

بررسی فشار باد بر سقف‌های چادری با فرم قیفی به روش شبیه‌سازی عددی

بنت‌الهدی سازگاران^۱، حسن حاجی‌کاظمی^{۲*}

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۵/۲۲	<p>فرم قیفی، یکی از متداول‌ترین و بهترین فرم‌های سازه‌های چادری است که عموماً به‌عنوان پوشش سقف در فضاهای با دهانه‌های کوچک و متوسط به کار می‌رود. به‌دلیل سبکی سازه چادری، بار باد اصلی‌ترین بار طراحی این سازه‌ها است، اما به‌علت شکل ویژه این سازه‌ها، استفاده از آیین‌نامه‌های بارگذاری برای تعیین بار باد امکان‌پذیر نیست. در این مقاله، تلاش شده است اثر بار باد بر سازه‌های چادری قیفی به روش شبیه‌سازی عددی مطالعه و پارامترهای مؤثر بر مقدار فشار باد تعیین و ارزیابی شود. به این منظور ۴۸ نمونه سازه چادری با فرم قیفی در محیط نرم‌افزار Fluent مدل‌سازی و تحلیل وزش باد در اطراف نمونه‌ها انجام شده است. با استفاده از نتایج تحلیل، اثر مشخصات هندسی نمونه‌ها، چون زاویه شیب کلی فرم، اندازه نسبی دایره بالای فرم قیفی و زاویه شروع قوس ایجادکننده فرم در پایین، بر توزیع فشار باد بررسی شده است. مشخص می‌شود که در میان پارامترهای هندسی موردنظر، زاویه شیب کلی فرم قیفی مؤثرترین عامل در تغییرات فشار باد بر سطح نمونه‌ها است.</p>
پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۱۱/۱۴	
<p>واژگان کلیدی: سازه کششی چادری، فرم قیفی، باد، دینامیک سیالات محاسباتی.</p>	

۱- مقدمه

سازه چادری، به سازه‌ای گفته می‌شود که در آن پارچه به‌عنوان یک عضو سازه، وظیفه تحمل و انتقال بار را انجام می‌دهد. اگرچه استفاده از سازه‌های چادری، قدمتی چنددهه‌ار ساله دارد، طراحی و ساخت سازه‌های چادری نو از حدود نیم قرن پیش آغاز شده است [۱]. استفاده از تکنولوژی‌های جدید در تولید پارچه‌های ساختمانی، منجر به بهبود مشخصات مکانیکی و دوام این مصالح ساختمانی شده و این امر، به‌همراه خصوصیات ویژه سازه‌های چادری، چون وزن کم، قابلیت پوشش دادن دهانه‌های بزرگ بدون استفاده از ستون و امکان ایجاد اشکال ویژه معماری، موجب رونق استفاده از این سازه‌ها شده است [۲].

با توجه به اینکه پارچه، تنها می‌تواند نیروی کششی را تحمل کند، سازه‌های چادری باید دارای شکل‌های خاصی برای توانایی انتقال بار باشند. در نتیجه، طراحی فرم صحیح در سازه‌های چادری، بسیار مهم و مؤثر است، زیرا عامل پایداری و رفتار سازه‌ای مناسب سازه است. یکی از

قدیمی‌ترین، متداول‌ترین و پرکاربردترین فرم‌های سازه‌های چادری، فرم قیفی است که هم به‌صورت منفرد و هم به‌صورت ترکیبی با سایر فرم‌ها استفاده می‌شود. از آنجا که سازه‌های چادری^۳ بسیار سبک هستند، عموماً فشار باد مؤثرترین بار در طراحی این سازه‌ها است. اما به دلیل فرم خاص این سازه‌ها، تعیین بار باد با استفاده از آیین‌نامه‌های بارگذاری موجود، امکان‌پذیر نیست. از سوی دیگر تحقیقات بسیار کمی درباره تعیین بار باد بر سازه‌های چادری انجام شده است که بیشتر محدود به آزمایش‌های موردی و کوچک می‌شود [۱]. اولین تحقیقات در این زمینه در دهه ۹۰ آغاز شد. در این پژوهش‌ها تعداد انگشت‌شماری آزمایش تونل باد بر روی سازه‌های چادری با فرم‌های خاص انجام و نتایج به‌صورت موردی و محدود گزارش شده است [۳-۶]. تحقیقاتی که مشخصاً در موضوع بار باد بر سازه‌های چادری با فرم قیفی انجام شده، محدود به سه آزمایش تونل باد بر روی نمونه‌های کوچک فرم قیفی با پلان دایره و مربع است که نتایج آزمایش‌ها به‌صورت ضریب فشار باد وارد بر

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: hkazemi@um.ac.ir

۱. دانشجوی دکتری سازه، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

۲. استاد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

^۳ Fabric Structure

قیفی‌شکل، متأثر از کشش داخلی پارچه در دو جهت اصلی تار و پود پارچه است و با روش‌های دستیابی به فرم بهینه دست‌یافتنی است. روشی که در این پژوهش برای ایجاد شکل قیفی پوشش سقف استفاده شده، با دقت خوبی قادر به شبیه‌سازی فرم‌هایی است که عموماً در پوشش‌های قیفی مورد استفاده قرار می‌گیرد. هدف از انتخاب این روش، یکنواختی سطح و سهولت تعیین زاویه قوس در هر نقطه از سطح پوشش قیفی سقف و در نتیجه ایجاد امکان انتخاب گزینه‌های مناسب و مؤثر در نتایج بررسی است.

در این پژوهش، فرض شده است که پوشش قیفی بر سقف ساختمانی کاملاً بسته قرار دارد، به این معنا که فشار داخلی ساختمان متأثر از تغییرات فشار خارجی نیست. ابعاد مدل‌ها به نحوی انتخاب شده است که معادل یک سقف قیفی متوسط باشد که معمولاً در ساختمان‌های با فضای بسته استفاده می‌شود. ابعاد کوچک‌تر معمولاً مختص سایه‌بان‌هایی است که فشار فضای داخلی و خارجی آن مجزا نیست. در شکل (۱) جزئیات مدل‌ها و پارامترهای مؤثر در مدل‌سازی ارائه شده است. پارامترهای مستقلی که تأثیر آن‌ها بر فشار ناشی از باد بر فرم قیفی بررسی شده، به قرار زیر است. سایر پارامترهای تعریف‌کننده فرم قیفی وابسته به این پارامترهای مستقل هستند.

نمونه‌ها ارائه شده است [۹-۷]. به دلیل کمبود تعداد نمونه‌ها در این آزمایش‌ها، امکان بررسی اثر مشخصات هندسی فرم قیفی بر مقدار ضرایب فشار وجود ندارد.

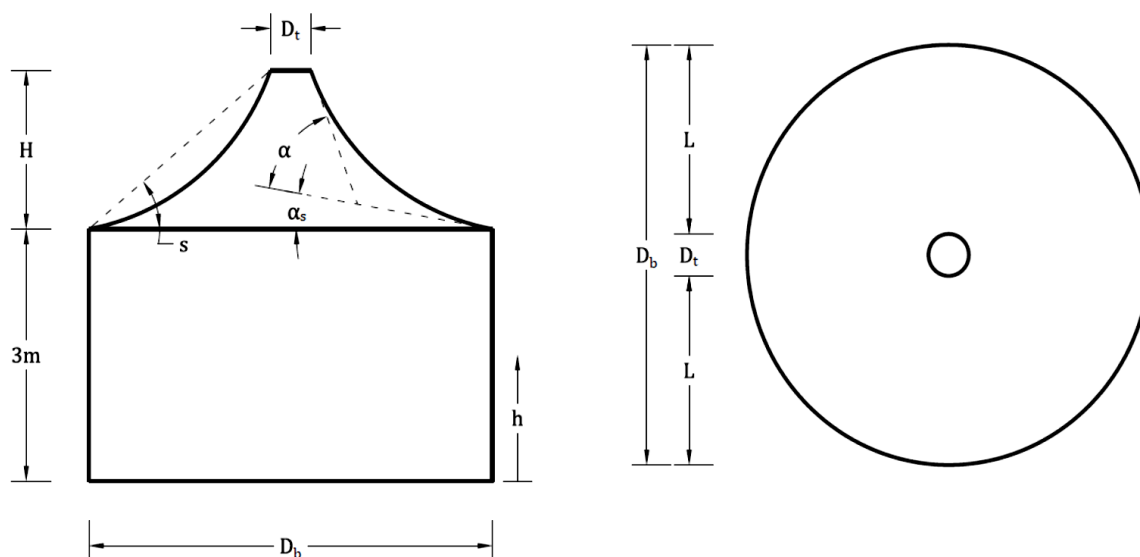
امروزه استفاده از سازه‌های چادری در حال افزایش است و شرکت‌های طراحی و مجری این سازه‌ها، معمولاً از روش‌های تجربی شخصی و بدون پشتوانه علمی مشخص برای تعیین بار باد بر این سازه‌ها استفاده می‌کنند. در نتیجه انجام مطالعات درباره نحوه بارگذاری باد بر سازه‌های چادری یکی از اقدامات اولیه و مهم در این حوزه است.

در این پژوهش، تعدادی پوشش پارچه‌ای با فرم قیفی^۱ در محیط نرم‌افزار Fluent مدل‌سازی شده و اثر وزش باد بر این سازه‌ها مورد بررسی کیفی قرار گرفته است. تلاش شده است که پارامترهای مؤثر بر توزیع فشار وارد بر فرم قیفی شناسایی و میزان تأثیر هر یک بررسی شود.

