



گزارش نهایی - گروه تخصصی فنی و مهندسی

عنوان طرح: بررسی اثر باد روی گنبدها و پیشنهاد ضرایب آئین نامه

کد طرح: ۲۰-۲۴۶۵

ویرایش: اول

گروه پژوهشی: تکنولوژیهای پیشرفته ساختمانی

واحد سازمانی مجری: استان کرمان

مسئول اجرای طرح: فرزاد رضایی نامدار

ماه و سال گزارش طرح:

آبان ۱۳۹۶

## شناسنامه گزارش

عنوان گزارش: بررسی اثر باد روی گنبدها و پیشنهاد ضرایب آئین نامه

شماره ویرایش: اول

عنوان فارسی طرح پژوهشی: بررسی اثر باد روی گنبدها و پیشنهاد ضرایب آئین نامه

عنوان انگلیسی طرح: The effect of wind load on domes and suggestion of code's coefficients

عنوان نهایی طرح در شبکه برنامه: -

کد طرح: ۲۰-۲۴۶۵

نام فایل گزارش: The effect of wind load 960730

ویرایشگر: فرساد سلاجقه

تاریخ تصویب طرح: ۹۵/۱۰/۲۸

سطح دسترسی به سند: نامحدود

ردیف	نام و نام خانوادگی	مسئولیت در طرح	تخصص	رتبه	جمع کل نفر ساعت همکاری در طرح
۱	فرزاد رضایی نامدار	مجری طرح	مکانیک سیالات	مربی	۳۲۰
۲	رضا کامیاب مقدس	همکار	عمران-سازه	دانشیار	۲۲۴
۳	علیرضا گرکانی	همکار	عمران-زلزله	مربی	۲۲۴
۴	ندا رحیم پور	همکار	ژئوتکنیک	مربی	۲۲۴
۵	فرساد سلاجقه	همکار	عمران-سازه	-	۲۸۸

## چکیده

سازه های گنبدی شکل که در زمره سازه های فضاکار قرار می گیرند، سازه هایی سبک بوده و در نتیجه بار جانبی باد اهمیت ویژه ای در اینگونه سازه ها دارد. جهت محاسبه ضریب فشار بار باد، آیین نامه های مختلف مقادیری را پیشنهاد داده اند که با یکدیگر متفاوت بوده و برای محاسبه دقیق تر آن باید با آزمایشات انجام شده مقایسه گردد. همچنین مقادیر ضریب فشار را میتوان با مدل سازی های عددی در نرم افزار بدست آورد. در این طرح، معتبرترین آیین نامه های جهان بررسی گردیده و بر اساس مشابهت ها در سه دسته کلی قرار گرفته اند. همچنین ضرایب فشار آیین نامه ها با آزمایشات صورت گرفته توسط سایر محققان و مدل سازی عددی مقایسه شده و در نهایت یک گراف ضریب فشار پیشنهاد شده که بیشترین انطباق را با آزمایشات و مدل برنامه عددی دارد. استفاده از این گراف پیشنهادی علاوه بر هماهنگی با آزمایشات و مدل سازی ها، تاثیر بسزایی در کاهش وزن گنبدها ایفا می کند.

**کلید واژگان:** آزمایش های ضریب فشار، آیین نامه های بار باد، ضریب فشار، گنبدهای فضاکار

## پیشگفتار

برای طراحی سازه ها، ترکیب بارهای قائم و جانبی از جمله بار مرده، زنده، برف، زلزله و باد مدنظر می باشد. از میان بارهای جانبی باد و زلزله هر کدام که حاکم باشد در ترکیب بار لحاظ می گردد. در سازه های فضاکار از جمله گنبد، سازه های سبک، پل ها و ساختمان های با پهنای زیاد، بار باد تاثیر بسزایی داشته و معمولا ترکیب بارهای شامل بار باد حاکم می گردد. محققان آزمایشات مختلفی جهت محاسبه نیروی زلزله و همچنین تأثیر بار باد بر روی سازه های بلند انجام داده اند، اما آزمایشات تونل باد جهت سازه های گنبدی شکل محدود می باشد. از سوی دیگر، آزمایشات تونل باد جهت یافتن مناسب ترین مقادیر ضریب فشار هزینة بر بوده و می توان از روش جایگزین مدل سازی های عددی با شرایط مرزی مناسب استفاده نمود. هدف این طرح مقایسه آیین نامه ها با آزمایشات و روش عددی بوده تا بتوان یک راه آسان و منطبق بر آزمایشات پرهزینه جهت محاسبه ضریب فشار بار باد پیشنهاد نمود.

آیین نامه های مورد بررسی در این طرح عبارتند از:

نشریه ۴۰۰، ISO، کانادا، هند، Euro Code، ASCE، ژاپن، استرالیا و نیوزیلند

این طرح طبق نسخه نهایی طرحنامه، مصوب شورای بررسی نهایی طرحها در تاریخ ۸۸/۱/۱ در چارچوب برنامه پژوهشی گروه پژوهشی تکنولوژیهای پیشرفته ساختمانی جهاددانشگاهی استان کرمان به اجرا در آمده است.

گروه تکنولوژیهای

پیشرفته ساختمانی

## فهرست عناوین

عنوان	شماره صفحه
مقدمه .....	۲
1-1- شبکه‌های تخت .....	۲
۲-۱- چلیکها .....	۴
۳-۱- گنبدها .....	۴
1-4- مزایای سازه‌های فضاکار .....	۶
۵-۱- انواع روشهای تحلیل در برابر باد .....	۷
۲ مرور کارهای قبلی .....	۱۰
۱-۲- بررسی و تطبیق آزمایشات با یکدیگر .....	۱۳
۱-۱-۲- ۱-۲-۱- ۳-۲-۱) کارهای نظری نویسنده .....	۱۵
2-2- بارهای وارد بر سازه‌های فضاکار .....	۱۵
۳-۲- بررسی آیین نامه ها .....	۱۷
۱-۳-۲- تعیین فشار باد از طریق آئیننامه سازه‌های فضاکار، نشریه شماره ۴۰۰ .....	۱۷
۲-۳-۲- محاسبه بار باد به روش آئیننامه Euro Code [۱] .....	۲۱
۳-۳-۲- آئیننامه ASCE 1998-2002 [۲] .....	۲۴
۴-۳-۲- ضرایب Cp در آئیننامه ژاپن .....	۲۷
۵-۳-۲- ضریب Cp از آئیننامه نیوزیلند .....	۲۹
۶-۳-۲- ضریب Cp از آئیننامه هند و کانادا .....	۳۰
۷-۳-۲- ضریب Cp از آئیننامه روسیه .....	۳۰
2-3-8- مقادیر ضریب فشار داخلی $C_{pin}$ .....	۳۰
۴-۲- مقایسه آیین نامه ها با آزمایشات .....	۳۴
۵-۲- مقایسه مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی و آیین نامه ها .....	۳۶

فهرست شکل ها

شماره صفحه

عنوان

شکل ۱: شبکه های تخت تک لایه ..... ۳

Archive of SID

## فهرست جدول ها

شماره صفحه	عنوان
۱۸	جدول ۱: ضریب اهمیت $I_w$ .....
۱۹	جدول ۲: ضریب $C_p$ برای زوایای مختلف .....

Archive of SID

Archive of SID



## مقدمه

امروزه با پیشرفت تکنولوژی نیازهای جدیدی نیز در عرصه مهندسی سازه به وجود آمده است. مدیریت زمان، هزینه‌های اجرا و مقاومت سازه‌ها در برابر بارهای مختلف اهمیت بیشتری پیدا کرده و همچنین گرایش به سازه‌هایی سبک و پیش ساخته را افزایش داده است. با افزایش جمعیت نیاز به ایجاد فضاهای بزرگ‌تر بدون ستون‌های میانی احساس می‌شود. از همین رو مهندسین عمران و معمار به سازه‌های فضاکار روی آورده و بسیاری از نیازهای جدید سازه‌ای را به این وسیله پاسخگو بوده‌اند. با مشاهده نتایج خوب اینگونه سازه‌ها، علاقه بیشتری برای ساخت و مطالعه در زمینه سازه‌های فضاکار به وجود آمده است به نحوی که هنوز هم مطالعه این سازه‌ها مورد توجه بسیاری از مراکز تحقیقاتی، مهندسین و دانشجویان قرار دارد.

در یک تعریف کلی، عنوان "سازه‌های فضاکار" به نوعی سازه‌ها گفته می‌شود که هر سه بعد فضا را در بر می‌گیرد. نام این سازه‌ها در مقابل "سازه‌های مسطح" مانند خرپاهای مسطح - که در دو بعد واقع شده اند - قرار می‌گیرد. در خرپاهای مسطح بارهای خارجی و نیروهای داخلی همگی در یک صفحه قرار دارند. در صورتی که در سازه‌های فضاکار، بارهای خارجی و داخلی در فضای سه بعدی اعمال می‌شوند. در عمل، سازه‌های فضاکار، بارهای خارجی و داخلی در فضای سه بعدی اعمال می‌شوند. در عمل، سازه‌های فضاکار شامل شبکه‌ها، چلیک‌ها، گنبد‌ها، دکل‌ها، شبکه‌ها و پل‌های کابلی و سازه‌های تاشو می‌باشد. برای ساخت اینگونه سازه‌ها می‌توان از مصالح فولاد، آلومینیوم، چوب، بتن، کامپوزیت‌های مسلح شده با الیاف شیشه و همچنین ترکیب این مصالح استفاده کرد.

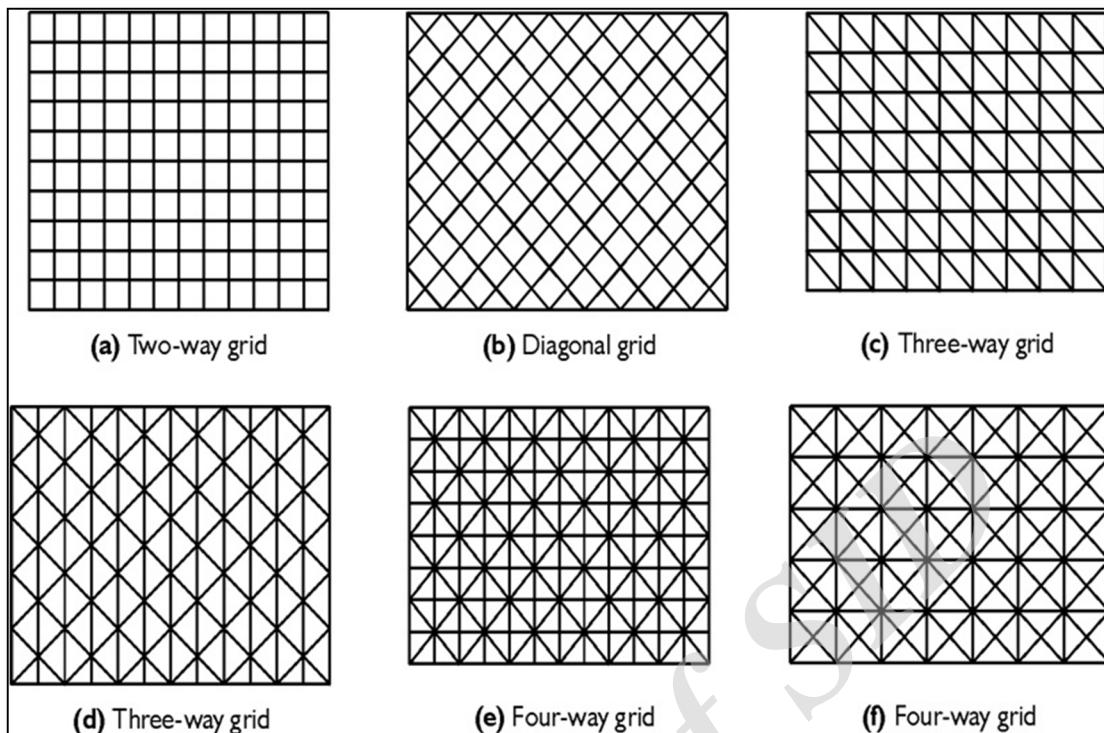
سازه‌های فضاکار را می‌توان به سه دسته تقسیم نمود:

- سازه‌های فضاکار شبکه‌ای که از عناصر میله‌ای تشکیل شده است.
- سازه‌های فضاکار پیوسته که شامل اجزایی مانند دال‌ها و پوسته‌ها می‌باشد.
- سازه‌های فضاکار دوگانه که ترکیبی از دو بخش قبل می‌باشد.

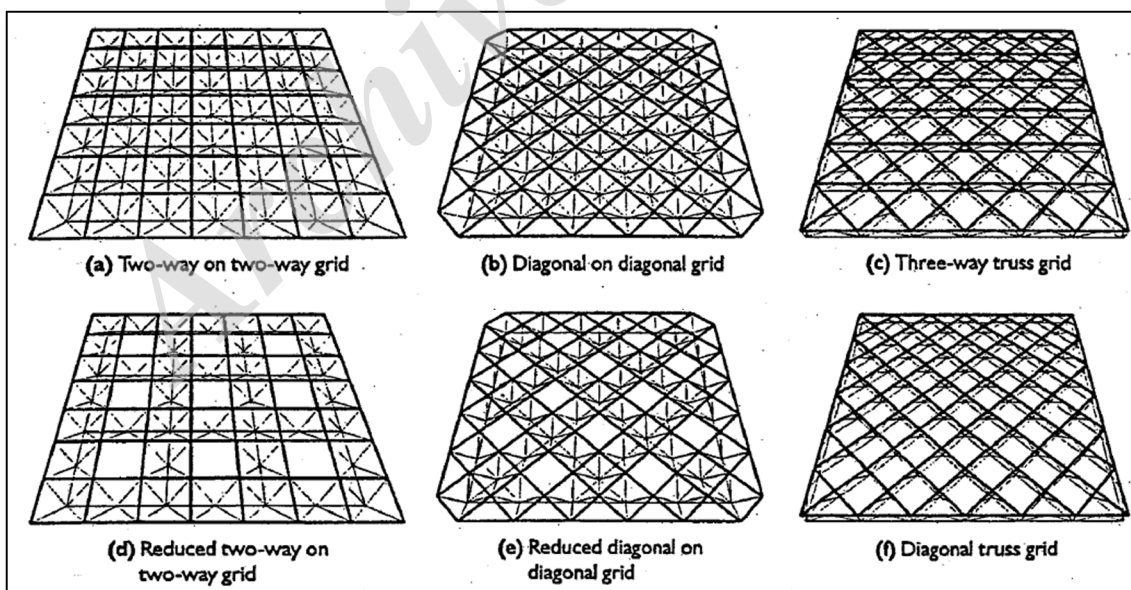
### ۱-۱- شبکه‌های تخت

شبکه‌ها یک سیستم سازه‌ای است که از یک یا چند لایه مسطح تشکیل شده است. یک شبکه تخت یا یک لایه، ترکیبی از تیرها در یک صفحه و با اتصالات صلب می‌باشد. بارهای خارجی وارد بر شبکه تخت شامل نیروهای عمود بر صفحه و یا لنگرهای خمشی با محور درون صفحه می‌باشد. به دلیل واقع نبودن نیروهای خارجی در صفحه می‌توان شبکه‌ها را در زیر مجموعه سازه‌های فضاکار قرارداد.

یک شبکه ۲ لایه از ۲ سری شبکه تخت موازی تشکیل شده است که به وسیله اعضای جان به یکدیگر متصل شده‌اند. همچنین می‌توان شبکه‌های خرپایی را با استفاده از ۲ شبکه تخت و اعضای جان مورب به وجود آورد. نمونه‌هایی از شبکه‌های تخت تک لایه در شکل (۱) و نمونه‌هایی از شبکه تخت دو لایه در شکل (۲) نشان داده شده است.



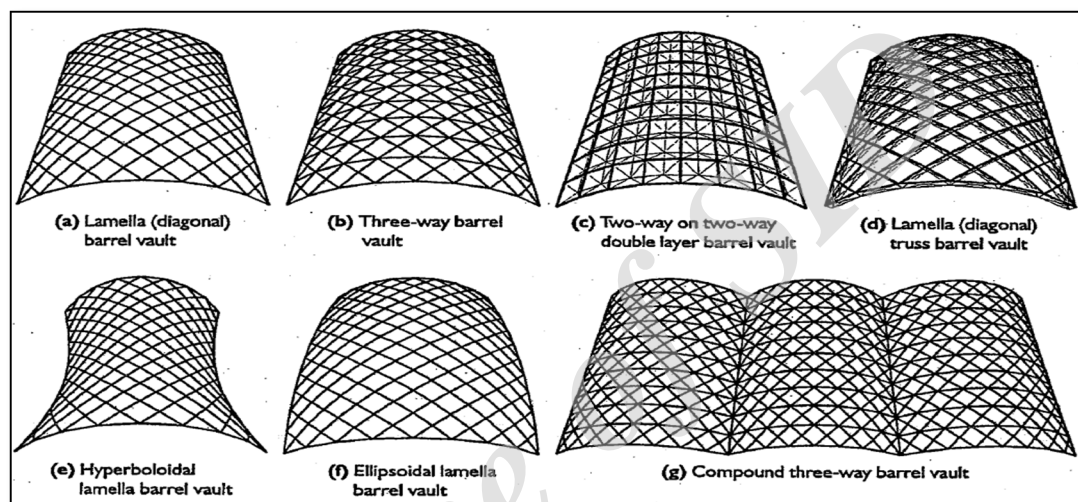
شکل ۱: شبکه های تخت تک لایه



شکل ۲: نمونه‌هایی از شبکه‌های تخت دو لایه

### ۲-۱- چلیک‌ها

چلیک‌ها از طریق "قوسی کردن" شبکه‌ها در راستای یک محور حاصل می‌شوند که می‌تواند به صورت یک یا چند استوانه در کنار هم قرار گیرد. چلیک‌ها نیز مانند شبکه‌ها دارای یک، دو و یا چند لایه می‌باشد. نمونه‌هایی از چلیک‌ها در شکل (۳) نشان داده شده است:



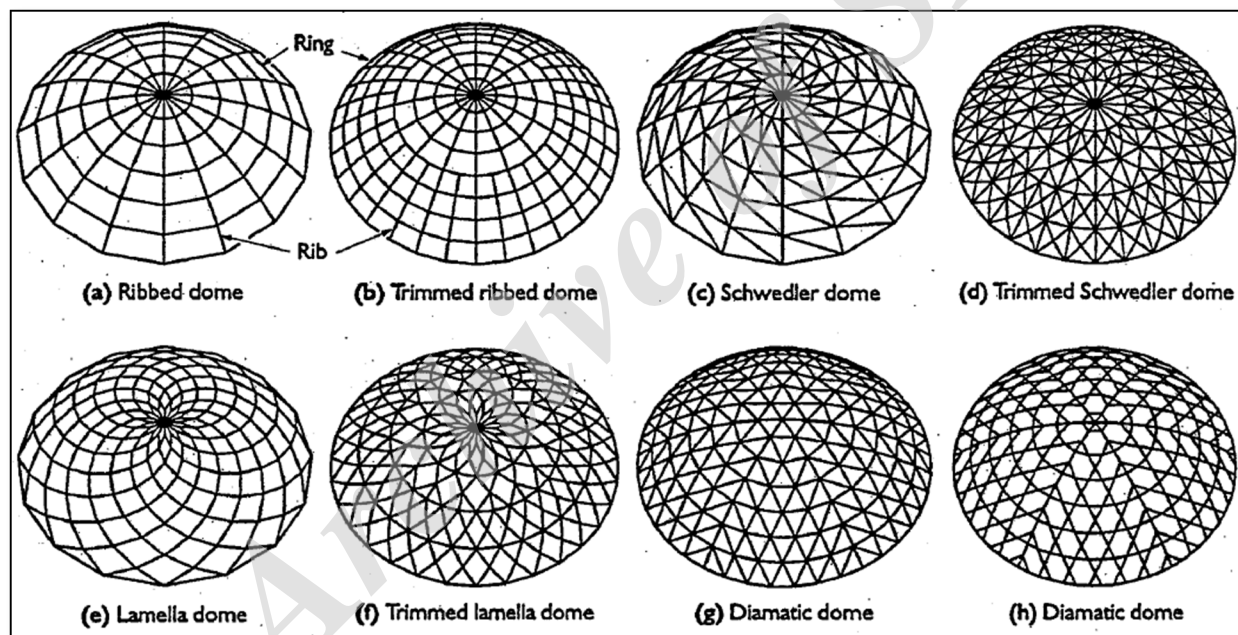
شکل ۳: نمونه‌هایی از چلیک‌ها

### ۳-۱- گنبدها

گنبد از طریق قوسی کردن شبکه‌ها در همه جهات به وجود می‌آید و می‌تواند بخشی از یک کره و یا سهموی باشد. همچنین می‌توان از ترکیب چندین گنبد در کنار هم استفاده کرد. بسته به رفتار و ساختار متفاوت گنبدها می‌توان اشکال متنوعی نیز به وجود آورد که هر کدام زیبایی خاص خود را در نقش‌های معماری و سازه‌ای دارد. چند نمونه از گنبدها و با رفتارهای متفاوت در زیر آمده است.

- گنبد دنده‌ای (Ribbed Dome): شامل تعدادی دنده و رینگ متقاطع است. یک دنده شامل گروهی از اعضا است که روی خط نصف‌النهاری قرار دارند و یک رینگ شامل گروهی از اعضا است که یک چند ضلعی افقی را تشکیل می‌دهند. شکل (a-۴) و (b-۴)
- گنبد شولدر (Schwedler Dome): یک مهندس آلمانی به نام "شولدر" در قرن نوزدهم فرم اصلاح شده‌ای گنبد دنده‌ای را با مهاربندی چهار ضلعی‌های آن ابداع کرد که به نام وی اسم گذاری شده است. (شکل (c-۴) و (d-۴))

- گنبد لَملا (Lamella Dome): این گنبد دارای آرایش مورب بوده و می‌تواند شامل یک یا چند رینگ باشد. (شکل (e-۴) و (f-۴))
- گنبد دیامتیک (Diamatic Dome): از قطاع‌های مثلثی مشابه تشکیل شده است و به لحاظ تیپ‌بندی‌های اجرایی دارای انواع مختلفی می‌باشد. (شکل (g-۴) و (h-۴))
- گنبد شبکه‌ای (Grid Dome): این گنبدها از طریق تصویر کردن شبکه مسطح بر روی سطوح گنبدی ایجاد می‌شود. گنبدهای شبکه‌ای معمولاً خفته‌تر هستند و نسبت ارتفاع به دهانه آن‌ها کوچکتر از سایر گنبدها می‌باشد. (شکل (i-۴) و (j-۴))
- گنبد ژئودزیک (Geodesic Dome): از تصویر آرایش چند ضلعی‌ها بر روی سطوح منحنی بدست می‌آید. (شکل (k-۴) و (L-۴))
- گنبد اسکالپ: این گنبدها عموماً برای دهانه‌های بالای ۱۰۰ متر استفاده می‌شود و همانند گنبدهای دیاماتیک، در زمان اجرا تیپ‌بندی مصالح متنوع می‌شود. گنبدهای دو یا چند لایه نیز از ترکیب آرایش‌های اصلی به همراه اعضای جان به وجود می‌آیند.



شکل ۴: نمونه‌هایی از گنبدها

همچنین می‌توان از کنار هم قرار دادن قسمتی از گنبدها، طرح‌های متفاوتی بوجود آورد که در شکل (۵) نمونه‌ای از آن نشان داده شده است.



شکل ۵: نمونه ای از مجموعه چند گنبد

#### ۱-۴- مزایای سازه‌های فضاکار

- **تقسیم بار**

اولین مزیت سازه‌های فضاکار مشارکت اغلب اعضای سازه در توزیع بار می‌باشد. در شبکه‌های سه بعدی بارهای متمرکز به صورت یکنواخت درون سازه و تکیه‌گاه توزیع می‌شوند و تأثیر آن در اندازه اعضا و تکیه‌گاهها و در نهایت هزینه ساخت نمایان می‌گردد.

- **نصب تأسیسات**

به دلیل وجود فضای باز بین دو لایه در شبکه‌های فضاکار، امکان نصب تأسیسات مکانیکی و الکتریکی و کانال‌های هوا در ارتفاع سازه به سادگی میسر می‌باشد و چنانچه نیاز به تجهیزات سنگین باشد با تقسیم نیرو بین اعضا و گره‌ها مشکلی متوجه سازه نمی‌شود.

- **مقاومت**

شبکه‌های فضاکار سازه‌های مقاومی هستند و با فروریختن تعداد محدودی از اعضا سازه دچار فروپاشی نمی‌شود.

- **اجزای مدولار**

برای اجزای سازه‌های فضاکار می‌توان از اجزا پیش‌ساخته و نصب آن در سایت بهره گرفت. به همین دلیل دقت کار و سرعت اجرا بسیار بالاست و به راحتی قابل توسعه و حتی جمع‌آوری و انتقال به محل دیگر می‌باشد.

