

## Numerical and experimental study of wind tunnel method to determine the effect of pressure coefficient on storage tanks

Hamid Reza Da varzani <sup>1</sup>. Ahmad Ganjali <sup>2</sup>. Hossein Sadeghi <sup>3\*</sup>. Rasul Mohebbi <sup>4</sup>

1- Phd Student, Faculty of Civil Engineering, Islamic Azad University of Shahrood , Shahrood, Iran

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering , Islamic azad university of shahrood ,Shahrood, Iran

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

4- School of Engineering, Damghan University P.O. Box: 3671641167, Damghan, Iran

### ABSTRACT

*In the design of cylindrical storage tanks, one of the effective parameters on the pressure coefficient is the wind load. In the static method for designing and calculating the pressure coefficient of tanks, the calculation of the pressure coefficient depends on its geometry. This coefficient exists for conventional structures in regulations. In the absence of this coefficient in the regulations, it should be obtained from wind tunnel testing or numerical method. On the other hand, the lack of pressure coefficient in all parts of the tank, at angles under the influence of wind, this causes computational errors. In this paper; Wind pressure coefficients on cylindrical storage tanks with a height to orifice ratio of 0.25, 0.5, 1, 1.5 have been obtained by using wind tunnel testing and numerical method based on computational fluid dynamics (CFD) Comparing the results of wind pressure coefficients, it is observed that; As the height to span ratio increases, the maximum value of the negative air pressure coefficient (suction) increases. The maximum negative pressure at  $\theta=90^0$  was equal to -2.2 and the maximum positive pressure at  $\theta=0^0$  (against wind) was +1. In this research, the equation wind pressure coefficients on the environment of cylindrical storage tanks is presented, which can be used in the design of storage tanks.*

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 20 September 2021

**Revise Date:** 28 December 2021

**Accept Date:** 16 February 2022

### Keywords:

Wind load  
pressure coefficient  
storage tanks  
wind tunnel  
CFD

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.304864.2576>

\*Corresponding author: Hossein Sadeghi.

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

## تعیین ضرایب فشار باد بر مخازن ذخیره استوانه‌ای، با استفاده از آزمایش تونل باد و مدل سازی عددی

حمیدرضا داورزنی<sup>۱</sup> احمد گنجعلی<sup>۲</sup>، حسین صادقی<sup>۳\*</sup>، رسول محبی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری سازه، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران

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

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

۴- استادیار، دانشگاه دامغان- دامغان- ایران

### چکیده

بار باد، یکی از بارهای جانبی تأثیرگذار در طراحی مخازن ذخیره استوانه‌ای می‌باشد. در روش استاتیکی، یکی از پارامترها در محاسبه نیروی باد وارد بر سازه که وابسته به هندسه مخزن می‌باشد، ضریب فشار است. راه‌های یافتن این ضریب، استفاده از آزمایش تونل باد و یا استفاده از مدل سازی عددی در نرم‌افزار بر مبنای روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) است. برآورد دقیق این ضرایب فشار در تمام سطح مخزن جهت محاسبه بار کمانشی و کنترل دیگر معیارهای طراحی از اهمیت بسزایی برخوردار است. در این مقاله، ضرایب فشار باد بر روی مخازن ذخیره استوانه‌ای با نسبت ارتفاع به قطر ۰٫۲۵ و ۰٫۵ و ۱ و ۱٫۵ (با استفاده از آزمایش تونل باد و مدل سازی عددی، بر مبنای روش دینامیک سیالات محاسباتی با استفاده از نرم‌افزار ANSYS به دست آمده است. با مقایسه نتایج ضرایب فشار باد، مشاهده می‌شود با افزایش نسبت ارتفاع به قطر مخزن، بیشینه مقدار ضریب فشار باد منفی (مکش)، افزایش می‌یابد. ماکزیمم فشار منفی در  $\theta=90^\circ$  برابر ۲٫۲- و بیشینه فشار مثبت در  $\theta=0^\circ$  (مقابل باد) برابر ۱ به دست آمد. در این تحقیق معادله حاکم بر ضرایب فشار باد بر روی محیط مخازن استوانه‌ای ذخیره، ارائه شده است که در طراحی مخازن ذخیره، می‌توان از این معادله استفاده کرد. همچنین ضرایب فشار بر روی مخزن ذخیره ساخته شده با استفاده از ورق‌های موج‌دار نیز ارائه شده است.

کلمات کلیدی: بارگذاری باد، ضریب فشار، مخازن ذخیره، تونل باد، فشار باد.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	شناسه دیجیتال:
۱۴۰۰/۰۶/۲۹	۱۴۰۰/۱۰/۰۷	۱۴۰۰/۱۱/۲۷	۱۴۰۰/۱۱/۲۷	۱۴۰۱/۰۹/۳۰	https://doi.org/10.22065/jsce.2022.304864.2576
					doi: 10.22065/jsce.2022.304864.2576
*نویسنده مسئول:					حسین صادقی damghaniau.ac.ir@H.Sadeghi
پست الکترونیکی:					

## ۱- مقدمه

با افزایش روزافزون مصرف سوخت، نیاز به ذخیره‌سازی در مخازن، ضروری به نظر می‌رسد. در این میان بررسی اثرات نیروی باد بر مخازن و طراحی آن، به‌عنوان نوعی سازه‌های بااهمیت و استراتژیک ضروری به نظر می‌رسد. یکی از مسائل مهم در طراحی، بررسی اثر نیروی باد بر روی این سازه‌ها می‌باشد. اثر بادهای محیطی، بر مخازن جدار نازک، و از جنس فولاد، حائز اهمیت است، که باعث شده مطالعات تجربی، عددی و میدانی در این زمینه، صورت گیرد. نیروی باد می‌تواند باعث کمناش و تغییر شکل و فروپاشی مخازن شود. در مخازن ذخیره استوانه‌ای، با افزایش نسبت ارتفاع به قطر در برابر نیروی باد آسیب‌پذیری افزایش پیدا خواهد کرد. برای مخازن ذخیره با هندسه مختلف و متفاوت، محاسبه اثر باد و تعیین ضریب فشار، الزامی است هرچند که الزامات شرایط طراحی برای اشکال خاص کمی پیچیده تر است. روش محاسبه نیروی باد استفاده از آزمایش تونل باد، یا مدل‌سازی عددی (CFD) با استفاده از نرم‌افزار است.



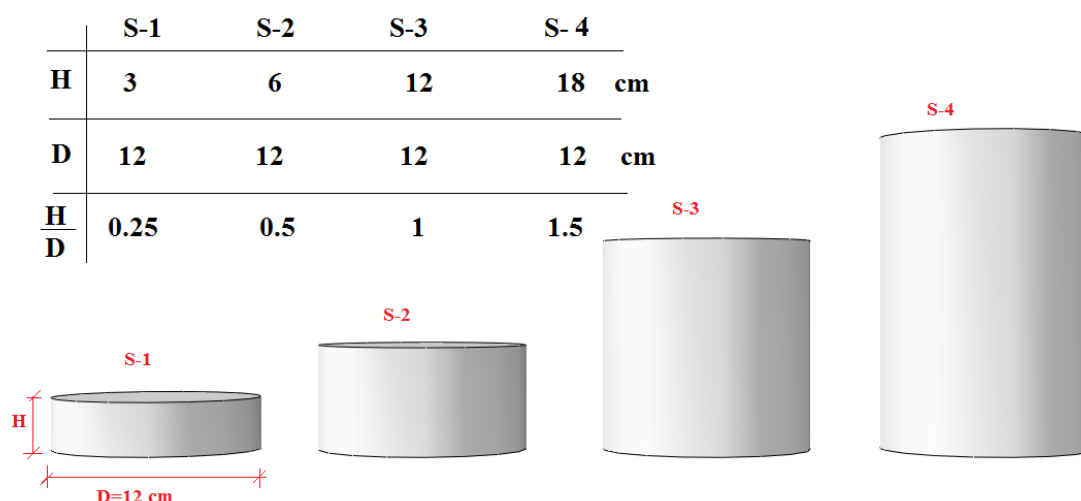
شکل (۱): نمونه‌ای از مخازن ذخیره استوانه‌ای فولادی