۲- معرفی مدل‌ها

۲-۱- هندسه مدل‌ها

مدل‌های انتخاب‌شده در این بررسی، دارای مقطع افقی دایره و پوشش سقف به فرم قیفی است. شکل قیفی سقف، از دوران قطاعی از دایره، بخشی از بیضی یا یک منحنی ترکیبی از دایره و خط، حول مرکز دایره پلان به دست آمده است. شایان توجه است که فرم واقعی یک پوشش پارچه‌ای



شکل ۱: سازه مدل‌سازی‌شده در تونل باد و پارامترهای مؤثر (سمت راست پلان، سمت چپ نمای جانبی)

² Form Finding

¹ Cone-Like Form or Conical Form

جدول ۱: مشخصات مدل‌ها

تعداد کلی مدل‌ها	نام مدل	قطر دایره بالا	K	زاویه راستای اریب فرم	اختلاف زاویه دو سر قوس	زاویه شروع قوس	نوع قوس فرم
		$D_t(m)$	D_t/L	S(deg.)	$\alpha(deg.)$	$\alpha_s(deg.)$	
۳	C15-(K=۰/۲، ۰/۷، ۱/۱)-۰-۳۰	۰/۵۰	۰/۲۲، ۰/۶۷، ۱/۱۱	۱۵	۳۰	۰	دایره
۶	E15-(K=۰/۲، ۰/۷، ۱/۱)-۰-۶۰	۰/۵۰	۰/۲۲، ۰/۶۷، ۱/۱۱	۱۵	۶۰	۰	بیضی
۹	E15-(K=۰/۲، ۰/۷، ۱/۱)-۰-۹۰	۰/۵۰	۰/۲۲، ۰/۶۷، ۱/۱۱	۱۵	۹۰	۰	بیضی
۱۲	C4۰-(K=۰/۲، ۰/۷، ۱/۱)-۲۵-۳۰	۰/۵۰	۰/۲۲، ۰/۶۷، ۱/۱۱	۴۰	۳۰	۲۵	دایره
۱۵	CL4۰-(K=۰/۲، ۰/۷، ۱/۱)-۲۵-۳۰	۰/۵۰	۰/۲۲، ۰/۶۷، ۱/۱۱	۴۰	۳۰	۲۵	دایره-خط
۱۸	E4۰-(K=۰/۲، ۰/۷، ۱/۱)-۱۰-۵۰	۰/۵۰	۰/۲۲، ۰/۶۷، ۱/۱۱	۴۰	۵۰	۱۰	بیضی
۲۱	E4۰-(K=۰/۲، ۰/۷، ۱/۱)-۰-۶۰	۰/۵۰	۰/۲۲، ۰/۶۷، ۱/۱۱	۴۰	۶۰	۰	بیضی
۲۴	C4۰-(K=۰/۲، ۰/۷، ۱/۱)-۱۰-۶۰	۰/۵۰	۰/۲۲، ۰/۶۷، ۱/۱۱	۴۰	۶۰	۱۰	دایره
۲۷	E4۰-(K=۰/۲، ۰/۷، ۱/۱)-۲۰-۶۰	۰/۵۰	۰/۲۲، ۰/۶۷، ۱/۱۱	۴۰	۶۰	۲۰	بیضی
۳۰	CL4۰-(K=۰/۲، ۰/۷، ۱/۱)-۲۰-۶۰	۰/۵۰	۰/۲۲، ۰/۶۷، ۱/۱۱	۴۰	۶۰	۲۰	دایره-خط
۳۳	E4۰-(K=۰/۲، ۰/۷، ۱/۱)-۱۰-۶۵	۰/۵۰	۰/۲۲، ۰/۶۷، ۱/۱۱	۴۰	۶۰	۱۰	بیضی
۳۶	E4۰-(K=۰/۲، ۰/۷، ۱/۱)-۱۰-۸۰	۰/۵۰	۰/۲۲، ۰/۶۷، ۱/۱۱	۴۰	۱۰	۸۰	بیضی
۳۹	E4۰-(K=۰/۲، ۰/۷، ۱/۱)-۰-۹۰	۰/۵۰	۰/۲۲، ۰/۶۷، ۱/۱۱	۴۰	۰	۶۰	بیضی
۴۲	E6۵-(K=۰/۲، ۰/۷، ۱/۱)-۲۰-۶۰	۰/۵۰	۰/۲۲، ۰/۶۷، ۱/۱۱	۶۵	۲۰	۶۰	بیضی
۴۵	CL6۵-(K=۰/۲، ۰/۷، ۱/۱)-۲۰-۶۰	۰/۵۰	۰/۲۲، ۰/۶۷، ۱/۱۱	۶۵	۲۰	۶۰	دایره-خط
۴۸	E6۵-(K=۰/۲، ۰/۷، ۱/۱)-۰-۹۰	۰/۵۰	۰/۲۲، ۰/۶۷، ۱/۱۱	۶۵	۰	۹۰	بیضی

تحلیل جریان با ابعاد بسیار بزرگ برای نمونه‌های کوچک و افزایش زمان تحلیل پیشگیری شود. به این منظور ضریب انسداد مقطع تونل (معادل نسبت مساحت تصویر مانع به مساحت مقطع عرضی تونل) به ۰/۲ محدود شده است. تصویری از یکی از نمونه‌ها در شکل (۲) نمایش داده شده است. با توجه به متغیر بودن اندازه مانع در نمونه‌های مختلف، ابعاد تونل در مدل‌سازی‌ها متغیر است. به‌طور کلی عرض تونل حداقل ۱۰ برابر عرض مانع، طول حداقل ۱۵ برابر عرض مانع و ارتفاع حداقل ۷ برابر ارتفاع مانع در نظر گرفته شده است.

۲-۲- جدول مشخصات و تعریف نام مدل‌ها

به‌منظور بررسی فشار ناشی از باد بر سطح سازه چادری با فرم قیفی، ۴۸ مدل متفاوت تعریف و بررسی شده که مشخصات آن‌ها در جدول ۱ آمده است. با توجه به اینکه

- زاویه شیب فرم قیفی (S)
- اندازه نسبی دایره بالای فرم: قطر دایره بالا به کمترین فاصله افقی دایره بالا و پایین ($K = D_t/L$)
- زاویه شروع قوس ایجادکننده فرم قیفی در پایین (α_s)
- اختلاف زاویه ابتدا و انتهای قوس ایجادکننده فرم قیفی (α)
- نوع قوس ایجادکننده فرم قیفی (دایره، بیضی یا ترکیبی)

مدل‌سازی با مقیاس ۱:۱ انجام شده است. ابعاد تونل باد محاطی مدل، به‌صورتی انتخاب شده است که مرزهای تونل، تأثیری بر جریان باد داخل تونل نداشته باشد. با توجه به اینکه ابعاد کلی نمونه‌ها متفاوت است، ابعاد تونل باد در مورد هر نمونه به نحوی انتخاب شده است که با ابعاد نمونه متناسب باشد تا ضمن تأمین شرایط مناسب مدل‌سازی، از

۲-۳- مش‌بندی

به‌منظور تحلیل حساسیت مدل‌سازی به ابعاد مش، بررسی تأثیر روش مش‌بندی روی سطح مدل در نتایج و انتخاب ابعاد مش مناسب برای مدل‌سازی، یکی از نمونه‌ها با ابعاد متوسط انتخاب شده و با مش‌بندی‌های گوناگون مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. با توجه به اینکه نرم‌افزار Fluent امکان انجام مش‌بندی با چند روش متعدد را فراهم می‌سازد، جهت تغییر ابعاد المان‌ها از این روش‌ها استفاده شده است. در مش‌بندی با متد اول، محیط جریان با مش ریز (مطابق پیش‌فرض‌های مش Fine در زیربرنامه مش‌بندی Ansys ICEM CFD) مش‌بندی شده است، ضمن اینکه مش اطراف نمونه با استفاده از امکان Mesh Refinement با درجات مختلف ریز شده است. در متد دوم مش‌بندی، تعداد المان‌ها در محدوده جریان با تعیین ابعاد حداکثر برای هر المان، افزایش داده شده و ابعاد مش ریز در محدوده اطراف مدل نیز به‌صورت مستقیم با تعیین ابعاد حداکثر المان در این محدوده مشخص شده است. در مش‌بندی ترکیبی دو متد، ضمن کاهش ابعاد کلی المان‌ها در محیط جریان و محدوده اطراف مدل، از Mesh Refinement جهت ریزترکردن مش در سطح مدل استفاده شده است.