- **آزادی در انتخاب محل تکیه‌گاهها**

امکانات زیادی در انتخاب محل و نوع تکیه‌گاه‌های سازه‌های فضاکار وجود دارد. این قابلیت به معماران آزادی عمل داده و حتی می‌توانند ستون‌ها را در محدوده دیوارهای داخلی پنهان کنند.

### • هندسه منظم و زیبایی

برای سهولت در ساخت، اغلب سازه‌های فضاکار الگوی منظمی دارند و این تقارن تأثیرات مثبت معماری را در برمی‌گیرد. با خلاقیت‌های معماری می‌توان نقش‌ها و طرح‌های متفاوتی از یک سازه فضاکار ایجاد نمود.

### ۱-۵- انواع روش‌های تحلیل در برابر باد

سه روش برای تحلیل آثار ناشی از بار باد وجود دارد:

روش اول: تحلیل لحظه به لحظه با یک رکورد موجود بار باد

با نصب سنسورها در هر گره مدل آزمایشگاهی سازه از طریق آزمایش و یا رکورد مصنوعی سرعت باد در هر گره بدست آمده و فشار از رابطه (۱ و ۲) محاسبه می‌شود:

$$P(z, t) = \frac{1}{2} \rho V^2(z, t) \quad (1)$$

$P(z, t)$ : فشار بار باد در هر نقطه به ارتفاع  $Z$  در زمان  $t$

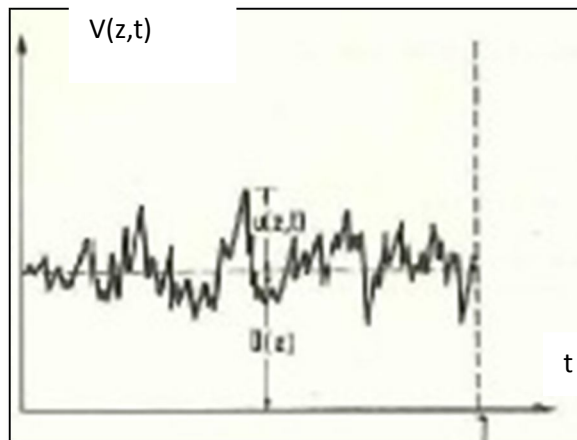
$\rho$ : چگالی هوا

$V(z, t)$ : سرعت باد

$$V(z, t) = \bar{V}_z + V_{(z, t)} \quad (2)$$

$\bar{V}_z$ : سرعت متوسط

در شکل (۶) نمونه‌ای از تغییرات سرعت باد در هر نقطه از ارتفاع سازه نشان داده شده است.



شکل ۶: تغییرات سرعت باد در هر نقطه از ارتفاع سازه

با نوشتن معادله تعادل (۳) دینامیکی و حل آن، مقادیر جابجایی  $(y)$ ، سرعت  $(\dot{y})$  و شتاب  $(\ddot{y})$  بدست می‌آید:

$$[M]\{\ddot{y}\} + [C]\{\dot{y}\} + [K]\{y\} = \{P(z, t)\} \quad (۳)$$

$[M]$ : ماتریس جرم سازه

$[C]$ : ماتریس میرایی سازه

$[K]$ : ماتریس سختی سازه

مقادیر  $y(t)$ ،  $\dot{y}(t)$  و  $\ddot{y}(t)$  پس از حل معادله دینامیکی، در کلیه درجات آزادی و در کلیه لحظاتی که بار باد اعمال می‌شود، بدست می‌آید.

این روش، روش نسبتاً دقیقی است اما انتخاب رکورد سرعت برای همه نقاط سازه کار آسانی نیست، بار باد با توجه به سرعت‌های مختلف متفاوت بوده و گاهی نیاز به اصلاح و مقیاس‌بندی رکورد دارد که دارای پیچیدگی‌های خاص خود می‌باشد. به همین دلیل از این روش کمتر استفاده می‌شود.

روش دوم: استفاده از طیف فشار باد و یا طیف سرعت:

با استفاده از رکوردهای مربوط به سرعت باد و با استفاده از روش‌های عددی (مانند سری فوریه) طیف مربوط به فشار در نقاط مختلف سازه تشکیل شده و با استفاده از این طیف‌ها، سازه با انتخاب تعدادی از مودهای تغییر شکل به روش دینامیکی تحلیل می‌شود. این روش مناسب‌تر از روش لحظه به لحظه بوده و مقادیر ماکزیمم جابجایی را بدست می‌دهد. در اینجا از تحلیل به روش ارتعاشات تصادفی استفاده می‌شود.

روش سوم: روش استاتیکی معادل با اثرات تشدید دینامیکی

در آیین‌نامه‌های موجود عمدتاً از این روش استفاده می‌کنند و اصول این روش به شرح زیر می‌باشد:  
فشار در هر نقطه از رابطه (۴) بدست می‌آید:

$$P = qGC_p \quad (۴)$$

$P$ : فشار در هر نقطه

$q$ : فشار متناظر سرعت مبنای باد

$G$ : اثر دینامیکی (ضریب تند باد) (Gust Factor)

$C_p$ : ضریب فشار (Pressure Coefficient) که از روش‌های تجربی و استفاده از تونل باد محاسبه می‌شود.

$q$ : در حالت کلی از فرمول (۵) محاسبه می‌شود:

$$q = \frac{1}{2} \rho V_o^2 \cdot C_{exposure} \cdot C_{terrain} \cdot C_{direction} \cdot C_{importance} \cdot C_{other} \quad (۵)$$

که در آن

$\rho$ : چگالی هوا

$V_o$ : سرعت مبنای باد

$C_{exposure}$ : ضریب مربوط به پروفیل سرعت و تغییرات ارتفاع

$C_{terrain}$ : ضریب توپوگرافی و نوع زمین

$C_{direction}$ : ضریب جهت باد

$C_{importance}$ : ضریب اهمیت ساختمان

$C_{other}$ : سایر ضرایب از قبیل احتمالات مربوط به وقوع و بازگشت بار و غیره

ضریب بادگیر  $C_e$  نمایانگر تغییرات سرعت باد با ارتفاع و همچنین آثار تغییر ویژگی‌های زمین اطراف و توپوگرافی محل می‌باشد و ضریب توپوگرافی نیز برای تغییرات سرعت در ارتفاع به کار می‌رود که برای مناطق مختلف بادگیری در آیین‌نامه‌ها

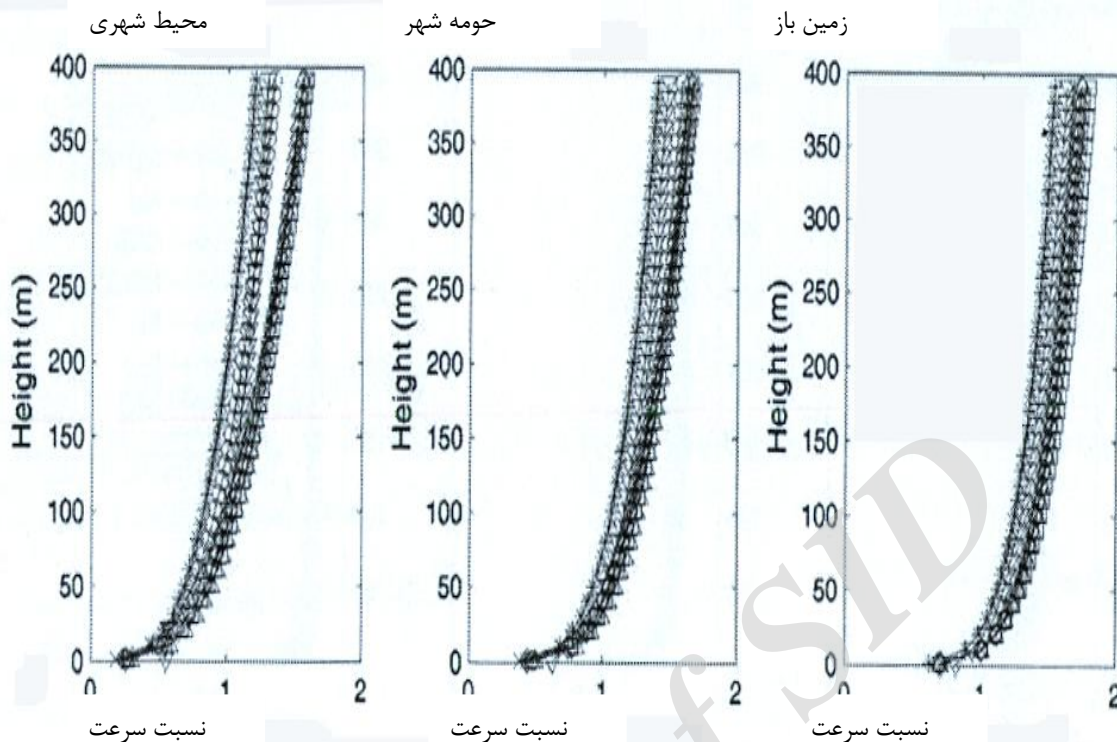


ضرایبی پیشنهاد شده است. در زمینه محاسبه ضرایب اثر دینامیکی، تغییرات ارتفاع، توپوگرافی، جهت باد و اهمیت ساختمان تحقیقات و آزمایش های فراوانی صورت گرفته. همچنین در نحوه محاسبه این ضرایب تفاوت عمده ای بین ساختمان های بلند و گنبد های فضاکار نمی باشد. اما ضریب فشار به شکل سازه مرتبط می باشد و مقدار عددی آن با تغییر هندسه عوض می شود. در نتیجه بررسی دقیق ضریب فشار حایز اهمیت می باشد. مقدار این ضریب در آیین نامه های مختلف بر اساس آزمایشاتی که انجام داده اند متفاوت می باشد. هدف این طرح مقایسه آیین نامه های متفاوت با یکدیگر و همچنین مقایسه با آخرین آزمایشات تونل باد می باشد تا پس از تعیین مناسب ترین و کارآمدترین آیین نامه از جهت دقت و سهولت اجرا، مقدار این ضرایب اصلاح گردیده و ضرایب فشار باد جدید و دقیق تر جهت محاسبات سازه ای و استفاده در آیین نامه ها پیشنهاد گردد.

### مرور کارهای قبلی

به عنوان قدیمی ترین سازه های فضاکار می توان از داربست هایی که برای نگهداری چادرها استفاده می شد، نام برد. از جمله قدیمی ترین این چادرها چندی پیش در مناطقی از چین باستان کشف شد. در روم باستان ایران دوره صفویه هم ساخت سازه های شبکه ای و سه بعدی در قالب سالن های تجمع، آمفی تئاترها، قصرها و مساجد اسلامی نمود داشته است. اولین شبکه چند لایه توسط الکساندر گراهام بل در سال ۱۹۰۶ برای کایت پرواز ساخته شد. برای ساخت این شبکه از اعضای با طول یکسان و اتصالات ساده استفاده شده بود. وی در آن زمان نشان داد که می توان با قرار دادن درست اعضا در کنار هم، سازه های محکم و سبک ساخت. کاربرد عملی اینگونه شبکه ها پنجاه سال بعد در سازه ها نمود پیدا کرد. از جمله خواص آن می توان به زیبایی معماری و امکان ایجاد طرح های خلاقانه و همچنین مقاومت خوب در برابر بارهای مختلف اشاره کرد.

سرعت باد با زیاد شدن ارتفاع افزایش می یابد. مقایسه تغییرات سرعت ( $V_z$ ) برای هشت آیین نامه مختلف در شکل (۷) آورده شده است.



ASCE

استرالیا و نیوزلند

ژاپن

چین

کانادا

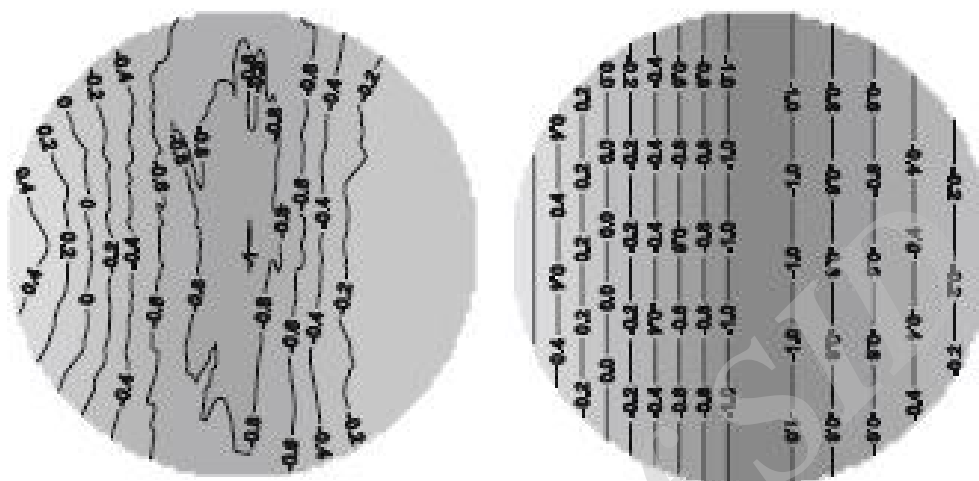


شکل ۷: مقایسه تغییرات سرعت در ارتفاع برای آئین‌نامه‌های مختلف

مشاهده می‌شود تغییرات سرعت در ارتفاع برای آئین‌نامه‌های مختلف تقریباً یکسان بوده و تفاوت چندانی با یکدیگر نشان نمی‌دهند.

در هر نقطه از سازه می‌توان ضریب فشار را با استفاده از آئین‌نامه‌های مختلف محاسبه و مقایسه نمود. در این طرح برای گنبد‌های فضاکار اسکلتی به طور مفصل در مورد این ضریب توضیح داده شده و مقادیر این ضرایب با یکدیگر و با آزمایشات صورت گرفته در تونل باد مقایسه گردیده است. مقادیر این ضرایب با تغییر نسبت ارتفاع به دهانه تغییر می‌کند.

در آئین‌نامه‌ها مقادیر  $C_p$  در هر مقطع عمود بر جهت وزش باد ثابت در نظر گرفته شده است در صورتی که آزمایشات و نصب سنسورها اندکی اختلاف را نشان می‌دهند. در شکل (۸) خطوط تراز فشار گنبد در آزمایشگاه و در آئین‌نامه‌ها مقایسه شده است.



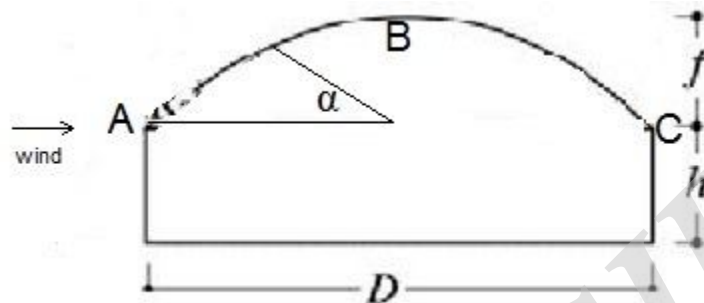
شکل ۸: مقایسه خطوط تراز فشار آزمایشگاهی و آئین‌نامه‌ها

دقت به این نکته لازم است که اگر چه در آئین‌نامه‌ها مقدار  $C_p$  در جهت عمود بر وزش باد ثابت در نظر گرفته شده، اما جهت آن در هر گره همواره عمود بر سطح گنبد می‌باشد و پس از تجزیه در راستاهای  $X$  و  $Y$  و  $Z$ ، مولفه‌ها متفاوت می‌باشند. در این طرح آثار اندرکنش پوشانه و سازه در نظر گرفته نشده است و همچنین از اثرات تغییر شکل سازه صرف نظر شده است. در عمل نیز به دلیل دو لایه بودن گنبدها و صرفاً وجود نیروی محوری، تغییر شکل‌های سازه ناچیز می‌باشد. هر چند برای آنالیز طیفی لحظه به لحظه (روش اول و دوم تحلیل)، اثرات تغییر شکل‌ها منظور می‌گردند.

مقادیر  $q$  و  $G$  معمولاً بستگی به شکل سازه ندارد ولی ضریب  $C_p$  بستگی به شکل سازه و سرعت باد منطقه دارد. با توجه به اینکه در این طرح بار باد بر گنبدهای فضاکار مورد بررسی قرار داده می‌شود، عمدتاً تغییرات  $C_p$  در آئین‌نامه‌های مختلف مورد توجه قرار خواهد گرفت. ضرایب  $q$  و  $G$  با توجه به نوع سازه و منطقه مورد نظر قابل محاسبه می‌باشند. جهت مقایسه این ضرایب در مرجع [ ] تعدادی سازه بلند مورد مطالعه قرار داده شده‌اند و نشان داده شده است که مقادیر پارامترهای ذکر شده در آئین‌نامه‌های مختلف متفاوت می‌باشند، ولی نیروی کلی برشی مربوط به بار باد و همچنین ضریب  $G$  تقریباً مساوی می‌باشند.

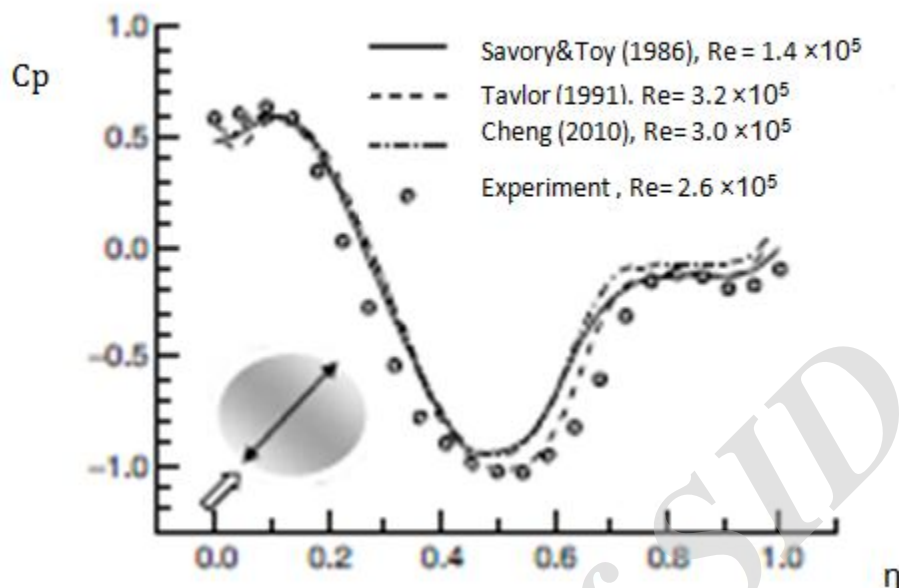
## ۱-۲- بررسی و تطبیق آزمایشات با یکدیگر

دو پارامتر اساسی در گنبدها نسبت "ارتفاع به دهانه"  $f/D$  و نسبت "پایه به دهانه"  $h/D$  می باشد که در شکل (۹) نشان داده شده است. در این شکل، نقطه  $A$  اولین نقطه در جهت وزش باد، نقطه  $B$  وسط گنبد در بالاترین ارتفاع، و نقطه  $C$  آخرین نقطه گنبد و پشت به باد می باشد. همچنین زاویه  $\alpha$  از زاویه صفر درجه جهت نقطه  $A$  شروع شده و تا زاویه  $180^\circ$  درجه جهت نقطه  $C$  که پشت به باد می باشد، ادامه می یابد.



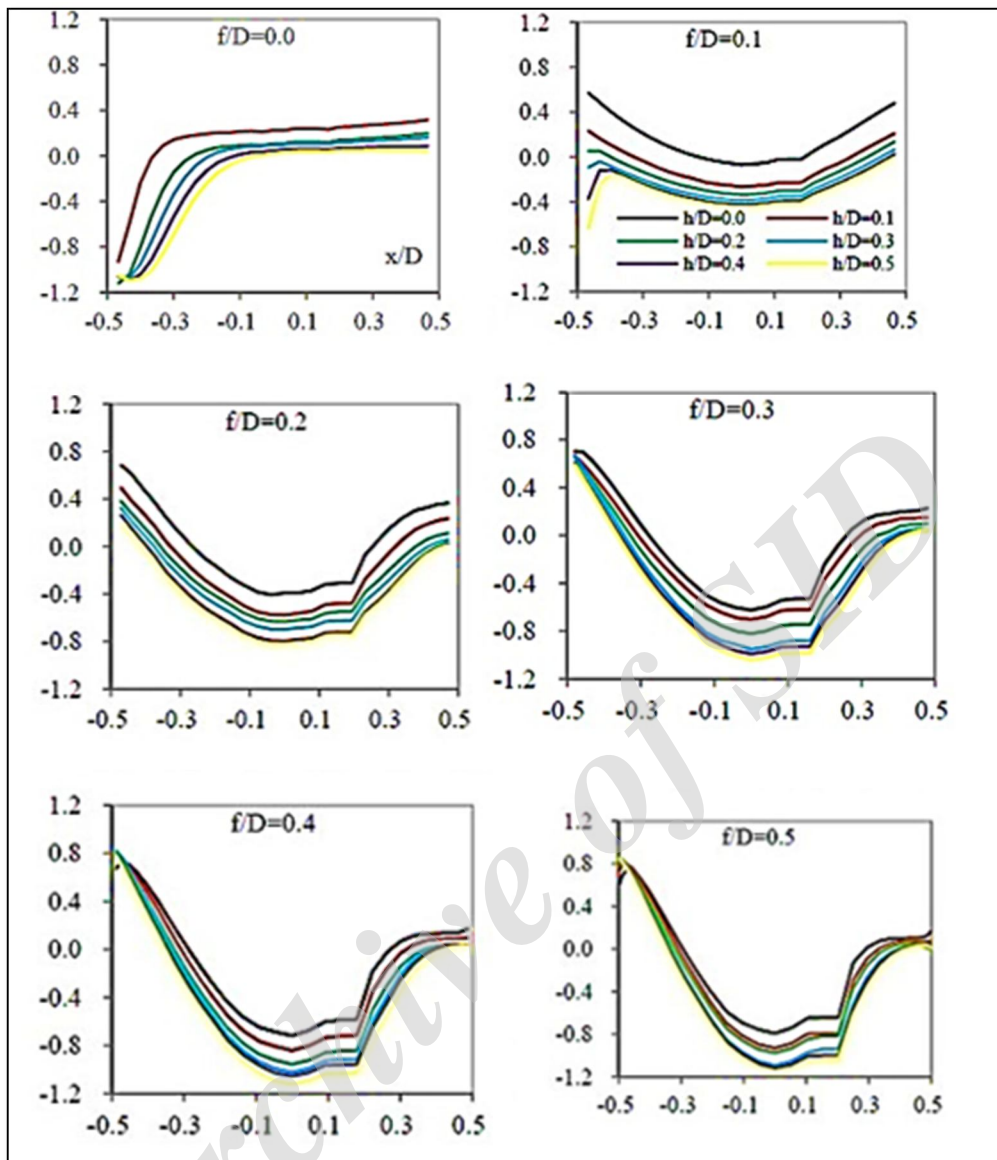
شکل ۹: نسبت های ارتفاع، پایه و دهانه گنبد

در آیین نامه های مختلف، مقادیر پیشنهادی ضریب فشار  $C_p$  بر اساس نسبت های مختلف  $f/D$  و  $h/D$  متفاوت می باشد. محققان برای گنبد بدون پایه با نسبت ارتفاع به دهانه ۰,۵، تغییرات ضریب فشار را با نصب سنسورهایی روی گنبد محاسبه نموده اند که در شکل (۱۰) آمده است.



شکل ۱۰: مقادیر بدست آمده  $C_p$  جهت گنبد بدون پایه با نسبت ارتفاع به دهانه ۰,۵.

در شکل (۱۰)،  $\eta$  زاویه نرمال شده می باشد که از مقدار "صفر" برای اولین نقطه در جهت وزش باد (نقطه  $A$  و زاویه  $\alpha$  برابر صفر درجه) تا عدد "یک" جهت آخرین در جهت وزش باد (نقطه  $C$  و زاویه  $\alpha$  برابر ۱۸۰ درجه) تغییر می کند. چهار مدل شبیه سازی شده شکل (۱۰) در تونل باد، با اندازه های متفاوت، اعداد رینولدز متفاوت، در سال های مختلف و همچنین در کشورهای گوناگون مدل سازی و آزمایش شده است. مشاهده می گردد نتایج با یکدیگر تطابق خوبی دارد. ضرایب فشار  $C_p$  جهت نسبت های مختلف  $f/D$  و  $h/D$  در تونل باد بدست آمده که نتایج آن در شکل (۱۱) می باشد. جهت تطبیق و صحت سنجی، از شکل (۱۱) نمودار مربوط به گنبد بدون پایه و نسبت ارتفاع به دهانه ۰,۵ را استخراج کرده و با شکل (۱۰) مقایسه می گردد. مشاهده می شود نتایج دو تونل باد مشابه بوده و می توان به سایر نتایج جهت  $f/D$  و  $h/D$  ها اتکا نموده و آیین نامه ها را با این آزمایشات مقایسه نمود.



