

محاسبه ضریب فشار بار باد بر روی گنبد به روش شبیه‌سازی و مقایسه آن با

مقادیر آیین‌نامه‌ها و آزمایش تونل باد

سینا صالحی نژاد

دانشجوی کارشناسی ارشد عمران سازه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمان، کرمان، ایران

sinasalehinejad@yahoo.com

عیسی سلاجقه^۱

استاد بخش عمران، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

eyasasala@uk.ac.ir

سینا صالحی نژاد، عیسی سلاجقه

چکیده

سازه‌های فضاکار گنبدی شکل امروزه به علت ویژگی‌های سازه‌ای و معماری که دارند بسیار مورد توجه طراحان دنیا قرار گرفته است و از این نوع سازه به منظور پوشش دهانه‌های وسیع از جمله استادیوم‌ها، تالارها، فروشگاه‌ها و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از ویژگی‌های اصلی این سازه‌ها وزن کم آن‌ها به دلیل بار مرده بسیار کم است. این ویژگی باعث شده تا این نوع سازه‌ها در مقابل بار باد آسیب‌پذیر شوند. بنابراین طراحی سازه‌های فضاکار در مقابل بار باد از اهمیت بسیار بالایی برخوردار می‌باشد. برای محاسبه بار باد بر روی تمامی سازه‌ها یکی از مهم‌ترین ضرایب در تمامی روابط ضریب فشار باد (C_p) است. آیین‌نامه‌ها این مقادیر را به صورت غیر دقیق و کلی در خود دارند از طرفی آزمایشات تونل باد نیز این مقادیر را با دقت بالا ارائه می‌کنند که به دلیل در دسترس نبودن و هزینه بالا، مهندسین به راحتی نمی‌توانند به این مقادیر دست پیدا کنند. اما در کنار این دو روش، دینامیک سیالات محاسباتی (*Computational Fluid Dynamics*) یا به اختصار (*CFD*) می‌تواند برای محاسبه تاثیر بار باد بر سازه و محاسبه ضرایب فشار استفاده گردد و نتایج قابل قبولی ارائه کند. در این تحقیق به مقایسه ضریب فشار خارجی در آیین‌نامه‌های اروپا، امریکا و کانادا، با نتایج آزمایش تونل باد و شبیه‌سازی عددی با استفاده از روش *CFD* بر روی سازه‌های فضاکار گنبد پرداخته.

واژه‌های کلیدی: سازه‌های فضاکار، *CFD*، گنبد، دینامیک سیالات محاسباتی، بار باد

نظر مصرف مصالح ساختاری، آنها را به ساختارهای بسیار اقتصادی تبدیل می‌کند. گنبد نیز دارای فرمی ساده و جذاب است ضمن آنکه این فرم از سازه در طبیعت نیز مشاهده می‌شود و یکی از قدیمی‌ترین اشکال ساختاری انسان است. در تئوری تقریباً هیچ محدودیتی برای اندازه گنبد وجود ندارد که بتوان آن را ساخت و این یک چالش همیشگی برای مهندسان است، با این حال، در عمل محدودیت‌های اندازه گنبد با توسعه مصالح موجود و تکنیک‌های ساخت و ساز همراه است (Wilkinson 1991).

ساختار کروی گنبدی نه تنها ظاهر زیبایی را نشان می‌دهد بلکه یکی از کارآمدترین اتمسفرهای داخلی را برای اقامت انسان فراهم می‌کند زیرا هوا و انرژی مجاز است بدون انسداد یا گرفتگی به راحتی در حال گردش باشد.

در سازه‌های فضا کار، نسبت بار باد و برف به بار مرده به طور قابل توجهی بیشتر از ساختمان‌های معمولی است و در صورت عدم وجود بار باد و برف این سازه‌ها به مراتب ظرفیت باربری بیشتری خواهند داشت (Bangash 2003).

در این نام‌های مختلف تغییرات قابل توجهی در ضرایب فشار باد برای سازه‌های منحنی فضا کار سه بعدی ارائه شده است و علت اصلی این واقعیت وابستگی شدید این ضرایب به مقدار عدد رینولدز، زبری سطح، نمایه سرعت باد و آشفتگی آن است.

ضرایب ارائه شده در این نام‌ها عموماً غیر دقیق و کلی می‌باشند و فقط به منظور طراحی اولیه می‌توان مورد استفاده قرار گیرند و نه به صورت نهایی خصوصاً برای طراحی سازه‌های فضا کار مهم و ان‌هم با پوشش‌های عظیم و شکل‌های عجیب و غریب. به همین دلیل مهندسان در طراحی این نوع سازه‌ها از نتایج آزمایشات تونل باد برای بدست آوردن توزیع دقیق تر فشار بر روی آن‌ها استفاده

معماران و مهندسان همیشه به دنبال راهکارهای جدیدی هستند تا بتوانند به بهترین شکل ممکن سازه‌هایی با فضاهای وسیع را طراحی و اجرا نمایند این موضوع با صنعتی شدن و توسعه جهان مدرن و تقاضا برای ایجاد سازه‌هایی با دهانه‌های بلند و کارآمد روز به روز افزایش می‌یابد. سازه‌های فضا کار یک ابزار ارزشمند برای معماران و مهندسانی است که در تلاش برای ایجاد یک چنین فرم‌های جدیدی از سازه‌ها می‌باشند (Britvec 1995).

