

بررسی تجربی اثر زاویه برخورد طوفان فرو وزشی بر سازه مکعب شکل - قسمت دوم: مشاهدات طوفان فرو وزشی کوچک متحرک

چکیده: طوفان های فرو وزشی با ایجاد جریان های ناپایای ریزشی قوی، باعث تخریب های شدید می شوند. از طرفی با توجه به تفاوت ساختار آنها با طوفان های لایه مرزی اتمسفری، بررسی و شناخت این جریانات در شرایط مختلف اهمیت دارد. لذا در این تحقیق به بررسی تأثیرات برخورد طوفان فرو وزشی در زوایا و راستاهای متفاوت در حالت دینامیکی بر روی مدل مکعب شکل پرداخته شده است. این مدل، در چهار زاویه قرارگیری مختلف نسبت به راستای ریزش جریان (θ)، دو راستای برخورد جریان سطحی (α) و در محدوده شعاعی $X/D=\pm 1/5$ قرار گرفته است. همچنین نسبت سرعت انتقالی افقی این طوفان (V_R)، $0/06$ و $0/12$ در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می دهد که افزایش θ و V_R ، باعث شده تا ضریب فشار بیشینه، از نقطه مرکزی فرود جریان ($X/D=0$) به سمت پایین دست جریان متمایل شود. همچنین افزایش زاویه α باعث کاهش بازه تغییرات فشار و نیرو در حدود 25% بر مدل شده است. به علاوه مشخص شد که طوفان های فرووزشی در حالت دینامیکی ضربات قوی تری بر سازه وارد نموده و عموماً قویترین ضربات، بلافاصله بعد از عبور طوفان از روی سازه رخ داده است.

واژه های راهنما: طوفان فرو وزشی، مدل مکعب شکل، ضرایب فشار و نیرو، زاویه برخورد، بررسی دینامیکی

محمد حججی

استادیار، دانشکده فنی مهندسی،
مرکز تحقیقات هوافضا و تبدیل
انرژی، واحد نجف آباد، دانشگاه
آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

امیر حسین رضوانی

دانشجوی کارشناسی ارشد

نیما عسگری

دانشجوی کارشناسی ارشد

امیر حسین صادقی

دانشجوی کارشناسی ارشد

سید جلیل حسینی*

استادیار، دانشکده عمران، واحد
نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی،
نجف آباد، ایران

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۲۵

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۲۶

Mohammad Hojaji
Assistant Professor,
Department of Engineering,
Aerospace and Energy
Conversion Research
Center, Najafabad Branch,
Islamic Azad University,
Najafabad, Iran

**Amir Hossein
Rezvani**
MSc. Student

Nima Asgari
MSc. Student

**Amir Hossein
Sadeghi**
MSc. Student

Seyed Jalil Hosseini*
Assistant Professor,
Department of Civil
Engineering, Najafabad
Branch, Islamic Azad
University, Najafabad, Iran

Experimental investigation of the downburst impact angle effect on a cubic structure Part B: Moving microburst observations

Abstract: Downburst storms cause severe destruction by creating intense and unstable downdrafts. On the other hand, due to the difference in their structure from atmospheric boundary layer storms, it is essential to study and understand these flows under different conditions. Therefore, this study the effects of the impact angle of the downburst and the structure installation angle relative to the surface flow on a cube-shaped model investigates dynamically. The model is placed in front of the downburst in four angles of the storm colliding with the surface(θ), in two directions of the surface flow relative to the structure(α), and in the radial range of $X/D=\pm 1.5$. Also, the ratio of horizontal displacement speed of this storm(V_R) is considered to be 0.06 and 0.12. The results show that the increase of θ and V_R caused the location of the maximum pressure coefficient to shift from the central point of the flow meeting the surface to the downstream. Also, increasing α has reduced the range of pressure and force changes by about 25% on the model. In addition, it was found that dynamic downburst caused stronger impacts on the structure and generally, these strong impacts occurred immediately after the downburst passed over the structure.