شکل ۱۱: نتایج آزمایشگاهی برای  $f/D$  و  $h/D$  های متفاوت

۲-۱-۱ - ۳-۲-۱ کارهای نظری نویسنده

## ۲-۲- بارهای وارد بر سازه‌های فضاکار

از جمله ترکیب کنش‌هایی که لازم است در طراحی عملی سازه‌های گنبدی شکل بزرگ منظور گردد، موارد زیر حائز اهمیت می‌باشند:

(۱) بار مرده و بار برف روی کل گنبد

(۲) بار مرده و بار برف نامتقارن

(۳) بار مرده و بار باد

(۴) ترکیبات بار شامل آثار ناشی از تغییرات دما، آثار ناکاملی نشست تکیه‌گاهها و ...

(۵) بارهای اعمالی در حین اجرا با توجه به روش ساخت، بافت، نصب

سازه‌های فضاکار شبکه‌ای معمولاً سازه‌هایی سبک می‌باشند که نیروی باد در آن‌ها می‌تواند نقش تعیین کننده داشته باشد. توزیع نیروی باد بر روی سطوح گنبد‌ها هنوز براساس مفروضاتی تقریبی در نظر گرفته می‌شود. کارهای تجربی و آزمایش‌های تونل باد معمولاً قابل اطمینان‌تر می‌باشند. تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که شدت توزیع باد به طور عمده به نسبت ارتفاع به دهانه بستگی داشته و همچنین وجود ساختمان‌های مجاور بر توزیع نیروی باد تأثیر دارند.

فرمول‌هایی برای میزان نیروی باد و اثر آن بر سازه‌های فضاکار بدست آمده که عمدتاً برای سازه‌های متقارن کاربرد دارند. برای سازه‌های خاص و یا سازه‌هایی که دارای تقارن نیستند، باید از مدل آزمایشگاهی و یا برنامه‌ها و مدل‌های عددی استفاده شود.

برای محاسبه نیروی باد به داشتن سرعت باد مبنا نیاز خواهد بود. بنا بر تعریف، سرعت باد مبنا، مینگین سرعت اندازه‌گیری شده به مدت سه ثانیه و در ارتفاع ۱۰ متری از تراز سطح زمین می‌باشد، مشروط بر آنکه ارتفاع موانع اطراف آن کمتر از ۱۰ متر باشد. اطلاعات مربوط به سرعت باد را می‌توان از سازمان هواشناسی و یا داده‌های معتبر بدست آورد. از سه روش برای محاسبه بار باد می‌توان استفاده کرد:

(۱) روش تحلیل استاتیکی

(۲) روش تحلیل دینامیکی

(۳) روش تجربی

• روش تحلیل استاتیکی: برای سازه‌هایی قابل کار برد است که ارتفاع آنها زیاد نباشد و همچنین سازه دچار ارتعاشات طولانی نگردد.

• روش تحلیل دینامیکی: برای سازه‌هایی است که ارتفاع آنها بزرگ‌تر از چهار برابر عرض موثر و یا ۱۲۰ متر باشد. همچنین برای سازه‌هایی که در معرض ارتعاشات و پریودهای نوسانی زیاد می‌باشند از روش تحلیل دینامیکی استفاده می‌شود.

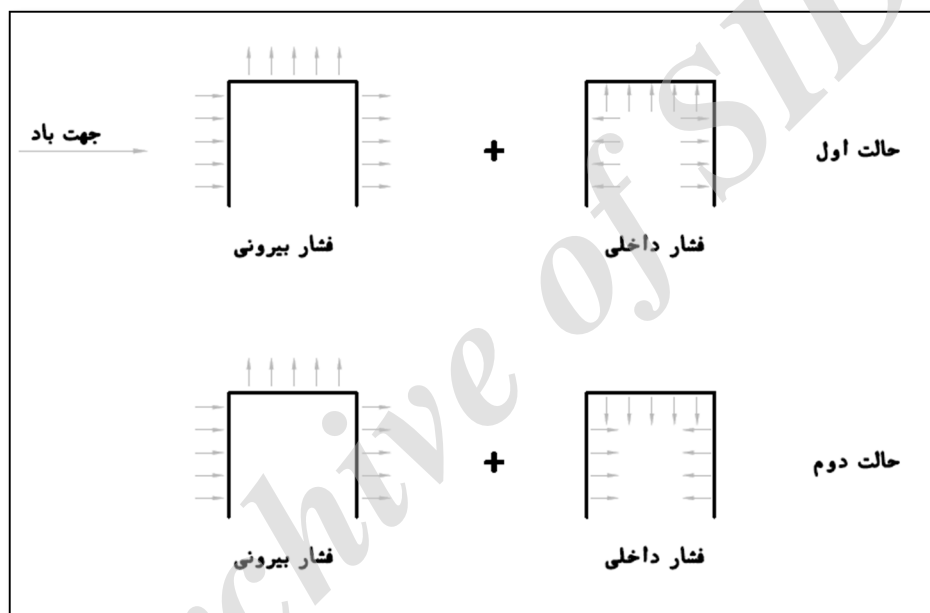
• روش تجربی: برخی سازه‌ها که اثرات گردبادی بر آنها اعمال می‌شود نمی‌توان با استفاده از روش دینامیکی تحلیل نمود و بر این اساس لازم است که در تونل باد شبیه‌سازی شوند.

در ادامه روش‌های بارگذاری آثار ناشی از باد به‌نحوی که در تعدادی از آئین‌نامه‌های معتبر قید گردیده، مورد اشاره و مقایسه قرار داده شده اند.

## ۳-۲- بررسی آیین نامه ها

## ۳-۲-۱- تعیین فشار باد از طریق آیین نامه سازه‌های فضاکار، نشریه شماره ۴۰۰

به صورت کلی فشار وارد بر یک سازه،  $p$ ، برابر است با اختلاف فشار بیرونی،  $p_{out}$  و داخلی  $p_{in}$ . فشار بیرونی در برخی نقاط به صورت فشاری و برخی نقاط به صورت مکش می‌باشد. فشار داخلی که ناشی از بازشوها و اثر ورود و خروج باد به سازه می‌باشد که حالت رفت و برگشتی دارد، یک بار تماماً به صورت فشار و یک بار تماماً به صورت مکش در نظر گرفته می‌شود. در شکل (۱۲)، دو حالت مذکور نشان داده شده و در فرمول (۶) خلاصه گردیده‌اند.



شکل ۱۲: جمع فشار خارجی و فشار داخلی در دو حالت

$$p = p_{out} \pm p_{in} \quad (۶)$$

فشار باد برابر است با حاصلضرب ضرایبی در فشار متناظر با سرعت مینا ( $q$ ). فشار متناظر سرعت مینا نیز از حاصلضرب ضرایبی در مجذور سرعت مینای باد  $V^2$  بدست می‌آید. معادلات مربوط به فشار و فشار داخلی در فرمول‌های (۷ و ۸) آورده شده است.

$$P_{out} = (I_w \times C_e \times C_g \times C_p)q \quad (۷)$$

$$P_{in} = (I_w \times C_e \times C_{gi} \times C_{pi})q \quad (۸)$$

که در آن:

$I_w$ : ضریب اهمیت



$C_e$  : ضریب بادگیری $C_g$  : ضریب تندباد $C_p$  : ضریب فشار $q$  : فشار متناظر با سرعت مبنا $i$  : پارامترهای داخلی (in)

۳-۴ تعریف ضرایب مختلف در رابطه فشار براساس آئین نامه شماره ۴۰۰  
ضریب اهمیت  $I_w$  در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول ۱: ضریب اهمیت  $I_w$ 

گروه ساختمان	ضریب اهمیت
سازه‌های کوتاه و سازه‌های طبقه‌بندی شده در گروه عمر مفید ۱	۰/۸
سازه‌های با ارتفاع متوسط و سازه‌های طبقه‌بندی شده در گروه عمر مفید ۲	۱
سازه‌های بلند و سازه‌های طبقه‌بندی شده در گروه عمر مفید ۳	۱/۱۵
سازه‌های با اهمیت ویژه از جمله سازه‌های مورد بهره‌برداری در مدیریت بحران پس از وقوع سوانح طبیعی و سازه‌های طبقه‌بندی شده در گروه عمر مفید ۴.	۱/۲۵

 $C_e$  : ضریب بادگیری

$C_e$  بیانگر اثر باد در ارتفاع می‌باشد و همچنین اثرات ناهمواری یا همواری و توپوگرافی اطراف سازه در این ضریب لحاظ شده است و به صورت زیر بدست می‌آید:

(الف) در مورد نواحی باز به نحوی که ساختمان‌ها، درخت‌ها و موانع به صورت پراکنده در اطراف سازه باشند ضریب بادگیری از رابطه (۹) محاسبه می‌شود:

$$C_e = \left(\frac{h}{10}\right)^2 \geq 0.9 \quad (9)$$

(ب) در مناطقی که دارای ناهمواری زیاد است، مانند شهرها و جنگل‌ها، ضریب  $C_e$  از رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود:

$$C_e = 0.7 \left(\frac{h}{10}\right)^2 \geq 0.7 \quad (10)$$

دقت شود این ناهمواری‌ها در بالا دست سازه باید بزرگ‌تر از یک کیلومتر و ۱۰ برابر ارتفاع سازه باشند.

(پ) اگر ناهمواری کمتر از یک کیلومتر باشد ( $X_r < 1km$ ) و ارتفاع سازه کمتر از ۱۰۰ متر باشد. ضریب  $C_e$  مقداری بین (الف) و (ب) خواهد داشت.

در روابط فوق  $h$  عبارتست از ارتفاع مبنا به شرح زیر:

برای ساختمان‌های کوتاه (کوچکتر از ۲۰ متر)

$h$ : ارتفاع میانگین سقف یا ۶ متر (بزرگ‌ترین انتخاب شود)

برای ساختمان‌های بلند:

(وجه رو به باد =  $h$ )

(وجه پشت به باد =  $\frac{h}{2}$ )

(سقف و دیوارهای جانبی =  $h$ )

(برای فشار درونی  $= \frac{h}{2}$ )

$C_g$ : اثر تندباد

برای کل سازه و اعضای اصلی:  $C_g = 2$

برای فشار و مکش وارد بر نما و پوشانه‌ها:  $C_g = 2.5$

برای فشار و مکش درونی:  $C_{gi} = 2$

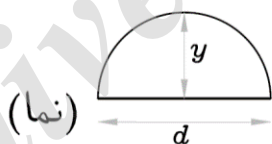
$C_p$ : ضریب فشار، برای گنبد‌های بدون پایه و برای هر نسبت ارتفاع به دهانه از جدول (۲) بدست می‌آید.



جدول ۲: ضریب  $C_p$  برای زوایای مختلف

$180^\circ$	$165^\circ$	$150^\circ$	$135^\circ$	$120^\circ$	$105^\circ$	$90^\circ$	$75^\circ$	$60^\circ$	$45^\circ$	$30^\circ$	$15^\circ$	$0^\circ$	$-a$
$+0.4$	$+0.3$	$+0.1$	$-0.2$	$-0.6$	$-1.0$	$-1.2$	$-1.1$	$-0.7$	$-0.1$	$+0.5$	$+0.9$	$+1.0$	$C_p$

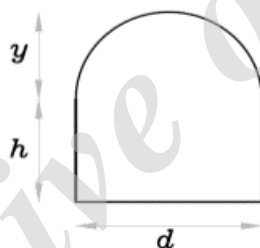
مقادیر کمینه و بیشینه  $C_p$  برای گنبد‌هایی که مستقیماً روی زمین قرار گرفته‌اند از جدول (۳) استخراج می‌شود.



جدول ۳: مقادیر بیشینه و کمینه ضریب  $C_p$  برای گنبد‌های بدون پایه

مقادیر بیشینه ضریب مکش $C_p$ در ناحیه مرکزی	مقادیر بیشینه ضریب فشار، $C_p$	نسبت ارتفاع به دهانه $\frac{y}{d}$
-۰/۳	+۰/۱	$\frac{1}{15}$
-۰/۳	+۰/۲	$\frac{1}{10}$
-۰/۴	+۰/۲	$\frac{1}{8}$
-۰/۵	+۰/۳	$\frac{1}{6}$
-۰/۶	+۰/۴	$\frac{1}{4}$
-۱/۰	+۰/۶	$\frac{1}{2}$

مقادیر ضریب  $C_p$  در سه نقطه "در جهت وزش باد"، "مرکز گنبد" و "خلاف جهت باد" برای گنبدهایی که روی یک سازه چلیکی به ارتفاع  $h$  قرار دارند، از جدول (۴) بدست می‌آید.



جدول ۴: مقادیر  $C_p$  برای گنبد‌های قرار گرفته روی پایه

موقعیت			نسبت $\frac{h}{d}$	نسبت $\frac{y}{d}$
در سمت پشت بادگیر	در مرکز گنبد	درست در منتهی‌الیه سمت بادگیر		
-۰/۴	-۱/۵	+۰/۹	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$
-۰/۴	-۱/۷	+۰/۸		
-۰/۵	-۱/۷	+۰/۸		
-۰/۴	-۰/۹	-۰/۱	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{6}$
-۰/۳	-۰/۶	-۱/۲		$\frac{1}{10}$
-۰/۳	-۰/۵	-۱/۴		$\frac{1}{15}$
-۰/۲	-۰/۴	-۱/۴		$\frac{1}{20}$
-۰/۴	-۱/۱	-۱/۴		$\frac{1}{6}$
-۰/۴	-۰/۸	-۱/۷		$\frac{1}{10}$
-۰/۴	-۰/۵	-۱/۵		$\frac{1}{15}$
-۰/۴	-۰/۵	-۱/۴		$\frac{1}{20}$

مشاهده می‌شود که اگر  $\frac{y}{d}$  کمتر از  $\frac{1}{5}$  و  $\frac{h}{d}$  بیشتر از  $\frac{1}{4}$  شود، گنبد تماماً در مکش قرار می‌گیرد  
 $q$ : فشار متناظر با سرعت مبنای  $V$ :  
 مقدار  $q$  از رابطه (۱۱) بدست می‌آید.

$$q = \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (11)$$

مقدار  $q$  برای دوره بازگشت  $N$  از رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود.

$$q(N) = q(10) + [q(100) + q(10)] \left[ \frac{\ln N}{\ln 10} - 1 \right] \quad (12)$$

$N$ : دوره بازگشت برحسب سال می‌باشد.

### ۲-۳-۲ - محاسبه بار باد به روش آئین‌نامه Euro Code []

برای محاسبه فشار نیاز به داشتن سرعت پایه باد ( $V_b$ ) می‌باشد که از رابطه (۱۳) بدست می‌آید:

$$V_b = C_{direction} \times C_{season} \times V_{bo} \quad (13)$$

$V_b$ : سرعت باد

$V_{bo}$ : سرعت پایه باد

$C_{direction}$ : ضریب جهت

$C_{season}$ : ضریب معتدل کردن

طبق توصیه آئین نامه می توان ضرایب  $C_{dir}$  و  $C_s$  را یک در نظر گرفت.

$V_{bo}$  سرعت متوسط در ۱۰ دقیقه و در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین می باشد و سطح اطراف سازه باید دارای موانع کم باشد.

پس از محاسبه  $V_b$ ، پارامتری به نام  $q_b$  (فشار متناظر سرعت پایه) از رابطه (۱۴) بدست می آید:

$$q_b = \frac{1}{2} \rho V_b^2 \quad (14)$$

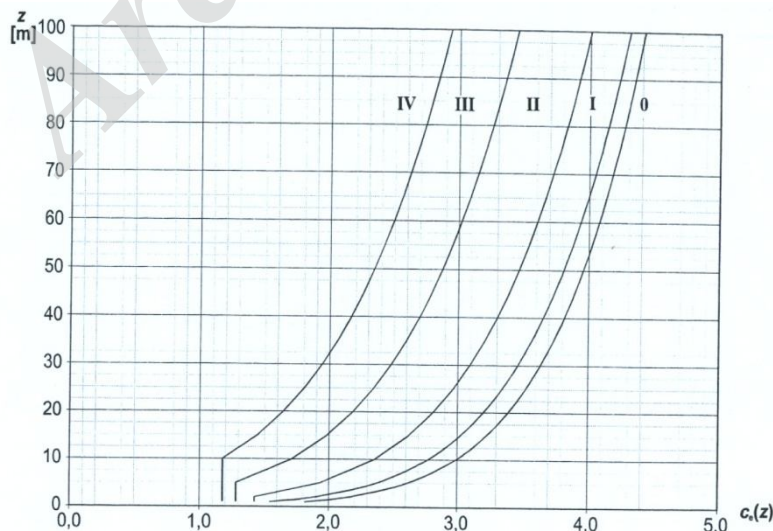
$\rho$  چگالی هوا که می توان آن را  $1.25 \frac{kg}{m^3}$  در نظر گرفت.

فشار متناظر سرعت حداکثر ( $q_{peak}$ ) برای قرارگیری در فرمول فشار از رابطه (۱۵) بدست می آید.

$$q_p(z) = q_b \times C_e(z) \quad (15)$$

$q_b$  فشار متناظر سرعت پایه

$C_e(z)$  ضریبی است که به ارتفاع سازه ( $Z$ ) و منطقه ای که سازه در آن واقع شده است (مناطق 0 تا IV) بستگی داشته و از شکل (۱۳) بدست می آید.



شکل ۱۳: ضریب  $C_e(z)$  برای مناطق مختلف

مناطق 0 تا VI در شکل (۱۳) به شرح زیر می‌باشد:

منطقه 0: منطقه ساحلی و آزاد کنار دریا

منطقه I: زمین مسطح و افقی بدون مانع

منطقه II: زمین با پوشش گیاهی کم و به دور از درخت و یا ساختمان

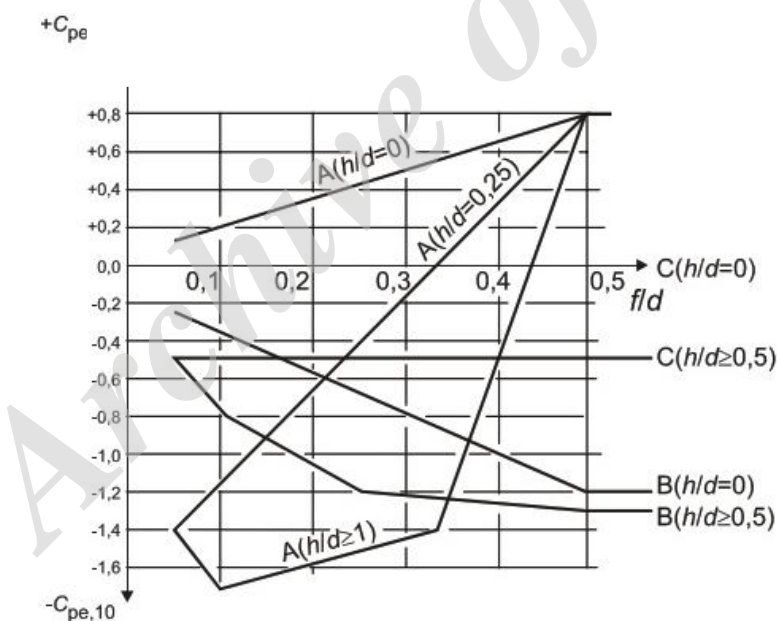
منطقه III: زمین با پوشش معمولی درخت و ساختمان

منطقه VI: زمینی که حداقل ۱۵ درصد آن ساختمان و درخت باشد.

هر چه ارتفاع سازه بیشتر و یا پوشش اطراف آن کمتر باشد، مقدار ضریب  $C_e(z)$  و همچنین  $q_b$  افزایش می‌یابد. فشار کلی وارد بر سازه از اختلاف فشار بیرونی و فشار درونی ناشی از باد مطابق رابطه (۱۶) بدست می‌آید.

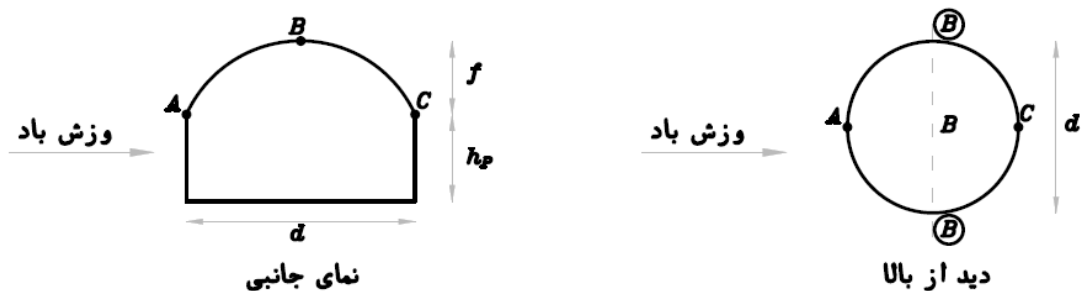
$$P = P_{external} - P_{internal} = C_{pe} \times q_p - C_{pi} \times q_p \quad (16)$$

$C_p$  (ضریب فشار برای گنبدها) از شکل (۱۴) بدست می‌آید.



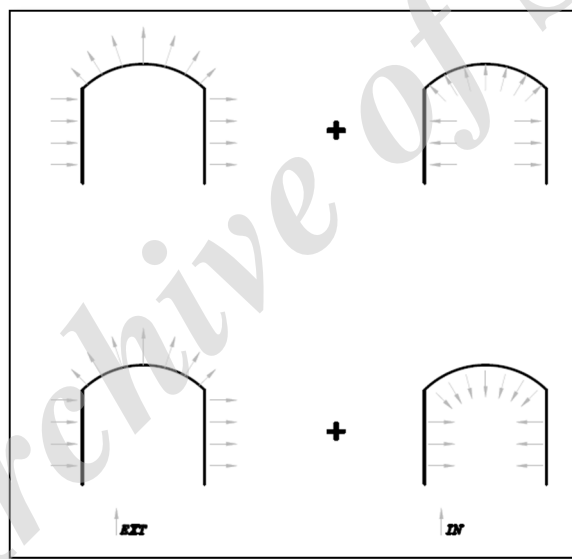
شکل ۱۴: محاسبه  $C_p$  در آئین نامه Euro Code

نقاط A, B و C در شکل (۱۵) مشخص شده است.



شکل ۱۵: نقاط A، B و C روی گنبد

فشار داخلی را یکبار به صورت تماماً فشاری و بار دیگر به صورت تماماً مکشی در نظر گرفته و بحرانی‌ترین مقدار فشار (P) را برای محاسبه نیروهای اعضا و طراحی در نظر می‌گیریم. باید دقت شود تمامی فشارهای محاسبه شده، مطابق شکل (۱۶) عمود بر سطوح سازه می‌باشند.



شکل ۱۶: جمع فشار خارجی و داخلی و عمود بودن فشار بر سطح

در نهایت فشار خارجی از رابطه (۱۷) بدست می‌آید:

$$P_{EXT} = C_p q_p = C_p (C_e(Z) \times q_b) = C_p \left( C_e(Z) \left( \frac{1}{2} \rho V_b^2 \right) \right) \quad (17)$$

۲-۳-۳- آئین‌نامه ASCE 1998-2002 []

فشار وارده بر سازه صلب از رابطه (۱۸) محاسبه می‌شود.

$$P = qGC_p - q_i(GC_{pi}) \quad (18)$$

q: فشار مبنای وارد بر سازه

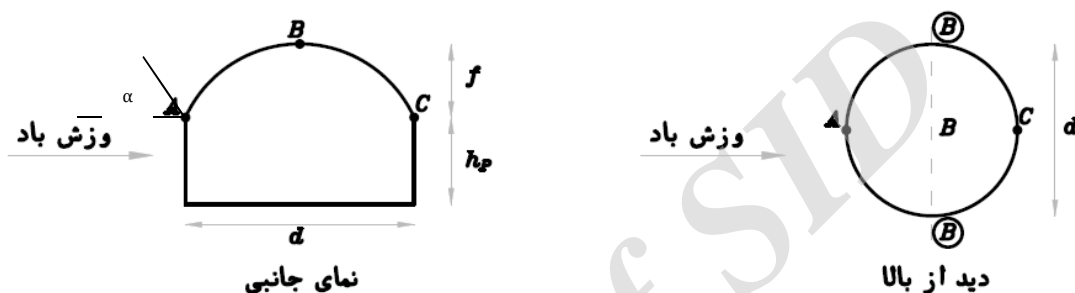
G: ضریب اثر دینامیکی که برای سازه‌های صلب ۰,۸۵ در نظر گرفته می‌شود.

(بنابر تعریف آئین‌نامه، سازه‌ای را صلب در نظر می‌گیریم که فرکانس آن بزرگتر و یا مساوی ۱ هرتز باشد.)

C<sub>p</sub>: ضریب فشار خارجی که برای سازه‌های گنبدی در آئین‌نامه ASCE در دو تیپ A و B تعریف می‌شود. تیپ A مشابه

آئین‌نامه Euro Code می‌باشد (شکل ۱۴). مقادیر C<sub>p</sub> در تیپ B تا زاویه  $\alpha = 25^\circ$  نشان داده شده در شکل (۱۷) ثابت

بوده و در سایر نقاط مشابه آئین‌نامه EuroCode می‌باشد.