این سازه‌ها که با نام سازه‌های فضایی یا فضا کار خوانده می‌شوند، بعدها با هندسه‌های مختلف نیز در مکان‌های مختلف با اهداف مختلف به کار گرفته شدند که بیشترین کاربرد آنها در پوشش محوطه‌های بزرگ، سالن‌های ورزشی، آمفی تئاترها و سالن‌های تجمع بوده که علت آن رفتار خوب این سیستم‌ها و اقتصادی بودن آنها است. کار و تلاش مهندسان و محققین در زمینه سازه‌های فضا کار، به صورت بناهای زیبا در کشورهای مختلف نمود پیدا کرده که هر کدام از این سازه‌ها از قابلیت‌های به خصوص برخوردار می‌باشند. سازه فضا کار، یک سیستم خرابای سه بعدی است که دهانه‌های آن در دو جهت گسترش یافته‌اند و اعضای آن فقط تحت تاثیر کشش و فشار قرار دارند (گلابچی ۱۳۹۱).

یکی از اشکال متداول سازه‌های فضایی فرم گنبدی آن است. گنبد یکی از کارآمدترین اشکال برای پوشش دادن فضاهای وسیع است. زیرا میزان زیادی از فضا را با حداقل مساحت سطح پوشش می‌دهند آنها همچنین ساختارهایی مناسب برای پوشش مکان‌های نیازمند به حداقل تداخل برای تکیه گاه‌های داخلی را لازم هستند. این مشخصات گنبد‌ها هنگام مقایسه با انواع ساختارهای کلاسیک از

CFD یا دینامیک محاسباتی سیالات یک روش عددی برای حل معادلات ناویر-استوکس مربوط به جریان سیال است. در این روش با استفاده از الگوریتم های عددی با تبدیل معادلات دیفرانسیل حاکم بر سیالات به معادلات جبری امکان حل عددی این معادلات فراهم می شود. با تقسیم ناحیه مورد نظر برای تحلیل به المان های کوچکتر و اعمال شرایط مرزی برای گروه های مرزی با اعمال تقریب هایی یک دستگاه معادله جبری بدست می آید که با حل آن میدان سرعت، فشار و دما در ناحیه مورد نظر بدست می آید (Wilcox 1994, Versteeg & Malalasekera 2007).

الگوریتم های عددی شامل مراحل زیر می باشد:

۱. انتگرال گیری از معادلات حاکم بر جریان سیال روی تمام حجم های کنترل مربوط به میدان حل.
۲. گسسته سازی، شامل جایگزینی نوعی از تقریب های اختلاف محدود برای عبارت های داخل معادله انتگرالی می باشد.

۳. حل معادلات جبری با استفاده از یک روش تکرار.

(Versteeg & Malalasekera 2007)

از جمله مهمترین روش های حل عددی معادلات ناویر-استوکس می توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱. روش DNS یا شبیه سازی عددی مستقیم
۲. روش LES یا شبیه سازی گردابه ای
۳. روش RANS یا ناویر-استوکس میانگیری شده رینولدز

ما در این تحقیق از روش RANS یا ناویر-استوکس میانگیری شده رینولدز استفاده کرده ایم. در این روش که به عنوان یک راه حل کلی در حل معادلات ناویر-استوکس شناخته می شود، می بایست وابستگی روابط به زمان را از میان برد و معادلات

می کنند، تا به طراحی دقیق تر دست پیدا کنند. برای چنین آزمایشاتی ضروریست مشخصات سرعت، اشفتگی طبیعی باد و مقادیر عدد رینولدز مرتبط با سطح منحنی در شبیه سازی ها ارایه شود. اما نکته مهم در این آزمایشات هزینه بالا و در دسرس نبودن آن است.

در تحقیق پیش رو ما سعی داریم با توجه به اهمیت موضوع باد در سازه های فضا کار به بررسی بیشتر آن پردازیم و از طریق روش های عددی علاوه بر راه حلی مناسب و کم هزینه جهت تحلیل این سازه ها به فرمی ایدال از این سازه ها در مقابل اثرات باد دست پیدا کنیم.

۲- مواد و روش ها

۲-۱- شبیه سازی عددی با استفاده از روش های CFD

در مطالعه جریانات یک سیال می توان از قوانین فیزیکی مشخصی پیروی کرد. این قوانین فیزیکی در قالب یک سری معادلات دیفرانسل غیر خطی و چند جمله ای قابل بیان می باشند که از آنها به عنوان معادلات ناویر استوکس یاد می شود (روابط ۱-الف تا ۱-ج). معادلات ناویر استوکس شامل معادلات حاکم بر حرکت سیال است. این معادلات شامل قوانین بقای جرم، بقای انرژی و بقای اندازه حرکت است.