Keywords: Downburst Thunderstorm, Cube-shaped model, Pressure and Force coefficient, Impact angel, Dynamic investigation

۱- مقدمه

لایه مرزی متعارف، با افزایش ارتفاع، سرعت افزایش پیدا نمی‌کند چرا که با کاهش سرعت نسبت به ارتفاع، یک ناحیه با جریان شتاب گرفته در نزدیکی سطح به وجود خواهد آمد. ثانیاً، فرو وزش‌ها معمولاً مقدار بالایی از تکانه طوفان مادر خود را حفظ می‌کنند. همچنین سرعت طوفان مادر به یک سوم سرعت طوفان فرو وزشی نیز می‌رسد [۸]. ثالثاً، در داخل میدان جریان طوفان فرو وزشی تغییرات فشار قابل توجهی مشاهده می‌شود. این در حالی است که روش‌های کنونی ارزیابی بارگذارهای باد بر روی سازه‌ها، فشار جوی را ثابت فرض می‌کنند.

سکون در ناحیه مرکزی زیر فرو وزش و با نزدیک شدن آن به سطح زمین رخ داده و اصطلاحاً یک گنبد فشار بالا را ایجاد می‌کند (شکل ۱). در اطراف این ناحیه، یک ناحیه حلقوی فشار پایین که ناشی از پخش شدن و شتاب گرفتن جریان فرو وزشی و رسیدن آن به سرعت افقی بیشینه است، شکل می‌گیرد که معمولاً بزرگی نسبی افت فشار این ناحیه، وابسته به سرعت انتقالی طوفان است [۹]. میدان فشار متغیر یک فرو وزش می‌تواند پیامدهای قابل توجهی را از نظر بارگذاری‌های طراحی بر روی سازه‌ها در پی داشته‌باشد. فوجیتا [۹] برآورد کرده است که این تغییرات سریع فشار می‌توانند به بزرگی ۲-۳ هکتوپاسکال باشند و در نتیجه منجر به افزایش قابل توجه در بار وارد شده به سازه‌های ایزوله شوند. در شکل (۲) نمای کلی مشخصات فیزیکی یک طوفان فرو وزشی کوچک قرار گرفته است و مقایسه آن با بادهای لایه مرزی، نشان داده شده است [۶].

فوجیتا [۹] نشان داد که اگر سطح تحت تاثیر طوفان فروروزشی بیش از ۴ کیلومتر مربع باشد، به آن طوفان فرو وزشی بزرگ^۵ در زمانی که این سطح تحت تاثیر کمتر از ۴ کیلومتر مربع باشد، به آن طوفان فرو وزشی کوچک گفته می‌شود. معمولاً سرعت نزول باد در آن‌ها بین ۶ تا ۲۲ متر بر ثانیه است [۱۰]. همچنین حداکثر سرعت در نزدیکی سطح زمین رخ می‌دهد [۶]. این نوع طوفان به صورت ریزشی و عمودی به سمت زمین حرکت می‌کند و بعد از رسیدن به سطح با حرکتی موجی شکل و دوار و با سرعتی در حدود سرعت اولیه، گسترش یافته که می‌تواند باعث ایجاد نیروی بالابرنده و یا پسای شدید بر سازه‌ها شود [۱۱]. مشاهدات انجام شده در مقیاس کامل در طی آزمایش‌های نیمروند توسط فوجیتا [۱۲] و آزمایش‌های