شکل ۱۷: زاویه  $\alpha$  در تیپ B آئین‌نامه ASCE

مقدار ضریب  $GC_{pi}$  از جدول (۵) محاسبه می‌گردد.

جدول ۵: ضریب  $GC_{pi}$  در فشار داخلی

	$GC_{pi}$
سازه‌های باز	0.00
سازه‌های تقریباً بسته	$\pm 0.55$
سازه‌های بسته	$\pm 0.18$

برای مقدار  $GC_{pi}$  هم مقدار مثبت و هم مقدار منفی باید جایگذاری شود و بحرانی‌ترین مقدار فشار (P) در طراحی لحاظ گردد.

q: فشار سرعت مبنا که برای سمت باد در هر ارتفاع Z محاسبه می‌گردد. برای سمت مخالف باد، دیواره‌های جانبی و سقف، ارتفاع h سازه مبنای محاسبه در نظر گرفته می‌شود.

فشار مبنا، q، در ارتفاع Z از رابطه (۱۹) محاسبه می‌شود.

$$q_z \left( \frac{N}{m^2} \right) = 0.0613 K_z K_{zt} K_d V^2 I \quad (19)$$



$K_z$  عبارتست از ضریب فشار سرعت مبنای باد که به جغرافیای منطقه، زبری سطح و ارتفاع سازه بستگی دارد (مانند ضریب  $C_e(z)$  در Euro Code و  $C_e$  در آئین نامه سازه های فضاکار نشریه 400).  
به طور کلی مناطق از لحاظ زبری به چهار دسته تقسیم می شوند:

منطقه (A) خیلی زبر

منطقه (B) مناطق شهری، حومه شهرها و مناطق جنگلی یا هر منطقه ای که از ساختمان پوشانده شده باشد.

منطقه (C) زمین باز با پراکندگی زیاد و موانعی که ارتفاعشان از 9.1 متر کمتر باشد.

منطقه (D) زمین صاف و بدون مانع مانند سازه های دریایی و یا سازه هایی که در زمین های ماسه ای بنا می شوند.

بنابراین طبقه بندی،  $K_z$  از معادله (۱۹) از روابط (۲۰ و ۲۱) محاسبه می شود.

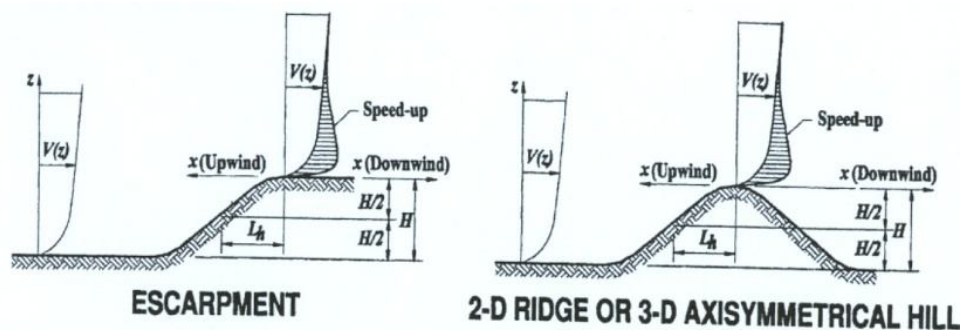
$$K_z = 2.01 \left( \frac{4.57}{z_g} \right)^{2/\alpha} \quad (20) \quad \text{برای } z < 4.57 \text{ m}$$

$$K_z = 2.01 \left( \frac{4.57}{z_g} \right)^{2/\alpha} \quad (21) \quad \text{برای } 4.57 \text{ m} < z < z_g$$

منطقه	$Z_g(m)$	$\alpha$
B	365.76	7
C	274.32	9.5
D	213.36	11.5

$K_{zt}$ : ضریب توپوگرافی منطقه بوده و اثر افزایش سرعت در مناطق با ارتفاع زیاد (مثل تپه ها) را لحاظ می کند. این کمیت از رابطه (۲۲) بدست آمده و در شکل (۱۸) نشان داده شده است.

$$K_{zt} = (1 + K_1 K_2 K_3)^2 \quad (22)$$



$$K_{zt} = (1 + K_1 K_2 K_3)^2$$

$K_1$  determined from table below

$$K_2 = \left(1 - \frac{|x|}{\mu L_h}\right)$$

$$K_3 = e^{-\gamma z/L_h}$$

شکل (۱۸): محاسبه ضریب  $K_{zt}$

اگر سازه روی بلندی مانند تپه نباشد  $K_{zt} = 1$

$K_d$  ضریب جهت باد می‌باشد و برای سازه‌های چلیکی و قوس‌دار ۰/۸۵ نظر گرفته می‌شود.

I: ضریب اهمیت سازه

V: سرعت پایه باد، که مشابه است با میانگین در ۳ ثانیه در ارتفاع ۱۰ متری و در یک زمین با پراکندگی کم موانع (منطقه C)

در نهایت فشار خارجی طبق آئین‌نامه ASCE از رابطه (۲۳) بدست می‌آید.

$$P_{EXT} = GC_p q = GC_p \times (0.0613 K_z K_{zt} K_d I V^2) \quad (23)$$

سایر آئین‌نامه‌ها

به دلیل حجم بالای اطلاعات، فرمول‌های مربوط به سایر آئین‌نامه‌ها در جدول (۶) آورده شده است و در اینجا به مقایسه ضرایب  $C_p$  اکتفا می‌شود.

جدول ۶: روابط آئین‌نامه‌ها

آئین‌نامه	سرعت	فشار دینامیکی	فشار وارد بر سازه
IS EuroCod	V	$q_{ref} = \frac{1}{2} \rho v^2$	$W = q_{ref} \times (C_{pe}) \times (C_{fe}) \times (C_{dyn})$
PrEN	$V_b = C_{dir} \cdot C_{season} \cdot V_{b_n}$	$q_p(z) = C_q \left(\frac{1}{2}\right) \rho V_b^2$	$W_e = q_p(z) C_{pe}$
ASCE-7	V	$q_z = \frac{1}{2} K_z K_{zt} K_d V^2 I$	$P = q(G C_p)$
AIJ	$U_H = U_o K_D E_H K_r w$	$q_H = \frac{1}{2} \rho U_H^2$	$W_f = q_H C_f G_f A$
AS/NZS	$V_{sit} = V M_d M_z M_s M_r$	$q_z = \frac{1}{2} \rho V_{sit}^2$	$P = q_z \cdot C_{fig} \cdot C_{dyn}$
BS	$V_c = V_b S_a S_d S_p S_b$	$q_s = \frac{1}{2} \rho V_c^2$	$P_z = q_s C_{pe} C_d$

ضرایب تعریف شده مشابه سایر آئین‌نامه‌های ذکر شده بوده و از آئین‌نامه‌های مختلف قابل برداشت می‌باشد.

۲-۳-۴ - ضرایب  $C_p$  در آئین‌نامه ژاپن

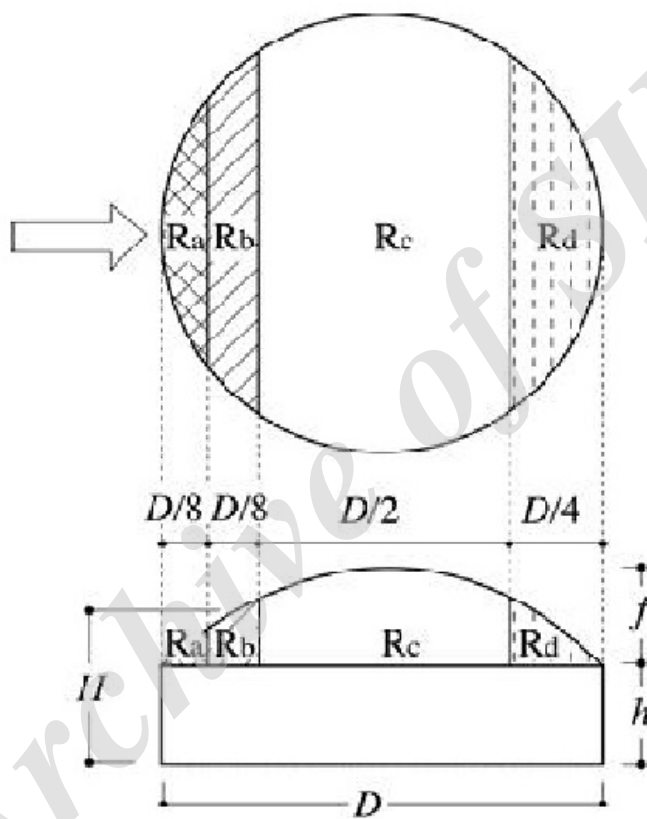
در آئین‌نامه ژاپن مطابق شکل (۱۹) گنبد به چهار قسمت تقسیم شده است:

- یک هشتم ابتدایی ( $R_a$ )

- یک هشتم دوم ( $R_b$ )

- یک دوم میانی ( $R_c$ )

- یک چهارم انتهایی ( $R_d$ )



شکل ۱۹: تقسیم‌بندی نواحی روی گنبد‌ها در آئین‌نامه ژاپن

مقادیر  $C_p$  به شرح جدول (۷) می‌باشد:

جدول ۷: ضرایب  $C_p$  از آئین نامه ژاپن

$f/D$	zone $R_a$ (positive)			zone $R_a$ (negative)		
	$h/D=0$	$h/D=0.25$	$h/D=1$	$h/D=0$	$h/D=0.25$	$h/D=1$
0	Not necessary to evaluate			-0.6	-1.4	-1.2
0.05	0.3	0	0	0	-1.0	-1.6
0.1	0.4	0	0	0	-0.6	-1.2
0.2	0.5	0	0	0	0	-0.4
0.5	0.7	0.6	0.6	not necessary to evaluate		

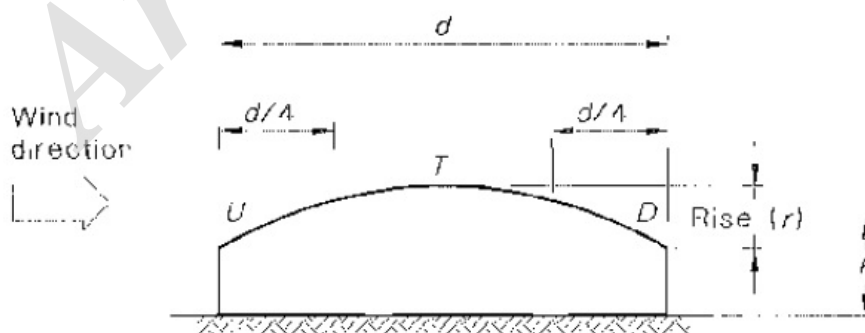
  

$f/D$	zone $R_b$			zone $R_c$			zone $R_d$		
	$h/D=0$	$h/D=0.25$	$h/D=1$	$h/D=0$	$h/D=0.25$	$h/D=1$	$h/D=0$	$h/D=0.25$	$h/D=1$
0	0	-0.8	-1.2	0	-0.1	-0.4	0	-0.1	-0.3
0.05	0	-0.4	-0.8	-0.2	-0.4	-0.4	-0.1	-0.3	-0.3
0.1	0	-0.4	-0.6	-0.4	-0.6	-0.6	-0.2	-0.4	-0.4
0.2	0	-0.4	-0.6	-0.6	-0.8	-1.0	-0.2	-0.4	-0.4
0.5	0	-0.3	-0.4	-1.1	-1.2	-1.3	-0.2	-0.4	-0.4

۲-۳-۵- ضریب  $C_p$  از آئین نامه نیوزیلند

در آئین نامه نیوزیلند گنبد به سه قسمت تقسیم شده و در شکل (۲۰) نشان داده شده است.

- یک چهارم ابتدایی (در جهت وزش باد)
- یک دوم میانی
- یک چهارم انتهایی



شکل ۲۰: تقسیم بندی نواحی روی گنبدها در آئین نامه نیوزیلند

$r$  ارتفاع گنبد و  $h$  ارتفاع میانه گنبد تا پایین پایه می باشد.

برای ارتفاع به دهانه 0.18 و 0.5 مقادیر  $C_p$  برحسب نسبت  $\frac{h}{r}$  به شرح جدول (۸) می‌باشد:

جدول ۸: ضرایب  $C_p$  آئین‌نامه نیوزیلند

ارتفاع به دهانه	یک چهارم ابتدایی U	یک دوم میانی T	یک چهارم انتهایی D
0.18	(0.3-0.4h/r) or 0.0	-(0.55 + 0.2h/r)	-(0.25 + 0.2h/r) or 0.0
0.5	(0.5-0.4h/r) or 0.0		-(0.1 + 0.2h/r) or 0.0

❖ برای  $\frac{h}{r}$  بزرگتر از ۲، مقدار  $\frac{h}{r}$  مساوی ۲ لحاظ گردد.

❖ برای  $\frac{r}{d}$  کمتر از 0.18 به آئین‌نامه رجوع شود.

۲-۳-۶- ضریب  $C_p$  از آئین‌نامه هند و کانادا

ضریب  $C_p$  در این دو آئین‌نامه مشابه ISO می‌باشد.

۲-۳-۷- ضریب  $C_p$  از آئین‌نامه روسیه

در آئین‌نامه روسیه نیز با اندکی تغییر در توصیه‌های آئین‌نامه ISO، ضریب  $C_p$  را به صورت جدول (۹) ارائه شده است. زاویه  $\alpha$  در شکل (۹) تعریف شده است.

جدول ۹: ضریب  $C_p$  مطابق با آئین‌نامه روسیه

$\alpha$	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	175°	180°
$C_p$	1	0.8	0.4	-0.2	-0.8	-1.2	- 1.2 5	-1	-0.6	-0.2	0.2	0.3	0.4

۲-۳-۸- مقادیر ضریب فشار داخلی  $C_{p_{in}}$

مقادیر  $C_{p_i}$  برای آئین‌نامه‌های مختلف در جدول (۱۰) بیان شده است.

جدول ۱۰: مقادیر  $C_{p_i}$  آئین‌نامه‌ها

نشریه ۴۰۰	ASCE ( $GC_{p_i}$ )	ISO	نیوزیلند	ژاپن	کانادا	EuroCode	هند
--------------	------------------------	-----	----------	------	--------	----------	-----

متغیر با استفاده از آزمایش	از $-0,55$ تا $+0,55$	از $-0,5$ تا $+0,35$	متغیر بستگی به میزان بازشوها دارد	از $0,5$ تا $0$	از $0,7$ تا $0$	از $C_{pi} - 0,5$ تا $+0,5C_{pi}$	از $-0,5$ تا $+0,5$
----------------------------	-----------------------	----------------------	-----------------------------------	-----------------	-----------------	-----------------------------------	---------------------

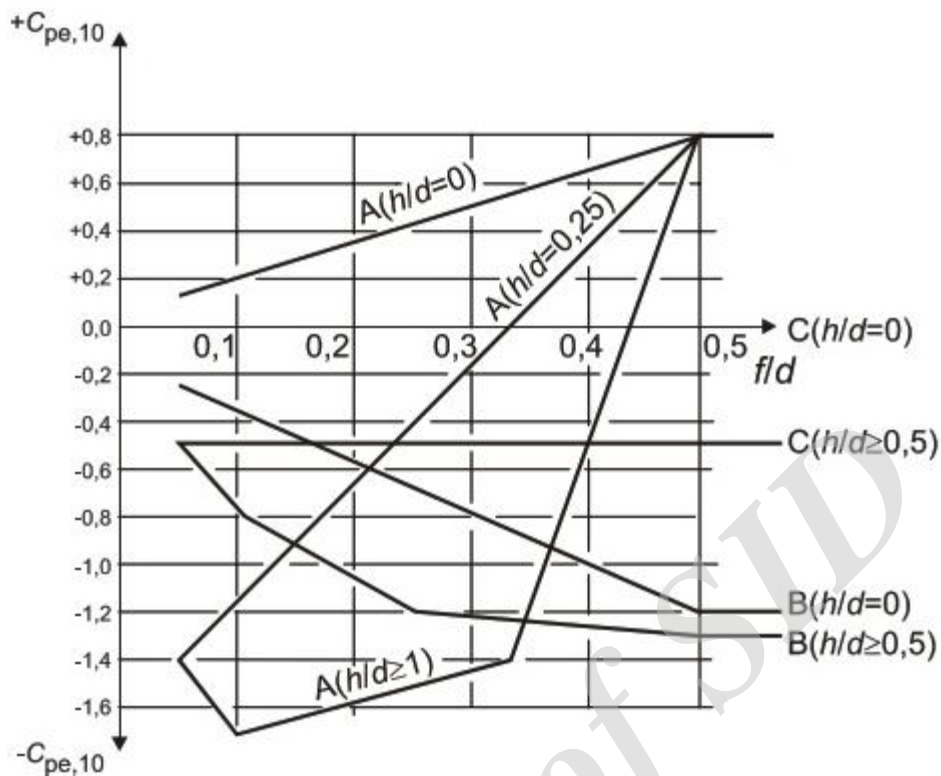
به صورت خلاصه و جمع بندی، آیین نامه های مختلف جهت ضریب فشار بار باد را به سه دسته می توان تقسیم نمود: دسته اول: ضریب  $C_p$  با توجه به زاویه  $\alpha$  مشخص شده در شکل ۱ جهت گنبد بدون پایه و برای هر نسبت "ارتفاع به دهانه" مشخص می گردد.

آیین نامه های ISO، کانادا، نشریه ۴۰۰ و هند در این دسته قرار می گیرند که ضرایبشان مشابه یکدیگر بوده و در جدول (۱۱) نشان داده شده است.

جدول ۱۱: ضریب  $C_p$  دسته اول

$180^\circ$	$165^\circ$	$150^\circ$	$135^\circ$	$120^\circ$	$105^\circ$	$90^\circ$	$75^\circ$	$60^\circ$	$45^\circ$	$30^\circ$	$15^\circ$	$0^\circ$	$-\alpha$
$+0,4$	$+0,3$	$+0,1$	$-0,2$	$-0,6$	$-1,0$	$-1,2$	$-1,1$	$-0,7$	$-0,1$	$+0,5$	$+0,9$	$+1,0$	$C_p$

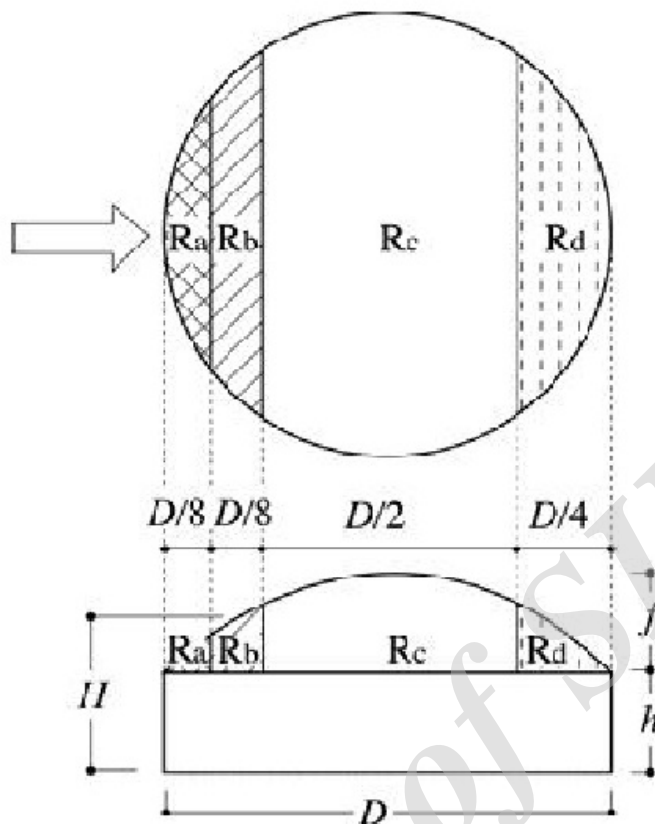
دسته دوم: مقادیر ضریب فشار جهت سه نقطه ابتدایی  $A$ ، وسط  $B$  و انتهای گنبد  $C$  که در شکل ۱۵ آمده، توسط یک گراف مشخص می گردد. ضریب فشار سایر نقاط را می توان از روش درون یابی بدست آورد. آیین نامه های Euro Code و ASCE در این دسته قرار می گیرند که ضرایب فشار نقاط  $A$ ،  $B$ ،  $C$  جهت مقادیر مختلف  $f/D$  و  $h/D$  مطابق شکل (۲۱) می باشد.



شکل ۲۱: ضرایب فشار دسته دوم

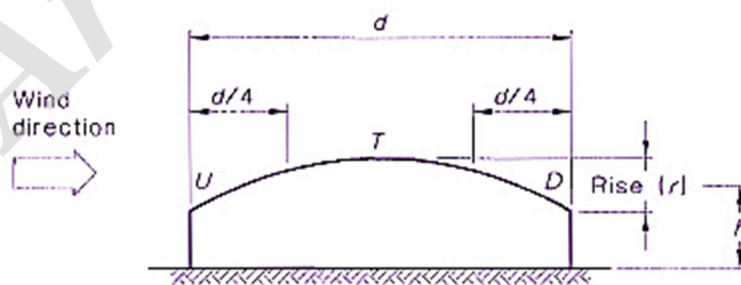
همچنین یک حالت دیگر در آیین نامه ASCE وجود دارد که میتوان برای زوایای کمتر از ۲۵ درجه، مقدار فشار باد را ثابت در نظر گرفته و در سایر زوایا از شکل ۴ استفاده نمود.

دسته سوم: در آخرین گروه، گنبد به چند ناحیه تقسیم شده و برای هر قسمت مقدار ثابت ضریب فشار بر اساس یک جدول بدست می آید. آیین نامه های ژاپن و استرالیا و نیوزیلند در این دسته قرار می گیرند. در آیین نامه ژاپن مطابق شکل (۲۲) گنبد به چهار قسمت تقسیم بندی شده است: یک هشتم ابتدایی، یک هشتم دوم، یک دوم میانی و یک چهارم انتهایی



شکل ۲۲: تقسیم بندی گنبد بر اساس آیین نامه ژاپن

در آیین نامه استرالیا و نیوزیلند ضریب فشار جهت تقسیم بندی شکل (۲۳) بر اساس سه محدوده "یک چهارم ابتدایی"، "یک دوم میانی" و "یک چهارم انتهایی"، مطابق جدول (۸) می باشد.

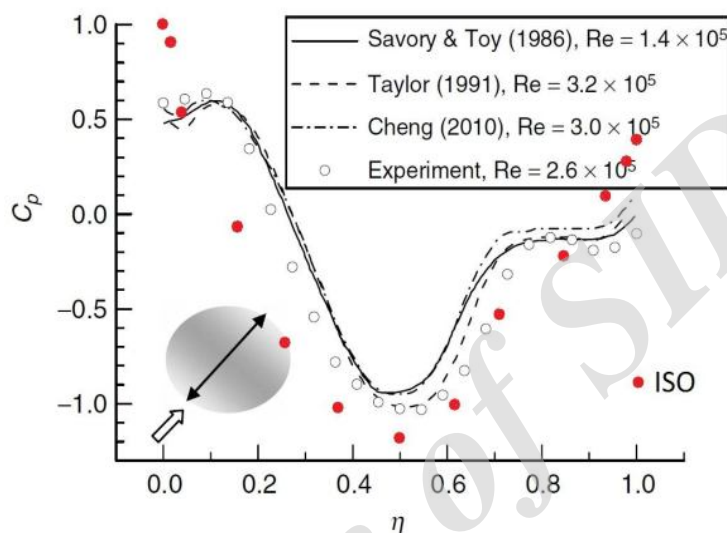


شکل ۲۳: تقسیم بندی نواحی گنبد در آیین نامه استرالیا و نیوزیلند



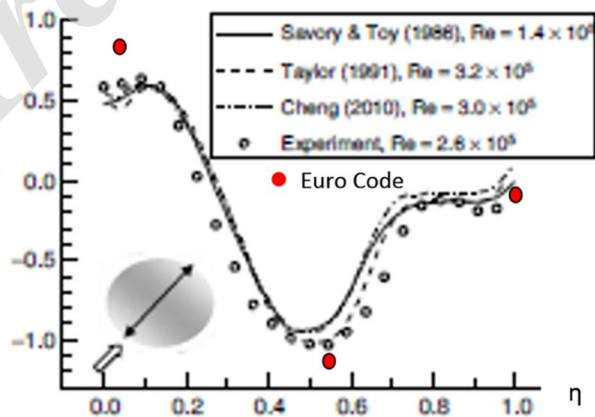
## ۴-۲- مقایسه آیین نامه ها با آزمایشات

جهت تعیین مناسب ترین آیین نامه از لحاظ تطبیق با آزمایشات، مقادیر ضریب فشار گنبد بدون پایه با نسبت "ارتفاع به دهانه" ۰,۵ از آیین نامه های مختلف با شکل (۱۰) مقایسه شده است.  
- ضریب فشار آیین نامه های دسته اول مطابق شکل (۲۴) می باشد.



