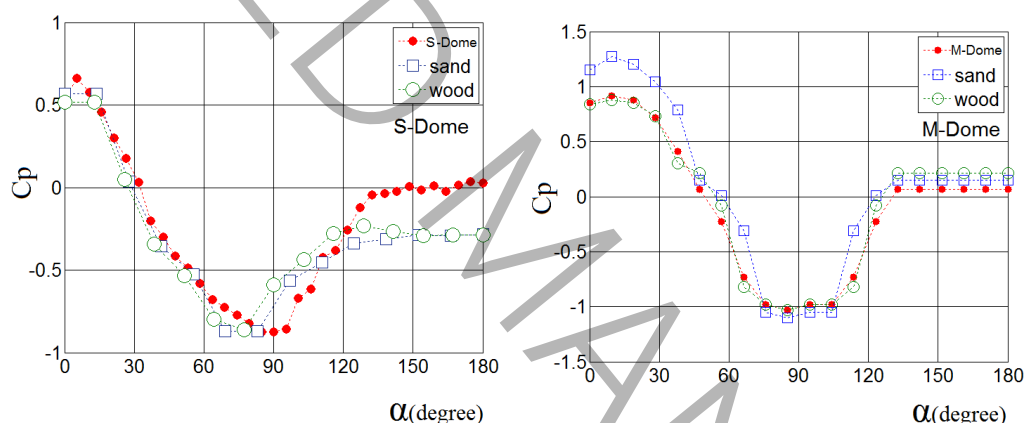
گنبد	D(cm)	H (cm)	K (H/D)
S	۲۰	۵	۰/۲۵
M	۲۰	۱۰	۰/۵۰
L	۲۰	۱۵	۰/۷۵



شکل ۵: نتایج ضرایب فشار باد بر روی گنبدها به دست آمده از آزمایش تونل باد

Fig. 5. Results of wind pressure coefficients on domes obtained from wind tunnel testing

در شکل ۵، ضرایب فشار باد بر روی گنبدهای مورد مطالعه، حاصل از آزمایشی تونل باد ارائه شده است، بیشینه ضریب فشار مثبت که در سطوح رو به باد حاصل می شود که این مقادیر به ترتیب در گنبدهای S و M و L برابر با ۰/۶۶ و ۰/۹۱ و ۱/۱۱ است، همچنین بیشینه ضرایب فشار منفی (مکش) برای گنبدهای ذکر شده به ترتیب برابر ۰/۸۷- و ۱/۰۳- و ۱/۳۵- است. مشاهده می شود با افزایش نسبت ارتفاع به دهانه (k) ماکزیمم ضریب فشار منفی افزایش می یابد، چنانچه در شکل ۵، مشاهده می شود بیشینه ضریب فشار منفی در تاج گنبد در $\alpha = 90^\circ$ بدست می آید. شکل ۶، ضرایب فشار باد بر روی گنبد S و گنبد M با سه پوشش متفاوت رسم شده است.



شکل ۶: مقایسه ضرایب فشار باد بر روی گنبد کروی با پوشش سقف (زبری) مختلف حاصل از آزمایش تونل باد

Fig. 6. Comparison of wind pressure coefficients on a spherical dome with different roof coverings (roughness) obtained from wind tunnel testing

سطح گنبدهای آزمایش شده در تونل باد، در حالت اولیه با توجه به ساخت این گنبدها با پرینتر سه بعدی دارای سطحی صیقلی است، با هدف بررسی اثر زبری سطح بر تغییرات ضرایب فشار گنبدها همانطور که در شکل ۳، قابل مشاهده است سطح به وسیله پوشش چوب (wood) و در حالتی دیگر به وسیله ماسه (sand) زبر شده است و نتایج ضرایب فشار بر روی این گنبدها در شکل ۶، ارائه شده است.

۴- مدل سازی عددی

در ۵۰ سال گذشته، روش محاسباتی در مهندسی باد (CWE) به عنوان یکی از شاخه های دینامیک سیالات محاسباتی برای تخمین اثر متقابل بین باد و سازه ها به صورت روشی عددی در برنامه های کاربردی پیشرفت چشمگیری داشته است، روش هایی از قبیل شبیه سازی عددی مستقیم (DNS) روش مبتنی بر معادلات ناویر-استوکس میانگین گیری شده از روش رینولدز (RANS) و در نهایت شبیه سازی گردابه های بزرگ (LES) به عنوان روش های حل معادلات محسوب می شود. شبیه سازی ها با استفاده از روش CFD در [۱۹] ANSYS Fluent انجام شده است، مدل k-epsilon به دلیل داشتن تطبیق مناسب با نتایج آزمایشگاهی، در این تحقیق استفاده شده است. مدل k-epsilon از دو معادله انتقال برای حل انرژی جنبشی آشفته (K) و سرعت اتلاف گردابی (اپسیلون) استفاده می کند. مدل استاندارد k-epsilon توسط Jones and