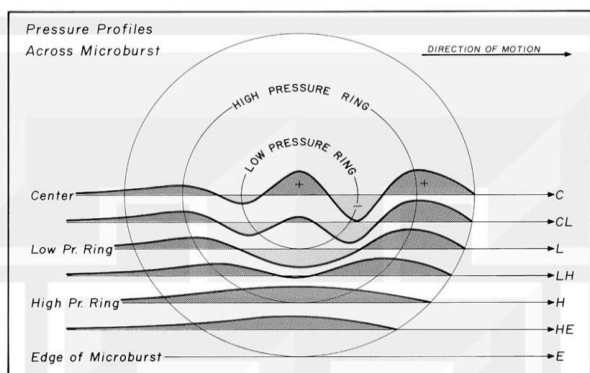
طوفان‌ها در سرتاسر دنیا، عامل تخریب‌های شدیدی بر سازه‌ها و عوارض طبیعی مختلف بوده‌اند. جریانات جوی به دلیل تنوع در نوع ساختار و رفتار آنها، تاثیرات متفاوتی را بر محیط خود می‌گذارند. لذا، لازم است که این جریانات و تاثیرات آنها بر محیط، بصورت جداگانه مورد بررسی قرار گیرد. در حال حاضر مبنای محاسبات بارهای وارده از طرف بادها به سازه‌ها، اکثراً بادهای لایه مرزی جوی هستند [۱]. که در این زمینه تحقیقات زیادی نیز انجام شده است [۲]، [۳]، [۴]. این موضوع خلأ تحقیقاتی موجود را در خصوص سایر جریانات جوی نشان می‌دهد. طوفان فرو وزشی^۱ یکی از جریاناتی است که کمتر مورد بررسی و تحقیق قرار گرفته است. این طوفان، نوعی از طوفان‌های تندری شدید است که در بیشتر نقاط جهان قابل مشاهده است [۵]. این جریان بر خلاف جریانات لایه مرزی جوی، بر سازه‌های کوتاه نیز تاثیرگذار است. همچنین در این جریان، بدلیل رفتار خاص آن، محل قرارگیری سازه نسبت به محل ریزش جریان می‌تواند، آثار متفاوتی و پیش بینی نشده ای را بر محیط و سازه‌ها بگذارد [۶].

۲- مشخصات طوفان فرو وزشی و مطالعات قبلی در این زمینه

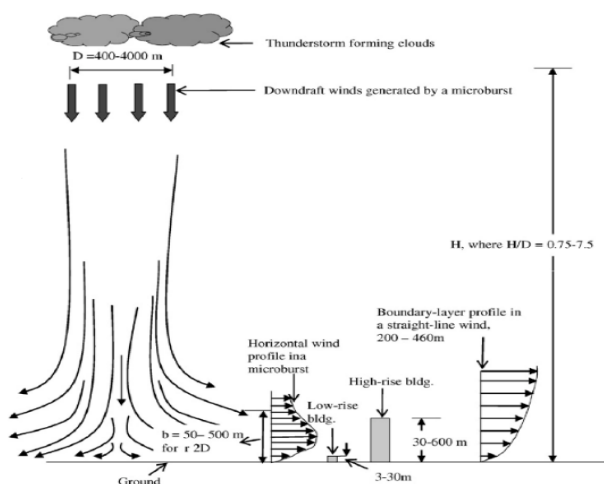
خلاصه آماری از مطالعات هواشناسی نشان می‌دهد که جت آزمایشگاهی توانایی ایجاد یک طوفان فرو وزشی کوچک^۲ در وضعیت تولید حداکثر باد را دارا می‌باشد [۷]. لچفورد [۸] نشان داد که بطور کلی، پدیده همرفت در اتمسفر، یک جریان عمودی به سمت بالا را ایجاد کرده که در آن رطوبت گرم که شناوری بیشتری دارد، به ارتفاع‌های بالاتر منتقل می‌شود. سپس رطوبت در این ارتفاع متراکم و خنک شده و در نهایت هوای خنک با چگالی بالا به شکل یک سقوط جریان به سمت پایین حرکت می‌کند. در نتیجه، فرو وزش‌ها زمانی رخ می‌دهند که یک جریان قوی در حال سقوط آزاد با سطح زمین برخورد کرده و به صورت امواج دوار، گسترش یابد. در پژوهش لچفورد [۸] توضیح داده شد که میدان جریان ایجاد شده توسط چنین رویدادی، به ویژه در نزدیکی نقطه برخورد، از چندین جنبه کلی متفاوت با میدان باد لایه مرزی جوی است. اولاً برخلاف پروفایل

⁴ Mesohigh⁵ Macrobust¹ Downburst² Microburst³ Momentum

تحقیق لوریدو سوزا و همکاران [۲۱] مشاهده کرد. علاوه بر این در سال ۲۰۲۲، حججی و همکاران [۲۲] به بررسی تاثیر زوایای برخورد طوفان فرو وزشی بر سازه مکعب شکل و به صورت استاتیکی پرداخته‌اند.