تاکنون در زمینه بررسی اثر باد و محاسبه ضرایب فشار بر مخازن، مطالعاتی انجام گرفته است. چنگ و همکاران [۱] در سال ۲۰۱۰ ضرایب فشار باد را بر روی گنبدی‌کروی با تمرکز بر تأثیر عدد رینولدز به دست آوردند، آن‌ها دریافتند که ضرایب فشار باد بر روی گنبدی‌کروی در برابر تغییرات سرعت تقریباً ثابت است. کی‌یو و همکاران [۲] در سال ۲۰۱۴ تأثیر تغییرات عدد رینولدز بر روی مخازن، با سقف‌های استوانه‌ای را بررسی کردند و ضرایب فشار بر روی سقف‌های با نسبت‌های شعاع به ارتفاع  $1/2$ ،  $1/3$ ،  $1/6$  را با استفاده از آزمایش تونل باد ارائه دادند. رنگ و همکاران [۳] در سال ۲۰۲۱ شبیه‌سازی عددی مخازن، مجتمع صنعت فرهنگی هاربین واندا را مورد بررسی قرار دادند. ارلاندو همکاران [۴] در سال ۲۰۰۱ مطالعات عددی و تجربی فراوانی بر روی تأثیر تداخلی باد القایی بین مخازن مجاور هم با استفاده از آزمایشگاه تونل باد دانشگاه فلورنس ایتالیا انجام داد. شکرزاده و سهرابی [۵] در سال ۲۰۱۶ ضرایب فشار باد را بر روی مخازن استوانه‌ای به دست آوردند و بار کمناشی را نیز تحت اثر باد، ارزیابی نمودند، آن‌ها تأثیر راه‌پله ماریچ بر رفتار کمناش مخازن استوانه‌ای را بررسی کردند. صادقی همکاران [۶] در سال ۲۰۱۷ به بررسی ضرایب فشار باد، حاکم بر مخازن گنبدی اسکالپ، پرداختند، و با توجه به محل قرارگیری شیار در گنبد اسکالپ، بحرانی‌ترین حالت قرارگیری به دست آمده و معادله حاکم بر ضرایب فشار باد را به دست آوردند. همچنین آن‌ها معادله ضرایب فشار باد بر گنبدی‌کروی با نسبت ارتفاع به دهانه مختلف را نیز ارائه دادند. مطالعات دیگری توسط صادقی و همکاران [۷] به بررسی تغییرات ضرایب فشار باد، با توجه به انعطاف‌پذیری گنبد و همچنین اثرات هم‌جواری گنبدها پرداختند. کیم و همکاران [۸] در سال ۲۰۱۹ به بررسی ضرایب فشار باد بر روی سازه‌های مربوط به گلخانه‌ها با هندسه‌ای خاص پرداختند و ضرایب فشار باد را با استفاده از آزمایش تونل باد ارائه دادند. در سال ۱۹۹۲ سان همکاران [۹] به بررسی و مطالعه میدانی بر روی برج‌های خنک‌کننده مجاور هم پرداختند. آن‌ها نیز توزیع فشار پیرامون دو برج خنک‌کننده، با فواصل مختلف را در تونل باد بررسی کردند. در سال ۲۰۱۹ هی‌یو و همکاران [۱۰] اثر بلند شدگی را بر روی مخازن ذخیره، تحت اثر بار باد، بررسی کردند و اثر کمناش بر پوسته مخازن را مطالعه کردند. در مطالعه دیگری

که چن و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۱۹، اثر فشار خارجی و فشار داخلی، ناشی از بار باد را مورد مطالعه قرار دادند. لی لینگ یائو و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۲۱ به مطالعه طراحی مدل هیدرو استاتیک و تجزیه و تحلیل حساسیت یک برج قوسی فولادی برای تعیین ضریب فشار، با استفاده از آزمایش تونل باد، پرداختند. آن‌ها انحراف زاویه‌ها و ضریب حساسیت وجهت تغییر مکان شدید مخزن، در جریان آشفته را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. لیو و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۱۱ جهت طراحی سازه‌ای خاص تحت اثر بار باد با مدل‌سازی این سازه در تونل باد ضرایب فشار باد بر روی این سازه را بدست آوردند و این مقادیر را با اندازه گیری محلی مقایسه کردند. در تحقیقی که فلیپو اوپرتینی و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۱۰ به بررسی شبیه‌سازی میدان سرعت باد به روش محاسباتی پرداختند آن‌ها پیشنهاد تکنیک‌های روش  $pod$ ,  $AR$  را برای شبیه‌سازی ارائه دادند. نیکلاس بلایز و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۱۱ انجام دادند، یک روش اندازه‌گیری برای سازه‌های انعطاف پذیر در تونل باد را ارائه کردند. فیو چی دوگلاس و همکاران [۱۶] در سال ۱۹۷۹، به بررسی ارتعاشات پیچشی سازه‌ها تحت اثر باد پرداختند. لی یان و همکاران [۱۷] در سال ۲۰۲۰ به بررسی ضریب باد بر برج‌های انتقال نیرو با مقاطع فولادی با دو جریان باد، پرداختند در این تحقیق ضرایب لیفت و دراگ مورد بررسی قرار گرفت.

## ۲- مشخصات هندسی مدل‌های مخازن ذخیره

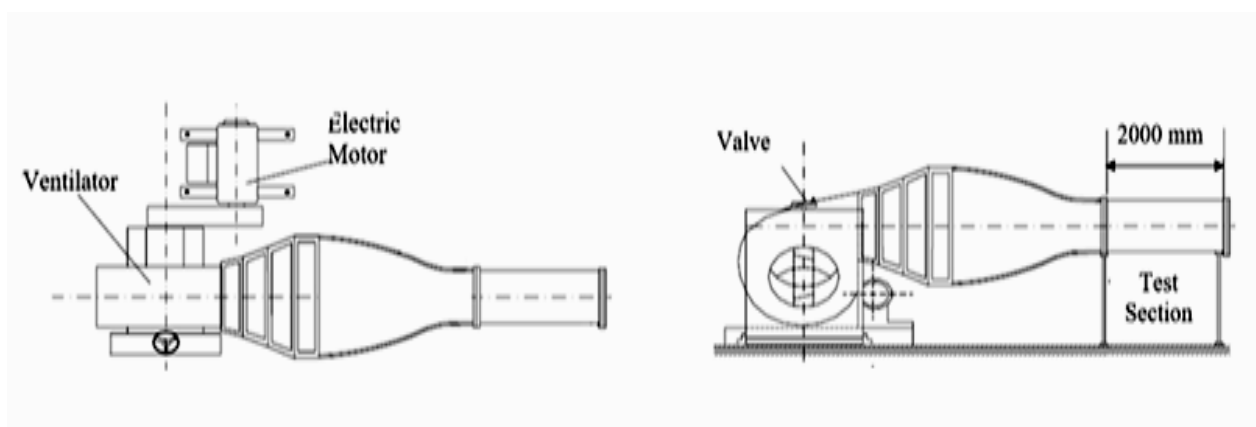
در این مقاله از دو روش مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار ANSYS و آزمایش تونل باد جهت شبیه‌سازی استفاده شده است. مدل‌های انتخابی بر اساس نسبت ارتفاع به قطر نمونه‌های واقعی برای چهار نمونه ساخته شد. که به ترتیب آن‌ها را Structure 1 تا Structure 4 تعریف و به اختصار  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ ,  $S_4$  نام‌گذاری شد. مدل‌ها مورد مطالعه مطابق شکل ۲ می‌باشد که در آن  $H$  بیانگر ارتفاع مخزن و  $D$  بیانگر قطر مخزن می‌باشد. نمونه اول  $S_1$  با ارتفاع ۳ سانتی‌متر و قطر ۱۲ سانتی‌متر به نسبت تناسب ارتفاع به قطر مخزن  $S_1=H/D=0.25$ ، نمونه دوم  $S_2$  با ارتفاع ۶ سانتی‌متر و قطر ۱۲ سانتی‌متر به نسبت ارتفاع به قطر مخزن  $S_2=H/D=0.5$ ، نمونه سوم که  $S_3$  نام‌گذاری شد با ارتفاع ۱۲ سانتی‌متر و قطر ۱۲ سانتی‌متر و به نسبت ارتفاع به قطر مخزن  $S_3=H/D=1$  و نمونه چهارم که  $S_4$  نام‌گذاری شد با ارتفاع ۱۸ سانتی‌متر و قطر ۱۲ سانتی‌متر به نسبت ارتفاع به قطر نمونه واقعی برابر  $S_4=H/D=1.5$  جهت استفاده و آزمایش در تونل باد ساخته شد.