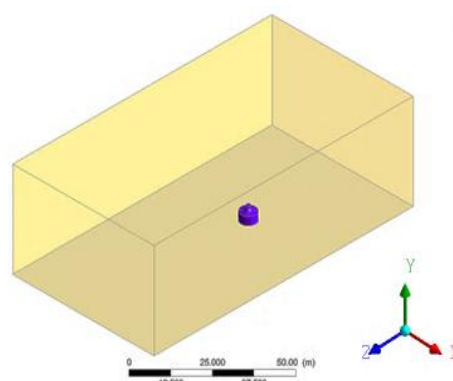
برای بررسی اثر باد بر سقف پارچه‌ای قیفی، از ضریب فشار با رابطه زیر استفاده شده است [۱۰]:

$$C_p = \frac{P_s - P_r}{Q_R} = \frac{P_s - P_r}{\rho_a V_R^2 / 2} \quad (1)$$

که C_p ضریب فشار، P_s فشار سطحی اندازه‌گیری شده، P_r فشار مینا، Q_R فشار متوسط دینامیک، ρ_a چگالی جرمی هوا و V_R سرعت متوسط باد در بالاترین نقطه پوشش سقف است. توجه شود که ضریب فشار منفی نمایشگر وجود نیروی کششی در سطح است. ضریب فشار میانگین در سه ناحیه اصلی سطح قیفی در برابر تعداد المان‌ها در شکل (۳) ارائه شده است (نواحی مورد مطالعه در شکل (۵) ارائه شده است). روش مش‌بندی سطح نمونه در مدل‌های مختلف، در قسمت پایین نمودار نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که گزینه سوم مش‌بندی سطحی با روش اول، علی‌رغم تعداد بسیار کمتر المان‌ها در کل مدل، نتایجی تقریباً مشابه روش ترکیبی مش‌بندی سطحی با حدود چهار برابر المان در کل مدل داده است. با در نظر گرفتن این نکته که ریزکردن بیش از حد المان‌ها به‌ویژه المان‌های سطحی مدل

برای تعریف هندسه هر نمونه ۵ پارامتر هندسی مستقل تعیین شده، تعداد کل نمونه‌ها به‌نحوی انتخاب شده است که برای بررسی اثر هر پارامتر، حداقل سه نمونه مناسب جهت مقایسه وجود داشته باشد. برای شناسایی مدل‌ها، از روش نام‌گذاری به‌صورت زیر استفاده شده است:

- نام مدل با یکی از حروف E، C و CL آغاز می‌شود که نشان‌دهنده قوس اولیه تشکیل‌دهنده فرم قیفی است و به‌ترتیب به‌معنای قوس بیضی، قوس دایره و منحنی ترکیبی دایره - خط است.
- عدد اول در نام مدل نشانگر زاویه شیب کلی فرم (S) است.
- عدد دوم در نام مدل نماینده اندازه نسبی دایره بالای فرم (K) است.
- عدد سوم در نام مدل نشان‌دهنده اختلاف زاویه ابتدا و انتهای قوس ایجادکننده فرم قیفی (α) است.
- عدد چهارم در نام مدل بیانگر زاویه شروع قوس اولیه ایجادکننده فرم در پایین (α_s) است.

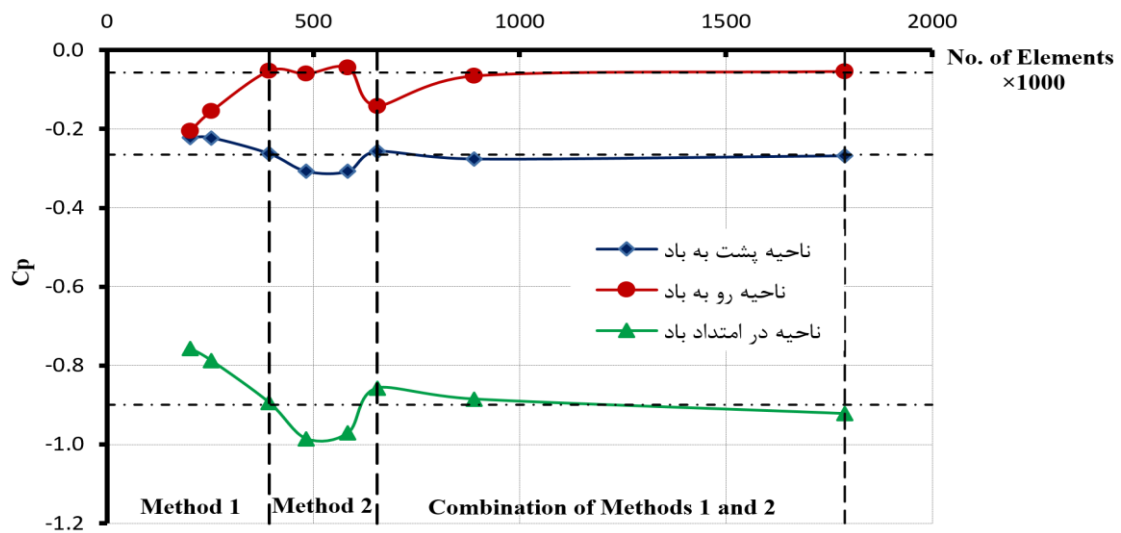


شکل ۲: نمای یکی از مدل‌ها در تونل باد

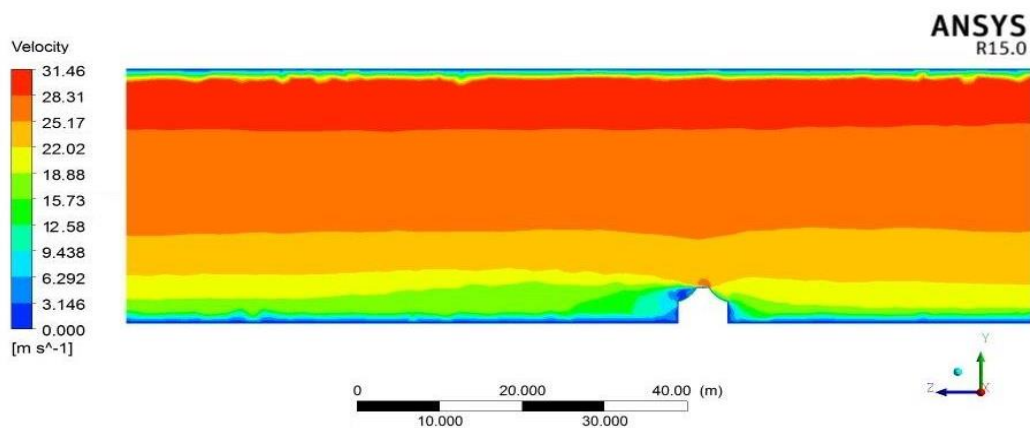
برای مثال، نام مدل شماره یک در جدول ۱، ۰-۳۰-۰-۰/۲-۱۵ C است که به‌معنای مدلی تشکیل‌شده از دوران قطاعی از دایره، با زاویه شیب کلی فرم ۱۵ درجه، اندازه نسبی دایره بالای فرم معادل ۰/۲، اختلاف زاویه ابتدا و انتهای قوس ایجادکننده فرم برابر ۳۰ درجه و زاویه شروع قوس مساوی صفر درجه (خط افقی) است.

برای اشاره به گروهی از مدل‌ها، وجه‌مشترک این گروه با حرف G نشان داده خواهد شد. برای مثال E-۰-۴۰/۲-G-۰ معرف گروهی از مدل‌ها است که در آن‌ها اختلاف زاویه ابتدا و انتهای قوس تغییر می‌کند، اما سایر مشخصات یکسان است.

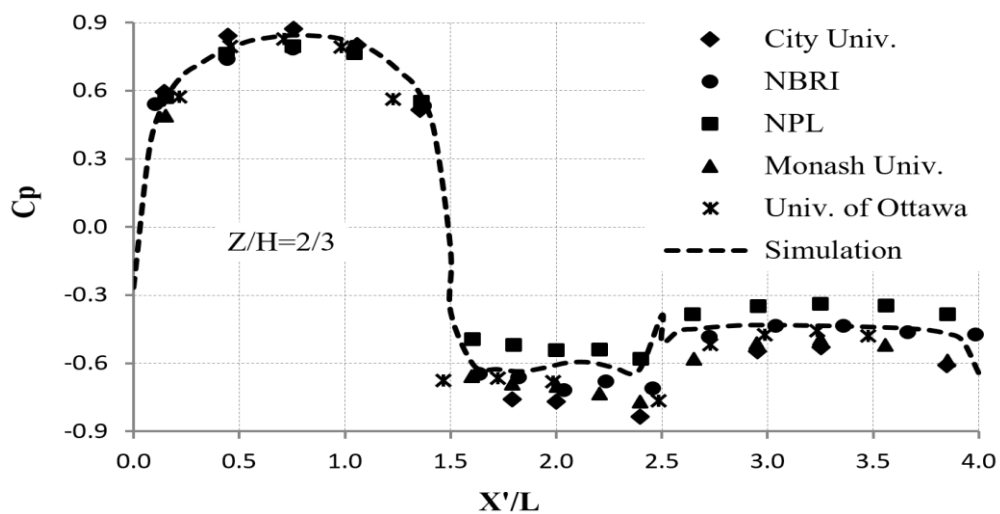
منجر به افزایش خطای محاسبات و دور شدن از پاسخ صحیح می‌شود، گزینه سوم مش‌بندی با متد اول، به‌عنوان روش مورد استفاده در مش‌بندی کل مدل‌ها انتخاب می‌شود.