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (1-f)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (1-b)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) - \rho g \quad (1-c)$$

- روش تفاضل محدود
- روش حجم محدود
- روش المان محدود

این سه روش برای گسسته‌سازی در تمامی مدل‌های *CFD* قابل استفاده می‌باشند. در اکثر نرم‌افزارهای تجاری *CFD* از روش حجم محدود استفاده می‌شود. در روش حجم محدود که یکی از حالات ویژه روش مانده‌های وزن‌دار در دینامیک سیالات محاسباتی یا *CFD* می‌باشد، درک مستقیم حالت فیزیکی مسئله آسان می‌باشد. در روش حجم محدود ابتدا دامنه موردنظر به تعدادی حجم کنترل غیرهمپوشان تقسیم می‌شود به طوری که هر حجم حول یک نقطه از میدان قرار می‌گیرد و آن‌گاه از معادله دیفرانسیل روی حجم کنترل انتگرال‌گیری شده و معادلات به فرم عددی منفصل می‌گردند.

ایده اصلی در روش حجم محدود، انفصال تقریب معادلات دیفرانسیل جزئی در نقاط مجزا نمی‌باشد، بلکه شرط برقراری اصل بقاء جرم به صورت مایکروسکوپی دارای اهمیت است. پس از انتگرال‌گیری روی حجم کنترل مدنظر مربوط به هر گره، عبارات جابجایی و پخش باید به گونه‌ای منفصل شوند که فرمول حاصل پایدار و دقیق باشد. به منظور انجام این مطالعه و شبیه‌سازی سیالاتی به روش حجم محدود ما از نرم‌افزار *Fluent* استفاده خواهیم کرد.

۲-۳- مش بندی

مش‌بندی یا شبکه بندی، به تبدیل جسم یا مدل به تقسیمات کوچک تر، محدود و منظم گفته می‌شود. یکی از اصلی ترین و مهم ترین قسمت‌های مدل‌سازی مش‌بندی است. در نرم افزار با

در حالت استاتیکی حل کرد. برای انجام این کار ابتدا باید با توجه به رابطه (۲) قسمت میانگین و نوسانی سرعت از یکدیگر جدا و در معادلات ناویر-استوکس جایگذاری شود و در نهایت با انجام عملیات ریاضی تعداد متغیرهای افزایش یافته را کاهش و وابستگی معادلات به زمان را از بین برد این عملیات ریاضی شامل یکسری ساده‌سازی‌ها و تقریب‌سازی‌ها می‌باشد.

$$u(t) = U + u'(t) \quad (2)$$

در رابطه (۲) به میانگین زمانی سرعت، سرعت متوسط گفته می‌شود. سرعت متوسط جریان با علامت U ، که بیانگر قسمت استاتیکی باد است و قسمت دینامیکی باد با u' نشان داده می‌شود. t زمان و h ارتفاع از سطح زمین می‌باشد.

روش ناویر-استوکس میانگیری شده رینولدز روش دارای سه مدل آشفتگی اصلی $k-\varepsilon$ ، $k-\omega$ و *Spalart-Allmaras* می‌باشد (Abouali2007).

۲-۲- گسسته‌سازی

همانطور که پیش از این ذکر شد معادلات ناویر-استوکس معادلات پیوسته هستند و برای حل عددی آنها به وسیله نرم افزارهای کامپیوتری ما نیازمند آن هستیم تا آنها را به فرم گسسته تبدیل کنیم. جواب یک معادله گسسته برای نقاط محدودی به دست می‌آید. از طریق درون یابی نقاط گسسته، می‌توان جواب سایر نقاط نیز محاسبه گردد. تبدیل یک معادله پیوسته به معادله گسسته، گسسته سازی نام دارد. برای گسسته سازی از سه روش استفاده می‌شود:

۴-۲- نواحی نزدیک به دیواره

در بحث مش بندی مدل، مش بندی نواحی نزدیک به دیواره به علت تفاوت نوع جریان به چند لایه تقسیم می شوند که هر یک خصوصیات خاص خود را دارند و از اهمیت خاصی برخوردار می باشند و می بایست به گونه ای این مش بندی انجام شود تا نتایج محاسبات در هر یک از لایه ها از دقت بالایی برخوردار باشد.