شکل ۲: مدل‌های مخازن ذخیره استوانه‌ای استفاده شده در آزمایش تونل باد و مدل‌سازی عددی

برای اندازه‌گیری فشار، ۲۴ سوراخ با قطر ۲ میلی‌متر در فواصل مساوی از همدیگر، در محیط مدل، و در ارتفاع ایجاد شده است. لوله‌های فشار با قطر داخلی ۱ میلی‌متر و قطر خارجی ۲ میلی‌متر، از یک سو به این سوراخ‌ها متصل شده، از سوی دیگر به انتقال‌دهنده فشار در

ارتباط با تطبیق‌دهنده سیگنال، متصل گردیدند. تمام اندازه‌گیری‌ها در سیستم ذخیره‌سازی داده در کامپیوتر ذخیره می‌شوند. هر یک از مقادیر فشار بر اساس ثبت نقطه موردنظر، در هر ارتفاع در بازه زمانی ۲۰ ثانیه توسط نرم‌افزار و کاربر ثبت می‌شود. با توجه به محدودیت تعداد سنسورها مدل‌ها بر روی یک صفحه چرخان قرار گرفته و در هر حالت نمونه‌ها در زاویه‌های مختلف، چرخانده می‌شود. تونل باد مورد استفاده، از نوع مدارباز دمشی جریان آزاد، دانشگاه صنعتی شاهرود، با طول تقریبی ۱۸ متر و ابعاد اتاق آزمایش، برابر با عرض ۸۰ سانتیمتر، ارتفاع ۸۰ سانتیمتر و طول ۲۰۰ سانتیمتر بوده که مجهز به یک فن سانتریفوژ و موتور سه فاز ۴۵ کیلووات است. حداکثر سرعت این تونل باد برابر با ۳۵ متر بر ثانیه بوده که با استفاده از یک کنترل‌کننده سرعت جریان باد قابل تنظیم است. تصویری شماتیک از تونل باد، اتاق آزمایش، فن سانتریفوژ و موتور سه فاز دانشگاه صنعتی شاهرود، در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳: تصویر شماتیک تونل باد و اتاق آزمایش دانشگاه صنعتی شاهرود.





شکل ۴: محل نصب سنسورها و نقاط اندازه‌گیری ضریب فشار باد در آزمایش تونل باد در نمونه‌های مختلف

جهت ثبت دقیق زاویه قرارگیری محل سنسورها نسبت به جهت باد، نمونه‌ها بر روی وسیله زاویه ساز (نقاله مندرج تونل باد) که توسط محققین طراحی و ساخته شد و در شکل ۵ قابل مشاهده است قرار می‌گیرد. پس از قرارگیری نمونه داخل اتاق آزمون در سرعت‌های مختلف بر حسب (m/s) اعمال شد. پس از اینکه مقدار سرعت نمایش داده شده روی سرعت‌سنج، با سرعت اعمال شده دستگاه مطابق شد، فشار بر روی تمام نقاط که سنسورها قرار دارند ثبت می‌شود.



شکل ۵: زاویه ساز (نقاله مندرج) ساخته شده که مدل در تونل باد بر روی این صفحه نصب می‌شود

مدل‌های مورد آزمایش مقیاسی از نمونه‌های واقعی موجود در مخازن ذخیره استوانه‌ای شرکت ملی پخش ایران - مشهد، استخراج و مدل‌سازی بر اساس تناسب سازی نمونه‌های واقعی، با ارتفاع ۶ و ۹ متر و قطرهای ۲۴، ۱۲ و ۹ متر ایجاد شده است. که ابعاد این مدل‌ها در شکل ۲ مشخص شده است. فضای اطراف مخازن فاقد هم‌جواری با یک مرز ورود سرعت و یک مرز خروجی فشار، شبیه‌سازی می‌شود. اثرات سطح تونل بر جریان باد نادیده گرفته شده و پروفیل سرعت باد به‌طور یکنواخت در نظر گرفته شده است. همچنین از تغییرات لحظه‌ای سرعت باد نیز صرف نظر شده است.

### ۳- استفاده از روابط تئوری

بر مبنای محاسبات عددی و استفاده از مبنای تئوری روش تانسورهای تنش ناشی از سرعت‌های باد معادلات حاکم، برای یافتن ضریب فشار و تانسورهای تنش ناشی از سرعت باد، روابط به صورت زیر ساده شده است.

$$\nabla \cdot V = 0 \quad (1)$$

$$(V \cdot \nabla)V = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nabla \cdot \left( \frac{\sigma}{\rho} \right) - \beta(T - T_a)g + F \quad (2)$$

$$\rho(V \cdot \nabla)T = -\nabla \cdot [(\Gamma + \Gamma_t)\nabla T] + Q \quad (3)$$

در روابط بالا  $V$  نمایشگر بردار سرعت،  $P$  انرژی سینتیک تولید شده به وسیله توربولانس،  $\rho$  چگالی هوا،  $\beta$  ضریب انبساط حجمی،  $g$

شتاب جاذبه،  $F$  دربرگیرنده افت فشار سیال است.  $\sigma$  نیز نشانگر تانسور تنش است که بدین صورت بیان می‌گردد:

$$\sigma_{ij} = (\mu + \mu_t) S_{ij} \quad (4)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

$$\Gamma = \frac{\mu}{Pr} \quad (6)$$

$\mu$  و  $\mu_t$  به ترتیب ویسکوزیته مولکولی و توربولانس هستند. جریان اطراف مدل، یک جریان مغشوش است و با استفاده از مدل  $k-\varepsilon$  استاندارد معادلات به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$\Gamma_t = \frac{\mu}{Pr_t} \quad (7)$$

$$(V \cdot \nabla)k = \nabla \cdot [(v + v_t / \sigma_k) \nabla k] + P + G - \varepsilon \quad (8)$$

$$(V \cdot \nabla)\varepsilon = \nabla \cdot [(v + v_t / \sigma_\varepsilon) \nabla \varepsilon] + c_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (P + G) - c_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (9)$$

$$v_t = \frac{1}{\rho} \mu_t = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (10)$$