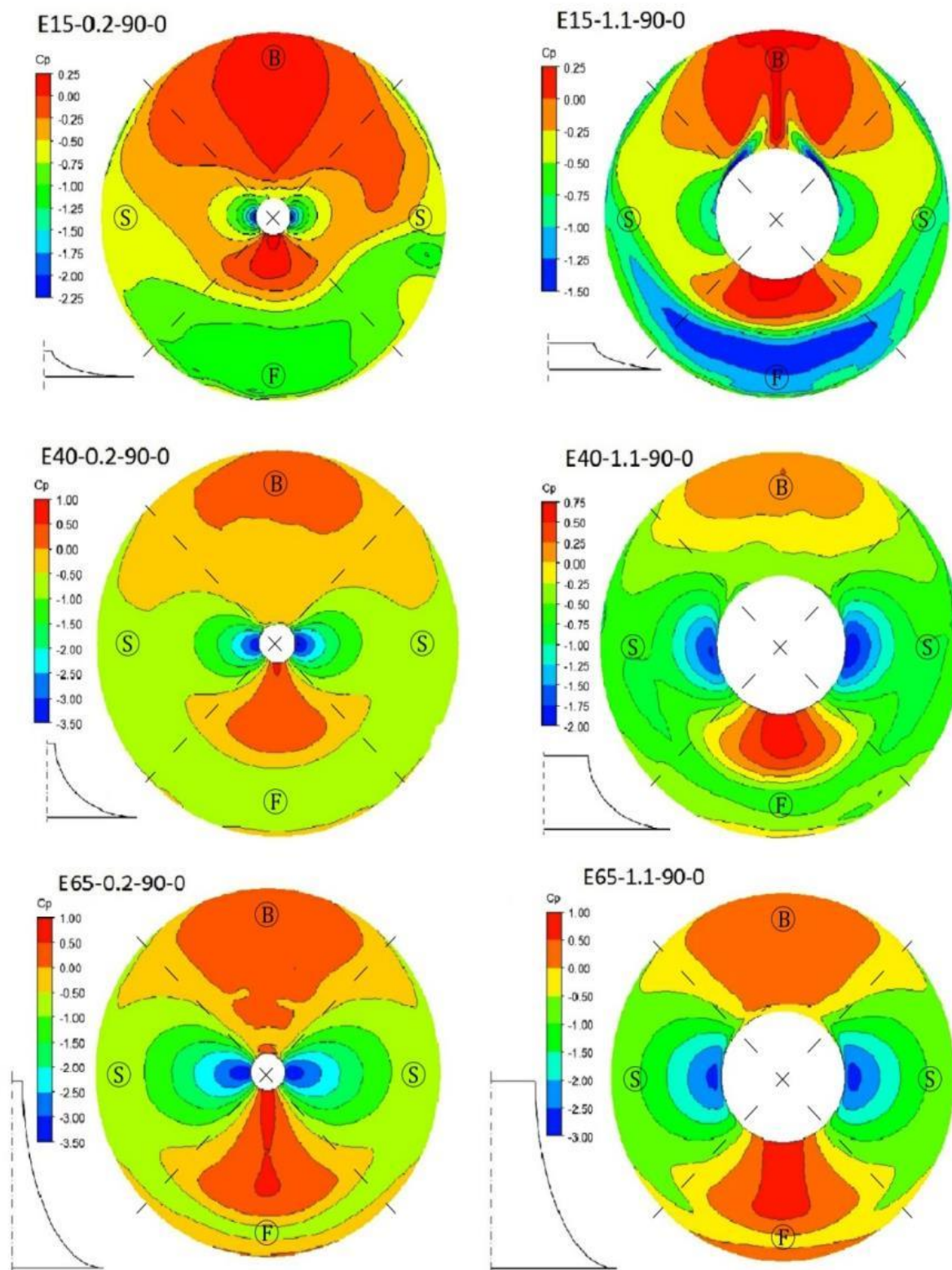
شکل ۳: ضریب فشار میانگین در برابر تعداد المان‌ها



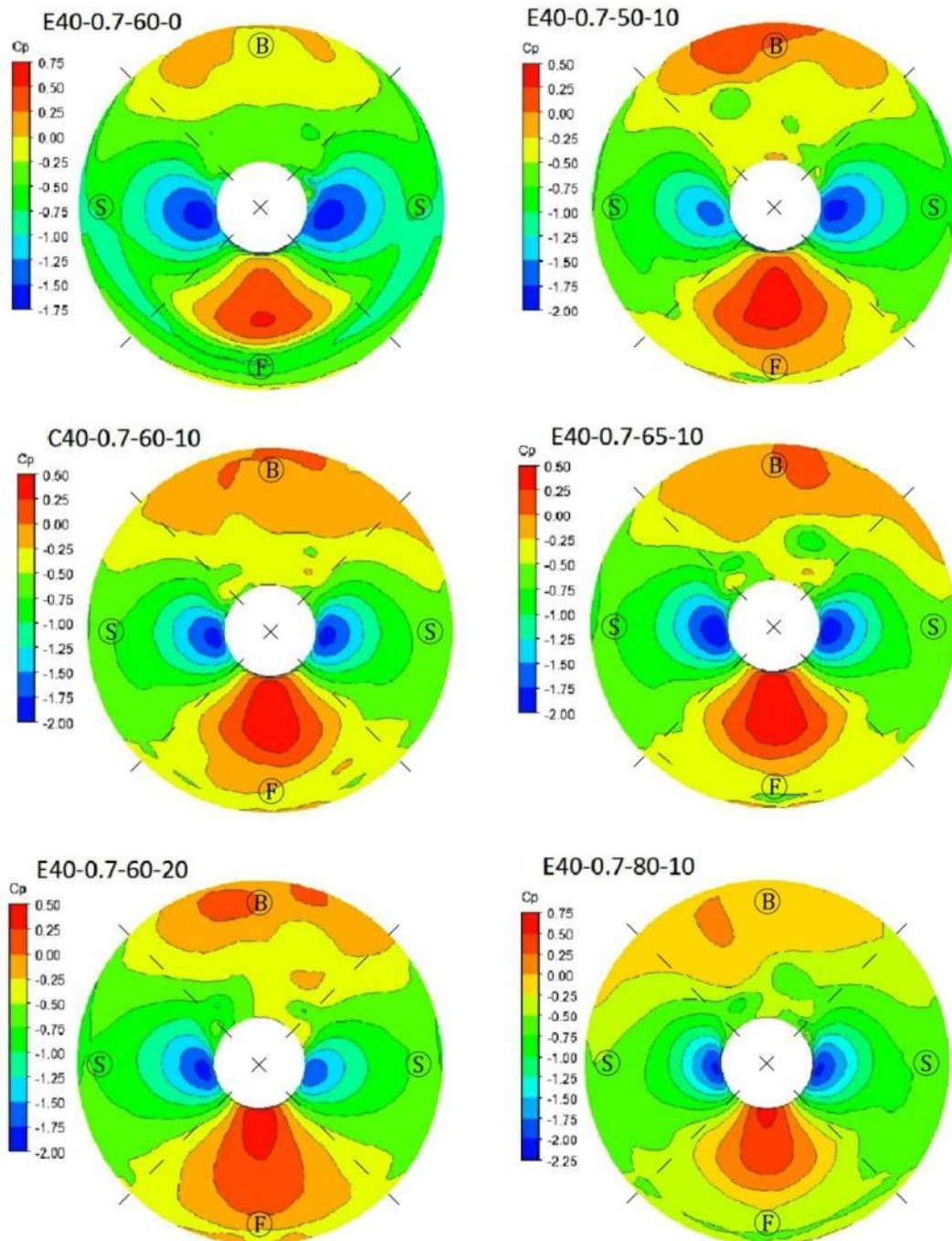
شکل ۴: تغییرات سرعت باد در ارتفاع تونل باد، مقطع میانی مدل در نمونه $E40-0.7-50-10$



شکل ۵: مقایسه نتایج مدل‌سازی ساختمان استاندارد CAARC با نتایج آزمایش‌های تونل باد



شکل ۶: توزیع ضریب فشار در نمونه‌های گروه EG-۰/۲-۹۰-۰ و EG-۱/۱-۹۰-۰ (حرف F نشان‌دهنده ناحیه رو به باد، S در امتداد باد و B ناحیه پشت به باد است)



شکل ۷: توزیع ضریب فشار در نمونه‌های گروه E۰-۴۰/۶۰-۷-G و E۰-۴۰/۷-G-۱۰ (حرف F نشان‌دهنده ناحیه رو به باد، S در امتداد باد و B ناحیه پشت به باد است)

متعدد وجود دارد اما نرم‌افزار Fluent به دلیل سادگی ایجاد هندسه، امکان انجام مش‌بندی‌های متفاوت، امکان انتخاب مدل‌های اغتشاشی و روش‌های کوپل کردن سرعت-فشار متعدد، برای انجام مدل‌سازی انتخاب شده است. در مقطع ورودی باد، از شرایط ورود سرعت^۱ با پروفیل سرعت متغیر در ارتفاع استفاده شده است. برای تعیین

۴-۲- شرایط مرزی

مدل‌سازی در محیط نرم‌افزار Fluent انجام شده است و شرایط مرزی انتخاب‌شده در این پژوهش، مشابه شرایط مرزی متداول در این گونه مدل‌سازی‌ها است [۱۱-۱۳] که در ادامه به جزئیات شرایط مرزی اشاره می‌شود. شایان توجه است که امکان انجام این مدل‌سازی با نرم‌افزارهای

^۱ Velocity Inlet

در نتیجه این فرض که تغییرشکل سازه چادری در اثر باد آنقدر کم است که فرم سازه چادری تغییر نخواهد کرد، مطابق با فرضیات اولیه طراحی است. شایان ذکر است تاکنون تنها چند نمونه محدود از آزمایش تأثیر باد بر سازه چادری غیرصلب انجام شده که در این آزمایش‌ها نیز توضیح مشخصی درباره نحوه مقیاس کردن کشش داخلی و سختی پارچه ارائه نشده است و به همین دلیل صحت نتایج این آزمایش‌ها در هاله‌ای از ابهام قرار دارد [۸-۵]. با توجه به تمام این عوامل و عنایت به این نکته که این پژوهش تنها یکی از گام‌های ابتدایی در تعیین اثر باد بر سازه‌های چادری است، از اندرکنش پارچه و باد صرف‌نظر و پوشش پارچه‌ای مدل‌ها صلب فرض شده و تنها اثر فرم بر بار باد مورد بررسی قرار گرفته است.