برای کنترل این موضوع از پارامتری بی بعد y^+ استفاده می شود. این پارامتری بی بعد به ما کمک می کند تا بتوانیم در یک جریان نواحی مختلف را تشخیص و متناسب با آن ضخامت لایه های مش در نواحی نزدیک به دیواره را تعیین کرد که این پارامتر از رابطه (۳) قابل محاسبه است:

$$y^+ = u^* \frac{y}{\nu} \quad (۳)$$

در این رابطه y ارتفاع اولین لایه تا سطح دیواره، ν ویسکوزیته سینماتیکی و u^* سرعت اصطکاکی در مجاورت دیواره می باشد که با رابطه (۴) قابل محاسبه می باشد:

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (۴)$$

که τ_w تنش برشی دیواره می باشد.

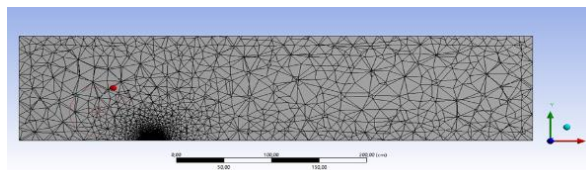
بر اساس آزمایشات انجام شده توسط محققین مقادیر مشخصی برای y^+ در نواحی مختلف حرکت سیال در نظر گرفته شده است که به شرح زیر می باشند:

توجه به توانایی کاربر در ایجاد یک شبکه با کیفیت، می تواند نیاز آن را در حوزه شبکه بندی در دینامیک سیالات محاسباتی برطرف کند. ایجاد شبکه با توجه به اثرگذاری آن به طور مستقیم بر روی جواب های حاصل از شبیه سازی، و همچنین تاثیر در همگرایی مسئله بسیار مهم است.

یک شبکه با کیفیت می تواند روند حل را تسریع بخشیده و حتی جواب های دقیق تری از شبیه سازی حاصل شود. در مقابل یک شبکه بی کیفیت باعث رسیدن به پاسخ های نادرست و همگرایی ضعیف و حتی عدم همگرایی می شود.

مش بندی در فلوئنت از حیث ساختار به دو دسته کلی مش بندی بی سازمان و مش بندی سازمان یافته تقسیم می شود. در مش سازمان یافته هر المان را می توان با شماره سطر و ستون آدرس دهی کرد زیرا در مش بندی سازمان یافته شبکه به صورت کاملاً منظم تولید می شود در صورتی که در شبکه بی سازمان عملاً این کار به دلیل عدم نظم در ایجاد شبکه امکان پذیر نیست. لازم به ذکر است برای ایجاد مش سازمان یافته به مهارت بالایی نیاز داریم و اغلب هزینه زمانی به مراتب بالاتری نسبت به استفاده از مش بیسازمان برای کاربر دارد. هر چند این گونه شبکه، کیفیت مش بسیار بهتری ایجاد می کند.

ما در این مطالعه همانطور که در شکل (۱) مشاهده می شود جهت مش بندی مدل فضای اطراف گنبد که تحت تاثیر برخورد بار باد می باشد را از مش ریزتر استفاده کرده ایم تا دقت محاسباتی کار بیشتر شود.



شکل (۱). مش بندی فضای اطراف گنبد

ناحیه آرام	$k_s^+ < 2.25$	اگر	ناحیه مرزی	$0 < y^+ < 5$	اگر
ناحیه انتقالی	$2.25 < k_s^+ < 90$	اگر	ناحیه گذار	$5 < y^+ < 30$	اگر
ناحیه زیر	$k_s^+ > 2.25$	اگر	ناحیه آشفته	$y^+ > 30$	اگر

۲-۶- همگرایی مسئله

یک مسئله غیر خطی زمانی به مقدار همگرایی مطلوب می‌رسد که دارای شرایط زیر باشد:

- با ادامه اصلاح جواب های مرحله قبل، جواب ها تغییر نکنند.
- تمامی معادلات و کنترل ها به مقدار قابل قبولی همگرا شوند.

در این مطالعه به منظور همگرایی مقدار تلورانس همان پیش فرض نرم افزار مقدار 10^{-3} در نظر گرفته شده است.

۲-۷- آزمایش مرجع

در این مطالعه از آزمایش تونل باد مرجع (Cheng & Fu 2010) جهت مقایسه با نتایج مدل سازی استفاده شده است. در این آزمایش که توسط *C.M. Cheng* و *C.L. Fu* در تونل بادی با ابعاد ۲۴ متر طول، ۴ متر عرض و ۲/۶ متر ارتفاع بر روی دو جریان اشفته و آرام انجام گرفته شده است. در این آزمایش از سه مدل گنبد با قطرهای ۵۰، ۲۰ و ۱۲۰ سانتیمتر استفاده شده. در مطالعه حال حاضر ما از مدل ۲۰ سانتیمتری با عدد رینولدز برابر با 3×10^5 جهت کنترل و مقایسه نتایج استفاده کرده ایم.

در نرم افزار یک مش بندی ابتدایی توسط کاربر انتخاب می گردد. پس از اتمام محاسبات، y^+ از طریق نرم افزار کنترل می گردد، در صورتی ضخامت اولین لایه نزدیک به دیواره کمتر از مقدار y^+ بدست آمده بود، مش بندی ما درست است در غیر این صورت باید اصلاح شود (Wilcox 1994, Versteeg & Malalasekera 2007, Cebeci, Shao & Laurendeau 2005).