که  $k$  انرژی سینتیک  $v$  و  $v_t$  ویسکوزیته مولکولی و توربولانس،  $\varepsilon$  نرخ پراکندگی و  $G$  انرژی سینتیک تولید شده به وسیله نیروی غوطه‌وری هستند. ضرایب ثابت، نیز به شرح زیر است:

$$\sigma_\varepsilon = 1.3, \sigma_k = 1, c_\mu = 0.09, c_{2\varepsilon} = 1.92, c_{1\varepsilon} = 1.44$$

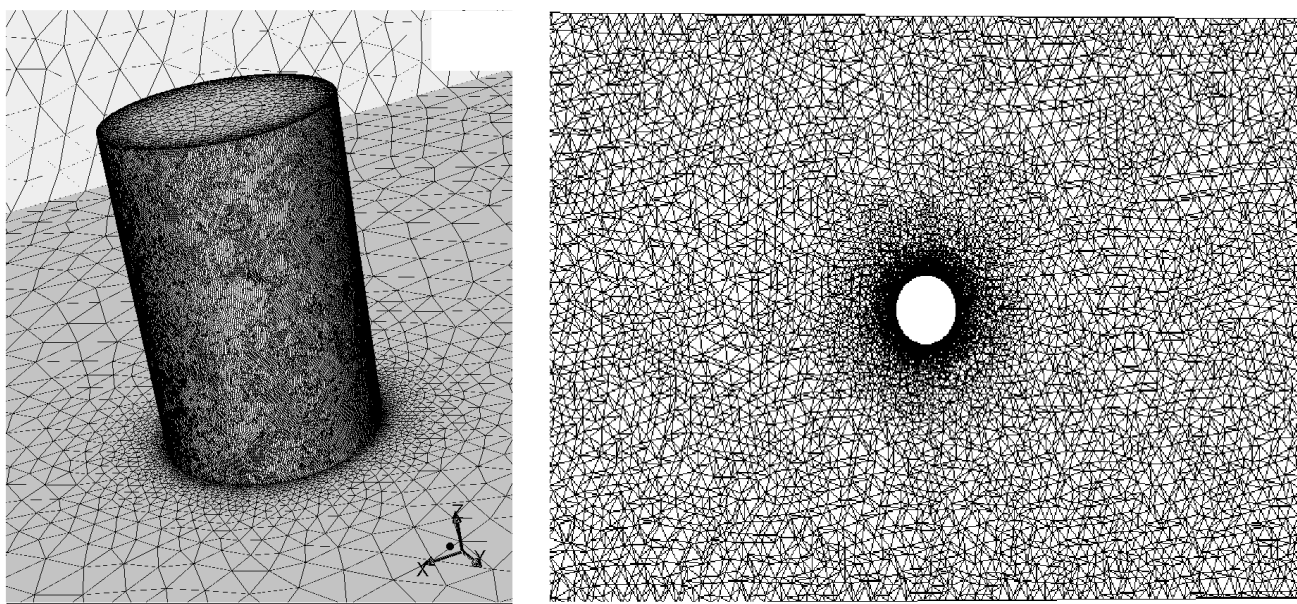
ضریب فشار با استفاده از معادله ۱۱، به دست می‌آید.

$$C_P(h, \theta) = \frac{P(h, \theta) - P_\infty}{1/2[\rho V(h)^2]} \quad (11)$$

که  $P_\infty$  فشار استاتیک جریان آزاد،  $P(h, \theta)$  فشار محلی کلی میانگین بر روی سطح مدل در مختصات  $(h, \theta)$ ،  $\theta$  زاویه قسمت مورد آزمایش،  $V(h)$  سرعت میانگین جریان آزاد در ارتفاع  $h$  و  $h$  ارتفاع قسمت مورد آزمایش است.

#### ۴- نتایج به دست آمده از روش عددی و آزمایش تونل باد

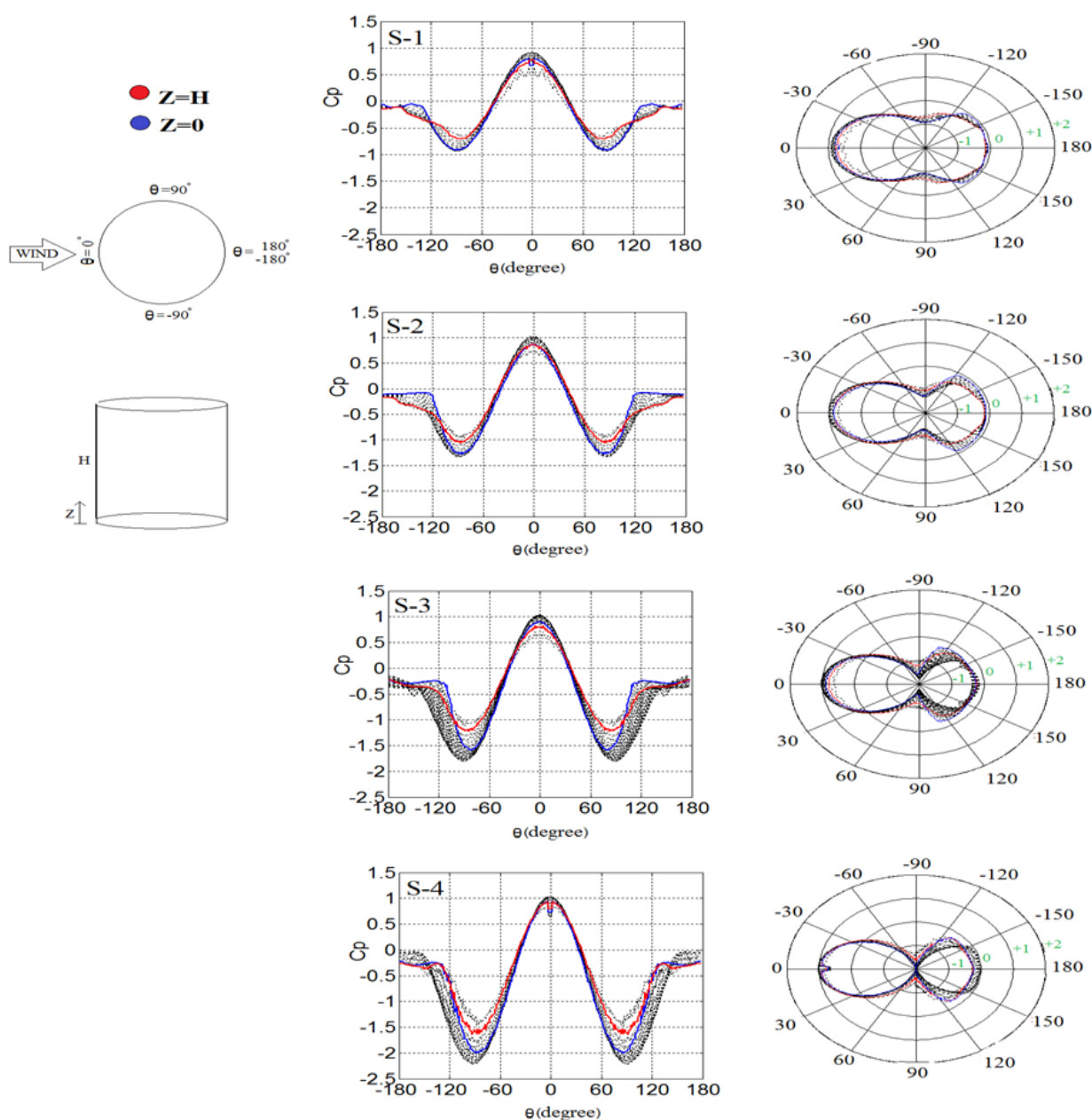
مدل سازی عددی در نرم افزار ANSYS، انجام می‌شود نمونه‌ای از مش بندی مدل در شکل ۶، مشاهده می‌شود. مش‌ها در اطراف مدل با استفاده از قابلیت نرم افزار ریزتر و با دور شدن از مدل ابعاد مش افزایش داده می‌شود.