۲-۵- صحت‌سنجی فرضیات مدل‌سازی

پیش از آغاز مدل‌سازی، بهتر است فرضیات، مش‌بندی و روش مدل‌سازی، صحت‌سنجی شود. با توجه به اینکه نتایج آزمایش تونل باد بر سازه صلب با فرم کیفی در دست نیست، برای صحت‌سنجی فرضیات از نتایج آزمایش تونل باد بر سازه با شکل مکعب-مستطیل استفاده شده است. به این منظور از ساختمان استاندارد CAARC که نتایج آزمایش‌های تونل باد متعدد بر آن گزارش شده [۱۹-۱۵]، استفاده شده است. مدل این ساختمان با ابعاد گزارش شده در پژوهش‌ها و اعمال فرضیات مدل‌سازی، مش‌بندی و شرایط مرزی که پیش از این به آن‌ها اشاره شد، ساخته شده و تحلیل جریان باد در اطراف آن انجام شده است. تنها تفاوت فرضیات شرایط مرزی مربوط به پروفیل سرعت ورودی است که پروفیل سرعت در نظر گرفته شده در این پژوهش با پروفیل سرعت مورد استفاده در آزمایش‌های تونل باد ساختمان CAARC جای‌گزین شده است. نتایج حاصل از مدل‌سازی با نتایج چند مورد از آزمایش‌های تونل باد در شکل (۵) مقایسه شده است. همین‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، تطابق مطلوبی بین نتایج مدل‌سازی و نتایج آزمایش‌ها مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده مناسب بودن فرضیات مدل‌سازی و تضمین‌کننده صحت نتایج است.

۳- نتایج مدل‌سازی

تغییرات سرعت ورودی باد در ارتفاع، از رابطه نمایی، به صورت زیر، استفاده شده است:

$$V = 25 \left(\frac{h}{12} \right)^{0.3} \quad (2)$$

در این رابطه h ارتفاع نقطه موردنظر برحسب متر و V سرعت باد برحسب متر بر ثانیه است. این رابطه، یکی از روابط پذیرفته شده برای پروفیل سرعت در مناطق با سطح زیر مانند مناطق شهری است [۱۴]. در شکل (۴) تصویری از تغییر سرعت در ارتفاع، در مقطع میانی یکی از مدل‌سازی‌ها ارائه شده است.

در مقطع خروجی از شرایط مرزی خروجی فشار^۱ با فشار ثابت ۱۰۵ Pa استفاده شده است. در دیواره‌های تونل، موازی با جهت وزش باد، و در سطح مانع شرایط مرزی دیواره بدون لغزش با ضریب اصطکاک ۰/۵ به کار برده شده است.

سیال داخل تونل، هوا با مشخصات زیر است:

- چگالی جرمی ۱/۲۲۵ kg/m³
- ویسکوزیته ۱۰-۱/۷۸۹۴×۵ kg/m.s

مدل‌سازی به صورت پایا انجام شده و مدل اغتشاشی منتخب در این پژوهش، مدل Realizable k-ε است. تنظیمات مدل در ورودی و خروجی تونل به صورت زیر است:

- Turbulent Intensity = ۱/۵%
- Turbulent Length Scale = ۰/۱ m

مدل پوشش پارچه‌ای سقف در این مدل‌سازی صلب فرض شده است. به دلیل پیچیدگی موضوع تغییرشکل سازه چادری و وابستگی سختی آن به عوامل متعدد و در نتیجه نبود روشی مشخص و معتبر برای مدل‌سازی صحیح سختی و تغییرشکل این سازه‌ها، فرض صلبیت پوشش پارچه‌ای یکی از فرضیات پذیرفته شده در آزمایش‌های تونل باد انجام شده بر این سازه‌ها است که منجر به ایجاد خطای چشمگیر در آزمایش نخواهد شد [۴]. از سوی دیگر، هدف از تعیین بار باد در این پژوهش، حرکت به سمت طراحی سازه چادری است و باید توجه داشت که یکی از اصلی‌ترین اهداف و وظایف طراح سازه چادری، طراحی فرمی است که در بارگذاری‌های مختلف، دچار تغییرشکل‌های بزرگ نشود.

^۱ Pressure Outlet

۳-۱- الگوی کلی توزیع فشار باد

برای بررسی الگوی کلی توزیع ضریب فشار در سطح، توزیع ضریب فشار در مدل‌های EG-۰/۲-۹۰-۰ و EG-۱/۹۰-۱ در شکل (۶) ارائه شده است. در هر گروه از این نمونه‌ها قطر دایره پایین فرم و قطر دایره نوک فرم یکسان است و تنها ارتفاع سازه تغییر می‌کند که تعیین‌کننده شیب کلی فرم است. در شکل (۶) قوس ایجادکننده سطح که یک ربع بیضی است، در کنار پلان هر نمونه نمایش داده شده است.

با بررسی این شکل می‌توان نکات زیر را درباره الگوی کلی توزیع فشار باد دریافت:

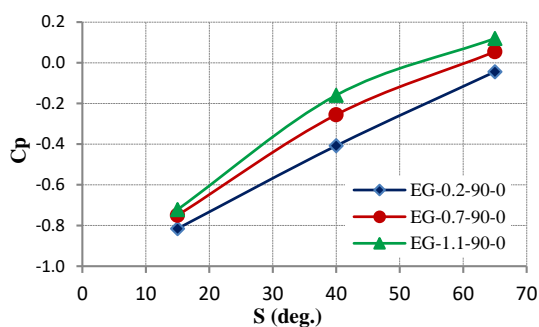
- با نگاه کلی به توزیع ضریب فشار در نمونه‌ها مشاهده می‌شود که تنش در بخش عمده سطح، کششی است و تنها در بخش کوچکی از سطح نمونه‌ها با زوایای شیب مختلف تنش فشاری مشاهده می‌شود.
 - به‌طور کلی توزیع ضریب فشار در سطح را می‌توان به سه محدوده رو به باد، در امتداد باد و پشت به باد تقسیم‌بندی کرد. به‌طور تقریبی این محدوده‌ها را می‌توان با زوایای هم‌مرکز حدود ۹۰ درجه در محور مشخص کرد.
 - توزیع فشار در نمونه‌های با زاویه شیب ۱۵ درجه، به‌جز در نواحی نزدیک به دایره بالا، دارای تغییرات نسبتاً یکنواخت است. در تمام سطح کشش وجود دارد و مقدار ضریب فشار، با تغییرات نسبتاً خطی، در جهت باد کاهش می‌یابد. در این نمونه‌ها به‌جز در قسمت‌های نزدیک نوک، تمایز مشخصی بین سه محدوده توزیع ضریب فشار مشاهده نمی‌شود و تنها در محدوده نوک فرم می‌توان تفاوت در سه ناحیه رو به باد، پشت به باد و در امتداد باد را مشخصاً مشاهده کرد.
 - با افزایش زاویه شیب کلی فرم، مشاهده می‌شود که تمرکز فشار حول نوک فرم به‌صورت موضعی ایجاد می‌شود و با افزایش زاویه شیب، افزایش می‌یابد تا حدی که در نمونه EG-۰/۲-۹۰-۰ سه محدوده توزیع فشار کلی شامل نواحی رو به باد، در امتداد باد و پشت به باد به‌طور مشخص قابل مشاهده است.
- تنش کششی حداکثر در محدوده در امتداد باد و تنش فشاری حداکثر در محدوده رو به باد مشاهده می‌شود. این مقادیر بیشینه در محدوده تمرکز تنش حول نوک فرم کیفی رخ می‌دهد که مقدار آن با افزایش زاویه کلی فرم افزایش و با افزایش اندازه نسبی دایره بالا کاهش می‌یابد. دلیل تمرکز فشار در محدوده نوک فرم، رخداد اغتشاش در جریان و ایجاد جریانات گردابه‌ای در این نواحی است که شدت اغتشاش با کوچک‌شدن دایره نوک فرم کیفی افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه معمولاً تنش داخلی بحرانی در پارچه، ناشی از سایر بارگذاری‌ها (مانند وزن سازه و کشش پارچه) در محدوده نوک فرم رخ می‌دهد، موضوع تمرکز ضریب فشار حداکثر در محدوده نوک بحرانی‌تر خواهد بود و باید موضوع بررسی‌های بیشتر قرار گیرد.
 - همان‌طور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود، افزایش اندازه نسبی قطر دایره بالا، باعث کاهش تمرکز فشار در محدوده نوک فرم در نواحی رو به باد و در امتداد باد می‌شود.
 - به‌منظور بررسی اثر دو عامل زاویه شروع قوس ایجادکننده فرق کیفی در پایین (α_s) و اختلاف زاویه ابتدا و انتهای قوس (α) بر تمرکز فشار حول دایره نوک شکل (۷) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود افزایش دو پارامتر یادشده منجر به افزایش اندک فشار متمرکز در محدوده نوک فرم کیفی در دو ناحیه رو به باد و در امتداد باد می‌شود اما بر الگوی کلی توزیع فشار، تأثیر چشمگیری ندارد.

در ادامه، برای بررسی جزئی‌تر تأثیر پارامترهای هندسی بر فشار وارد بر سقف کیفی، هریک از نمونه‌ها به چهار قسمت مساوی رو به باد، در امتداد باد و پشت به باد تقسیم و ضریب فشار در هر ناحیه میانگین‌گیری و بررسی شده است.