۲-۵- آشفتنی نزدیک دیواره

با کوچک بودن y^+ ، قدرت نیروی لزجت یا گرانشی سیال در آن ناحیه زیاد می شود و با فاصله گرفتن از دیوار این نیرو کم شده و اغتشاشات افزایش می یابد. قانون کلی لگاریتمی را برای جریان نزدیک به دیواره در روش $k-\epsilon$ می تواند به شکل رابطه ۵ ارایه کرد.

$$\frac{U}{u^+} = \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{u^+ Z}{\nu}\right) + B - \Delta B(k_s^+) \quad (5)$$

که U سرعت متوسط جریان، u^+ سرعت اصطکاکی، κ ثابت ون-کارمان، Z فاصله از دیوار، ν ویسکوزیته سینماتیکی، B ضریب ثابت پیوستگی، k_s^+ ارتفاع زبری دانه های ماسه که با رابطه (۶) قابل محاسبه است و ΔB تابع سختی می باشد.

$$k_s^+ = \frac{k_s u^+}{\nu} \quad (6)$$

k_s^+ در جریان آرام، انتقالی یا زیر به دارای مقادیر زیر می باشد (Versteeg & Malalasekera 2007):

۲-۸- مدل سازی در نرم افزار

محاسباتی و تحلیلی بالاتری نسبت به فضاهای دورتر خواهیم داشت. این دقت نیازمند مش بندی ریزتر خواهد بود.

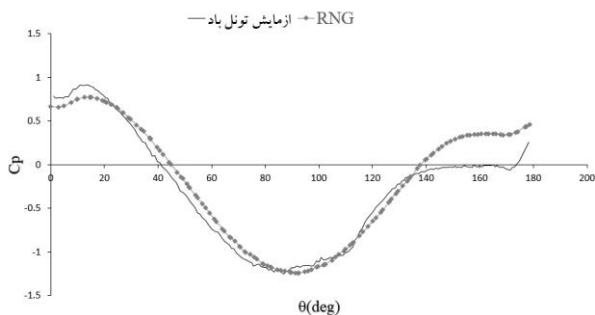
یکی از فواید شبیه سازی این است که سرعت، فشار، انرژی و را می توان در هر نقطه دلخواه مورد بررسی قرار داد. در آزمایش تونل باد تنها بعضی پارامترها و در مکان هایی که سنسور قرار داده شده می توان اطلاعاتی را بدست آورد.

در این مطالعه جهت شبیه سازی با نرم افزار انسیس فلوئنت ما از سه مدل آشفتگی اصلی $k-\varepsilon$ ، $k-\omega$ و $Spalart-Allmaras$ در روش CFD استفاده کرده ایم.

۳- نتایج و بحث

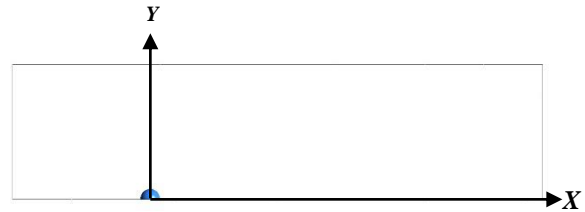
۳-۱- کنترل ضرایب فشار روش های CFD با آزمایش

در نهایت بعد از تحلیل نرم افزار و گرفتن خروجی مقادیر ضرایب فشار C_p ، نتایج هر یک از روش مختلف CFD با مقادیر مربوط به نتایج آزمایشگاه (آزمایش مرجع) مقایسه می شود که در قالب نمودار در اشکال (۴) تا (۱۰) نشان داده شده است. لازم به ذکر است این مقادیر برحسب زاویه عبوری جریان باد بر روی سطح منحنی گنبد می باشد.

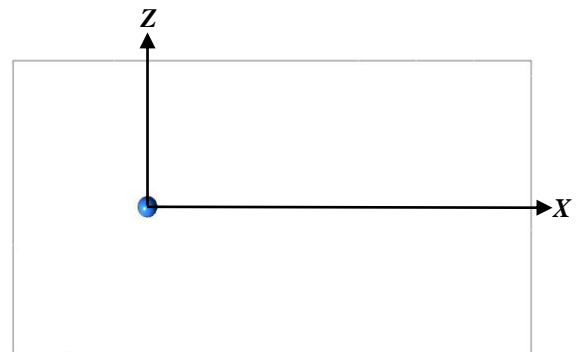


شکل (۴). مقایسه ضرایب فشار در روش $k-\varepsilon$ -RNG با نتایج آزمایشگاهی

برای شبیه سازی مدل استفاده شده در مرجع (Cheng & Fu 2010) از نرم افزار انسیس بخش فلوئنت استفاده می شود. در مرجع مورد نظر در یک تونل باد آزمایش بر روی سه گنبد با قطر ۲۰، ۵۰ و ۱۲۰ سانتیمتری انجام گرفته است. ما در این مطالعه جهت بررسی ضرایب فشار همانطور که در شکل (۲) و (۳) نشان داده شده از مدل با قطر ۲۰ سانتیمتری در حجم کنترل مطابق با ابعاد ارایه شده در جدول ۱ برای مدل سازی استفاده کرده ایم.