[۲۰] Launder و [۲۱] Launder and Sharma بر اساس مفهوم ویسکوزیته گردابی خطی [۲۲] Boussinesq توسعه یافته است. تنش های رینولدز به صورت خطی با نرخ کرنش متوسط تغییر می کند. تنش های رینولدز در مدل ویسکوزیته گردابی به صورت بیان می شود:

$$\tau_{ij} = 2\mu_t (S_{ij} - S_{nn}\delta_{ij}/3) - 2\rho k \delta_{ij}/3 \quad (۳)$$

μ_t ویسکوزیته گردابی است، S_{ij} تانسور نرخ کرنش میانگین سرعت، ρ نشان دهنده ویسکوزیته، k نشان دهنده انرژی جنبشی آشفته، و δ_{ij} دلتای کرونکر است. ویسکوزیته گردابی به عنوان تابعی از انرژی جنبشی آشفته و سرعت اتلاف آشفته تعریف می شود:

$$\mu_t = c_\mu f_\mu \rho k^2 / \varepsilon \quad (۴)$$

c_μ ضریب مدل به دست آمده توسط تجزیه و تحلیل تعادل در اعداد رینولدز بالا است، در حالی که f_μ تابع میرایی است. تابع میرایی بر اساس عدد رینولدز آشفته تعریف می شود

$$Re_t = \rho k^2 / \varepsilon \mu$$

$$f_\mu = \exp(-3.4 / (1 + 0.02 Re_t)^2) \quad (۵)$$

معادلات انتقال آشفته مدل k-epsilon در مدل Launder-Sharma به صورت زیر تعریف می شوند.

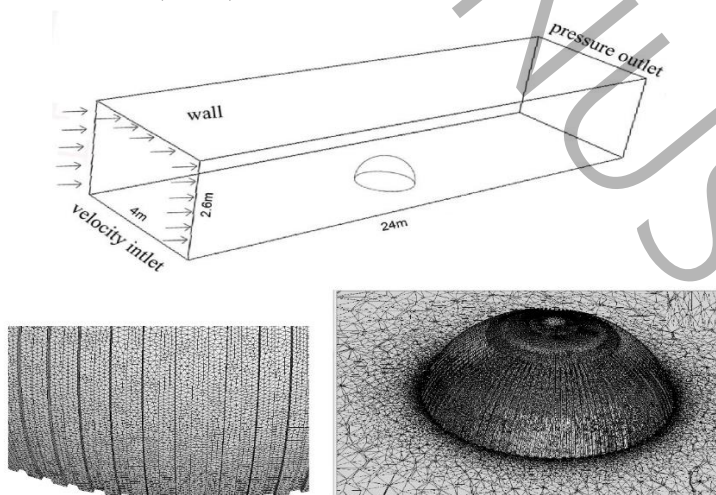
$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) = \tau_{ij} S_{ij} - \rho \varepsilon + \phi_k \quad (۶)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho u_j \varepsilon - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) = c_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} S_{ij} - c_{\varepsilon 2} f_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + \phi_\varepsilon \quad (۷)$$

$$c_\mu = 0.09 \quad c_{\varepsilon 1} = 1.45 \quad c_{\varepsilon 2} = 1.92 \quad \sigma_k = 1.0 \quad \sigma_\varepsilon = 1.3 \quad Pr_t = 0.9$$

$$f_2 = 1 - 0.3 \exp(-Re_t^2) \text{ and } Re_t = \frac{\rho k^2}{\mu \varepsilon} \quad (۸)$$

$$\phi_k = 2\mu \left(\frac{\partial \sqrt{k}}{\partial y} \right)^2 \text{ and } \phi_\varepsilon = 2\mu \frac{\mu_t}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u_s}{\partial y^2} \right)^2 \quad (۹)$$