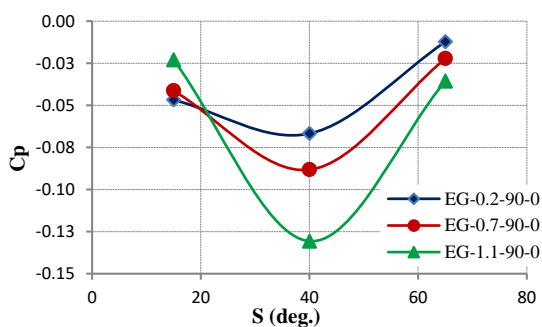
۳-۲- زاویه شیب کلی فرم کیفی (S)

زاویه شیب کلی فرم کیفی، اولین پارامتر مؤثر بر فشار باد به نظر می‌آید. این پارامتر همچنین در طراحی اولیه فرم مناسب که منجر به کاهش تمرکز تنش در بخش‌های مستعد و افزایش سطح پایداری بالقوه سازه می‌شود، تأثیر

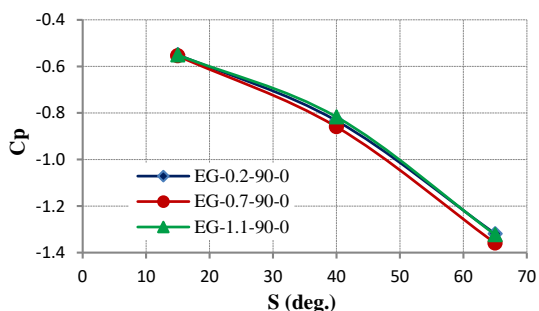
نسبت خطی مستقیم با اندازه نسبی قطر دایره بالای فرم دارد. با افزایش اندازه نسبی قطر دایره بالای فرم قیفی، نیروی کششی برآیند وارد بر ناحیه رو به باد کاهش می‌یابد و حتی ممکن است به نیروی فشاری تبدیل شود.



شکل ۸: تغییرات ضریب فشار میانگین در برابر زاویه شیب کلی فرم، در ناحیه رو به باد برای نمونه‌های EG-G-۹۰-۰



شکل ۹: تغییرات ضریب فشار میانگین در برابر زاویه شیب کلی فرم، در ناحیه پشت به باد برای نمونه‌های EG-G-۹۰-۰



شکل ۱۰: تغییرات ضریب فشار میانگین در برابر زاویه شیب کلی فرم، در ناحیه در امتداد باد برای نمونه‌های EG-G-۹۰-۰

با افزایش اندازه نسبی قطر دایره بالا، برای نمونه‌های با شیب کلی ۱۵ درجه ضریب فشار متوسط در ناحیه پشت به باد کاهش، اما برای نمونه‌های با شیب کلی ۴۰ و ۶۵ درجه ضریب فشار متوسط در این ناحیه افزایش می‌یابد. به

مستقیم دارد. برای بررسی تأثیر این پارامتر بر ضریب فشار میانگین، شکل‌های (۸) تا (۱۰) ارائه شده است. در این شکل‌ها تغییرات ضریب فشار میانگین در هریک از نواحی سه‌گانه سطح (رو به باد، در امتداد باد و پشت به باد) در برابر زاویه شیب کلی (K) ترسیم شده است. نمونه‌های انتخاب‌شده برای این مقایسه، دارای خصوصیات هندسی مشابه هستند و تنها در مقدار زاویه شیب فرم قیفی و مقدار اندازه نسبی دایره بالا متفاوت‌اند. با بررسی شکل‌های یادشده، این نکات برداشت می‌شود:

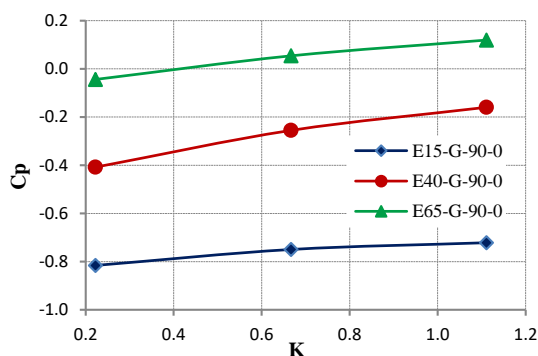
- ضریب فشار متوسط در ناحیه رو به باد با افزایش شیب کلی فرم قیفی، با تغییرات نسبتاً خطی، افزایش می‌یابد؛ به این معنا که با افزایش شیب کلی فرم، نیروی کششی برآیند وارد بر ناحیه رو باد کاهش می‌یابد و حتی به نیروی فشاری تبدیل می‌شود.
- ضریب فشار متوسط در ناحیه پشت به باد با افزایش شیب کلی فرم، ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد. در نتیجه برای هر گروه مدل‌ها زاویه شیبی وجود دارد که در آن زاویه، ضریب فشار متوسط در ناحیه پشت به باد به مقدار حداکثر خود خواهد رسید. به هر صورت، در تمام نمونه‌های مورد بررسی، ضریب فشار متوسط در ناحیه پشت به باد کششی است.
- ضریب فشار متوسط در ناحیه در امتداد باد با افزایش شیب کلی فرم کاهش می‌یابد؛ به این معنا که با افزایش شیب کلی نیروی کششی بزرگ‌تری به این ناحیه وارد می‌شود.

۳-۳- اندازه نسبی دایره بالای فرم قیفی (K)

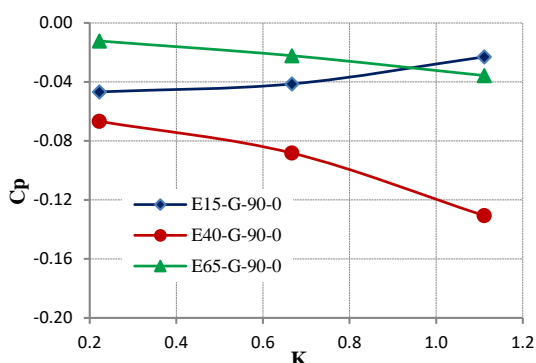
اندازه نسبی قطر دایره بالای فرم، تأثیر مستقیم بر تنش کششی داخلی متمرکز در پارچه در محدوده نوک فرم قیفی دارد و از این لحاظ مستقیماً در طراحی و انتخاب پارچه مناسب برای سازه چادری با فرم قیفی مؤثر است. برای بررسی اثر اندازه دایره بالای فرم بر فشار باد، نتایج بررسی‌شده در شکل‌های (۸) تا (۱۰)، در شکل‌های (۱۱) تا (۱۳) مجدداً در برابر اندازه نسبی دایره بالا ترسیم شده است. با بررسی توأم این شکل‌ها می‌توان نکات زیر را دریافت:

- تغییرات ضریب فشار متوسط در ناحیه رو به باد،

دارد. وقتی مقدار زاویه شروع قوس و سرعت افزایش آن در ابتدای قوس کم باشد، امکان ایجاد تغییر شکل‌های بزرگ در بارگذاری‌های مختلف در آن ناحیه به شدت افزایش می‌یابد که پایداری کلی سازه را تهدید می‌کند. به همین دلیل، تأثیر زاویه شروع قوس ایجادکننده فرم در پایین بر فشار باد وارد بر سطح پوشش قیفی، در این بخش مورد بررسی قرار می‌گیرد. با بررسی شکل‌های (۱۷) تا (۱۹) مشخص می‌شود که با افزایش زاویه شروع قوس، مقدار ضریب فشار کششی متوسط در ناحیه رو به باد کاهش و در ناحیه پشت به باد افزایش می‌یابد و در ناحیه در امتداد باد تغییر معنی‌داری در مقدار ضریب فشار متوسط مشاهده نمی‌شود. باید توجه داشت که مقدار تغییرات زاویه شروع قوس محدود به مقدار زاویه شیب کلی فرم است و در نتیجه رنج بررسی شده در این پژوهش کوچک است. به هر حال در همین محدوده عددی کوچک، تغییر مهمی در مقادیر ضریب فشار مشاهده نمی‌شود.



شکل ۱۱: تغییرات ضریب فشار میانگین در برابر اندازه نسبی دایره بالای فرم قیفی، در ناحیه رو به باد برای نمونه‌های EG-G-۹۰-۰



شکل ۱۲: تغییرات ضریب فشار میانگین در برابر اندازه نسبی دایره بالای فرم قیفی، در ناحیه پشت به باد برای نمونه‌های EG-G-۹۰-۰

عبارت دیگر ضریب فشار متوسط در ناحیه پشت به باد با اندازه نسبی قطر دایره بالا رابطه نسبتاً خطی دارد که شیب این خط با افزایش زاویه شیب کلی فرم کاهش می‌یابد. این پدیده مشخص می‌کند که تأثیر اندازه نسبی قطر دایره بالای فرم بر ضریب فشار متوسط در ناحیه پشت به باد، وابسته به شیب کلی فرم است و به علاوه همان‌طور که در قسمت قبل نیز به آن اشاره شد، مقدار ضریب فشار متوسط در این ناحیه دارای بیشینه‌ای خواهد بود که در درجه اول وابسته به شیب کلی فرم قیفی و در درجه دوم وابسته به اندازه نسبی قطر دایره بالا است.