شکل (۲). نمای گنبد در نرم افزار در صفحه YX

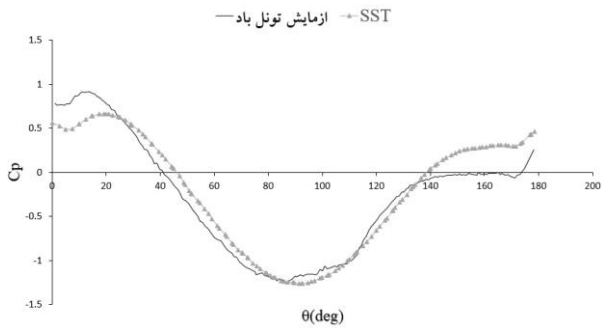


شکل (۳). نمای گنبد در نرم افزار در صفحه ZX

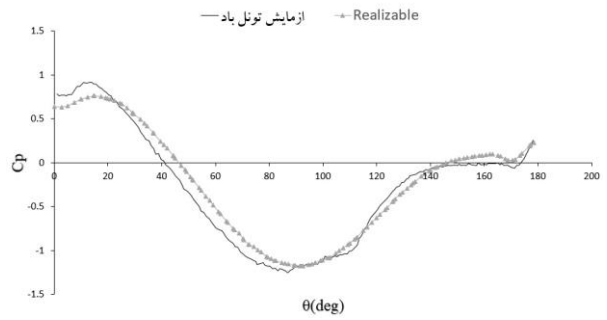
جدول ۱. مشخصات حجم کنترل نسبت به مبدا مختصات

+z	-z	+x	-x	+y
$13 \times r$	$13 \times r$	$39 \times r$	$13 \times r$	$12 \times r$

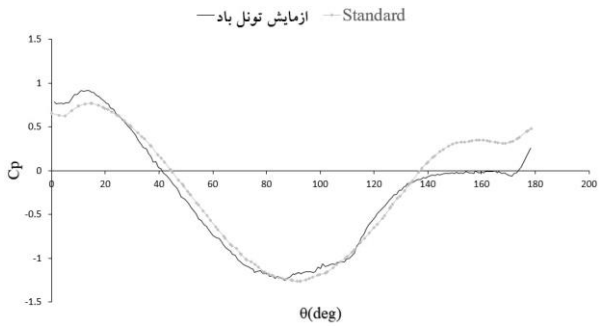
در جدول بالا r شعاع گنبد مورد مطالعه می باشد. لازم به ذکر است که فضای اطراف گنبد تحت تاثیر برخورد جریان سیال (باد) با گنبد خواهد بود و ما در این فضا نیازمند دقت



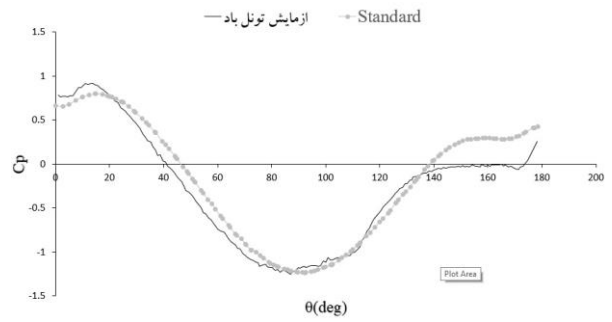
شکل (۸). مقایسه ضرایب فشار در روش $k-\omega$ -SST با نتایج آزمایشگاهی



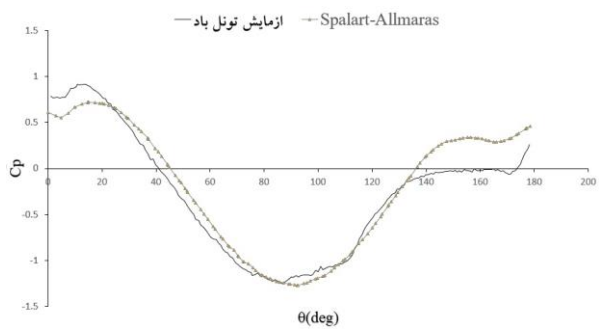
شکل (۵). مقایسه ضرایب فشار در روش $k-\epsilon$ -Realizable با نتایج آزمایشگاهی