شکل ۷: شرایط مرزی تونل باد و مدل مش بندی گنبد دارای شیارهای قائم

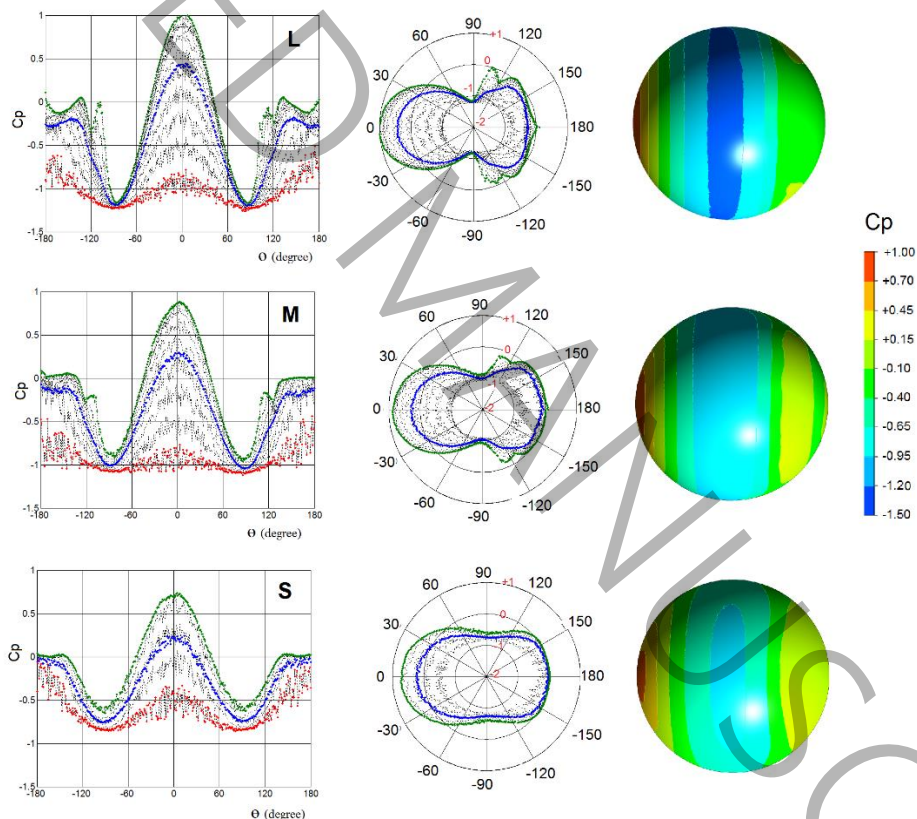
Fig. 7. Wind tunnel boundary conditions and meshing model of a dome with vertical grooves

شرایط مرزی تونل باد که در مدل سازی عددی در نظر گرفته شده است در شکل ۷، 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 میتوان از شرط مرزی فشار ورودی Pressure inlet استفاده کرد، این مرز برای جریان تراکم پذیر و تراکم ناپذیر استفاده میگردد. 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 مدلسازی عددی جریان باد به صورت یکنواخت در ارتفاع تونل در نظر گرفته شده است.

۳-۱- مدل سازی عددی گنبدهای با سطح پوشش صیقلی

در این بخش گنبدهای S و M و L با سطح صیقلی مدل سازی شده و ضرایب فشار بر روی این گنبدها ارائه شده است، در شکل ۸، کانتور ضرایب فشار بر روی گنبدهای S و M و L حاصل از مدل سازی عددی مشاهده می شود، همچنین نمودار ضرایب فشار در مختصات دکارتی و مختصات قطبی رسم شده است، مشاهده می شود با افزایش نسبت ارتفاع به قطر گنبد (k)، بیشینه ضرایب فشار مثبت و همچنین بیشینه ضرایب فشار منفی (مکش) افزایش می یابد. در این شکل ضرایب فشار در تمامی نقاط گنبدها در ترازهای ارتفاعی متفاوت رسم شده است، نمودار سبز رنگ در مختصات دکارتی مربوط به ضرایب فشار در پایین ترین تراز ارتفاعی گنبد و رنگ قرمز مربوط به بالاترین تراز ارتفاعی گنبد و دیگر خطوط مربوط به سایر ترازهای ارتفاعی است.

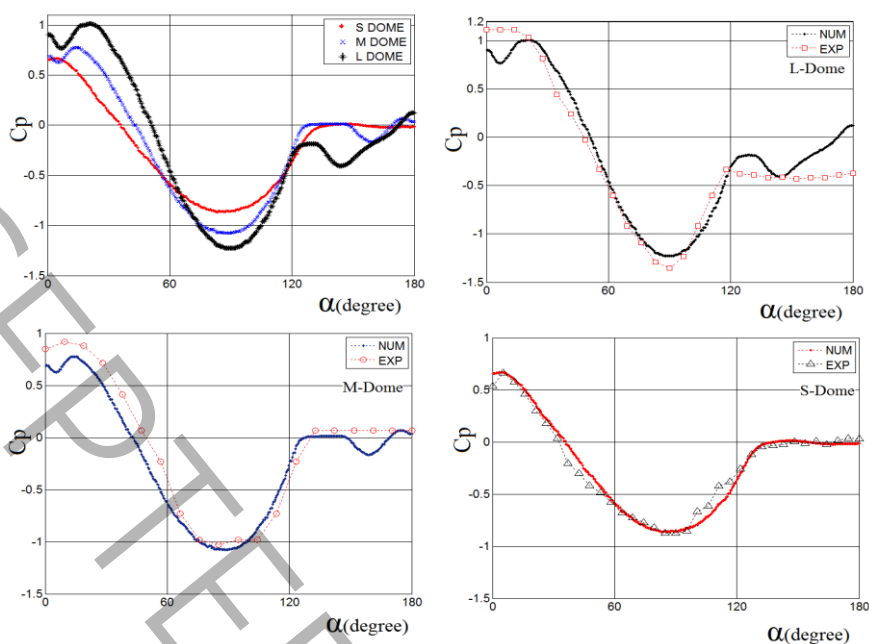


شکل ۸: کانتور ضرایب فشار باد به همراه نمودار این ضرایب در گنبدهای کروی حاصل از مدل سازی عددی