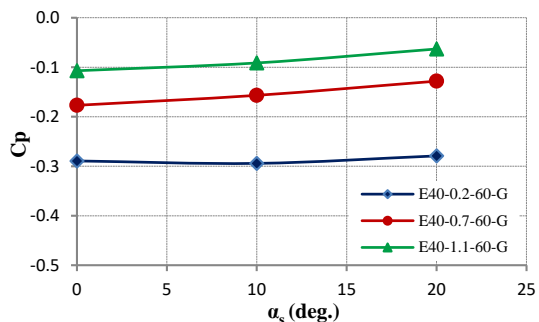
- ضریب فشار متوسط در ناحیه در امتداد باد، متأثر از اندازه نسبی قطر دایره بالای فرم نیست.

۳-۴- اختلاف زاویه ابتدا و انتهای قوس ایجادکننده فرم قیفی (α)

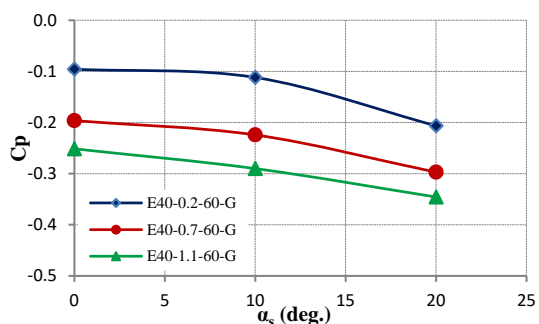
اختلاف زاویه ابتدا و انتهای قوس ایجادکننده فرم قیفی، عملاً نمایشگر میزان انحنای سطح پوشش پارچه‌ای نسبت به شکل مخروط ناقص است. این مقدار یکی از پارامترهای تأثیرگذار در عملکرد و طراحی سازه چادری با فرم قیفی است که به‌ویژه اثر مشخصی بر پایداری سازه دارد. برای بررسی اثر این عامل بر فشار باد وارد بر سطح قیفی، شکل‌های (۱۴) تا (۱۶) ارائه شده است. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، ضریب فشار متوسط در نمونه‌های با زاویه شیب کلی ۱۵ درجه در هیچ‌یک از سه ناحیه اصلی سطح، به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر تغییرات اختلاف زاویه در طول قوس ایجادکننده فرم نیست. اما در نمونه‌های با زاویه شیب کلی ۴۰ درجه، تأثیر اختلاف زاویه در طول قوس ایجادکننده فرم بر مقادیر ضریب فشار میانگین در هر سه ناحیه سطح بیشتر می‌شود، اگرچه در بیشتر نمونه‌ها میزان تغییرات قابل چشم‌پوشی است. به هر صورت، این تعداد نمونه برای بررسی اثر اختلاف زاویه در طول قوس ایجادکننده فرم بر مقادیر ضریب فشار میانگین کافی به نظر نمی‌رسد و نیاز به نمونه‌های بیشتری است تا تأثیر همه‌جانبه این پارامتر مشخص شود.

۳-۵- زاویه شروع قوس در پایین (α_s)

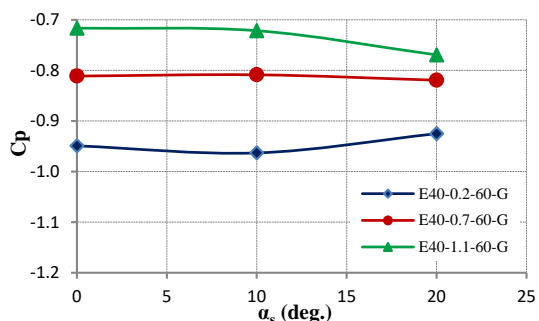
زاویه شروع قوس ایجادکننده فرم قیفی در پایین، تأثیر مهمی در پایداری موضعی پوشش پارچه‌ای در این قسمت



شکل ۱۷: تغییرات ضریب فشار میانگین در برابر زاویه شروع قوس ایجادکننده فرم قیفی، در ناحیه رو به باد برای نمونه‌های E40-G-60-G



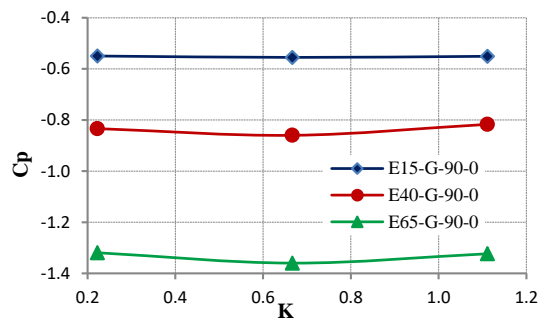
شکل ۱۸: تغییرات ضریب فشار میانگین در برابر زاویه شروع قوس ایجادکننده فرم قیفی، در ناحیه پشت به باد برای نمونه‌های E40-G-60-G



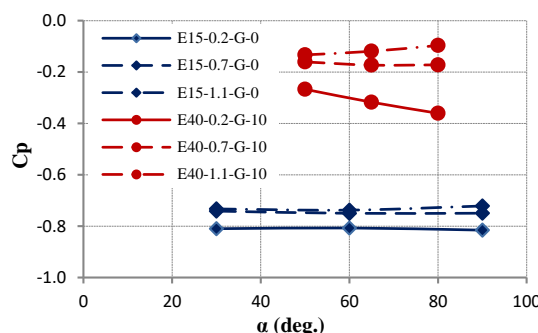
شکل ۱۹: تغییرات ضریب فشار میانگین در برابر زاویه شروع قوس ایجادکننده فرم قیفی، در ناحیه در امتداد باد برای نمونه‌های E40-G-60-G

۳-۶- نوع قوس ایجادکننده فرم قیفی

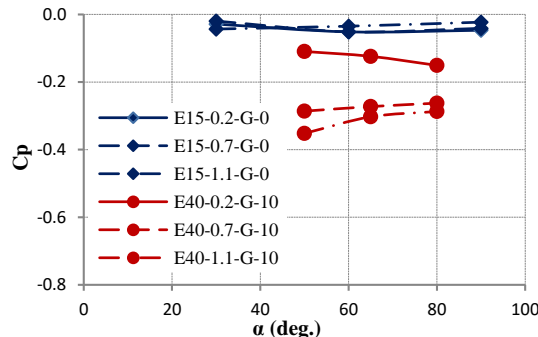
یکی از سؤالاتی که در مورد تأثیر عوامل هندسی بر فشار باد وارد بر سطح پارچه‌ای با فرم قیفی وجود دارد، چگونگی تأثیر سرعت تغییر زاویه در طول قوس ایجادکننده فرم بر مقدار فشار باد است. در پروسه فرم‌یابی سازه‌های چادری قیفی، معمولاً نواحی نسبتاً خطی به‌ویژه ابتدای قوس در پایین فرم ایجاد می‌شود. برای بررسی بهتر این اثر، سه گروه نمونه بدین صورت تعریف و بررسی شده است:



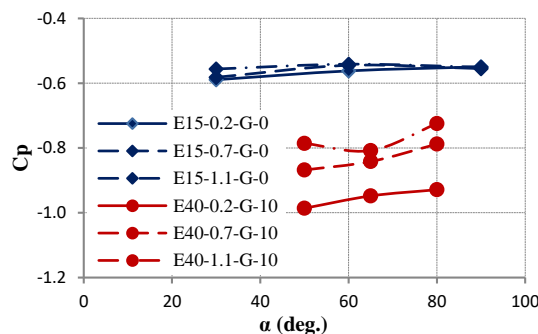
شکل ۱۳: تغییرات ضریب فشار میانگین در برابر اندازه نسبی دایره بالای فرم قیفی، در ناحیه در امتداد باد برای نمونه‌های EG-G-90-0



شکل ۱۴: تغییرات ضریب فشار میانگین در برابر اختلاف زاویه در طول قوس، در ناحیه رو به باد برای دو گروه از نمونه‌ها



شکل ۱۵: تغییرات ضریب فشار میانگین در برابر اختلاف زاویه در طول قوس، در ناحیه پشت به باد برای دو گروه از نمونه‌ها



شکل ۱۶: تغییرات ضریب فشار میانگین در برابر اختلاف زاویه در طول قوس، در ناحیه در امتداد باد برای دو گروه از نمونه‌ها

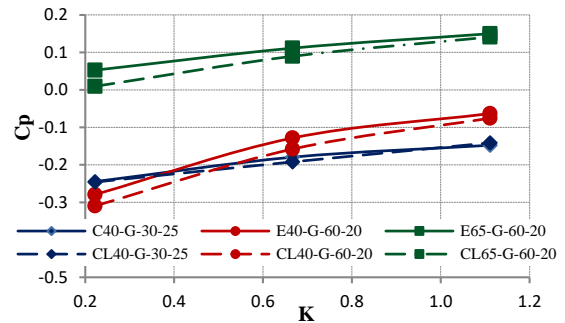
جدول ۲: مشخصات نمونه‌های دارای قوس ترکیبی

نام گروه نمونه	محل قسمت خطی در قوس	نسبت طول ناحیه خطی به طول کل قوس	نام گروه مقایسه متناظر
G-۲۰-۶۰ CL۶۵	انتهای قوس در بالا	۰/۴۹	E۶۵-G-۲۰-۶۰
G-۲۰-۶۰ CL۴۰	ابتدای قوس در پایین	۰/۳۲	G-۲۰-۶۰ E۴۰
G-۲۵-۳۰ CL۴۰	دو قطعه با طول برابر در ابتدا و انتهای قوس	دو قطعه هر یک معادل ۰/۱۵	G-۲۵-۳۰ C۴۰