شکل ۶: مش بندی مخزن و تونل باد در نرم افزار ANSYS

پس از مدل سازی در نرم افزار ANSYS مقادیر فشار در تمامی نقاط مخزن به صورت فایل عددی خروجی گرفته می شود و با استفاده از معادله (۱۱)، مقادیر فشار به ضریب فشار تبدیل می شوند و مقادیر ضرایب فشار در دو مختصات قطبی و مختصات دکارتی با استفاده از برنامه MATLAB رسم خواهد شد. در شکل ۷، توزیع فشار به دست آمده از مدل سازی عددی نشان داده شده است، این ضرایب در محیط و ترازهای مختلف ارتفاعی مخزن رسم شده است، مشاهده می شود در زاویه رو به باد  $\theta = 0^\circ$  بیشینه ضرایب فشار مثبت به دست می آید که این مقدار برابر ۱+ است، در  $\theta = 90^\circ$  ضریب فشار منفی (مکش) است که با افزایش ارتفاع مخزن این مقدار افزایش می یابد.



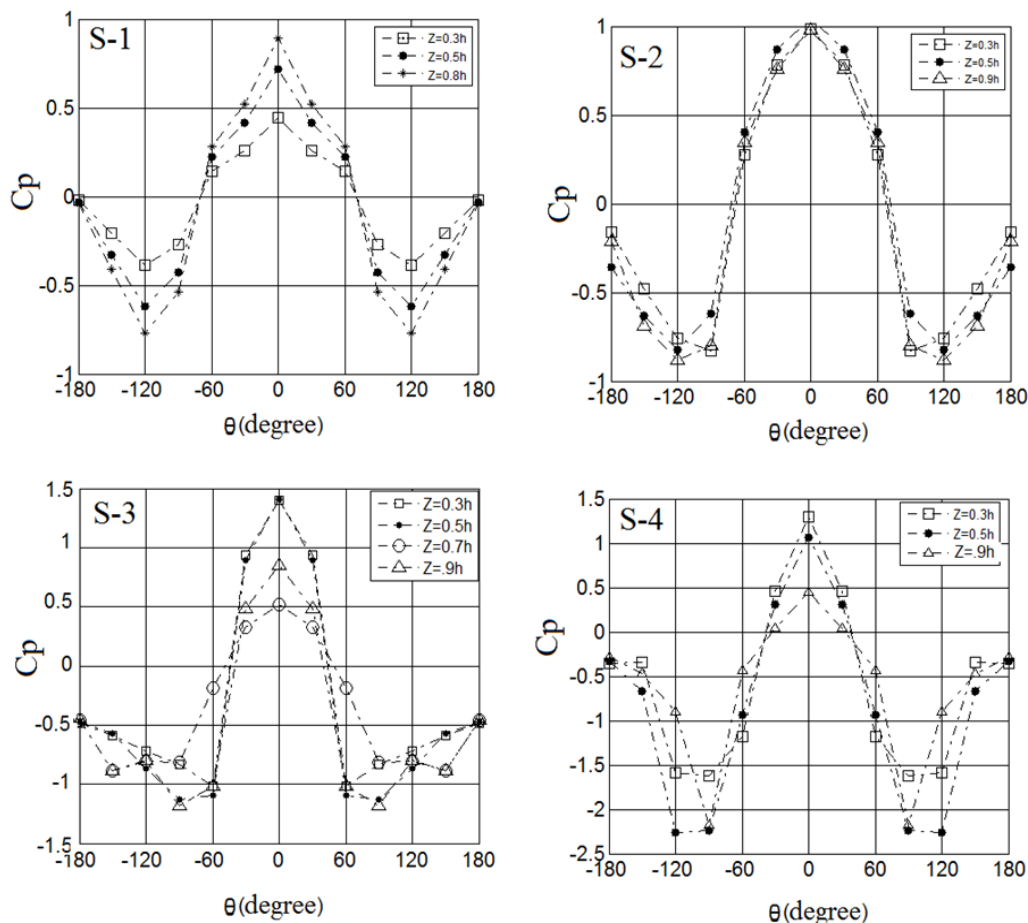


شکل ۸: نمودار ضرایب فشار باد حاصل از مدل سازی عددی رسم شده در مختصات قطبی و دکارتی

مقادیری که بارنگ قرمز نشان داده شده است مربوط به ضریب فشار باد در بالاترین ارتفاع مخزن ( $Z=H$ ) و مقادیری که بارنگ آبی نشان داده شده است مربوط به پایین ترین ارتفاع مخزن ( $Z=0$ ) می باشد، مقادیر ضریب فشار که بارنگ مشکی نشان داده شده است مربوط به ضریب فشار در تمامی ترازهای ارتفاعی است. در روش تجربی نیز با استفاده از مدل ساخته شده و استفاده از تونل باد و تجهیزات جانبی آن، توزیع فشار پیرامون مخازن ذخیره استوانه ای محاسبه گردید. منحنی توزیع فشار بر حسب زاویه در سرعت های مختلف، مطابق شکل ۸ رسم شده است.

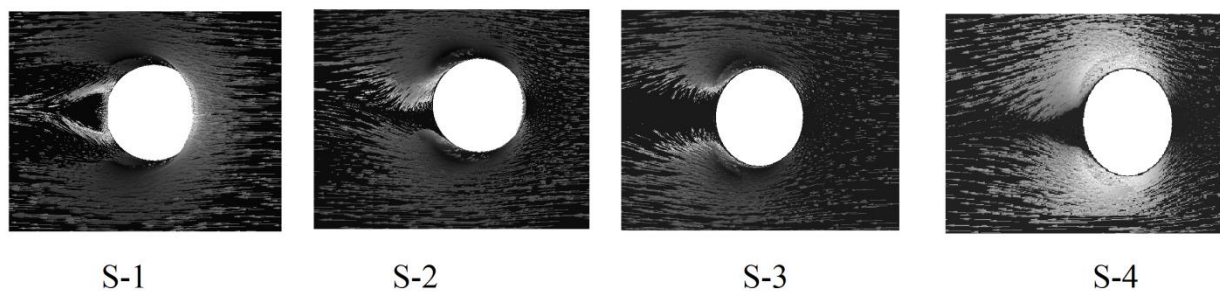
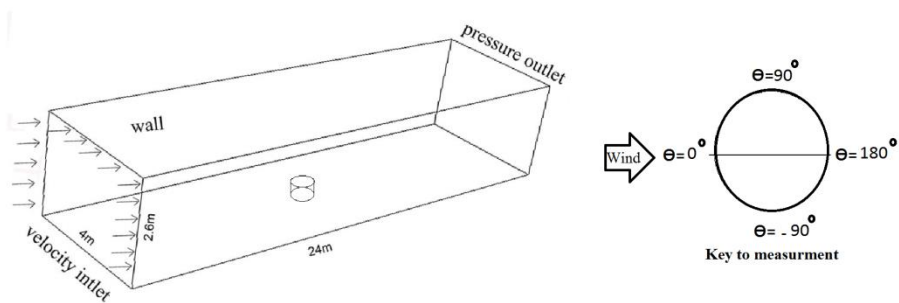
نتایج حاصل از آزمایش تونل باد نشان می دهد که بیشترین ضریب فشار مثبت در زاویه راستای جهت باد  $\theta = 0^\circ$  به دست می آید. با افزایش ارتفاع، بیشترین فشار منفی (-) در زاویه  $\theta = 90^\circ$  به دست می آید و با کاهش ارتفاع، فشار (-) بین زاویه  $\theta = 60^\circ$  تا  $\theta = 80^\circ$  به

وجود می‌آید. با مقایسه نتایج ضرایب فشار باد مشاهده شد که: با افزایش نسبت ارتفاع به دهانه، بیشینه مقدار ضریب فشار باد منفی (مکش) افزایش می‌یابد. ماکزیمم فشار منفی در  $\theta = 90^0$ ، برابر ۲٫۲- و بیشینه فشار مثبت در زاویه  $\theta = 0^0$  مقابل باد، برابر ۱ به دست آمده است.