Fig. 8. Contour of wind pressure coefficients along with a graph of these coefficients in spherical domes resulting from numerical modeling

همانطور که در شکل ۸ مشاهده می شود، ضرایب فشار در گنبدهای M و S، در $\theta = 150^\circ$ تا $\theta = 180^\circ$ تقریباً دارای مقادیر ثابتی است. در شکل ۹، نتایج حاصل از آزمایش تونل باد و مدل سازی عددی مقایسه شده است. بیشینه ضرایب فشار مثبت حاصل از مدل سازی عددی در گنبدهای S و M و L برابر با ۰/۶۶ و ۰/۷۸ و ۱/۰۲ است، همچنین بیشینه ضرایب فشار منفی (مکش) برای گنبدهای ذکر شده به ترتیب برابر

۰/۸۶- و ۱/۰۷- و ۱/۲۲- است. آنچه در شکل واضح است نزدیک بودن نتایج آزمایش تونل باد و نتایج حاصل از مدل سازی عددی بر مبنای روش (CFD) با بکارگیری نرم افزار ANSYS است.

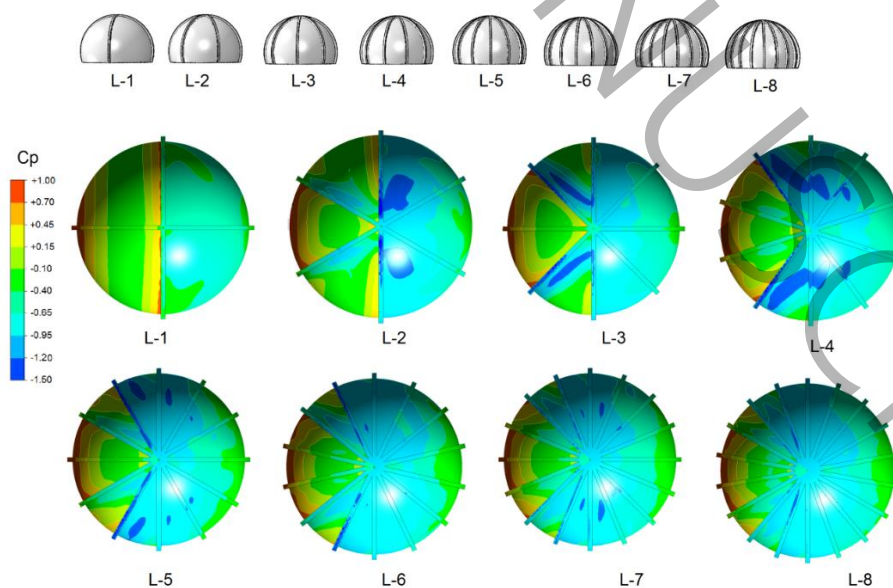


شکل ۹: مقایسه نتایج حاصل از آزمایش تونل باد و مدل سازی عددی

Fig. 9. Comparison of results from wind tunnel testing and numerical modeling

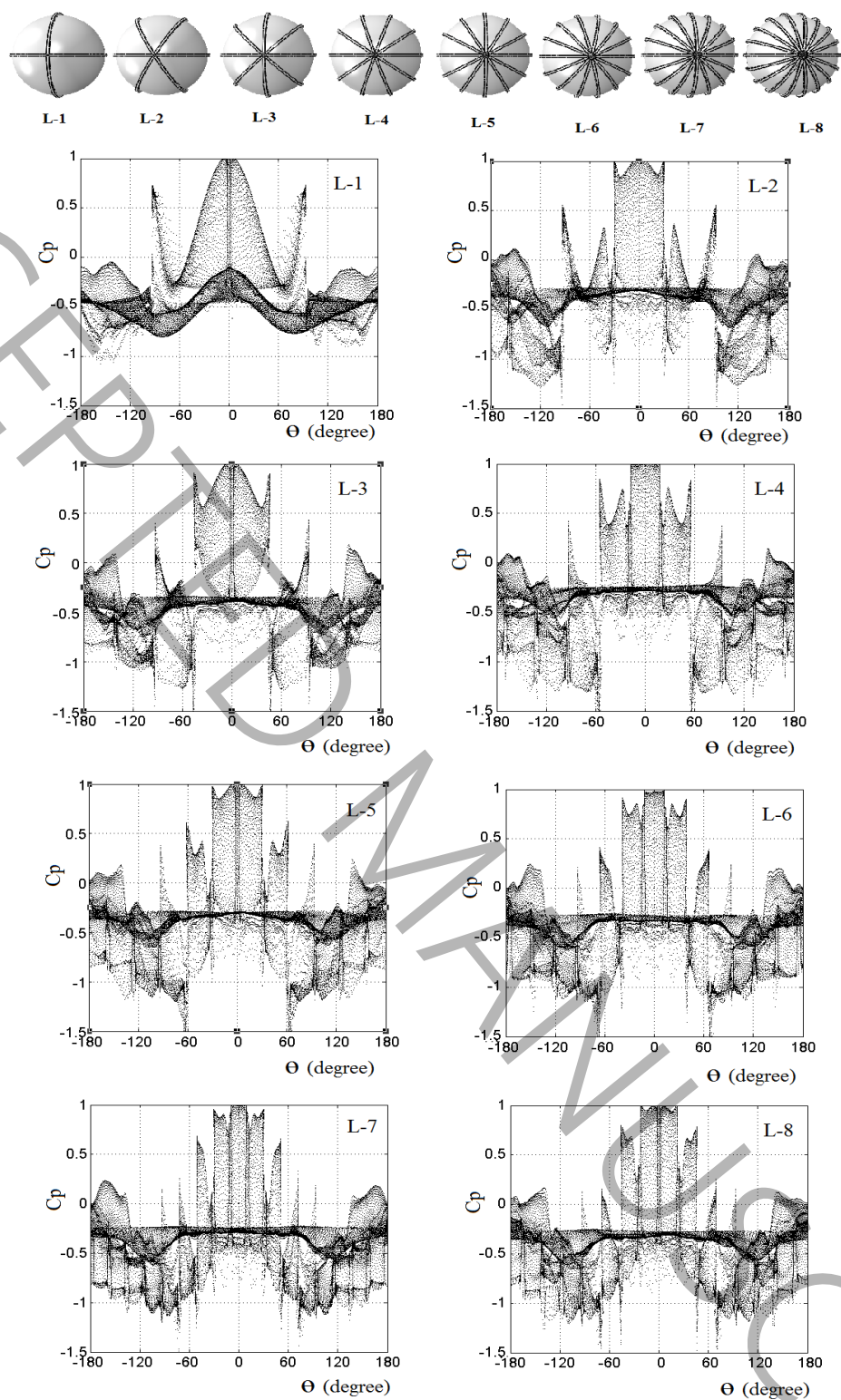