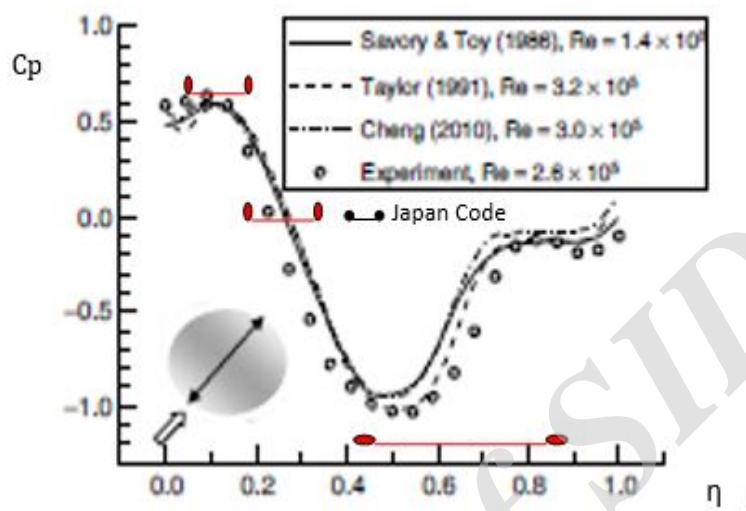
شکل ۲۴: مقایسه ضریب فشار آیین نامه های دسته اول با آزمایش تونل باد

- ضریب فشار آیین نامه های دسته دوم مطابق شکل (۲۵) می باشد.



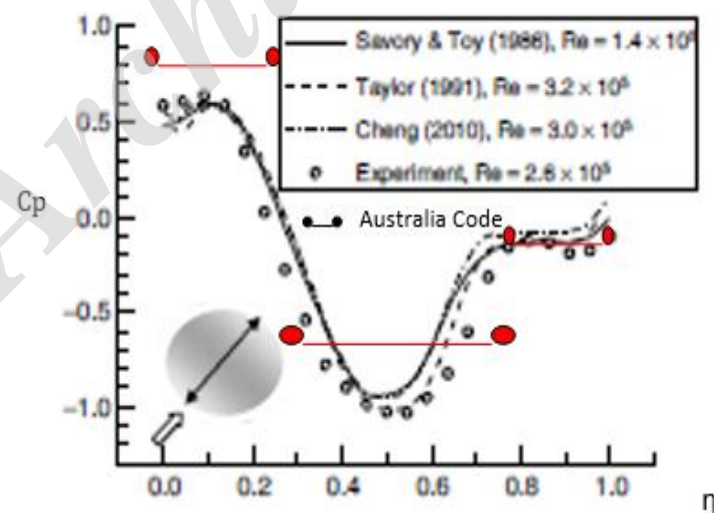
شکل ۲۵: مقایسه ضریب فشار آیین نامه های دسته دوم با آزمایشات

ضریب فشار آیین نامه ژاپن که در دسته سوم قرار دارد، مطابق شکل (۲۶) می باشد.



شکل ۲۶: مقایسه ضریب فشار آیین نامه ژاپن با آزمایشات

ضریب فشار آیین نامه استرالیا و نیوزیلند نیز در دسته سوم قرار داشته و مطابق شکل (۲۷) می باشد.



شکل ۲۷: مقایسه ضریب فشار آیین نامه استرالیا و نیوزیلند با آزمایشات

مقایسه مقادیر ضریب فشار نشان می دهد آیین نامه Euro Code همخوانی بیشتری با نتایج آزمایشگاهی دارد.

## ۲-۵- مقایسه مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی و آیین نامه ها

### روش های عددی:

روش های عددی بعنوان روش نوع سوم جهت حل معادلات مکانیک سیالات در بسیاری از پروژه های امروزی مورد استفاده قرار می گیرند. توسعه و پیشرفت علوم کامپیوتر و استفاده گسترده از زبان های برنامه نویسی منشا پیدایش دینامیک سیالات محاسباتی جهت حل عددی معادلات مکانیک سیالات در سالهای اخیر شده است. در روش های عددی، ابتدا دامنه حل به اجزای بسیار کوچکی به نام سلول های محاسباتی تقسیم شده و مجموع سلول های محاسباتی تشکیل یک شبکه محاسباتی می دهند. سلول های محاسباتی بسته به پیچیدگی هندسی و همچنین ساختار کلی حل گر، دارای اشکال مختلفی هستند. معادلات ناویر استوکس در حالت پایه دارای حداقل چهار مجهول اصلی شامل فشار و سرعت ها در سه راستا هستند. در برخی از شبیه سازی ها دانسیته نیز تابعی از شرایط حل بوده و می بایست جزو مجهول ها قرار گیرد که به این نوع از جریان ها، جریان های دانسیته متغیر گفته می شود. در این حالت با در نظر گرفتن معادلات ناویر استوکس ۴ معادله و ۵ مجهول وجود دارد. معادلات شامل مومنتوم در راستاهای  $x, Y, Z$  و معادله پیوستگی می باشد که در اینصورت نیاز به یک معادله اضافی برای بدست آوردن مجهول پنجم می باشد که از معادله حالت استفاده می شود. معادلات حالت که معادله گاز ایده آل نمونه ای از آنها است، ارتباطی بین فشار و دانسیته و در صورت نیاز دما برقرار می کند که در اینصورت می توان یکی از ۲ مجهول دانسیته و فشار را در حلقه اصلی معادلات بدست آورد و دیگری را با استفاده از معادله حالت، محاسبه و در تکرار بعدی مورد استفاده قرار داد. در صورتی که فشار در حلقه اصلی و دانسیته در معادله حالت بدست آید، به این روش حل معادلات، "حل بر پایه فشار" گفته می شود. در روش حل بر پایه دانسیته، دانسیته در حلقه اصلی و فشار در معادله حالت بدست می آید. با توجه به اینکه در این پژوهش عدد ماخ باد کوچکتر از ۱ می باشد، از روش بر پایه فشار استفاده خواهد شد.

در شبیه سازی های عددی شرایطی پیش می آید که همگرایی مختل شده و یا بعضا حل دچار واگرایی می شود. واگرایی به معنای افزایش باقیمانده های حل به روش تکرار شونده و حفظ این روند رو به بالا تا رسیدن به مقدار نهایی مجاز در نرم افزار است. در شرایطی دیگر ممکن است حل واگرا نشود، اما باقیمانده های حل تا میزان مورد نظر کاهش نیابند. در نتیجه نتایج شبیه سازی قابل اعتماد نخواهد بود که هر ۲ حالت مذکور را با عدم همگرایی شناسایی می کنند. در این شرایط می بایست در ابتدا تاثیر پارامتر هایی مانند کیفیت شبکه، مرتبه تفکیک معادلات، مدل های آشفتگی و سایر مدل های دخیل در شبیه سازی مورد بررسی قرار گیرد تا در صورت تاثیر منفی در شبیه سازی مورد اصلاح قرار گیرد. به طور مثال در شبیه سازی هایی که در آنها از شبکه بی کیفیت با زوایای تیز استفاده شده باشد، ممکن است روند همگرایی مختل شود. در این شرایط بهترین راه حل اصلاح شبکه در نرم افزار تولید شبکه و انجام مجدد شبیه سازی با استفاده از شبکه اصلاح شده است. در برخی موارد استفاده از روشهای دارای مرتبه تفکیک بالا مانند روش های مرتبه دوم در آغاز شبیه سازی موجب عدم همگرایی می شود و می توان با استفاده از روش های مرتبه اول در آغاز شبیه سازی و تغییر آنها به روشهای مرتبه دوم پس از شکل

گیری اولیه حل به همگرایی دست یافت. در برخی دیگر از شبیه سازی ها استفاده از برخی از مدل های آشفتگی مانند RMS می تواند موجب عدم همگرایی شود. در این شرایط می توان با استفاده از مدل های ساده تر و پایدارتر مانند k-epsilon در آغاز شبیه سازی و تغییر آن به مدل مورد نظر پس از همگرایی اولیه، همگرایی را تضمین نمود.

در این طرح با تبدیل و انتقال فرمها و شکل گندهای مورد نظر با استفاده از جبر فرمکسی و نرم افزار Formian، هندسه مورد نظر ایجاد و خروجی مناسب از نرم افزار Formian به نرم افزارهای طراحی ۳ بعدی همچون AutoCAD تبدیل شده و سپس به فرمت نرم افزارهای مورد استفاده (Fluent یا ANSYS-CFX) تبدیل و شبکه محاسباتی مربوطه تولید خواهد شد. تقسیم دامنه حل به سلولهای بسیار کوچک موجب می شود بتوان تغییرات متغیرهای حل، در فاصله کوتاه یک سلول را خطی و بعضا ناچیز فرض کرد که در اینصورت امکان خطی سازی و ساده سازی معادلات ناویر استوکس، بر روی اجزای دامنه حل فراهم می شود. از یکپارچه سازی و برقراری ارتباط بین سلولها بصورت کلی رفتاری تقریبی از جریان سیال بدست می آید. با افزایش تعداد سلولها در دامنه حل و به دنبال آن کوچک تر شدن سلولهای محاسباتی، فرض خطی سازی برخی متغیرها و ثابت ماندن برخی دیگر در هر سلول منطقی بوده و نتایج محاسبات به داده های واقعی نزدیک تر خواهد شد. البته با افزایش تعداد سلولها در دامنه حل هزینه و نرخ محاسبات افزایش یافته و سیستم کامپیوتری پیشرفته تری مورد نیاز خواهد بود. سیستم کامپیوتری که برای انجام محاسبات این طرح در نظر گرفته شده است به شرح ذیل می باشد:

• Motherboard: GIGA P ۸۱ ۳D

• CPU: I ۷۷۹

• Ram: 8G

• HDD (Hard Disk Drive): 1 Terabyte

• VGA (Video Graphics Array): ASUS 2G

برای مدل سازی عددی توزیع فشار روی گنبد، مش برای هندسه پوسته گنبد در حالت جامد و همچنین مش برای تونل باد در حالت سیال تولید شده و ترکیب مش ها با ویژگیهای مختلف انجام خواهد شد. در ناحیه هایی که لایه مرزی تغییر می نماید، اعضای مش بندی دارای اندازه های کوچکتری خواهد شد. شرایط تونل باد عددی با اعمال شرایط مرزی در طرفین هندسه و فیزیک گنبد شبیه سازی شده و توزیع فشار بر روی سطح گنبد بدست خواهد آمد. در هر دو جریان آرام و توربولانس می توان تنها به کمک معادلات ناویراستوکس و بدون نیاز به معادلات اضافی میدان جریان را حل کرد، اما با توجه به اینکه مقیاس تغییرات زمانی و مکانی متغیرها در جریان توربولانس بسیار گسترده بوده و شامل ابعاد بسیار کوچک مکانی و زمانی می باشد، برای حل این جریان تعداد سلولهای شبکه محاسباتی بسیار افزایش یافته و فواصل زمانی نیز بسیار کاهش پیدا خواهد کرد. این مسئله به حدی هزینه های محاسباتی را بالا می برد که امکان استفاده از روش های شبیه سازی عددی مستقیم (DNS) در اغلب پروژه های کاربردی و همچنین این تحقیق میسر نمی باشد. در این حالت استفاده از مقادیر متوسط گیری شده زمانی یا نهایتا حل ساختارهای توربولانسی بزرگ مقیاس، جوابگوی نیاز مسائل کاربردی مهندسی می باشد. در

واقع جریان های توربولانسی از یک مشخصه متوسط و یک مشخصه نوسانی تشکیل شده اند، بنابراین به جای بررسی دقیق نوسانات و استفاده از شبکه های بسیار ریز، می توان اثرات اغتشاشات را در میدان سیال در نظر گرفت. از آنجایی که شبیه سازی پایدار مسائل مهندسی کاربردی به دلیل زمان شبیه سازی کمتر، پردازش آسان تر و اهمیت بالای مقادیر متوسط نسبت به مقادیر لحظه ای ارجحیت دارد، لذا مدل های توربولانسی که امکان شبیه سازی پایدار جریان را ایجاد می کنند بسیار مطلوب بوده و اهمیت دارند. تاکنون مدل های زیادی برای تخمین اثرات توربولانسی در حل جریان بر پایه معادلات ناویر استوکس متوسط گیری شده توسط رینولدز ارائه شده است. اما تاکنون یک مدل توربولانسی جامع که بتوان برای تمام جریانها و کاربردهای صنعتی و تحقیقاتی، با اطمینان و دقت بالا استفاده کرد، وجود ندارد. تعدادی از این مدل ها کاربردهای بسیار خاصی داشته و مابقی آنها با قابلیت اطمینانی منطقی برای محدوده وسیعتری از جریان ها بکار گرفته می شوند. بطور کلی می توان مدل های اغتشاشی را به دو دسته کلی مدل های بر پایه لزجت گردابه ای و مدل های بر پایه تنش رینولدزی تقسیم نمود. علاوه بر مدل های مذکور روش دیگری برای حل جریان های مغشوش وجود دارد که از هر دو مزیت دقت شبیه سازی مستقیم و سرعت مدل های توربولانسی استفاده می کند که بر پایه تفکیک مقیاسی گردابه ها استوار است. از آنجا که با افزایش هزینه محاسباتی فیزیک حل دقیق تر می شود، بایستی با ایجاد تعادلی بین افزایش دقت و افزایش هزینه محاسباتی بهترین مدل را انتخاب نمود.

برای حل عددی معادلات ناویراستوکس در این پژوهش مدل توربولانسی جابجایی تنش برشی (SST) پیشنهاد شده توسط منتر استفاده خواهد شد که یک مدل نوع RANS با استفاده از معادلات دو مدل  $k-\epsilon$  و  $k-\omega$  می باشد. فرمول بندی مدل  $k-\epsilon$  در ناحیه بیرونی جریان جایی که این نوع مدل کارآمدتر میباشد استفاده خواهد شد. همچنین در ناحیه نزدیک به دیوار معادلات جابجایی مدل  $k-\omega$  استفاده خواهد شد. مدل SST بدلیل دقت بالای آن در ناحیه گذر لایه مرزی جریان از آرام به توربولانس، بصورت وسیعی در تحقیقات صنعتی استفاده می شود. روش های عددی جهت حل معادلات مکانیک سیالات کاربرد فراوانی دارد. در روش های عددی دامنه حل به اجزای کوچک تقسیم بندی شده و مجموع این اجزاء، تشکیل یک شبکه محاسباتی می دهند. روابط فیزیکی سیالات با معادلات غیر خطی و چند جمله ای ناویر-استوکس مشخص می گردد. معادلات حاکم بر جریان سیالات، حاصل ترکیب قوانین پیوستگی جرم، بقای انرژی و بقای اندازه حرکت می باشد که در معادله (۲۴) آمده است.

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (24a)$$

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (24b)$$

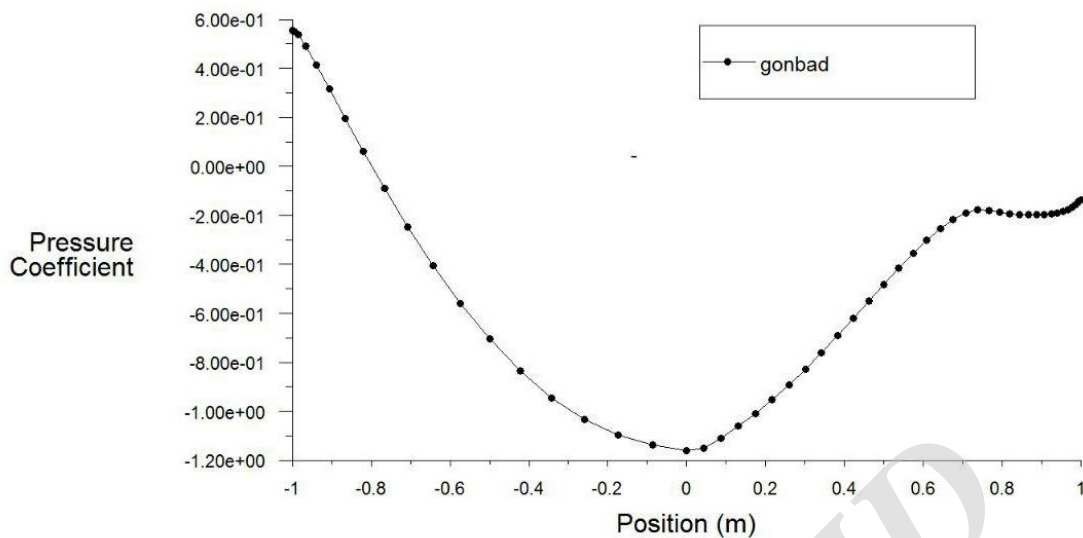
$$\rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) - \rho g \quad (24c)$$

در معادله بالا،  $u, v, w$  و سرعت در جهت  $x, y, z$  بوده و همچنین  $\rho, p$  و  $g$  معرف فشار، چگالی و ثابت گرانشی می باشد. این معادلات در حالت اولیه دارای چهار مجهول  $u, v, w, p$  بوده و چگالی به عنوان یک پارامتر ثابت در نظر گرفته می شود. همچنین اطلاعات ورودی، شرایط مرزی موجود در مساله CFD، تنظیمات برنامه و مش بندی مناسب اهمیت زیادی دارد.

روش ها و متدهای حل این معادلات به صورت زیر می باشد:

(A) RANS ( $k-\omega$  {Standard, SST, BSL}, {Standard, Rng, Realizable}),  
 (B) DES (combination of  $k-\omega$  and  $k-\epsilon$ )  
 (C) LES (Smagorinsky, WALE, WMLES, WMLES S-Omega, Kinetic-Energy Transport)

جهت مقایسه نتایج تحلیل عددی با آزمایش تونل باد، یک مدل گنبد بدون پایه با نسبت ارتفاع به دهانه ۰٫۵ در برنامه Fluent با روش  $k-\epsilon$  استاندارد مدل شده است که با نتایج آزمایشگاهی و آیین نامه Euro Code مطابقت خوبی دارد. با مدل نمودن یک گنبد بدون پایه با نسبت "ارتفاع به دهانه" ۰٫۵ جهت گنبد با قطر دو متر نتایج شکل (۲۸) حاصل شده که مقادیر عددی آن در جدول (۱۲) آمده است.

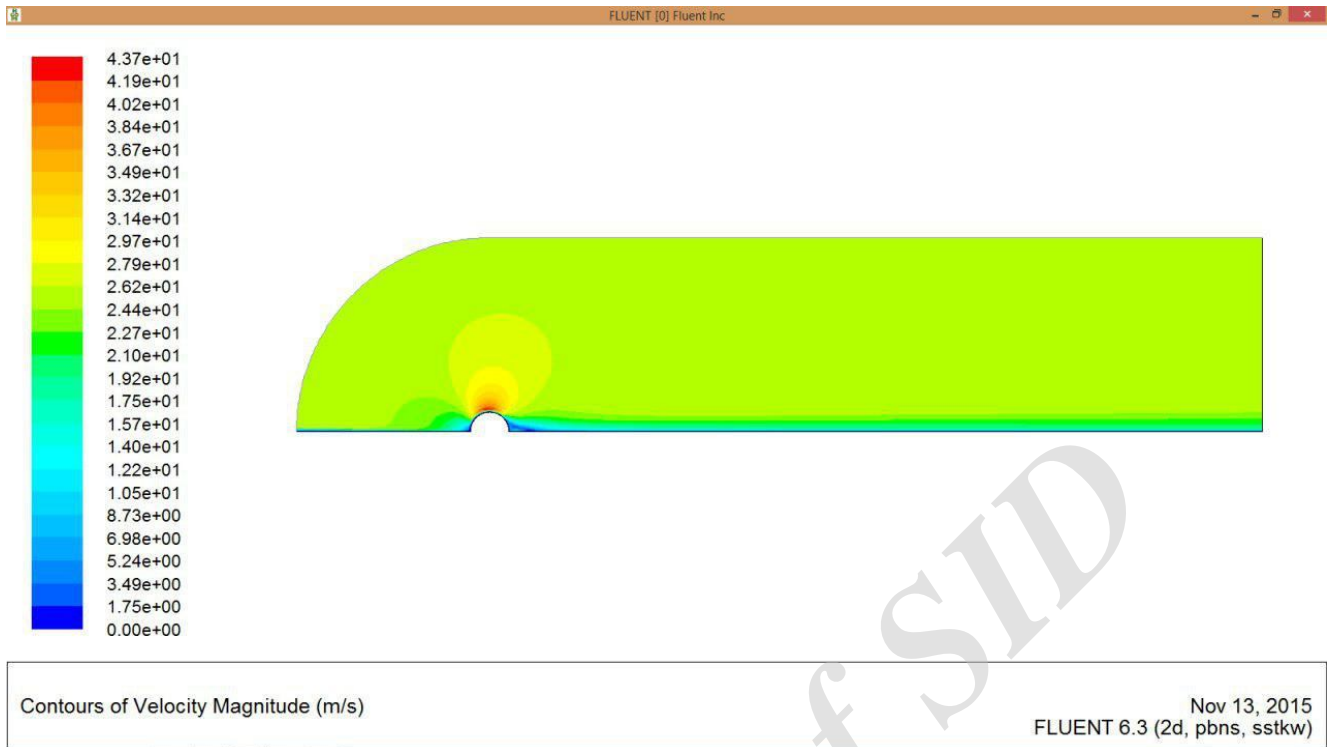


شکل ۲۸: ضریب فشار محاسبه شده از مدلسازی عددی

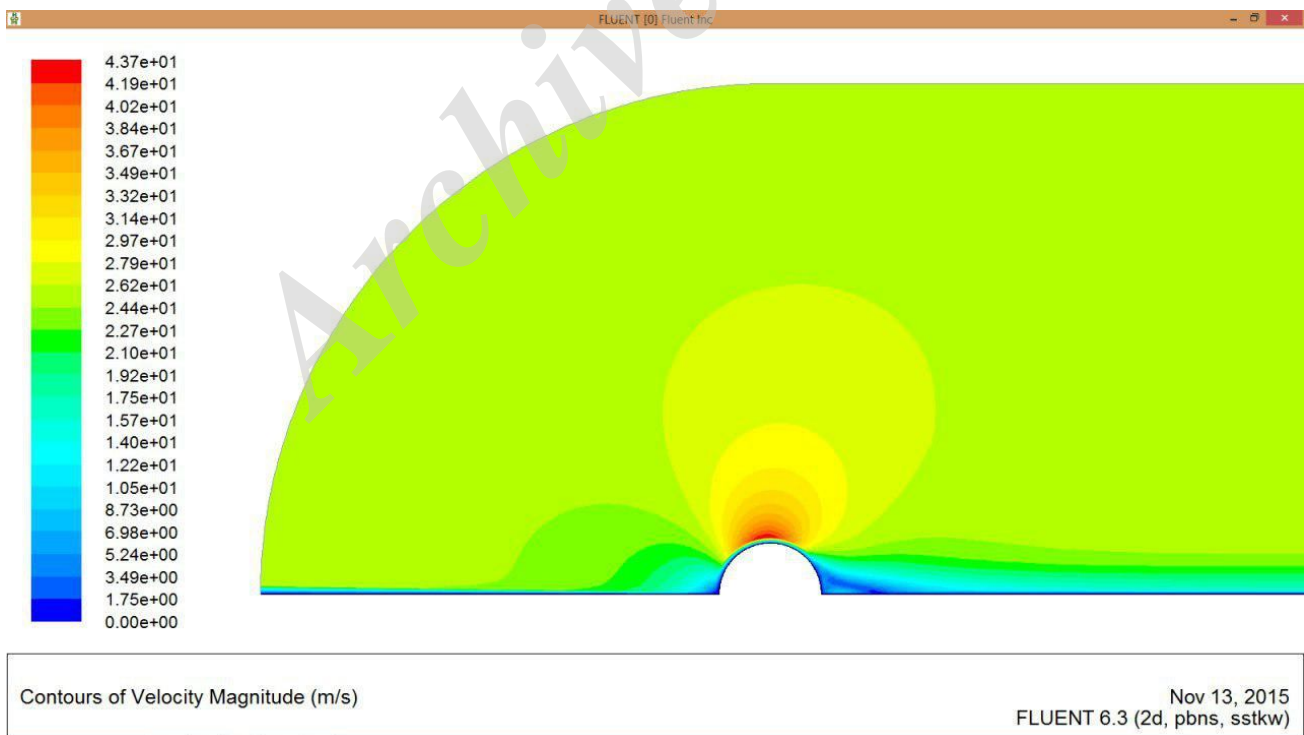
جدول ۱۲: مقادیر ضریب فشار محاسبه شده از مدلسازی عددی

$\alpha =$	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°
numeric model	+0.55	+0.45	+0.22	-0.25	-0.7	-1	-1.2	-0.9	-0.5	-0.15	-0.2	-0.2	-0.1

کانتور سرعت جهت گنبد بدون پایه با نسبت ارتفاع به دهانه ۰/۵ مطابق شکل های (۲۹ تا ۳۲) می باشد.