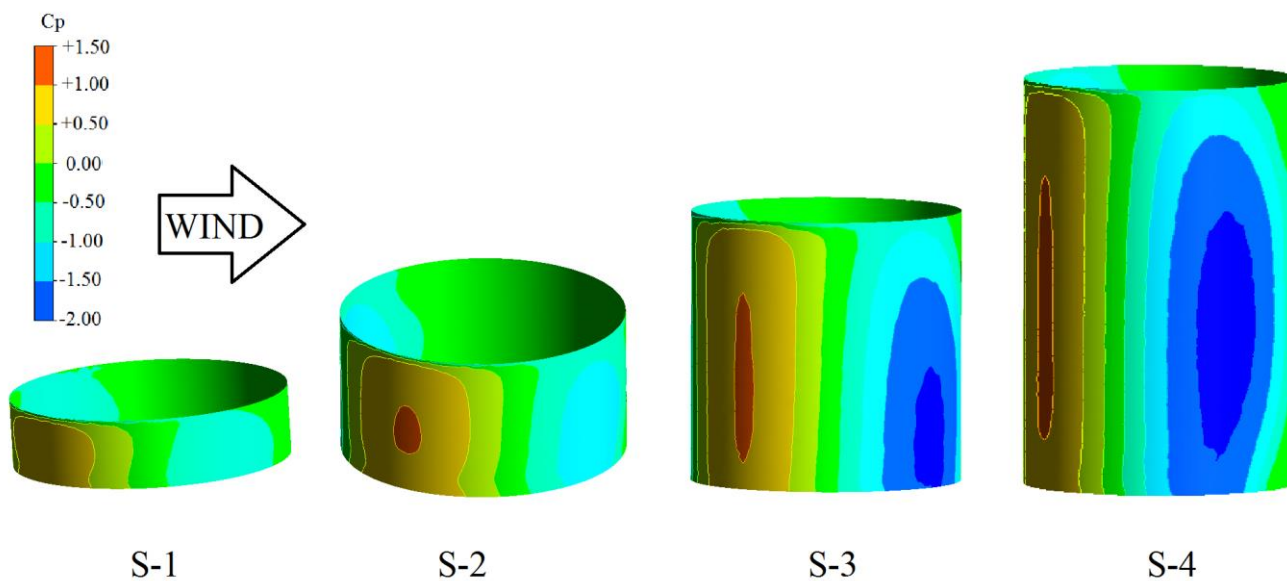


شکل ۹: نمودارهای ضریب فشار بر حسب  $\theta$  به دست آمده از آزمایش تونل باد

در شکل ۹ بردار خطوط جریان در مجاورت سازه تحت اعمال باد، با سرعت ۲۰ متر بر ثانیه نشان داده شده است. همچنین در شکل ۱۱، کانتور ضرایب فشار باد بر روی مخازن نشان داده شده است.

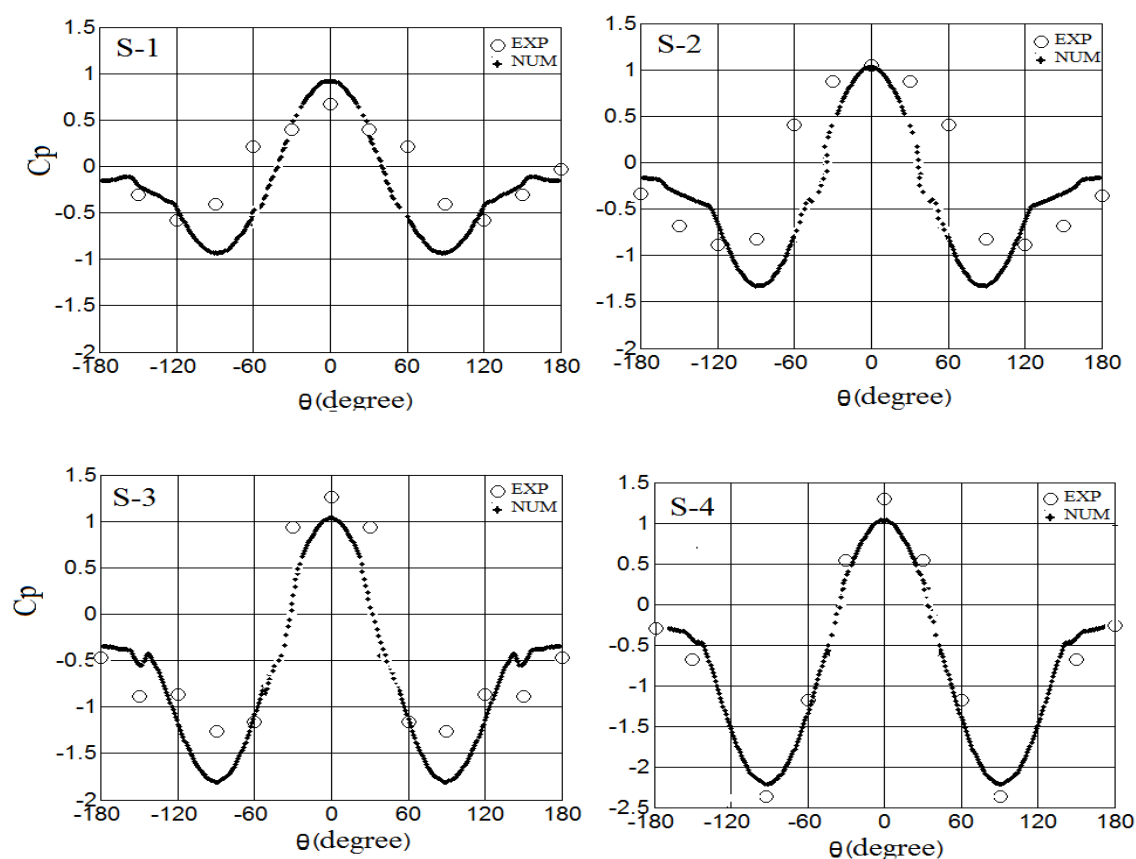


شکل ۱۰: بردارهای خطوط جریان در مجاورت سازه حاصل از مدل سازی عددی



شکل ۱۱: کانتور ضرایب فشار باد بر روی مخازن حاصل از مدل سازی عددی

در شکل ۱۲، نمودار ضرایب فشار باد حاصل از مدل سازی عددی و نتایج حاصل از آزمایش تونل باد رسم شده است.