۲-۳- مدل سازی عددی گنبد های دارای برآمدگی در پوشش

در این بخش باهدف بررسی تأثیر ایجاد برآمدگی در پوشش سقف مشابه آنچه در شکل ۱، ارائه شده است، اثر این برآمدگی ها مورد بررسی قرار گرفته است، در شکل ۱۰، ایجاد برآمدگی هایی بر روی سطح مورد بررسی قرار گرفته است شکل ۱-L دارای چهار برآمدگی است که سقف را به چهار ناحیه تقسیم می کند به تدریج تعداد برآمدگی ها افزایش یافته تا اینکه در نمونه ۸-L، تعداد برآمدگی در سقف به ۱۸ عدد می رسد، این گنبدها در نرم افزار مدل شده است و نتایج ارائه شده است در شکل ۱۰، کانتور ضرایب فشار بر روی این گنبدها ترسیم شده است، با افزایش تعداد این برآمدگی ها در سطح سازه تغییر در ضرایب فشار کاملاً مشهود است.



شکل ۱۰: کانتور ضرایب فشار بر روی گنبد های کروی L با برآمدگی های ایجاد شده بر روی سازه

Fig. 10. Contour of pressure coefficients on spherical domes (L) with Prominence created on the structure



شکل ۱۱: نمودار ضرایب فشار بر روی گنبد های کروی L با برآمدگی های ایجاد شده بر روی سازه