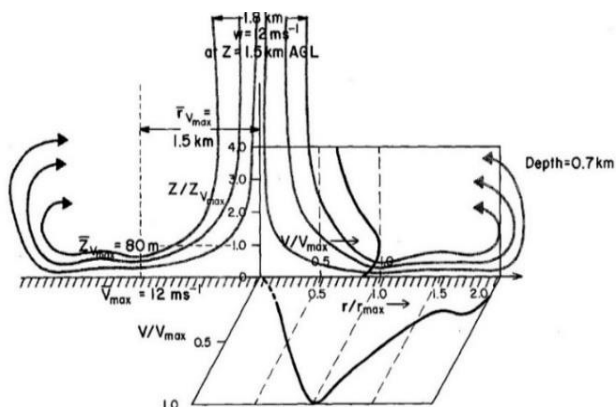


شکل ۱ میدان فشار یک طوفان فرو وزشی [۸]



شکل ۲ تفاوت جریان طوفان فرو وزشی با جریان لایه مرزی

جوی [۲۳]



شکل ۳ پروفیل سرعت یک طوفان فرو وزشی متعارف در طی

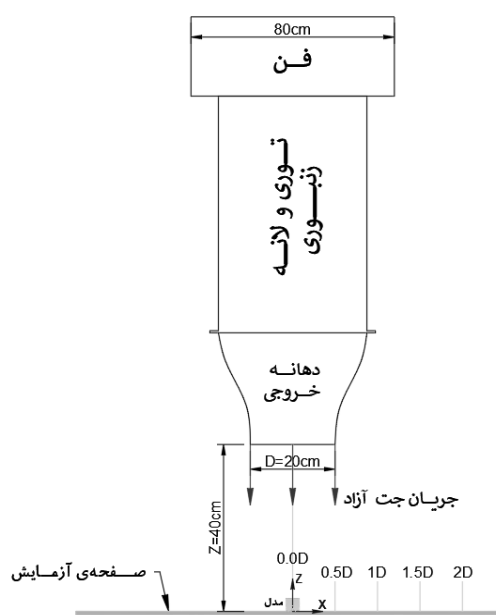
تحقیق جاوز [۷]

جاوز [۷] توسط هلمفلت، برای طوفان فرو وزشی کوچک، نتایج مشابهی را نشان داده‌است. شکل (۳) نشان‌دهنده خلاصه نتایج ارائه شده توسط هلمفلت از آزمایش‌های جاوز است. در نتایجی که از یک فرو وزش با قطر متوسط ۱/۸ کیلومتر استخراج شده است، مشخص شده که به طور متوسط، سرعت باد بیشینه در ارتفاع تقریباً ۸۰ متر و در فاصله تقریباً ۱/۵ کیلومتری از نقطه برخورد رخ می‌دهد. در نتیجه قویترین جریان‌ها در محدوده‌ای به فاصله یک قطر جریان از محل برخورد جریان وجود می‌آیند. یومی ایدا و همکاران [۱۳] با بررسی عددی طوفان فرو وزشی بر روی سازه‌ها، نشان دادند که نتایج شبیه‌سازی عددی با نتایج شبیه‌سازی آزمایشگاهی همخوانی داشته و یکدیگر را تأیید می‌کنند. جورج رومانیک و حوریا هنگان [۱۴] نیز طوفان فرو وزشی را به صورتی که در باد‌های لایه مرزی غوطه‌ور باشد را بررسی کردند. آن‌ها نتایج وجود یا عدم وجود باد لایه مرزی در جریان خروجی را مقایسه کرده‌است. همچنین مصطفی ابوطایب و همکاران [۱۵] با استفاده از یک سیستم تیغه‌ای در تونل باد لایه مرزی به شبیه‌سازی طوفان فرو وزشی پرداخته‌اند. آسانو و همکاران [۱۶] با استفاده از شبیه‌سازی جت پالسی به بررسی اثرات غیر ایستایی طوفان فرو وزشی بر روی بارهای باد وارد بر یک ساختمان کم ارتفاع پرداختند. ژونگهوی ووآ و همکاران [۱۷] با استفاده از جت دیواره پالسی به شبیه‌سازی طوفان فرو وزشی ثابت و متحرک پرداختند و اثرات این طوفان را بر روی خطوط انتقال برق را بررسی کردند. از دیگر تحقیقات مهمی که در راستای شناخت جریان‌ها طوفان فرو وزشی انجام شده است می‌توان به مطالعه نیکولز و همکاران اشاره کرد که به بررسی ساختار جریان در اطراف یک مدل مکعب شکل تحت بار طوفان شبه فرو وزشی پرداختند [۱۸].