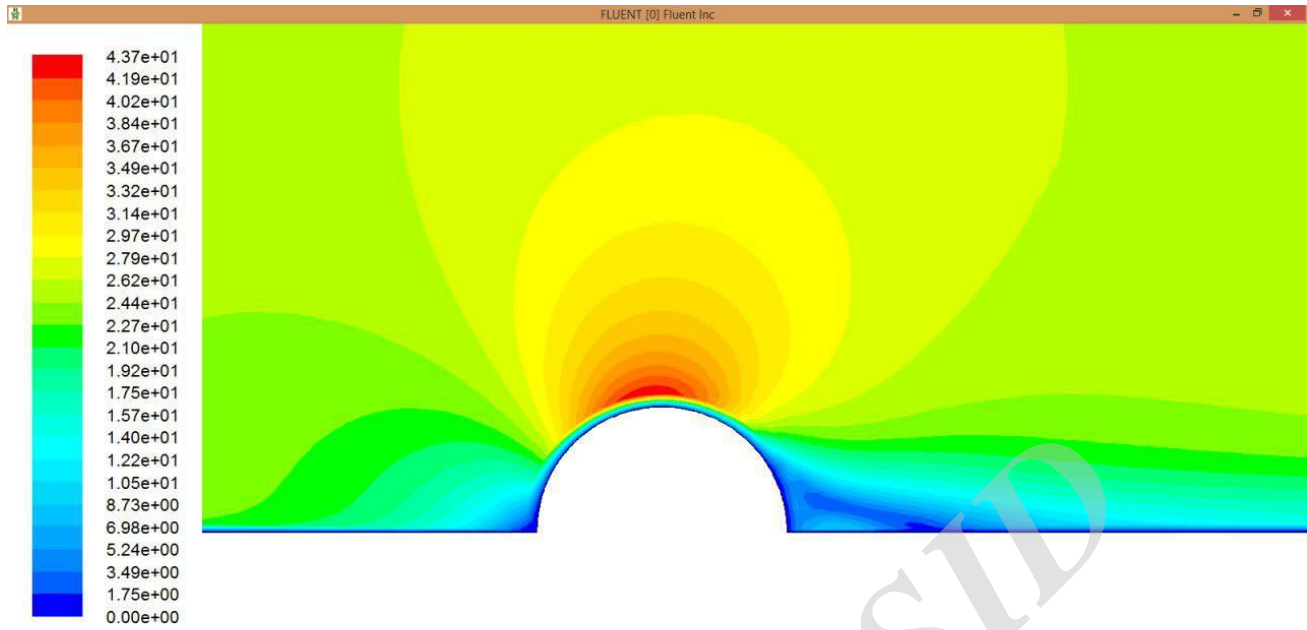


شکل ۲۹: کانتور سرعت گنبد بدون پایه A



شکل ۳۰: کانتور سرعت گنبد بدون پایه B

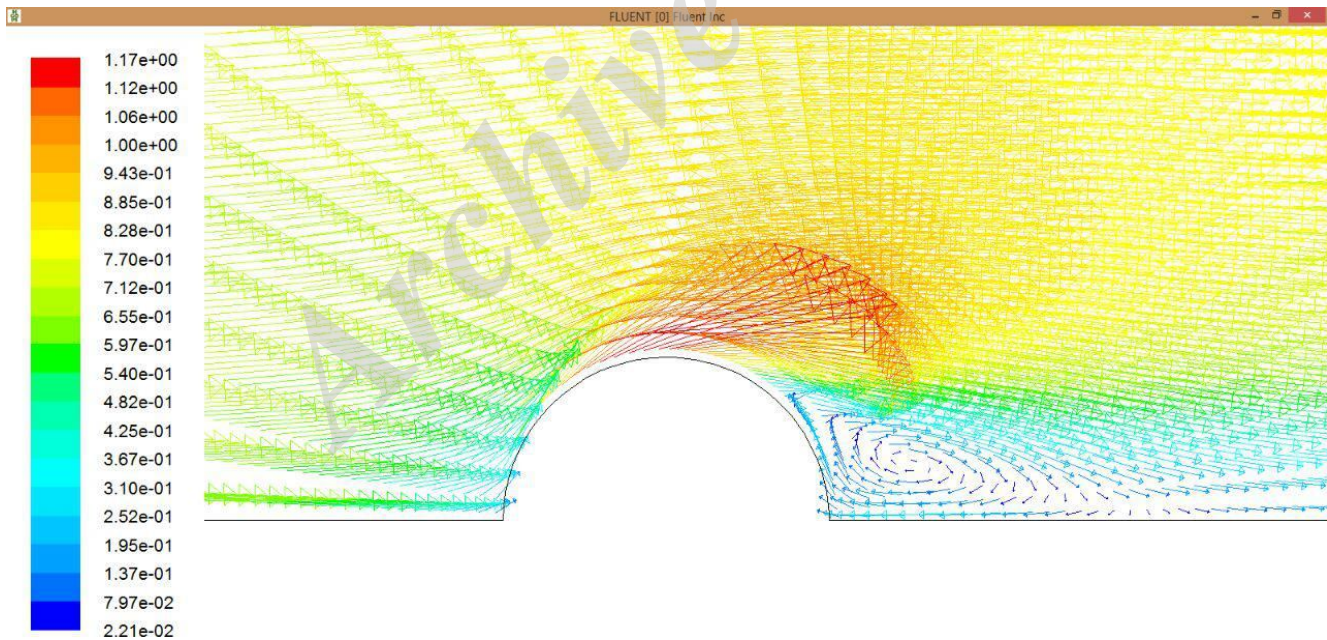




Contours of Velocity Magnitude (m/s)

Nov 13, 2015  
FLUENT 6.3 (2d, pbns, sstk)

شکل ۳۱: کانتور سرعت گنبد بدون پایه C

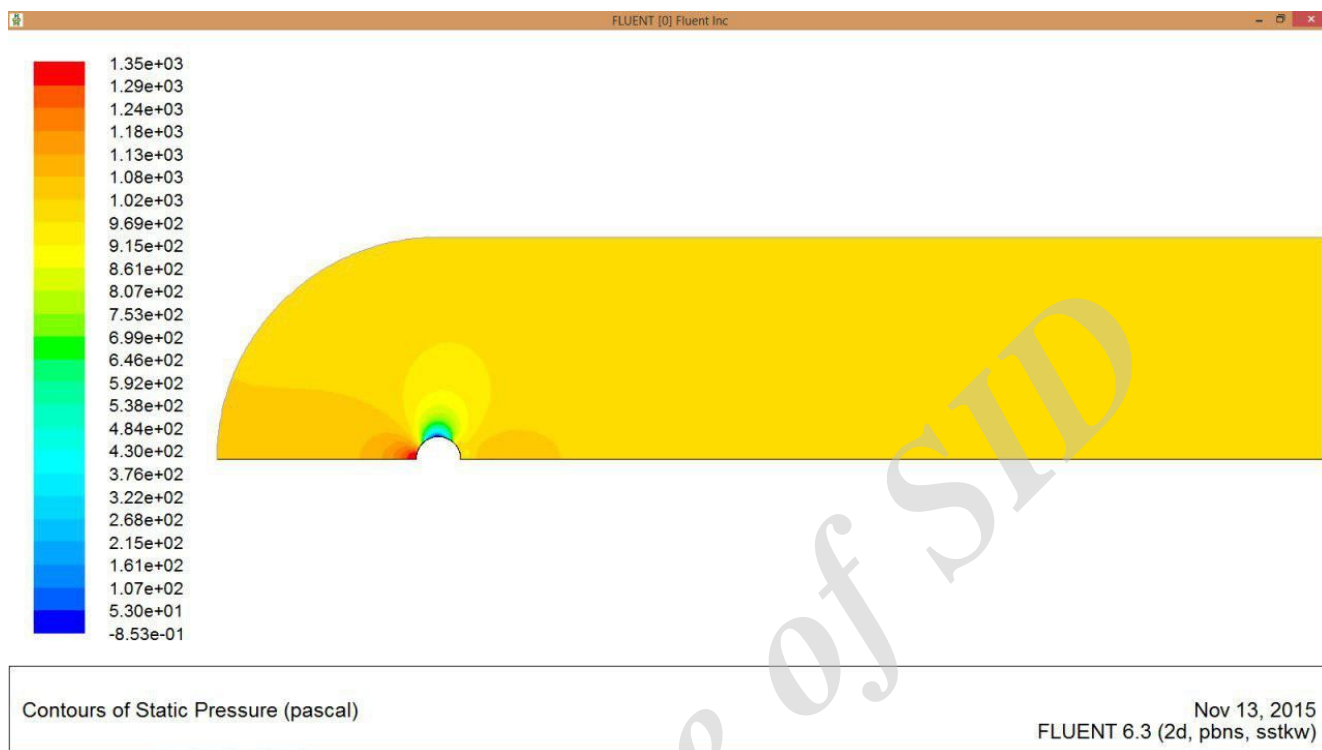


Velocity Vectors Colored By Velocity Magnitude (m/s)

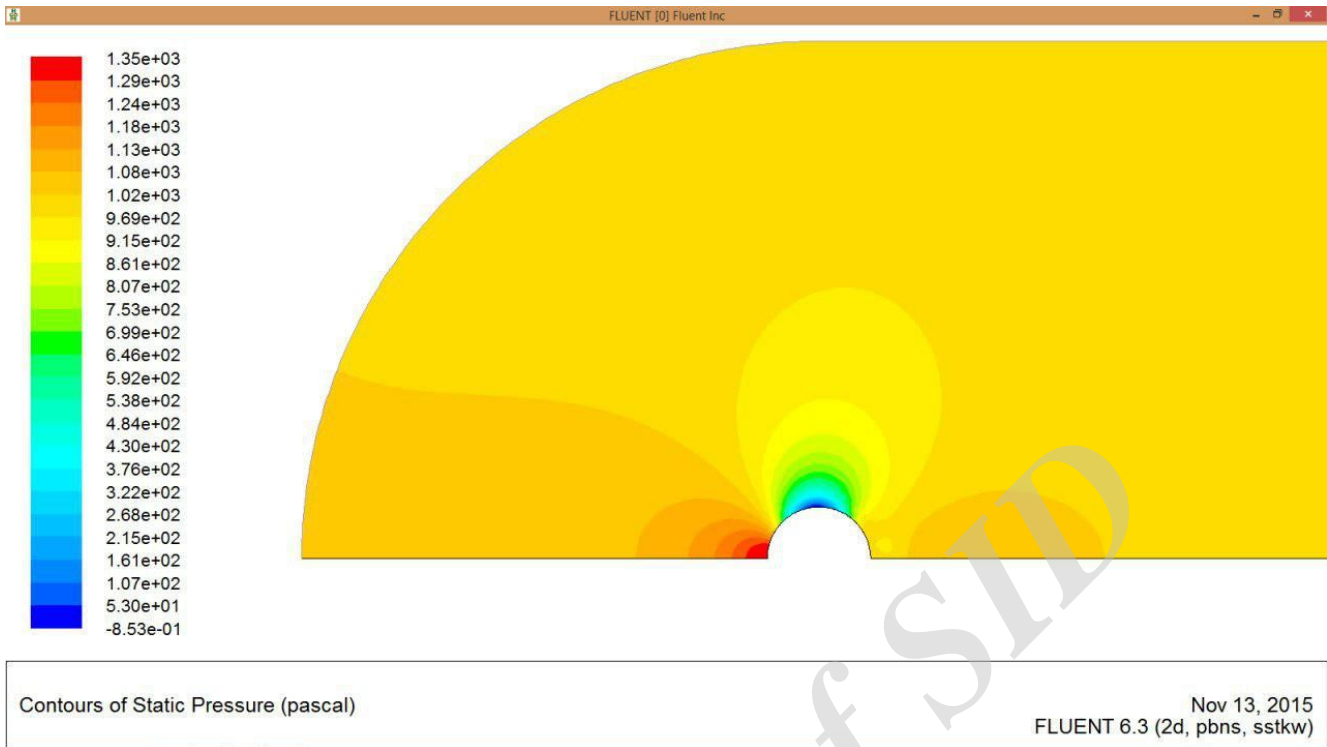
Sep 11, 2015  
FLUENT 6.3 (2d, pbns, ske)

شکل ۳۲: کانتور سرعت گنبد بدون پایه D

کانتور فشار جهت گنبد بدون پایه با نسبت ارتفاع به دهانه ۰/۵ مطابق شکل های (۳۳ تا ۳۷) می باشد.



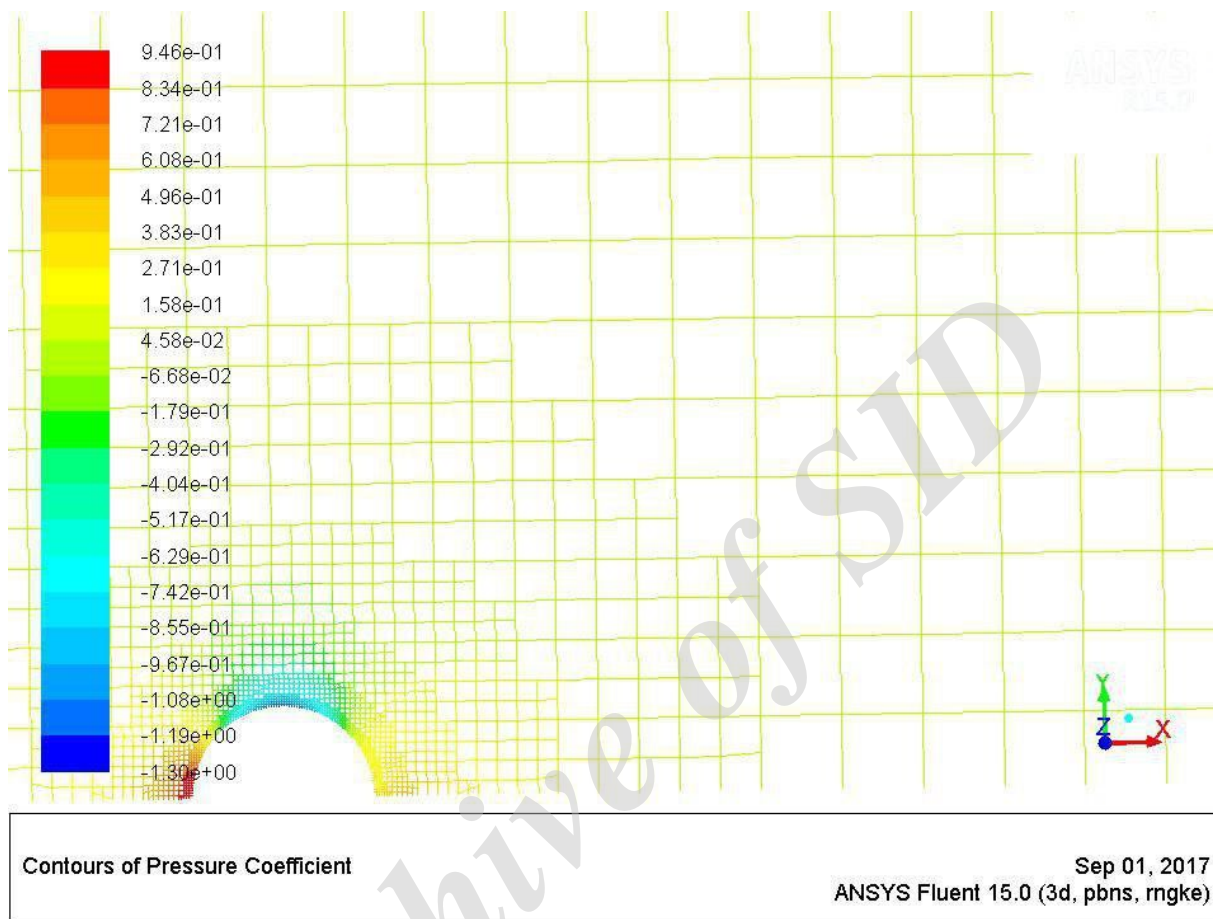
شکل ۳۳: کانتور فشار گنبد بدون پایه A



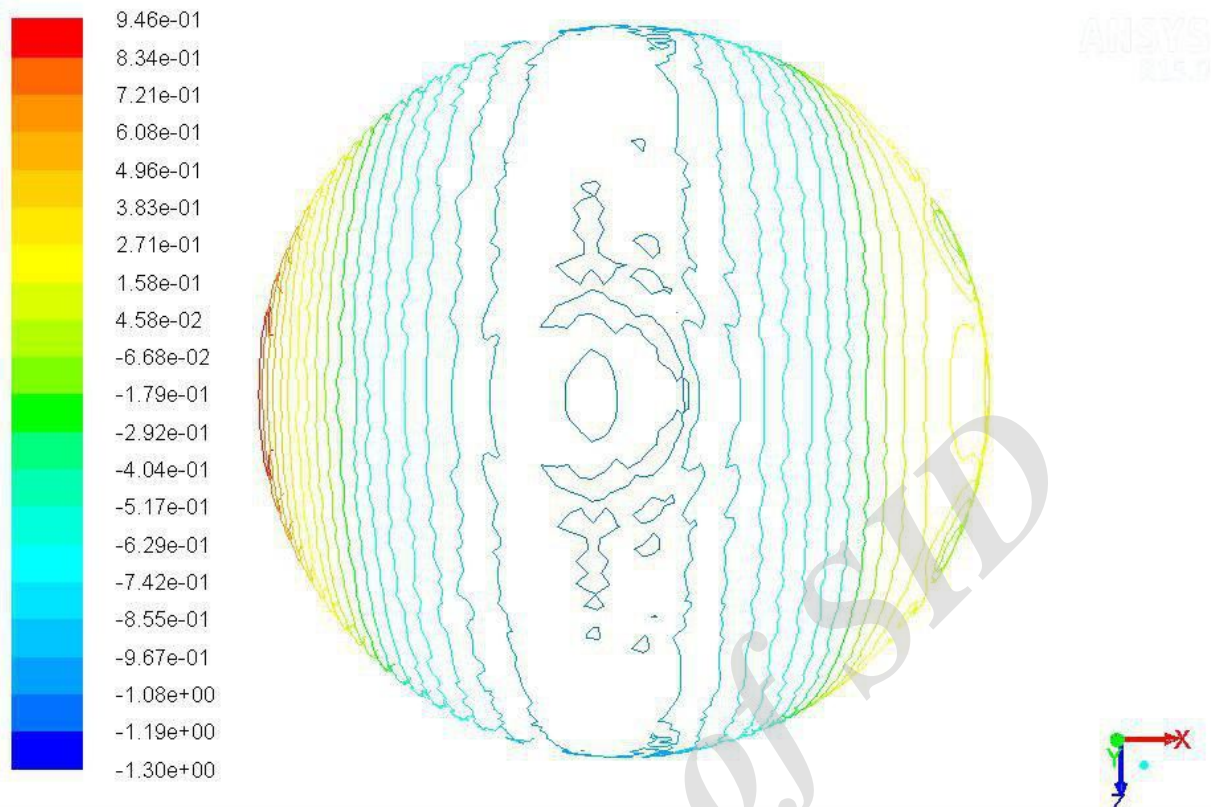
شکل ۳۴: کانتور فشار گنبد بدون پایه B



شکل ۳۵: کانتور فشار گنبد بدون پایه C

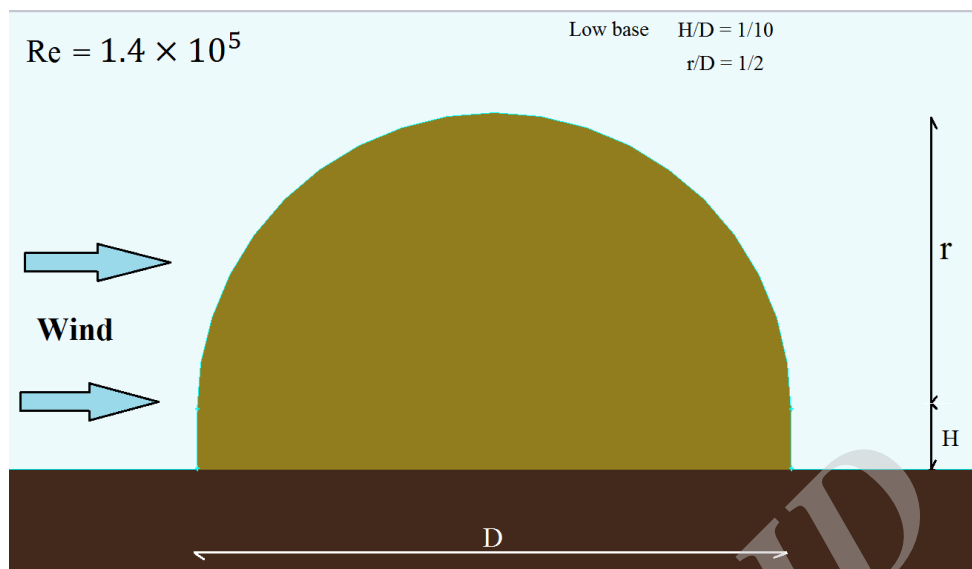


شکل ۳۶: کانتور فشار گنبد بدون پایه D



شکل ۳۷: کانتور فشار گنبد بدون پایه E

همچنین جهت گنبد دارای پایه نشان داده شده در شکل (۳۸) مدلسازی انجام شده است که این شبیه سازی در حالت جریان آشفته با رینولدر ۱,۴ در ده به ده توان پنج می باشد.

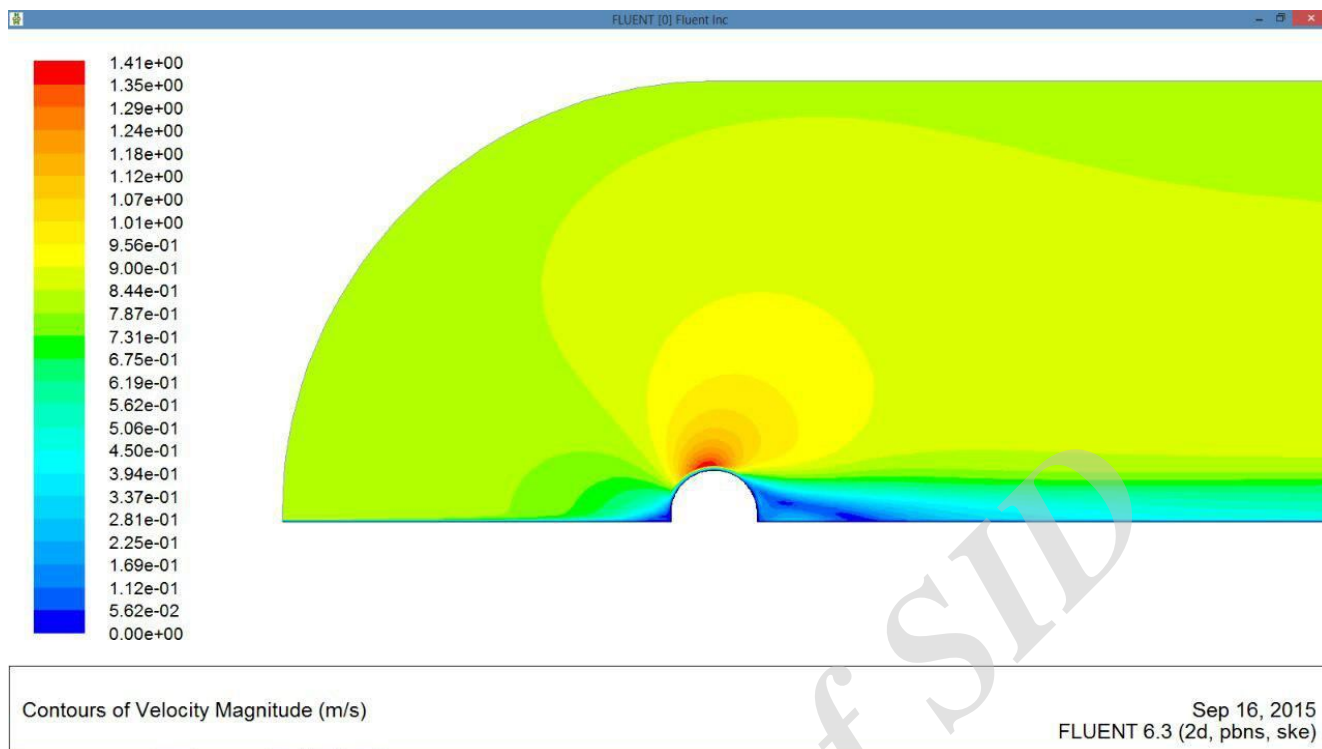


شکل ۳۸: مدل‌سازی گنبد با پایه

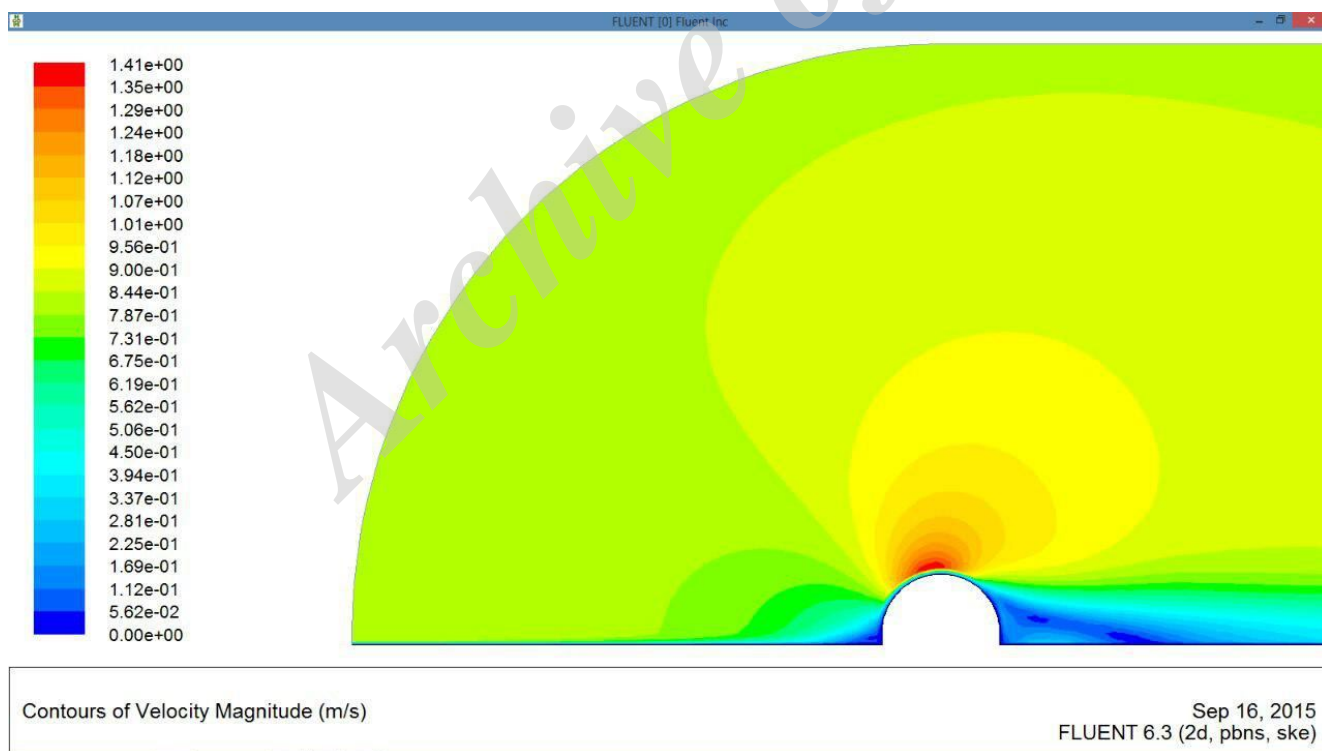
کانتور سرعت جهت گنبد با پایه با نسبت ارتفاع به دهانه  $+/5$  و پایه به دهانه  $1/1$ . مطابق شکل های (۳۹ تا ۴۳) می باشد.