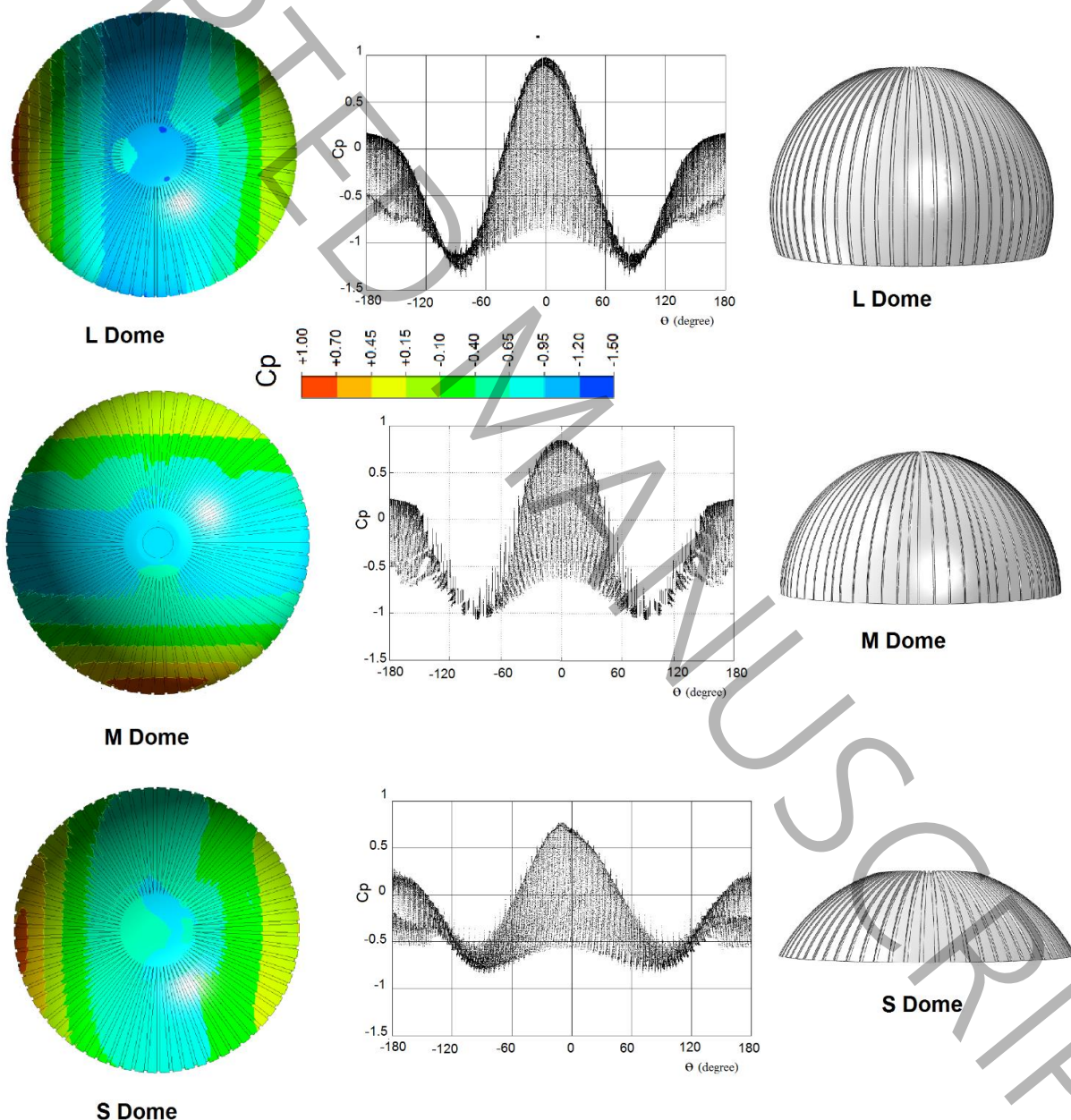
Fig. 11. Pressure coefficient diagram on L-shaped spherical domes with protrusions created on the structure

شکل ۱۱ ضرایب فشار بر روی گنبد L با وجود حالات مختلف ایجاد برآمدگی بر روی این گنبد را نشان می دهد، این ضرایب فشار برای تمامی ترازهای ارتفاعی گنبد رسم شده است، همانطور که مشاهده می شود، ایجاد برآمدگی بر روی سطح گنبد باعث ایجاد پرش در مقادیر ضرایب

فشار C_p در محل برآمدگی می‌شود، در گنبد ۱- L که شیارها در زاویه $\theta = 0^\circ$ و $\theta = 90^\circ$ نسبت به اعمال جهت باد قرار دارد، پرش در مقادیر ضریب فشار به سمت مقادیر مثبت در محل برآمدگی قرار گرفته در 90° درجه اتفاق می‌افتد، در گنبد ۲- L که برآمدگی در $\theta = 60^\circ$ و $\theta = 120^\circ$ قرار دارد پرش در ضرایب فشار در این زوایا قابل مشاهده است، نکته مهم این است که در طراحی گنبدهایی از قبیل گنبدهای نشان داده شده در شکل ۱۱ نمی‌توان از ضرایب فشار گنبدهای کروی که دارای سطحی صیقلی هستند استفاده کرد و باید حتما ضرایب فشار سازه مورد نظر را با استفاده از آزمایش تونل باد و یا مدل‌سازی عددی به‌دست آورد.