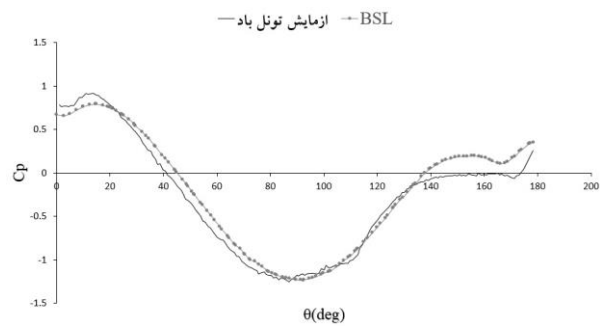
شکل (۹). مقایسه ضرایب فشار در روش $k-\omega$ -Standard با نتایج آزمایشگاهی



شکل (۶). مقایسه ضرایب فشار در روش $k-\epsilon$ -Standard با نتایج آزمایشگاهی

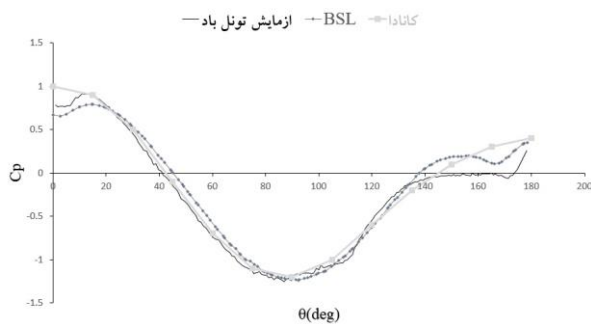


شکل (۱۰). مقایسه ضرایب فشار در روش Spalart-Allmaras با نتایج آزمایشگاهی

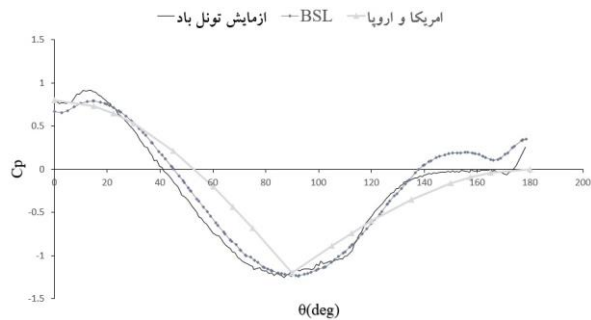


شکل (۷). مقایسه ضرایب فشار در روش $k-\omega$ -BSL با نتایج آزمایشگاهی

ضرایب دقیق تری برای سازه‌های گنبدی شکل ارائه کرده است که در اشکال (۱۱) و (۱۲) و در جدول (۳) مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است جهت بررسی دقیق تر این موضوع دو آیین نامه آمریکا (American Society of Civil Engineers (ASCE) 2010) و اروپا (European committee for Standardization (CEN) 2010) که ضرایب یکسانی ارائه کرده‌اند نیز بررسی شده است.



شکل (۱۱). مقایسه ضرایب فشار آیین نامه کانادا با روش BSL و نتایج آزمایشگاهی



شکل (۱۲). مقایسه ضرایب فشار آیین نامه آمریکا و اروپا با روش BSL و نتایج آزمایشگاهی

که طبق رابطه (۷) میزان انحراف معیار هر یک از این روش‌ها در مقایسه با روش BSL و آزمایش تونل باد به شرح جدول (۳) خواهد بود.

به منظور بررسی دقت نتایج روش‌های CFD، انحراف معیار هر کدام از روش‌ها با نتایج آزمایشگاهی، در جدول (۲) بررسی می‌گردد. انحراف معیار با رابطه (۷) محاسبه شده است.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (C_{pi} - C_{pei})^2} \quad (7)$$

در این رابطه C_{pi} ضریب فشار روش‌های مورد بررسی، C_{pei} ضریب فشار حاصل از آزمایشگاه و n تعداد نقاطی که نتیجه آزمایشگاهی موجود می‌باشد.

جدول (۲). انحراف معیار روش‌های CFD

روش‌های k-ε			
	RNG	Realizable	Standard
انحراف معیار σ	۰/۱۴۱۲	۰/۱۱۶۷	۰/۱۴۵۹
روش‌های k-ω			
	BSL	SST	Standard
انحراف معیار σ	۰/۱۰۵۱	۰/۱۵۳۱	۰/۱۳۸۸
اسپالارت-الماراس			
انحراف معیار σ	۰/۷۸۷۵		

مشاهده می‌گردد که روش BSL از دقت بالایی نسبت به سایر روش‌های مورد بررسی برخوردار می‌باشد. همچنین روش‌های k-ε دقت جواب بالاتری نسبت به دو روش دیگر دارد.