لچفورد و همکاران [۱۰] در قسمت اول پژوهش خود به بررسی جریان‌های ناشی از طوفان فرو وزشی بر مدلی مکعب شکل و بصورت استاتیکی پرداختند. این پژوهش در حالی صورت پذیرفت که نیاز به بررسی این جریان‌ها به صورت شبیه‌سازی آزمایشگاهی در حالت دینامیکی نیز دیده می‌شد. لذا در ادامه پژوهش خود و در قسمت دوم آن، با ساخت یک سیستم شبیه‌سازی دینامیکی طوفان فرو وزشی، به بررسی جریان‌ها طوفان و تأثیر آن بر مدلی مکعب شکل پرداختند [۱۹]. همچنین لامباردو و همکاران [۲۰] در تحقیق خود، مطالعه‌ای بر روی بار وارد بر یک سازه کم ارتفاع در مقیاس کامل انجام دادند. نمونه‌ای از بررسی آثار طوفان فرو وزشی بر سازه‌ها و مطالعه بر روی مناطق تحت تأثیر این طوفان را می‌توان در

۳-۲- مدل و صفحه آزمایش

با استناد به پژوهش فوجیتا [۹]، سطح تحت تاثیر طوفان فرووزشی حداقل برابر با ۴۰۰ متر می‌باشد. بنابراین در این پژوهش باتوجه به قطر خروجی دمنده، مقیاس مدل طراحی شده برای انجام آزمایشات، برابر با ۱:۲۰۰۰ در نظر گرفته شده است. در این آزمایشات از یک صفحه آزمایش با ابعاد ۱/۵×۱ متر استفاده شده است. این صفحه قابلیت جابه‌جایی برای رسیدن به سرعت‌های مختلف به‌وسیله دست را دارد. جابه‌جایی صفحه در محدوده $\pm 1/5D$ در نظر گرفته شده است. همچنین فاصله صفحه تا مرکز خروجی دمنده برابر ۰/۴ متر ($2D$): دو برابر قطر دهانه خروجی دمنده) معین شده است. نمای بالای این سیستم در شکل (۴) نشان داده شده است. برای این پژوهش یک مدل مکعب شکل به ابعاد ۱۵×۱۵ میلی‌متر به عنوان یک نمونه عمومی از سازه‌ها ساخته شد. تعداد ۳ عدد سوراخ فشاری روی مدل در هر ضلع نصب شده است. در شکل (۵) مدل مورد نظر نشان داده شده است. همچنین در شکل (۶) نمای کناری از چیدمان تجهیزات ارائه شده است. سرعت جابه‌جایی صفحه آزمایش در راستای X ، به‌صورت نسبت V_{trans}/V_{ref} اعلام می‌شود که به اختصار با V_R نشان داده شده است. این تخته در دو نسبت سرعت برابر با ۰/۱۲ و ۰/۰۶ ($V_R=0/06, 0/12$) جابه‌جا می‌شود. این سرعت توسط میکروسویچی که بر روی صفحه آزمایش قرار گرفته است، محاسبه و اندازه‌گیری شده است (شکل ۷).