۳-۳- مدل‌سازی عددی گنبدهای دارای شیار در سطح پوشش

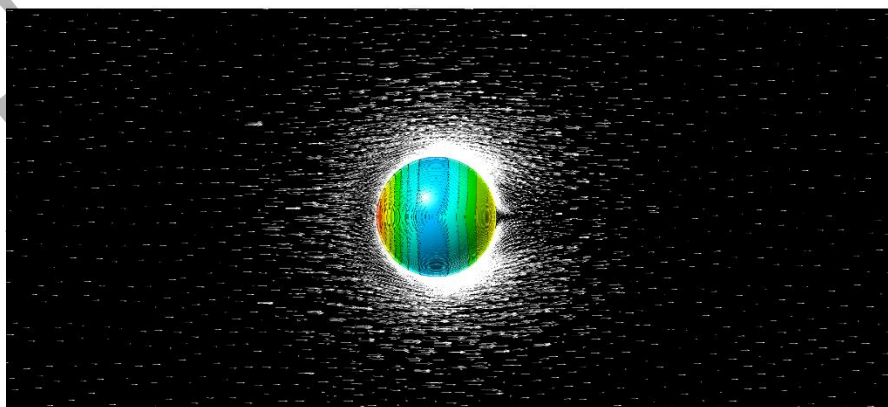
در شکل ۱۲، ضرایب فشار گنبدهای L و S و M در صورتی که ورق‌های پوشش موج‌دار باشند مدل‌سازی شده است، در این شکل علاوه بر کانتور ضرایب فشار باد، نمودار این ضرایب نیز رسم شده است. آنچه در این شکل قابل ملاحظه است و در مقایسه با شکل ۸، که مقادیر ضرایب فشار گنبدهای ذکر شده در حالتی که پوشش به صورت صیقلی باشد این است که مقادیر ماکزیمم فشار و مکش تفاوتی ندارد تنها تفاوت در جمع شدگی مقادیر ضرایب فشار در زاویه $\theta = 90^\circ$ تا $\theta = 120^\circ$ است بعلاوه پرش‌های کوچکی که در محل شیارها مشاهده می‌شود.



شکل ۱۲: نمودار و کانتور ضرایب فشار بر روی گنبدهای کروی با پوشش ورق‌های شیار دار

Fig. 12. Chart and contour of pressure coefficients on spherical domes covered with corrugated sheets

هنگامی که سیال از روی سازه عبور می‌کند، می‌تواند دارای اعداد رینولدز متفاوتی باشد. به‌طور کلی هرچه 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 به‌گونه‌ای 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. در شکل ۱۳، خطوط جریان در اطراف گنبد رسم شده است.



شکل ۱۵: خطوط جریان اطراف گنبد
Fig. 13. Streamlines around the dome

با افزایش عدد رینولدز، ناحیه ویسکوز به پایین‌دست جریان رانده می‌شود که لایه مرزی نازک روی قسمت جلویی سازه وجود دارد و یک ناحیه جریان‌های حلقوی (wake) نامنظم در قسمت پایین‌دست 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 آنجا که تنش‌های برشی (یعنی 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.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله اثر بار باد بر روی گنبدهای کروی مورد بررسی قرار گرفت و ضرایب فشار باد بر روی این نوع از گنبدها با استفاده از آزمایش تونل باد و مدل‌سازی عددی بر مبنای روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) ارائه شده است، نتایج زیر از انجام تحقیق حاصل می‌شود.

- ۱- با افزایش نسبت ارتفاع به دهانه گنبد، حداکثر مقادیر فشار منفی (مکش) افزایش می‌یابد، در گنبدهایی با نسبت ارتفاع به دهانه کم، سطح بیشتری از گنبد تحت مکش قرار می‌گیرد، به‌طوری‌که در آزمایش تونل باد مشاهده می‌شود گنبدهای با ارتفاع کم تحت تأثیر بار باد از کف تونل به سمت بالا کشیده می‌شود.
- ۲- بیشینه ضرایب فشار مثبت حاصل از مدل‌سازی عددی در گنبدهای S و M و L برابر با ۰/۶۶ و ۰/۷۸ و ۱/۰۲ است، همچنین بیشینه ضرایب فشار منفی (مکش) برای گنبدهای ذکر شده به ترتیب برابر ۰/۸۶- و ۱/۰۷- و ۱/۲۲- است.
- ۳- با مشاهده کانتورهای ضریب فشار مشاهده می‌شود تقریباً در $\theta = 150^\circ$ تا $\theta = 180^\circ$ ضریب فشار برای تمامی گنبدها ثابت است.
- ۴- با مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی و نتایج حاصل از آزمایش تونل باد، تطابق مناسب در این نتایج دیده می‌شود در نتیجه می‌توان مدل‌سازی عددی را یک راه جایگزین و دقیق آزمایش تونل باد در نظر گرفت.
- ۵- باتوجه به نتایج مدل‌سازی گنبدهای دارای برآمدگی در پوشش (مطابق شکل ۱۱)، مشاهده می‌شود که تغییرات زیادی در نمودار ضرایب فشار این گنبد در مقایسه با گنبدهای دارای پوشش صیقلی وجود دارد، لذا نمی‌توان در طراحی این نوع از گنبدها، از ضرایب فشار گنبدهای کروی که دارای سطحی صیقلی هستند استفاده کرد و باید حتماً ضرایب فشار سازه مورد نظر را با استفاده از آزمایش تونل باد و یا مدل‌سازی عددی به‌دست آورد.