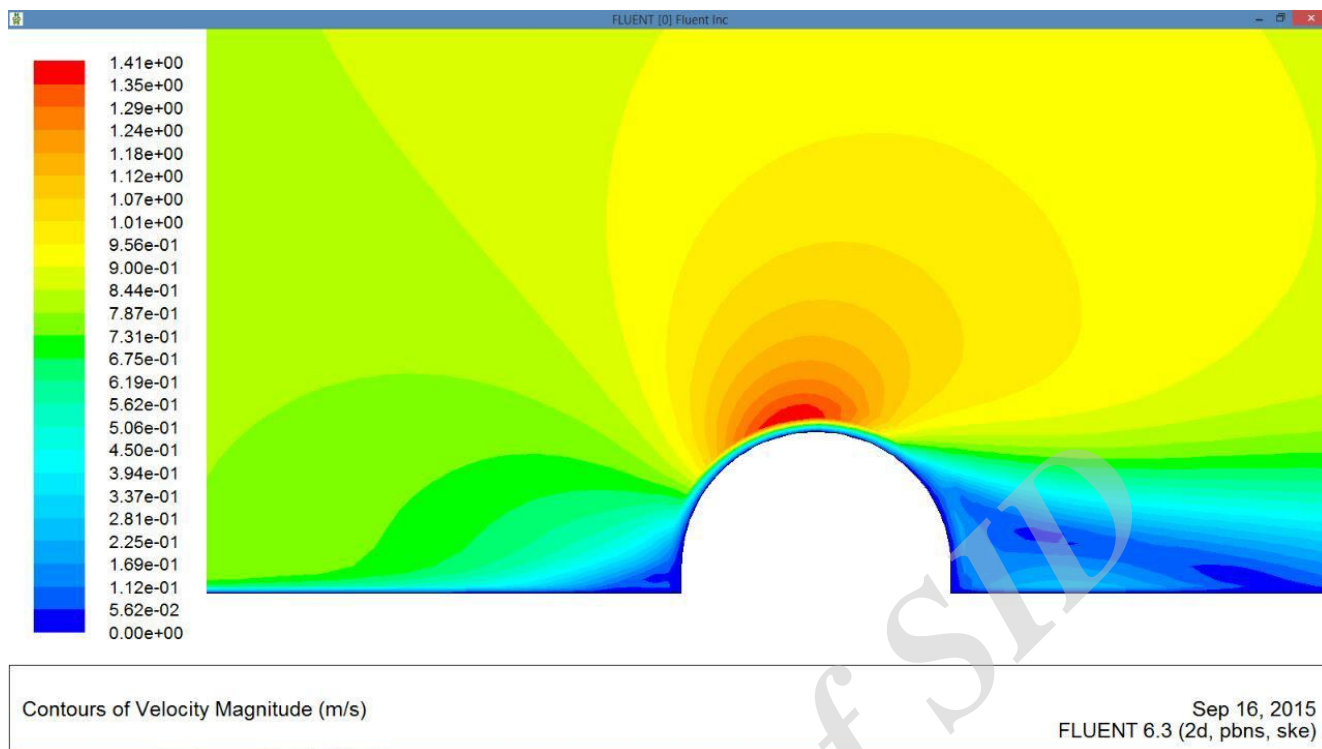
شکل ۳۹: کانتور سرعت گنبد با پایه A



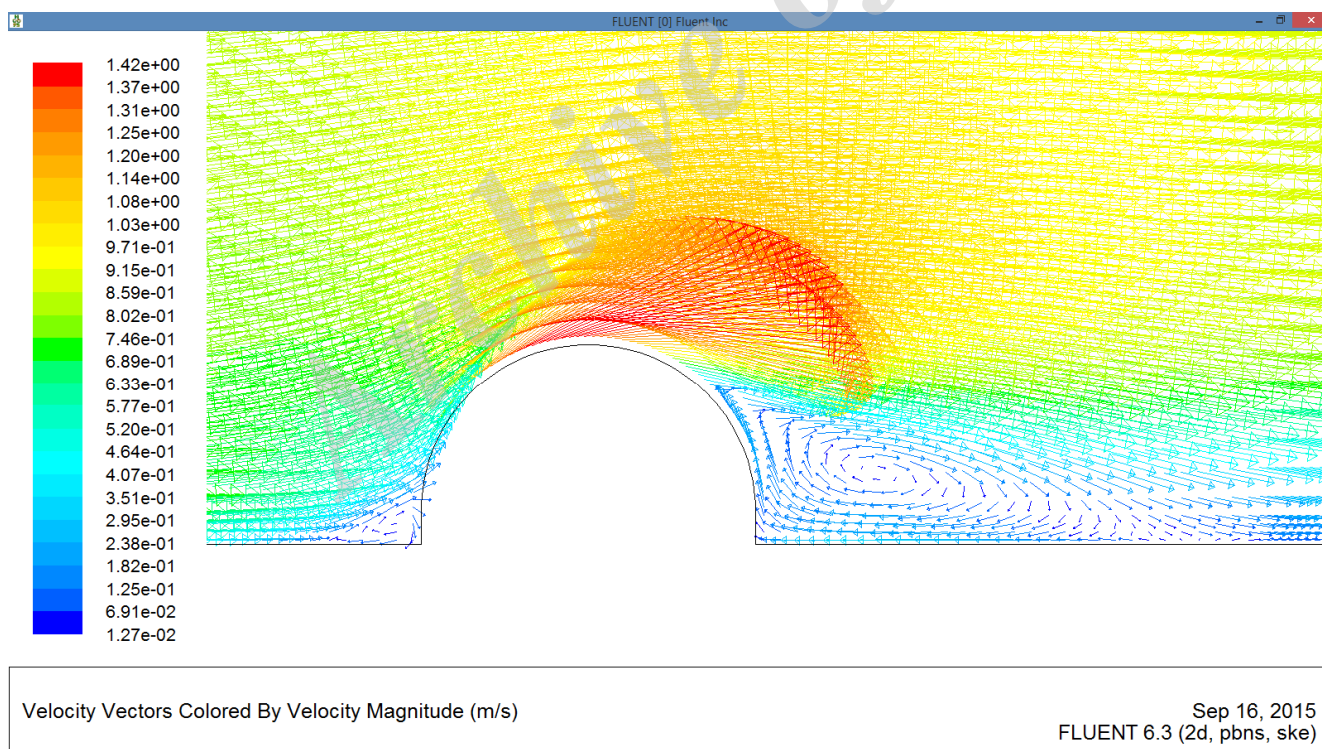
شکل ۴۰: کانتور سرعت گنبد با پایه B



شکل ۴۱: کانتور سرعت گنبد با پایه C



شکل ۴۲: کانتور سرعت گنبد با پایه D



شکل ۴۳: کانتور سرعت گنبد با پایه E



کانتور فشار جهت گنبد با پایه با نسبت ارتفاع به دهانه ۰/۵ و پایه به دهانه ۰/۱ مطابق شکل های (۴۴ تا ۴۶) می باشد.



شکل ۴۴: کانتور فشار گنبد با پایه A



شکل ۴۵: کانتور فشار گنبد با پایه B

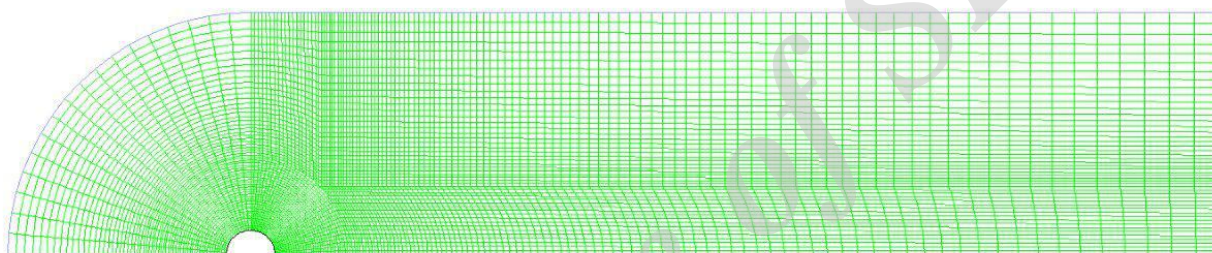


شکل ۴۶: کانتور فشار گنبد با پایه C

مقایسه نتایج و بررسی کانتورهای مختلف نشان می دهد که پایه ها سبب میشوند جریان علاوه بر پشت گنبد، در جلوی گنبد نیز چرخشی شده و برگشت جریان رخ دهد. ولی اگر پایه ای وجود نداشته باشد و فقط نیمکره باشد، در جلوی گنبد هیچگونه جریان چرخشی بوجود نمی آید.

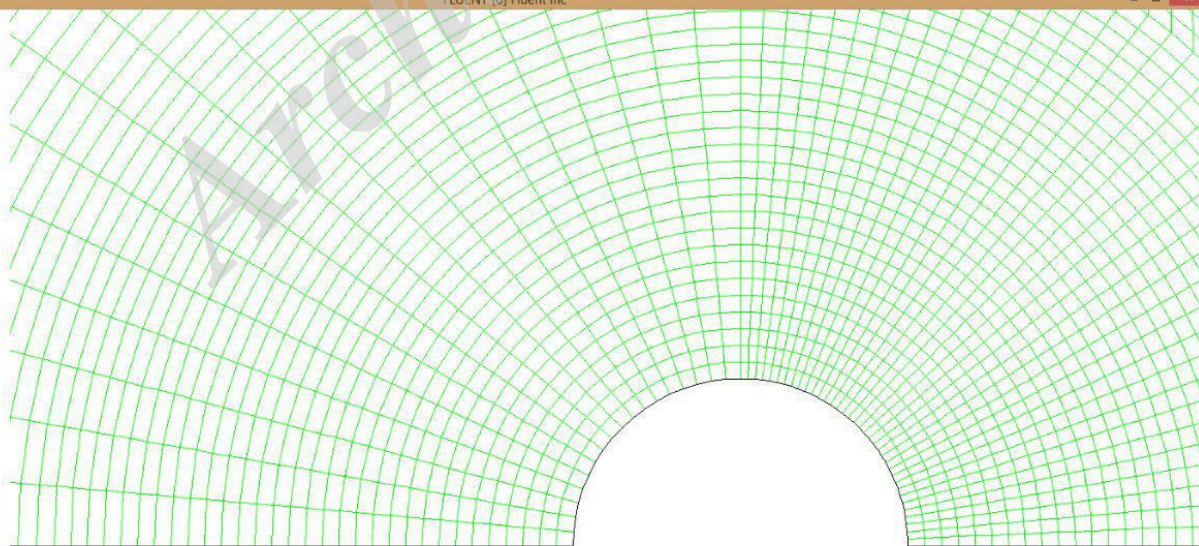
همچنین مدل جریان آرام غیر توبولانسی به صورت لامینار در برنامه آنالیز شده است که نحوه مش بندی آن در شکل های (۴۷ و ۴۸) نشان داده شده است.

FLUENT [0] Fluent Inc



شکل ۴۷: مش بندی جریان آرام A

FLUENT [0] Fluent Inc

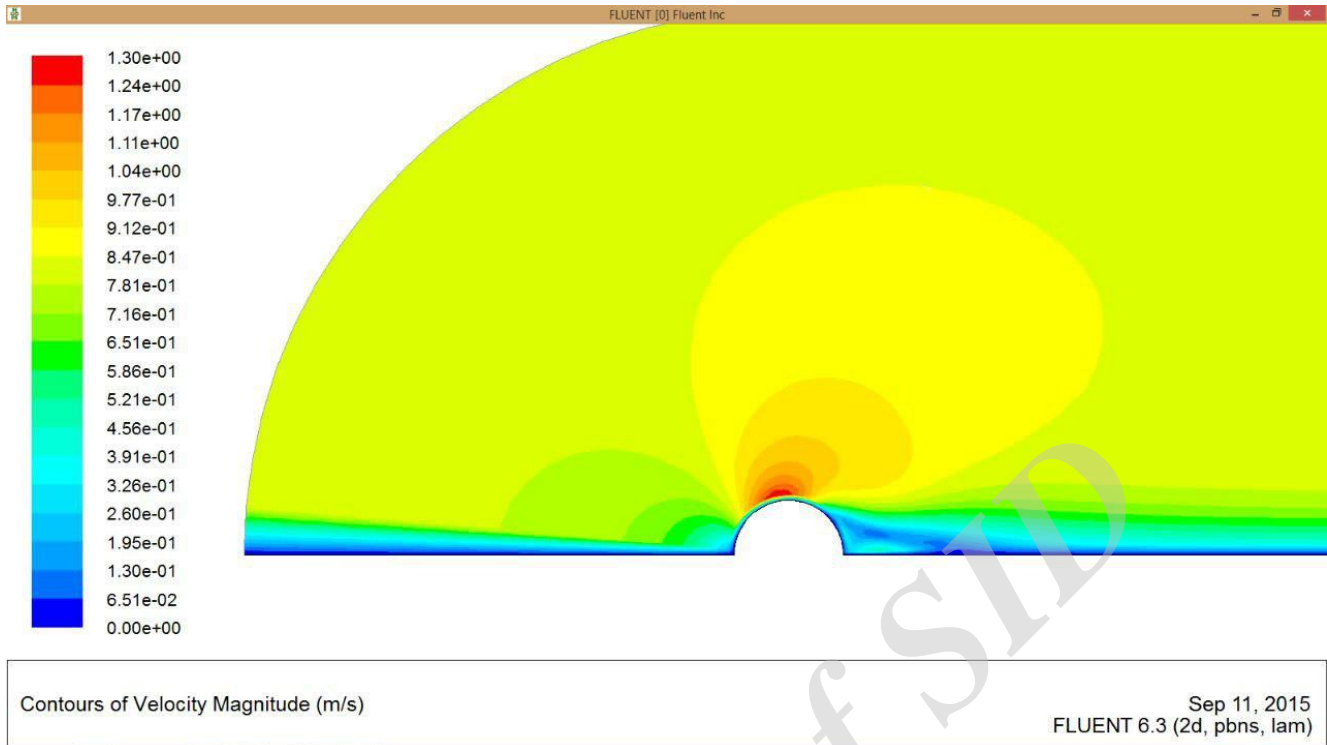


شکل ۴۸: مش بندی جریان آرام B

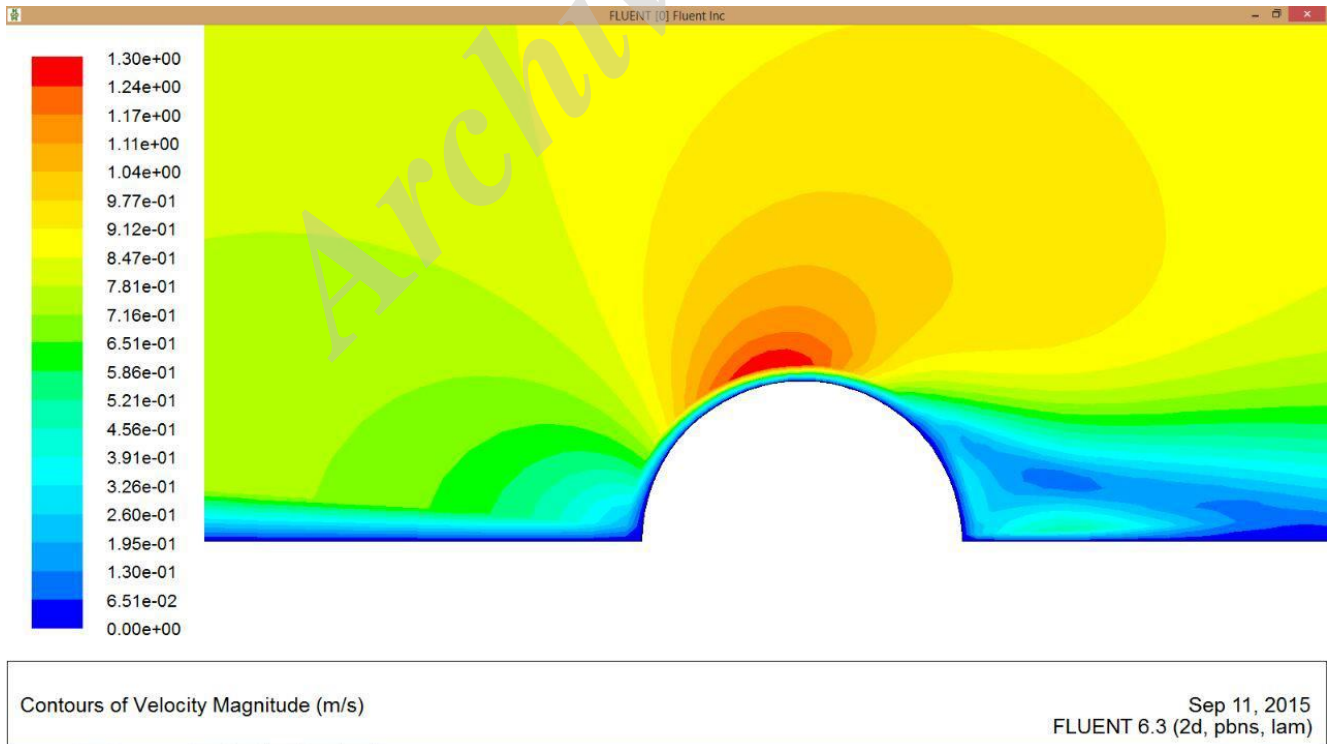
کانتور سرعت جهت جریان لامینار در شکل های (۴۹ تا ۵۳) از آنالیز بدست آمده است.