۲-۳- مقایسه نتایج مدل سازی با آیین نامه‌ها

در آیین نامه‌های بارگذاری جهت اعمال بار باد به سیستم باربر سازه جداول و نمودارهایی ارائه شده است تا از طریق آنها بتوان ضرایب فشار وارد بر قسمت‌های مختلف سازه را بدست آورد. آیین نامه کانادا (National Building Code of Canada (NBC) 2005)

۵- منابع مورد استفاده

- [۱] گلابچی، محمود. (۱۳۹۱). درک رفتار سازه ۶-ه. تهران: انتشارات دانشگاه تهران.
- [2] Abouali, M. (2007). Direct numerical simulation of atmospheric flow over rough terrain. MA Thesis. International Institute for Geo-information Science and Earth Observation.
- [3] American Society of Civil Engineers (ASCE). (2010). Minimum design loads for buildings and other structures. Reston (VA), USA.
- [4] Bangash, M. Y. H. (2003). Elements of spatial structures – analysis and design. Journal of Computers & Structures, 15(8), 12-32.
- [5] Britvec, S.J. (1995). Stability and optimization of flexible space structures-birkh. Berlin: Birkhauser. .
- [6] Cebeci, T. Shao, J. P. Kafyeke, F & Laurendeau, E. (2005). Computational fluid dynamics for engineers. California: Horizons.
- [7] Cheng., C. M & Fu., C. L. (2010). Characteristic of wind loads on a hemispherical dome in smooth flow and turbulent boundary. Progress in Aerospace Sciences, 17(3), 123-142.
- [8] European committee for Standardization (CEN). (2010). Eurocode 1: Actions on structures- Part 1-4: General actions - Wind actions. Brussels: Management Centre, Avenue Marnix.
- [9] National Building Code of Canada (NBC). (2005). Institute for research in construction, Ottawa (Canada).
- [10] Versteeg., H. K & Malalasekera., W. (2007). An introduction to computational fluid dynamics. Second edition. England: Pearson Education.
- [11] Wilcox., D.C. (1994). Turbulence modeling for CFD. La Canada, California: DCW Industries.
- [12] Wilkinson, C. (1991). The architecture of long-span, large-volume buildings-butlerworth architecture. J Struct Eng, 52(18), 45-63.

۶- چکیده انگلیسی

Nowadays, Dome-shaped space structures have been welcomed by designers of the world because of their architectural and structural features and, they are used to cover large spans such as stadiums, halls, shops and, etc. One of the main characteristics of these structures is their low weight due to their very low dead load. This feature makes these types of structures vulnerable to wind load, so designing space structure is crucial against wind load. The wind pressure coefficient (C_p) is one of the essential coefficients for calculating the wind load on all structures. The bylaws contain these values inaccurately and in general. On the other hand, wind tunnel tests provide high precision values that engineers cannot quickly obtain them because of their lack of availability and high cost. However, besides these two methods,

جدول (۳). مقایسه انحراف معیار ضرایب آیین نامه کانادا، اروپا،

آمریکا و روش *BSL* با نتایج آزمایشگاهی

	BSL	کانادا	اروپا و آمریکا
انحراف معیار σ	۰/۱۰۵۱	۰/۱۰۰۰	۰/۲۶۵۰

همانطور که در جدول (۳) مشاهده می شود ضرایب آیین نامه کانادا تشابه بسیار زیادی با نتایج آزمایشگاهی و روش شبیه سازی *BSL* دارد.

۴- نتیجه گیری

همانطور که در این مطالعه مشخص شد روش های دینامیک سیالات محاسباتی یا *CFD* می تواند جایگزین مناسبی برای آزمایش تونل باد در مدل سازی گنبد باشد. البته این موضوع نیازمند تعریف صحیح ابعاد دامنه ی حل، شرایط مرزی، تنظیمات برنامه و از همه مهم تر مش بندی مدل است.

اما لازم به ذکر است در میان روش های مختلف *CFD* روش *k- ω -BSL* نزدیکترین نتایج را در مقایسه با نتایج آزمایشگاه ارائه کرده است.

در مقایسه آیین نامه های اروپا، آمریکا و کانادا با نتایج شبیه سازی و آزمایشگاه برای گنبد، آیین نامه اروپا و آمریکا ضرایب قابل قبولی ارائه نکرده اند و نمی توان معیار مناسبی برای در نظر گرفتن اثرات باد بر گنبد باشند. اما در میان آیین نامه های معتبر، آیین نامه کانادا ضرایب بسیار دقیق و نزدیکی را به روش شبیه سازی و آزمایشگاه ارائه کرده است و می توان معیار خوبی برای در نظر گرفتن اثرات ناشی از بار باد بر گنبد باشد و با استفاده از این آیین نامه، بدون صرف وقت و هزینه می تواند نتایج مطلوبی گرفت.

Computational Fluid Dynamics or CFD can be used to calculate the impact of wind load on the structure and to calculate the pressure coefficients and provide acceptable results. This study compared the external pressure coefficient in European, American, and Canadian codes, tunneling tests, and numerical simulation results by using the CFD method on dome space structures. Finally, the optimum weight of these structures determined by optimization by using PSO method.

Keywords: Space Structures, CFD, Dome, Computational Fluid Dynamics, PSO, Optimization