شکل ۱۲: مقایسه مقادیر ضرایب فشار حاصل از مدل سازی عددی و آزمایش تونل باد

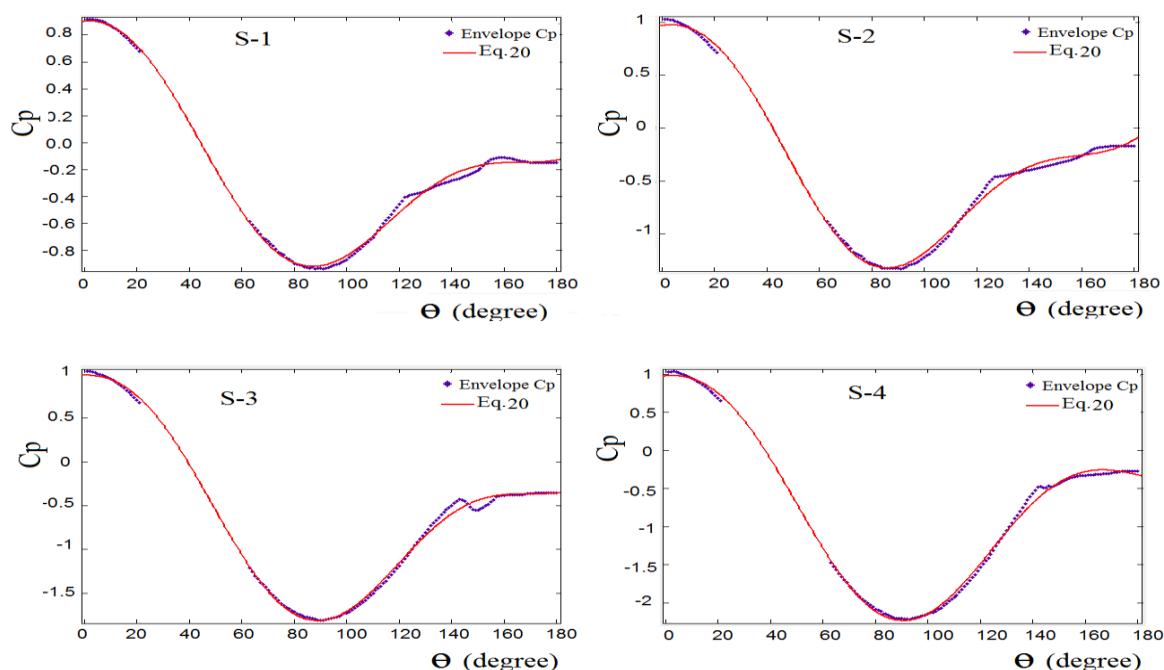
با استفاده از میانگین روابط عددی و نتایج نمودارهای آزمایشگاهی در زوایای مختلف، با این فرض که قرارگیری نمونه در راستای جهت باد در زاویه  $0^\circ$  و  $90^\circ$  جهت پهلوها و  $180^\circ$  جهت پشت به جریان باد، معادله حاکم بر ضریب فشار باد، به صورت معادله ۱۱، به دست می آید. جدول ۱ ضرایب معادله ۱۱ را در به ازای مدل های مختلف نشان می دهد. مقادیر  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $c_1$ ,  $c_2$  ضرایب ثابتی هستند که برای هر مدل ارائه شده است.

$$C_p(\theta) = a_1 \sin(b_1 \theta + c_1) + a_2 \sin(b_2 \theta + c_2) \quad (11)$$

جدول ۱: ضرایب ثابت معادله حاکم بر ضریب فشار باد در معادله ۱

	$a_1$	$a_2$	$b_1$	$b_2$	$c_1$	$c_2$
S1	0.75	0.33	0.023	0.050	2.10	0.87
S2	1.08	0.38	0.023	0.056	2.28	0.39
S3	1.41	0.52	0.02	0.052	2.57	0.45
S4	1.59	0.73	0.018	0.048	2.77	0.57

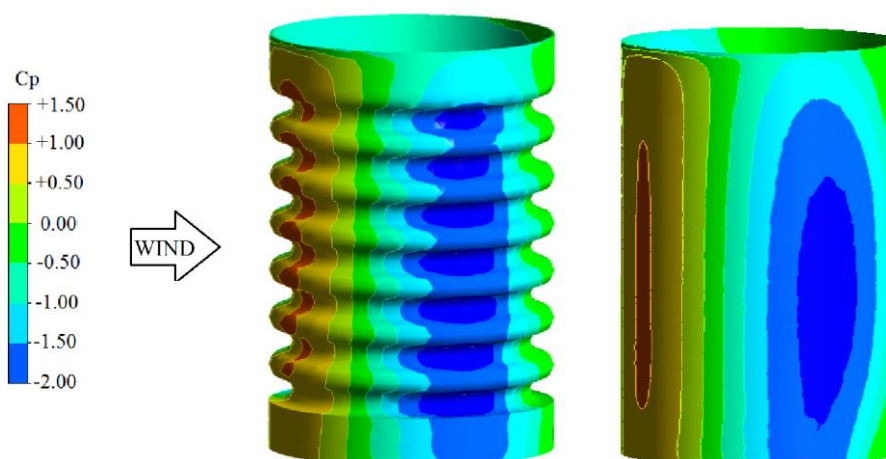
شکل ۱۳ مقدار همپوشانی نتایج حاصل از معادله ۱۱، که با نتایج حاصل از ضریب فشار آزمایش تونل باد و مدل سازی عددی را نشان می دهد.



شکل ۱۳: مقایسه معادله حاکم بر ضرایب فشار باد و پوش منحنی ضرایب فشار باد

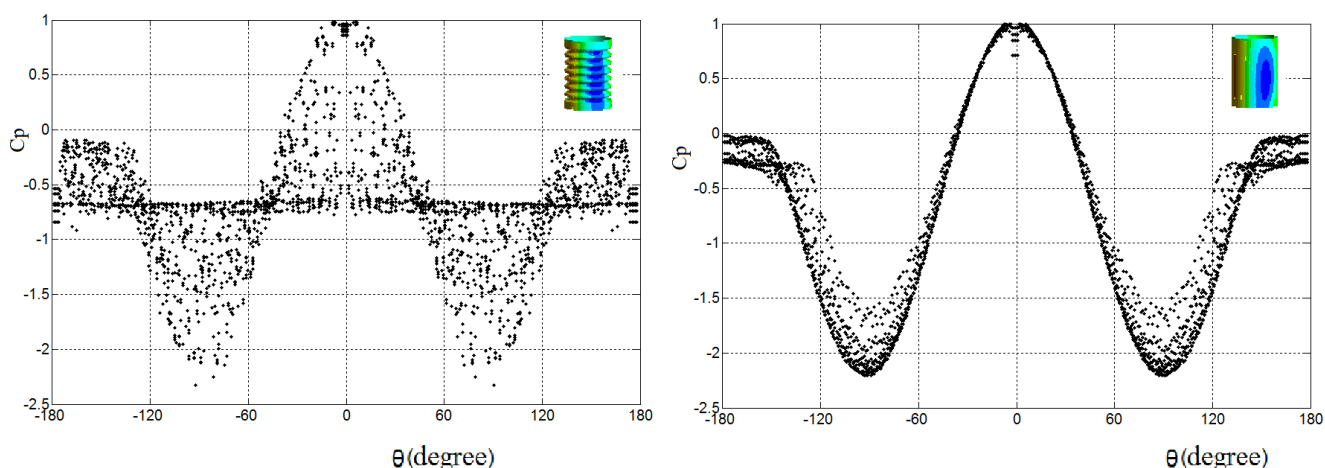
#### ۵- مخازن ذخیره ساخته شده با ورق موجدار

در ادامه به بررسی ضرایب فشار بر روی مخازن ذخیره ساخته شده با ورق موجدار پرداخته می شود، مدل S-4 با قطر ۱۲ و ارتفاع ۱۸ به صورت ورق موجدار ساخته شده و در تونل باد قرار گرفته و ضرایب فشار باد بر روی این مدل به دست می آید، همچنین جهت تکمیل نتایج این مدل به صورت عددی نیز مدل سازی می شود.