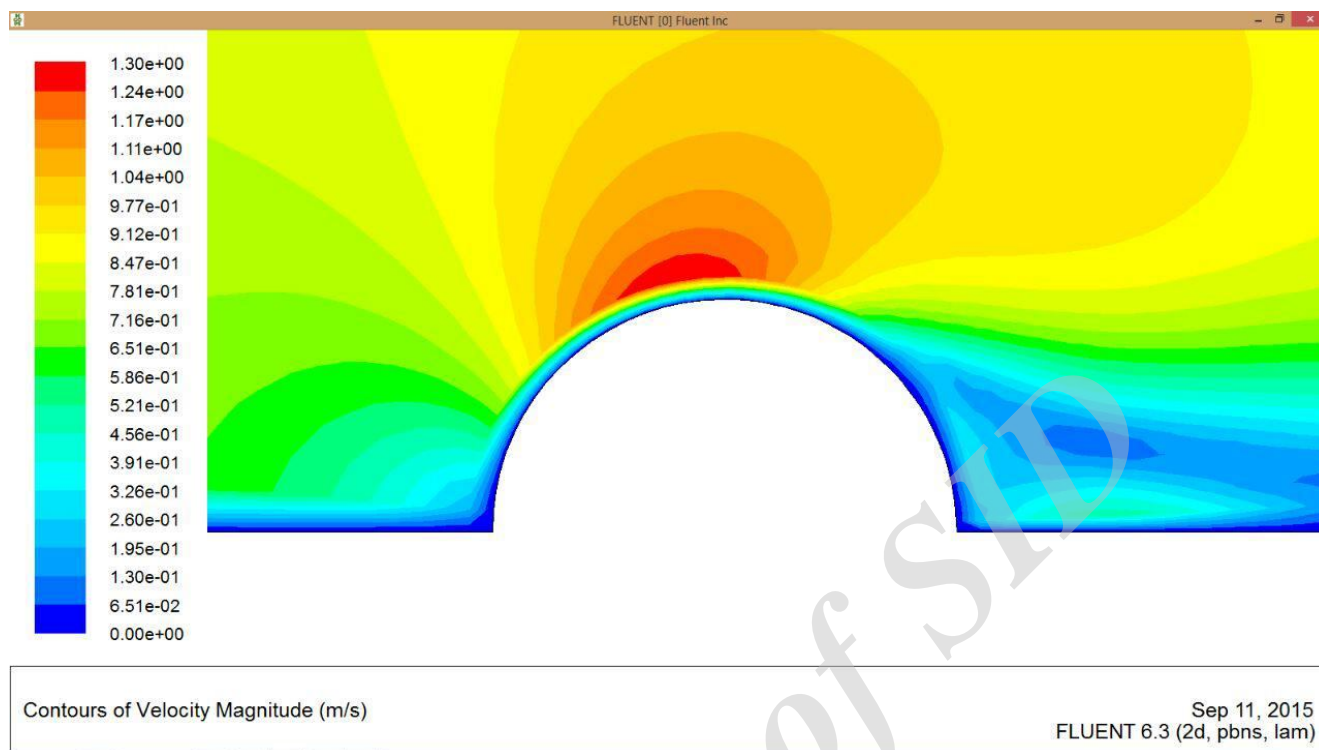
شکل ۴۹: کانتور سرعت جریان آرام A



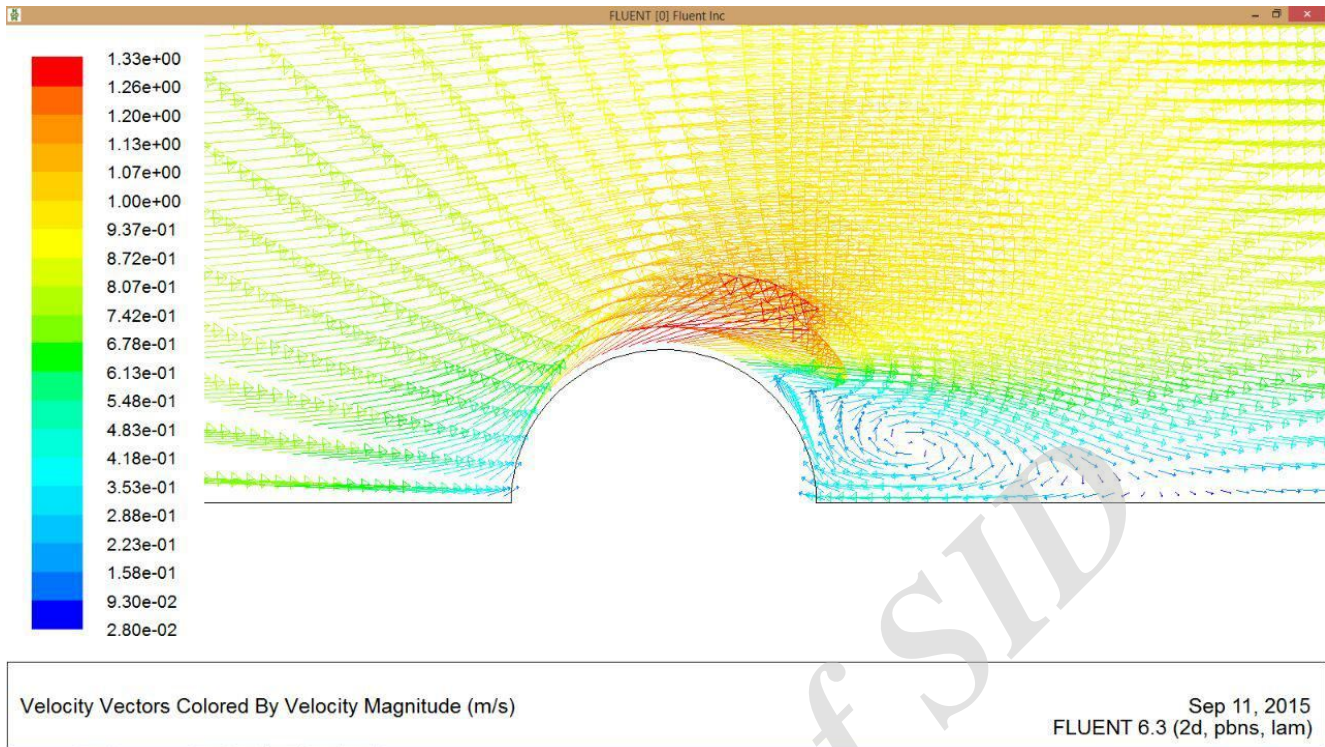
شکل ۵۰: کانتور سرعت جریان آرام B



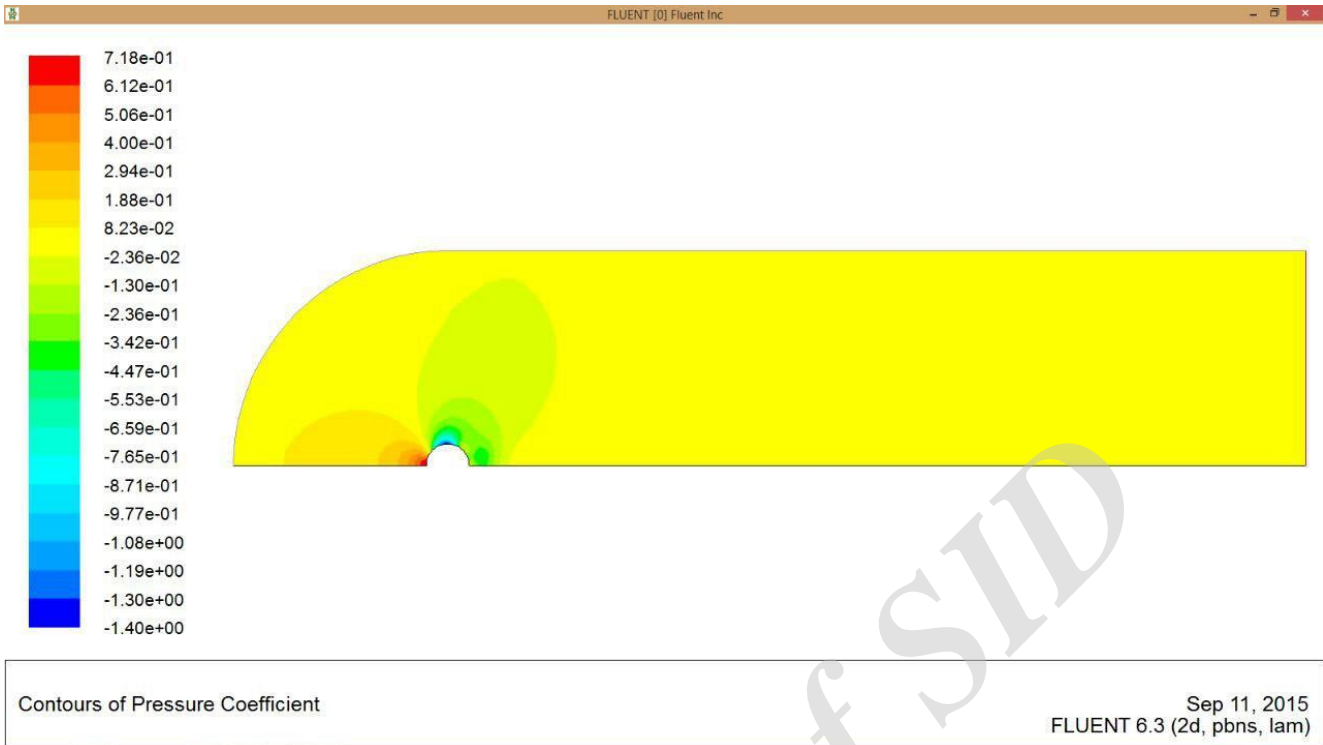
شکل ۵۱: کانتور سرعت جریان آرام C



شکل ۵۲: کانتور سرعت جریان آرام D



شکل ۵۳: کانتور سرعت جریان آرام E  
کانتور فشار جهت جریان لامینار در شکل های (۵۴ تا ۵۷) از آنالیز بدست آمده است.



شکل ۵۴: کانتور فشار جریان آرام

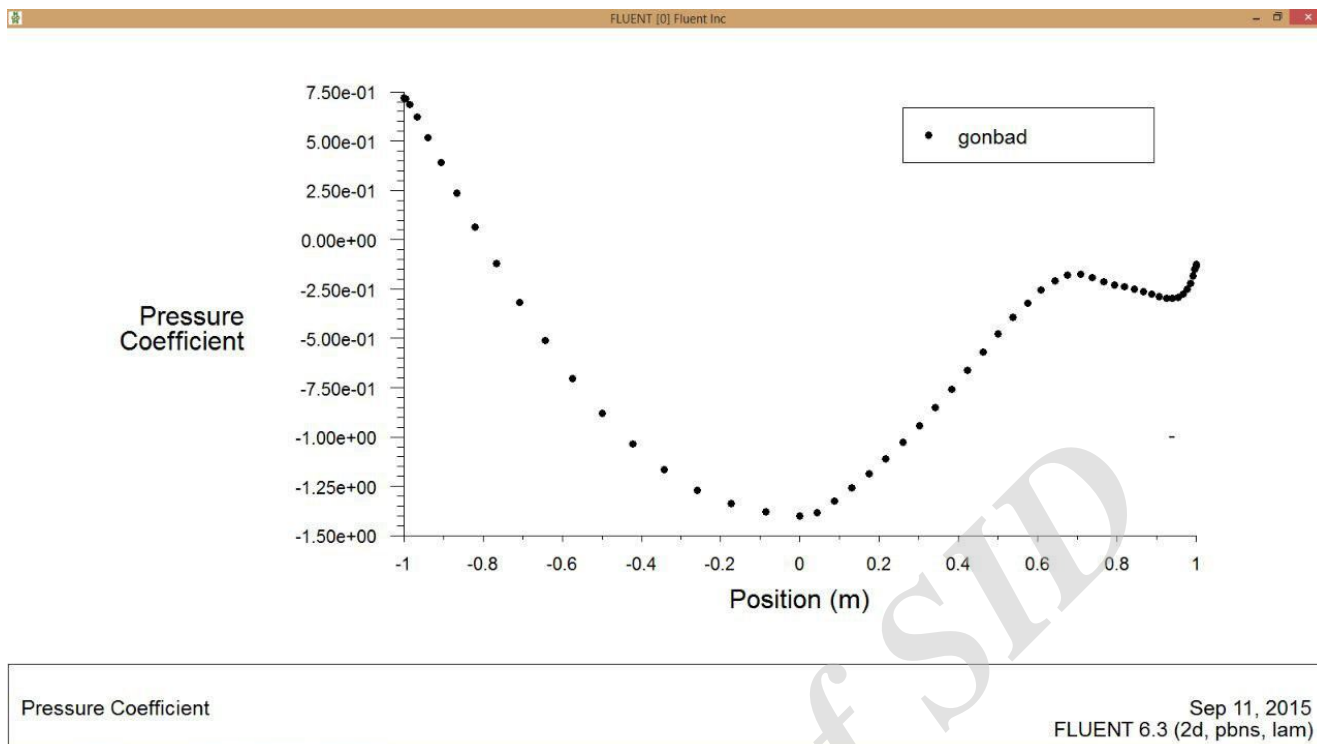




شکل ۵۵: کانتور فشار جریان آرام B



شکل ۵۶: کانتور فشار جریان آرام C



شکل ۵۷: کانتور فشار جریان آرام D

مقایسه نتایج بدست آمده از جریان لامینار و نتایج آزمایشگاهی نشان می دهد که جهت آنالیز گنبد در برابر بار باد نمی توان از خروجی های جریان لامینار استفاده نمود.

براساس نتایج حاصل از این پژوهش مشخص گردید که در هندسه های بررسی شده مدل های توربولانسی SST و K- $\omega$ SST و سپس شده مدل K- $\omega$  نتایج دقیق تری نسبت به سایر مدل ها ارائه می دهند.

## تجزیه و تحلیل

آیین نامه های موجود دنیا در زمینه بار باد به سه دسته کلی تقسیم می گردد:

دسته اول: آیین نامه های ISO، کانادا، نشریه ۴۰۰، هند و روسیه، ضریب  $C_p$  با توجه به زاویه  $\alpha$  مشخص می گردد.

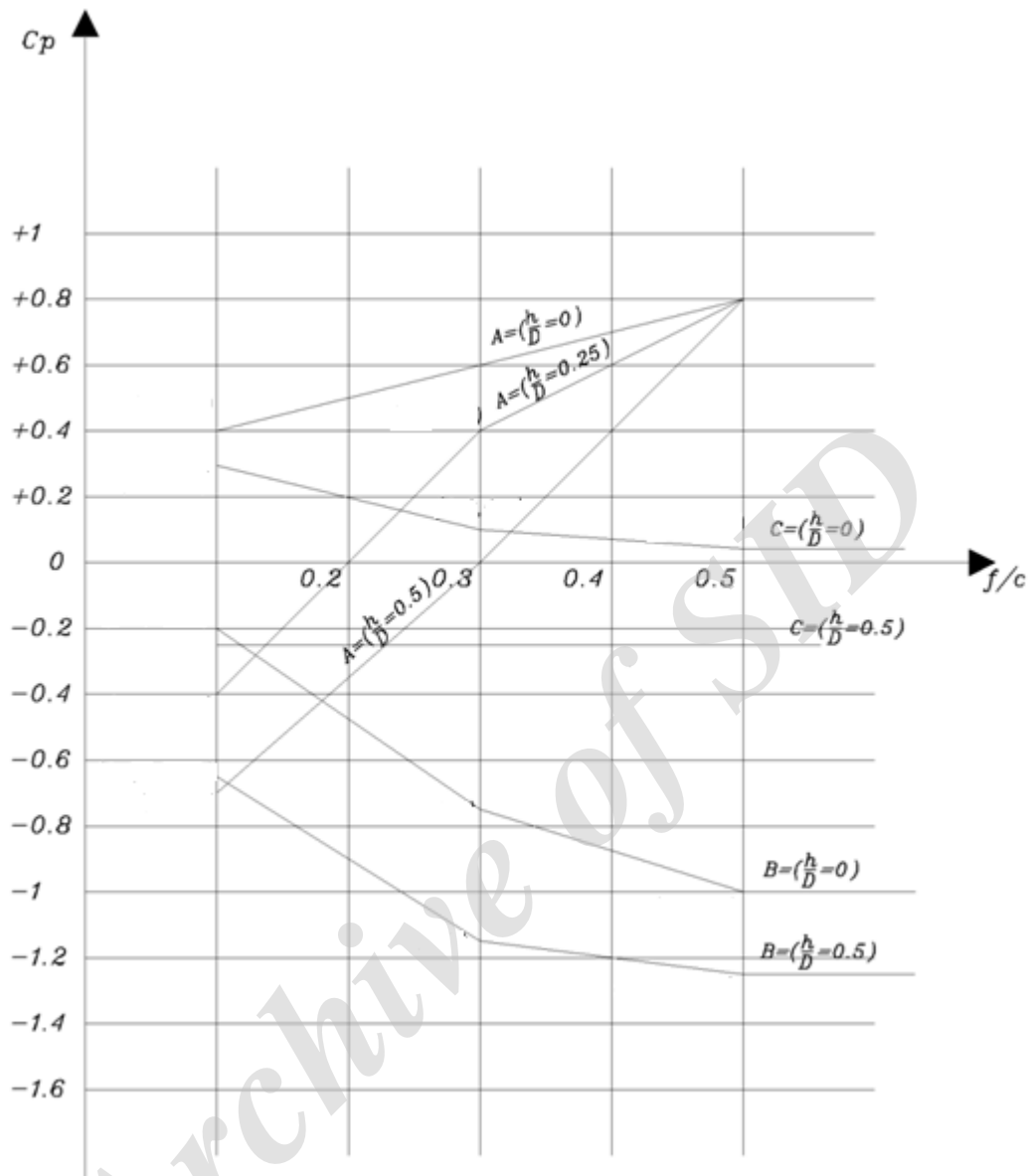
دسته دوم: آیین نامه های آمریکا و اروپا، مقادیر ضریب فشار جهت سه نقطه ابتدایی A، وسط B و انتهای گنبد C توسط یک گراف مشخص می گردد. ضریب فشار سایر نقاط را می توان از روش درون یابی بدست آورد.

دسته سوم: در آیین نامه ژاپن و استرالیا و نیوزیلند، گنبد به چند ناحیه تقسیم شده و برای هر قسمت مقدار ثابت ضریب فشار بر اساس یک جدول بدست می آید.

مشاهده می‌شود در یک پایه به دهانه ثابت ( $\frac{h}{D}$  ثابت)، هر چه نسبت ارتفاع گنبد به دهانه، ( $\frac{f}{D}$ )، بیشتر می‌شود، مقدار  $C_p$  نیز در نقطه A (اولین نقطه در جهت وزش باد) افزایش می‌یابد. همچنین این کمیت در بالاترین نقطه گنبد، نقطه B، کاهش یافته و در نقطه C (آخرین نقطه در جهت وزش باد) ثابت می‌ماند. بدین ترتیب فشار در نقطه A و مکش در نقطه B افزایش می‌یابد.

در نسبت  $\frac{h}{D}$  ثابت، با افزایش  $\frac{f}{D}$  نتایج ضریب فشار براساس آئین‌نامه EuroCode در نقطه A به نتایج آزمایشگاهی نزدیک‌تر می‌گردد. به نحویکه نتایج آئین‌نامه‌ای برای نقطه A در  $\frac{f}{D}$  کمتر از 0.3 و  $\frac{h}{D}$  بیشتر از 0.2 قابل اطمینان به نظر نمی‌رسد. در این بازه، آئین‌نامه EuroCode نیرو را مکشی در نظر گرفته، در صورتی که در آزمایش‌ها فشاری به ثبت رسیده است. قابل قبول‌ترین نتایج ضریب  $C_p$  از آئین‌نامه EuroCode مربوط به حالتی است که نسبت ارتفاع گنبد به دهانه  $\frac{f}{D}$  برابر 0.5 باشد.

بررسی و مقایسه آیین‌نامه‌ها با آخرین نتایج آزمایشگاهی نشان دهنده تطبیق بیشتر نتایج آیین‌نامه اروپا Euro Code می‌باشد. هرچند نتایج این آیین‌نامه هم نیاز به اصلاح ضرایب جهت تطابق بیشتر با آزمایشات دارد. لذا با بررسی مقادیر ضریب فشار آزمایشگاهی و مدل‌های عددی، گراف شکل (۵۸) جهت استفاده در آیین‌نامه‌ها و محاسبه ضریب فشار  $C_p$  پیشنهاد می‌گردد.



شکل ۵۸: گراف پیشنهادی ضریب فشار گنبد

ضرایب  $C_p$  برای نسبت‌های مختلف  $\frac{h}{D}$  و  $\frac{f}{D}$  براساس آزمایشات به صورت جدول (۱۳) پیشنهاد می‌شود.

جدول ۱۳: مقادیر پیشنهادی ضریب فشار گنبد

$\left(\frac{h}{D}\right) = 0$	$\left(\frac{f}{D}\right)$	A	B	C
	۰,۱	۰,۴	-۰,۲	۰,۳
	۰,۲	۰,۵۵	-۰,۵	۰,۲

	۰,۳	۰,۶	-۰,۷۵	۰,۱
	۰,۴	۰,۶۷	-۰,۸۵	۰,۱
	۰,۵	۰,۸	-۱	۰,۰۵
$\left(\frac{h}{D}\right) = 0.1$				
	۰,۱	۰	-۰,۳۷	۰,۱
	۰,۲	۰,۲	-۰,۶۵	۰,۱
	۰,۳	۰,۵	-۰,۸	۰
	۰,۴	۰,۶	-۰,۹	۰
	۰,۵	۰,۸	-۱,۰۵	۰
$\left(\frac{h}{D}\right) = 0.2$				
	۰,۱	-۰,۳	-۰,۴	۰,۱
	۰,۲	۰	-۰,۷۵	۰
	۰,۳	۰,۴	-۰,۹	۰
	۰,۴	۰,۶	-۱	۰
	۰,۵	۰,۸	-۱,۰۵	۰
$\left(\frac{h}{D}\right) = 0.3$				
	۰,۱	-۰,۵	-۰,۵	۰
	۰,۲	-۰,۲	-۰,۸	-۰,۱
	۰,۳	۰,۴	-۰,۹۷	-۰,۱۵
	۰,۴	۰,۵	-۱,۰۷	-۰,۱۵
	۰,۵	۰,۸	-۱,۱۵	-۰,۱۵
$\left(\frac{h}{D}\right) = 0.4$				
	۰,۱	-۰,۶۸	-۰,۵۵	-۰,۲
	۰,۲	-۰,۳۴	-۰,۸۸	-۰,۲
	۰,۳	۰,۰۸	-۱,۰۶	-۰,۲
	۰,۴	۰,۵	-۱,۱۵	-۰,۲
	۰,۵	۰,۸	-۱,۲	-۰,۲

$\left(\frac{h}{D}\right) = 0.5$				
	۰,۱	-۰,۷۵	-۰,۶۵	-۰,۲۵
	۰,۲	-۰,۵	-۰,۹	-۰,۲۵
	۰,۳	۰	-۱,۱۵	-۰,۲۵
	۰,۴	۰,۴	-۱,۱۷	-۰,۲۵
	۰,۵	۰,۸	-۱,۲۵	-۰,۲۵

مقایسه نتایج و بررسی کانتورهای مختلف نشان می دهد که وجود پایه در گنبدها سبب می شوند جریان علاوه بر پشت گنبد، در جلوی گنبد نیز چرخشی شده و برگشت جریان رخ دهد. ولی اگر پایه ای وجود نداشته باشد و فقط نیمکره باشد، در جلوی گنبد هیچگونه جریان چرخشی بوجود نمی آید. این نتیجه در آیین نامه ها ذکر نشده است و نتایج نشان دهنده لزوم دقت بیشتر در ساخت پایه ها و نمای پوشانه ای پایه گنبد می باشد.

جهت تحلیل عددی سازه های گنبدی شکل در برابر بار باد، نمی توان از جریان آرام لامینار استفاده نمود و استفاده از روش های آشفته مدل های توربولانسی SST و K- $\omega$ SST و K- $\omega$  نتایج مناسبی را ارائه می دهند.

## جمع بندی

تأثیر باد روی گنبدهای اسکلتی به عوامل زیر بستگی دارد:

الف) رفتار سازه ای:

اتصالات گنبد تک لایه خمش پذیر فرض شده و هر عضو دارای شش نیروی داخلی می باشد (یک نیروی محوری، دو نیروی برشی، دو لنگر خمشی و یک پیچش)؛ در صورتی که گنبدهای چند لایه رفتار خرپایی داشته و اعضا فقط تحت اثر نیروی محوری می باشند.

رفتار سازه روی مودهای تغییر شکل، میرایی، مقادیر ویژه، بردارهای ویژه و در نتیجه تحلیل سازه اثرگذار می باشد و کلیه این عوامل روی ضریب G مربوط به اثر دینامیکی بار باد موثر می باشند.

ب) محیط قرارگیری ساختمان از قبیل ارتفاع از سطح زمین و پوشش اطراف آن

ج) شدت بادخیزی منطقه که هر آیین نامه سرعت و فشار باد را در هر ناحیه معین می کند.

د) شکل سازه و میزان بازشوها، که روی ضرایب  $C_p$  داخلی و  $C_p$  خارجی تأثیر دارد.

ه) عوامل دیگر از قبیل اهمیت ساختمان و پوشش آن

## دلیل تمرکز بر روی ضریب $C_p$ جهت گنبدها

با تغییر شکل سازه تنها ضریب  $C_p$  تغییر می‌کند و سایر پارامترهای فشار مستقل از شکل و نسبت ارتفاع به دهانه می‌باشند. در مورد اثرات باد روی سازه‌های بلند آزمایشات و تحقیقات زیادی صورت گرفته است. در صورتی که براساس مطالعات حاضر، تحقیقات انجام شده برای گنبدها، اثر بار باد روی گنبدها و مخصوصاً تغییرات  $C_p$  اندک بوده‌اند.

### نتایج بدست آمده

آئین‌نامه EuroCode نتایج قابل اطمینان تری برای ضریب  $C_p$  به دست داده است.

آئین‌نامه EuroCode هم در نقاط در جهت وزش باد (نقطه A) برای  $\frac{f}{D}$  کمتر از ۰,۳ و  $\frac{h}{D}$  بیشتر از ۰,۲ قابل اطمینان نبوده و در این محدوده لازم است از طریق آزمایش و یا مدل سازی عددی به نتایج قابل قبولی دست یافت.

آئین‌نامه‌ها مقدار ضریب  $C_p$  را در جهات عمود بر وزش باد یکسان در نظر می‌گیرند؛ در صورتی که آزمایشات اندکی اختلاف را نشان می‌دهند.

استفاده از روش‌های عددی در صورت دقت در مش بندی و استفاده از مدل‌های توربولانسی مناسب، جواب‌های مناسب و نزدیک به نتایج آزمایشگاهی می‌دهد.

پس از بررسی آئین‌نامه‌ها، آزمایشات و تحلیل‌های عددی، استفاده از شکل (۵۸) و جدول (۱۳) جهت محاسبه مقادیر ضریب فشار در آئین‌نامه سازه‌های فضاکار پیشنهاد می‌گردد.

## «فهرست منابع و مآخذ»

۱. کتاب فارسی:

۳- سیف‌زاده ، حسن، سیف‌زاده ، حسین ، نظریه‌های مختلف در روابط بین الملل ، تهران ، نشر سفیر ، چاپ سوم ، (۱۳۷۴) ، صص ۱۰۷.

۴- آدرنو و دیگران (1992) در آمدی بر جامعه‌شناسی ادبیات ، گزیده و ترجمه : محمدجعفر پوینده ، تهران ، انتشارات نقش جهان ، چاپ دوم ، (۱۳۷۷).

۲. مقاله فارسی:

۶- عادلخانی ، هادی ، فرآیند سل - ژل ، مجله شیمی ، سال ۱۶ ، شماره ۲ ، (۱۳۸۲) ، ص ۵۰.

۸- قورچیان ، نادرقلی ، شاخص‌ها و معیارها در انتخاب موضوعات و پروژه‌های تحقیق و توسعه ، فصلنامه سیاست علمی و پژوهشی رهیافت ، شماره ۱۳ ، (۱۳۷۵) ، صص ۳۱-۳۳.

۳. پایان نامه :

۷- هیودی محمد، محمدرضا (۱۳۸۴) ، نقش تمایلات قومی در مشارکت سیاسی ، پایان نامه کارشناسی ارشد ، تهران ، دانشگاه تربیت مدرس ، دانشکده علوم انسانی.

۴. کتاب لاتین:

8- Grom, D.J. "Organic Chemistry", 3rd Ed., McGraw Hill, N.Y., pp. 77-80 ,1992.



۵. مقاله لاتین:

9- X.F.Wang , G.Ghen, and K.T.Ko , " A stability theorem for intrnet congestion control," System & Control Letters, vol. 45, no. 2, pp.81-85 , Feb.2002.

10- S.Servetto , et al., " Video multicast in ( large) local area network ," in Proc. Of IEEE INFOCOM , vol. 2 , pp. 733-142 , New York , NY , Jun. 2002.

۶. ثبت اختراع:

11- Micholowicz, W.A., U.S. Patent 29224829, Sep.1981.

Archive of SID

### **Abstract**

This document provides a template for final reports of research projects which are funded by Research and Technology Deputy of ACECR. All of the current regulations about final reports are mentioned in this document.

It is expected that this document will be used by researchers to improve the quality of their reports.

**Keywords:** Report Template, Research Report Format, Scintific Writing

Archive of SID



**ACECR**

**Research and Technology  
Deputy**



**Islamic Republic of Iran**

**FINAL REPORT**

**The effect of wind load on domes and suggestion of  
code's coefficients  
(Ver. 1)**

**(Code No. 2465-20)**

**Kerman Branch**

**Project Manager: F. REZAEI NAMDAR**

**Advanced Structural Technologies**

**December 2017**