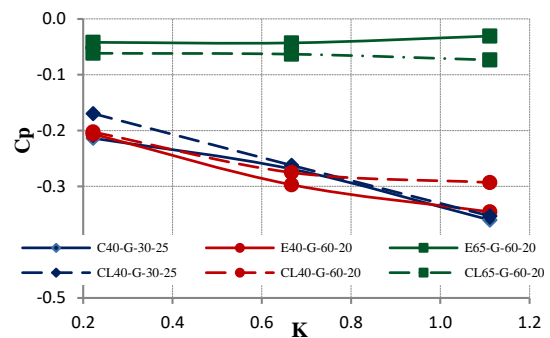
۴- نتیجه‌گیری

با شبیه‌سازی عددی مدل‌های سازه چادری با فرم قیفی در تونل باد و تحلیل جریان با استفاده از نرم‌افزار Fluent، نتایج زیر درباره فشار باد وارد بر پوشش قیفی به دست آمده است:

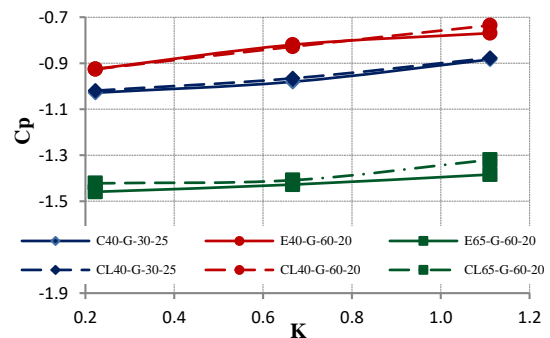
- با بررسی الگوی کلی فشار باد وارد بر سقف‌های پارچه‌ای قیفی، می‌توان سه ناحیه مشخص رو به باد، در امتداد باد و پشت به باد را در سطح پوشش سقف مشاهده و مجزا کرد. با اهداف طراحی، به‌طور تقریبی می‌توان محدوده این سه ناحیه را با چهار زاویه هم‌مرکز ۹۰ درجه در محور پوشش قیفی مشخص کرد.
- در نمونه‌های بررسی شده، ضریب فشار متوسط در دو ناحیه در امتداد باد و پشت به باد همواره کششی و ناحیه رو به باد به دو حالت کششی و فشاری مشاهده شده است.
- با بررسی توزیع ضریب فشار در سطح پوشش قیفی، می‌توان تمرکز فشار را به‌طور مشخص در محدوده نوک فرم مشاهده کرد. افزایش زاویه شیب کلی و کاهش اندازه نسبی قطر دایره بالای فرم قیفی، منجر به افزایش تمرکز فشار باد در



شکل ۲۰: تغییرات ضریب فشار میانگین در برابر اندازه نسبی دایره بالا، در ناحیه رو به باد برای نمونه‌های با قوس ترکیبی



شکل ۲۱: تغییرات ضریب فشار میانگین در برابر اندازه نسبی دایره بالا، در ناحیه پشت به باد برای نمونه‌های با قوس ترکیبی



شکل ۲۲: تغییرات ضریب فشار میانگین در برابر اندازه نسبی دایره بالا، در ناحیه در امتداد باد برای نمونه‌های با قوس ترکیبی

در همه این نمونه‌ها با قوس ترکیبی، قسمت غیرخطی قوس دایره‌ای است. باید توجه داشت که قوس دایره‌ای، در واقع نوعی قوس بیضوی با قطرهای برابر است. نتایج مدل‌سازی در شکل‌های (۲۰) تا (۲۲) ارائه شده است. همان‌طور که در شکل‌های (۲۰) تا (۲۲) مشاهده می‌شود تفاوت معنی‌داری بین گزینه‌های با قوس ترکیبی خط - دایره با گزینه‌های متناظر آن‌ها مشاهده نمی‌شود؛ بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که نوع قوس، تأثیر چشمگیری بر ضریب فشار ندارد و پارامترهای هندسی انتخابی، گزینه‌های متناظر را با دقت خوبی توصیف می‌کنند.

- محدوده نوک فرم می‌شود.
- افزایش زاویه شیب کلی، اندازه نسبی دایره بالا و زاویه شروع قوس ایجادکننده فرم کیفی در پایین، هر یک منجر به کاهش ضریب فشار متوسط کششی در ناحیه رو به باد، و گاه فشاری شدن آن می‌شود، اگرچه تأثیر عامل سوم چشمگیر نیست.
- با بررسی نتایج مدل‌سازی‌ها به نظر می‌رسد که پارامتر زاویه شیب کلی مؤثرترین عامل در تغییرات ضریب فشار متوسط در ناحیه پشت به باد است و برای هر فرم کیفی یک زاویه شیب کلی بحرانی وجود دارد که به‌ازای آن ضریب فشار کششی در ناحیه پشت به باد حداکثر می‌شود. تأثیر افزایش اندازه نسبی دایره بالا بر ضریب فشار متوسط در ناحیه پشت به باد وابسته به زاویه شیب کلی است و ممکن است افزایش یافته یا کاهش یافته باشد. افزایش زاویه شروع قوس ایجادکننده فرم در پایین منجر به افزایش ملایم مقدار ضریب
- فشار کششی در ناحیه پشت به باد می‌شود.
- تنها پارامتر مؤثر بر ضریب فشار متوسط در ناحیه در امتداد باد، زاویه شیب کلی فرم کیفی است و سایر عوامل هندسی بررسی شده در این پژوهش، تأثیر چشمگیری بر این ضریب ندارند. افزایش زاویه شیب کلی منجر به افزایش مقدار ضریب فشار متوسط کششی در ناحیه در امتداد باد می‌شود.
- دو پارامتر هندسی اختلاف زاویه ابتدا و انتهای قوس، و نوع قوس ایجادکننده فرم کیفی تأثیر معنی‌داری بر تغییرات ضریب فشار متوسط در هیچ‌یک از سه ناحیه اصلی سطح ندارند، اگرچه به نظر می‌رسد محدوده بزرگ‌تری از عامل اختلاف زاویه ابتدا و انتهای قوس و نیز زاویه شروع قوس ایجادکننده فرم در پایین باید بررسی تا تأثیر دقیق این عوامل مشخص شود.

۵- مراجع

- [1] Huntington, C.G., "Tensile Fabric Structures (Design, Analysis, and Construction)", American Society of Civil Engineer, 2012.
- [2] Guigliano, P., "Technical Guideline To Permanent Tensile Architectures", Mehler Technologies, First Edition, 2009.
- [3] Ogawa, T., Nakayama, M., Murayama, S., and Sasaki, Y., "Characteristics of wind pressures on basic structures with curved surfaces and their response in turbulent flow", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 38, 1991, pp. 427-438.
- [4] Sykes, D. M., "Wind loading tests on models of two tension structures for EXPO'92, Seville", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 52, 1998, pp. 371-383.
- [5] Haedrich, Daniel, "An Exploration of the Design of a Portable Tensile Membrane Structure in a High Wind Environment", Dalhousie University, Master Thesis, 1999.
- [6] Sivaprasad, N., "Wind Design of Fabric Structures Determination of Gust Factors for Fabric Structures", University of Southern California, Thesis, 2006.
- [7] Rank, E., Halfmann, D.S., Gluck, M., Breuer, M., Durst, F., Kaiser, U., Bergmann, D. and Wagner, S., "Wind Loads on Lightweight Structures: Numerical Simulation and Wind Tunnel Tests", GAMM-Mitteilungen, Vol. 28, No. 1, 2005, pp. 73-89.
- [8] Nagai, Y., Okada, A., Miyasato, N. and Saitoh, M., "Wind Tunnel Tests on the Horn-Shaped Membrane Roof", Wind Tunnels and Experimental Fluid Dynamics Research: InTech, 2011, p. 724.
- [9] Nagai, Y., Okada, A., Miyasato, Masao Saitoh, N., and Matsumoto, R., "Wind Tunnel Tests on Horn-Shaped Membrane Roof Under the Turbulent Boundary Layer", in Wind Tunnel Designs and Their Diverse Engineering Applications, N. A. Ahmed, Ed.: InTech, 2013, p. 228.
- [10] Snæbjörnsson, J.TH., "Full and Model Scale Study of Wind Effects on a Medium-Rise Building in a Build Up Area", Norwegian University of Science and Technology, Doctoral Thesis, 2002.
- [11] Blazek, J., "Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications", Elsevier Science Ltd, 2001.
- [12] Masatsuka, K., "I Do Like CFD", Lulu.com, Vol. 1, 2nd edition, 2013.

- [13] Matthews, L.A., Greaves, D.M. and Williams, C.J.K., "Numerical Simulation of Separated Flow over Flexible Structural Membranes", European Conference on Computational Fluid Dynamics, Delft, Netherland, 2006.
- [14] "National Building Code of Canada", National Research Council of Canada, Institute for Research in Construction, 2010.
- [15] Braun, A. L. and Awruch, A. M., "Aerodynamic and aeroelastic analyses on the CAARC standard tall building model using numerical simulation", Computers and Structures, Vol. 87, 2009, pp. 564–581.
- [16] Huang, Sh., Li, Q. S. and Xu, Sh., "Numerical evaluation of wind effects on a tall steel building by CFD", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 63, 2007, pp. 612–627.
- [18] Roy, A. K., Verma, S. K., Lather, S. and Sood., M., "ABL airflow through CFD simulation on tall building of square plan shape", 7th National Conference on Wind Engineering (NCWE 2014), pp. 174-183.
- [19] Dagneu, A. K. and Bitsuamlak, G. T., "LES evaluation of wind pressures on a standard tall building with and without a neighboring building", The Fifth International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2010).