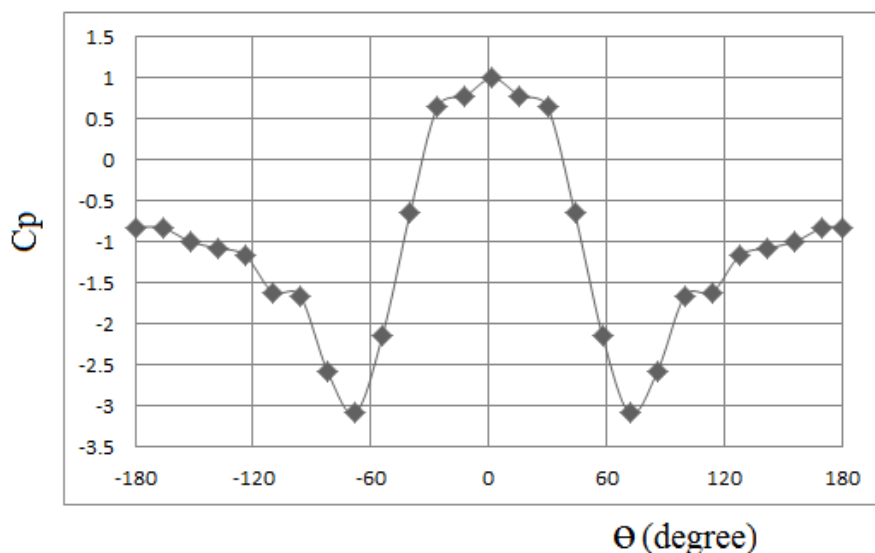


شکل ۱۴: کانتور ضرایب فشار باد بر روی مخزن ذخیره ساخته شده با ورق ساده و ورق موجدار

در شکل ۱۴، کانتور ضرایب فشار باد در مخزن ذخیره ساخته شده با ورق فولادی ساده و ورق موجدار نشان داده شده است، همچنین نمودار ضرایب فشار باد بر روی مخزن ذخیره ساخته شده با ورق ساده و ورق موجدار در شکل ۱۵، مشاهده می شود.



شکل ۱۵: نمودار ضرایب فشار باد بر روی مخزن ذخیره ساخته شده با ورق ساده و ورق موجدار



شکل ۱۶: نمودار ضرایب فشار باد بر روی مخزن ذخیره ساخته شده ورق موجدار حاصل از آزمایش تونل باد

در شکل ۱۶، نمودار ضرایب فشار باد بر روی مخزن ذخیره ساخته شده ورق موجدار حاصل از آزمایش تونل باد نشان داده شده است. استفاده از ورق موجدار می تواند باعث بهبود رفتار کمانشی مخزن شود.



## ۶- بحث و نتیجه گیری

در این مقاله، ضرایب فشار باد بر روی مخازن ذخیره استوانه‌ای با نسبت ارتفاع به قطر ۰٫۲۵ و ۰٫۵ و ۱ و ۱٫۵ با استفاده از آزمایش تونل باد و مدل‌سازی عددی، بر مبنای روش دینامیک سیالات محاسباتی با استفاده از نرم‌افزار ANSYS به دست آمده است. با مقایسه نتایج ضرایب فشار باد، مشاهده می‌شود با افزایش نسبت ارتفاع به قطر مخزن، بیشینه مقدار ضریب فشار باد منفی (مکش)، افزایش می‌یابد. ماکزیمم فشار منفی در  $\theta=90^\circ$ ، برابر ۲٫۲- و بیشینه فشار مثبت در  $\theta=0^\circ$  (مقابل باد) برابر ۱ به دست آمده است. انطباق نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی و نتایج آزمایش تونل باد نشان می‌دهد که مدل‌سازی عددی یک روش جایگزین در بررسی سازه‌ها تحت اثر بار باد می‌تواند باشد. در مقایسه ضرایب فشار باد بر روی مخزن با ورق ساده و ورق موج‌دار که در شکل ۱۵، رسم شده است نشان می‌دهد که پراکندگی ضرایب فشار باد در نمونه موج‌دار نسبت به نمونه ساده در ارتفاع مخزن بیشتر است. ضریب فشار در محدوده زاویه  $\theta=130^\circ$  تا  $\theta=180^\circ$  مقدار ثابتی را نشان می‌دهد. معادله ۱۱، ضرایب فشار باد حاکم بر روی مخازن را نشان می‌دهد که می‌توان برای طراحی، ضرایب فشار را بر روی محیط مخزن با استفاده از این معادله به دست آورد.

## ۷- مراجع و منابع

- [1]-Cheng, C. M., & Fu, C. L. (2010). 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), 328-344.
- [2]- Qiu Y, Sun Y, Wu Y, Tamura Y, Modelling the mean wind loads on cylindrical roofs with consideration of the Reynolds number effect in uniform flow with low turbulence, *Wind Engineering and Industrial*
- [3]-Rong, B., Yin, S., Wang, Q., Yang, Y., Qiu, J., Lin, C., & Zhang, R. (2021). Simulation and Analysis of Wind Pressure Coefficient of Landslide-Type Long-Span Roof Structure. *Advances in Civil Engineering*, 2021.
- [4]- Orlando, M. "Wind Induced Interference Effects on Two Adjacent Cooling", *J. Engineering Structures*, Vol. 23, pp. 979-992, 2001.
- [5]-Shokrzadeh A R and Sohrabi M R, Strengthening effect of spiral stairway on the buckling behavior metal tanks under wind and vacuum pressures, *Thin-Walled Structures*, 106(2016) 437-447.
- [6]- Sadegh, H , Heristchian, M. Aziminejad, A, & Nooshin, H. (2017). Wind effect on grooved and scallop domes. *Engineering Structures*, 148, 436-450
- [7]- 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.
- [8] 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. *Bio systems Engineering*, 188, 114-135.
- [9]-Sun, T.F., Gu, Z.F., Zhou, L.M., Li, P.H., and Cai, G.L. "Full-scale measurement and wind tunnel testing of Wind loading On two neighboring cooling towers", *Int. J. wind engineering and industrial aerodynamics*, Vol. 43, pp. 2213-2224, 1992.
- [10]- 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.
- [11] - 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.
- [12]- LI, Ling Yao; HE, Shi Chang; HE, Xu Hui. Aeroelastic model design and sensitivity analysis of a complicated steel truss arch tower to skew incident winds based on wind tunnel tests. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2021, 214:104646.
- [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 and Structures*, 14(4), 301-319.
- [14]- UBERTINI, F.; GIULIANO, F. Computer simulation of stochastic wind velocity fields for structural response analysis: comparisons and applications. *Adv Civ Eng* 2010.

- [15]- DENOËL, Vincent; BLAISE, Nicolas. Optimal processing of wind tunnel measurements in view of stochastic structural design of large flexible structures. Intech open, 2011.
- [16]- FOUTCH, Douglas A.; SAFAK, E. Torsional vibration of wind-excited structures. In: Engineering Mechanics. ASCE, 1979. p. 255-258.
- [17]- Li, Yan, Zhengliang Li, Eric Savory, Yongli Zhong, and Zhitao Yan. "Wind tunnel measurement of overall and sectional drag coefficients for a super high-rise steel tube transmission tower." Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 206 (2020): 104363.