- ۶- در گنبدهای دارای برآمدگی، باتوجه به ارتفاع و تعداد برآمدگی موجود در محیط گنبد، ضرایب فشار باد متغیر است، این برآمدگی‌ها باعث پرش در مقادیر ضریب فشار می‌شود که این تغییرات در شکل ۱۱، به طور کامل مشهود است، لذا دقت مدل‌سازی در این نوع از سازه‌ها از اهمیت بسزایی برخوردار است.
- ۷- تأثیرگذارترین حالت قرارگیری برآمدگی در حالتی است که برآمدگی گنبد در $\theta=90^\circ$ قرار بگیرد که در این صورت پرش ضرایب فشار به سمت مقادیر مثبت به مقدار $C_p=0.7$ می‌رسد.

۵-مراجع:

- [۱] S. Vinothni, P. Sangeetha, Space Frame Structure as Roof and Floor System—A Review, Sustainable Practices and Innovations in Civil Engineering: Select Proceedings of SPICE 2021, (2022) 291-298.
- [۲] P.K. Goyal, S. Kumari, S. Singh, R.K. Saroj, R.K. Meena, R. Raj, Numerical study of wind loads on Y plan-shaped tall building using CFD, Civil Engineering Journal, 8(2) (2022) 263-277.
- [۳] F. Rezaeinamdar, M. Sefid, H. Nooshin, Numerical and experimental investigation of wind pressure coefficients on scallop dome, Int. J. Optim. Civil Eng, 12(3) (2022) 313-334.
- [۴] H. Sadeghi, M. Heristchian, A. Aziminejad, H. Nooshin, Wind effect on grooved and scallop domes, Engineering Structures, 148 (2017) 436-450.
- [۵] M.J. Park, S.W. Yoon, Y.C. Kim, D.J. Cheon, Wind pressure characteristics based on the rise-span ratio of spherical domes with openings on the roof, Buildings, 12(5) (2022) 576.
- [۶] J.H. Lee, Y.C. Kim, D.J. Cheon, S.W. Yoon, Wind pressure characteristics of elliptical retractable dome roofs, Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 21(4) (2022) 1561-1577.
- [۷] A. Verma, R.K. Meena, R. Raj, A.K. Ahuja, Experimental investigation of wind induced pressure on various type of low-rise structure, Asian Journal of Civil Engineering, 23(8) (2022). ۱۲۶۵-۱۲۵۱ (
- [۸] L. Pagnini, S. Torre, A. Freda, G. Piccardo, Wind pressure measurements on a vaulted canopy roof, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 223 (2022) 104934.
- [۹] T. Taylor, Wind pressures on a hemispherical dome, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 40(2) (1992) 199-213.
- [۱۰] 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, 227(12) (2013) 2686-2700.
- [۱۱] P. Zhou, B. Tang, P. Liu, G. Zheng, Study on wind load distribution on the surface of dome structure based on CFD numerical simulation, in: Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing, 20, ۱۹ pp. 052056.
- [۱۲] S. Nie, X. Zhou, Y. Shi, C. Gou, T. Zhou, Wind tunnel test on wind load characteristic of low-rise sloping roof buildings, Jianzhu Jiegou Xuebao(Journal of Building Structures), 33(3) (2012) 118-125.
- [۱۳] S. Khosrowjerdi, H. Sarkardeh, Effect of wind load on combined arches in dome buildings, The European Physical Journal Plus, 137(2) (2022) 227.
- [۱۴] X. Sun, K. Arjun, Y. Wu, Investigation on wind tunnel experiment of oval-shaped arch-supported membrane structures, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 206 (2020) 104371.

[١٥]N. Su, S. Peng, Y. Uematsu, Reynolds number effects on the wind pressure distribution on spherical storage tanks, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 208 (2021) 104464.

[١٦]A. Sheikh Aleslami, H. Sadeghi, Effect of wind load on Milad Tower and adjacent buildings case study: shed adjacent to tower, *Iranica Journal of Energy & Environment*, 14(3) (2023) 289-300.

[١٧]E. Rajabi, H. Sadeghi, M.R. Hashemi, Wind effect on building with Y-shaped plan, *Asian Journal of Civil Engineering*, 23(1) (2022) 141-151.

[١٨]H. Sadeghi, M. Heristchian, A. Aziminejad, H. Nooshin, CFD simulation of hemispherical domes: structural flexibility and interference factors, *Asian Journal of Civil Engineering*, 19(5) (2018) 535-551.

[١٩]U. Manual, ANSYS FLUENT 12.0, Theory Guide, 67 (2009).

[٢٠]J. Bardina, P. Huang, T. Coakley, J. Bardina, P. Huang, T. Coakley, Turbulence modeling validation, in: 28th Fluid dynamics conference, 1997, pp. 2121.

[٢١]W.P. Jones, B.E. Launder, The prediction of laminarization with a two-equation model of turbulence, *International journal of heat and mass transfer*, 15(2) (1972) 301-314.

[٢٢]B.E. Launder, B.I. Sharma, Application of the energy-dissipation model of turbulence to the calculation of flow near a spinning disc, *Letters in heat and mass transfer*, 1(2) (1974) 131-137.