شکل ۴ نمای بالای سیستم شبیه‌ساز طوفان فرووزشی آزمایشگاهی

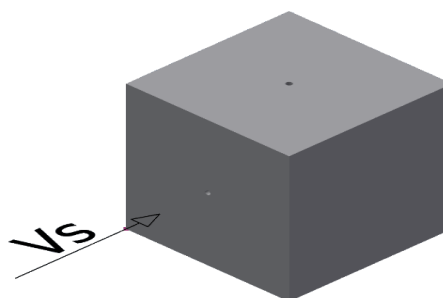
تا به امروز چندین تحقیق جهت ارزیابی تأثیر طوفان فرووزشی بر روی مدل‌هایی مکعب شکل به‌عنوان شکلی عمومی از سازه‌ها صورت گرفته است که در آن‌ها بررسی دینامیکی نیروی اعمالی از سوی طوفان فرووزشی بسیار کم یافت می‌شود. این تحقیقات عموماً در راستای بررسی و شناخت طوفان‌ها و جریان‌ات ریزشی به‌صورت تجربی و بعضاً عددی صورت پذیرفته است. در عین حال، این پژوهش‌ها کماکان دچار خلأهایی از لحاظ بررسی دینامیکی تأثیر این طوفان بر سازه‌هایی که در اراضی شیب‌دار، بنا شده‌اند وجود دارد؛ لذا هدف این پژوهش، ارائه یک شبیه‌سازی دینامیکی کارآمد از طوفان فرووزشی و بررسی اثرات آن بر توزیع فشار و نهایتاً نیروهای وارده بر یک ساختمان استاندارد مکعبی شکل می‌باشد. همچنین باتوجه به خلأ علمی مورد اشاره، بررسی دینامیکی اثرات زاویه قرارگیری سازه نسبت به جریان و شیب سطح، از دیگر اهداف مهم در این تحقیق می‌باشد. مقایسه‌هایی نیز با توزیع‌های فشار به‌دست‌آمده از سایر شبیه‌سازی‌های طوفان فرووزشی، جهت بررسی صحت نتایج این تحقیق انجام شده است. با کاوش در ویژگی‌های انحصاری و مشخصات بارهای وارده بر طوفان فرووزشی، نویسندگان بر این باورند که نتایج این تحقیق بتواند باعث افزایش شناخت جریان‌ات این طوفان خاص در حالات مذکور بر سازه‌های کوتاه گردد.

۳-۲- مدل، تجهیزات و شرایط آزمایشگاهی

۳-۱- شبیه‌ساز طوفان فرووزشی

برای ایجاد طوفان فرووزشی در این تحقیق، از یک دمنده با خروجی یکنواخت ثابت استفاده شده است. جریان سیال متلاطم از طریق فن تعبیه شده، با میزان آشفتگی کمتر از ۰/۵٪ از دهانه خروجی آن خارج می‌شود. این فن با قطر ۸۰ سانتی‌متر و با سرعت ۱۵۰۰ دور بر دقیقه و با قابلیت تنظیم سرعت چرخش، جریان موردنظر را تولید می‌کند که این جریان توسط یک تغییردهنده سائز (آداپتور) که فن را به دمنده متصل کرده است وظیفه ایجاد طوفان فرووزشی موردنظر را برعهده دارد. این جریان در محفظه آرامش دمنده که دارای ساختار لانه‌زنبوری و توری است، یکنواخت شده و از دهانه دمنده خارج می‌شود. همچنین یک نازل کاهنده با شعاع ۰/۲ متر که به‌وسیله چاپ سه‌بعدی ساخته شده است در دهانه خروجی دمنده استفاده گردیده که کمک به شبیه‌سازی فیزیکی جریان می‌نماید.

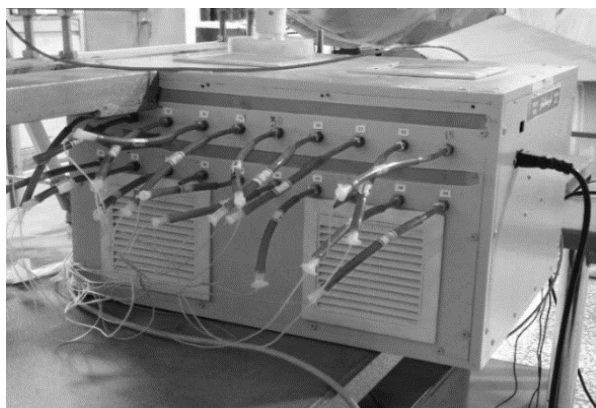
شده را نسبت به فشار اتمسفر اندازه گیری می کنند. این سنسورها قادر به اندازه گیری فشارهایی کمتر از فشار اتمسفر نیز هستند. قبل از انجام آزمایش ها، تمام سنسورهای مورد استفاده در شرایط استاندارد کالیبره شده اند. این جعبه سنسور داده های آنالوگ دریافتی را توسط پردازنده ۱۶ بیتی نصب شده در جعبه، به داده های دیجیتال تبدیل می کند و در انتها نیز این داده ها به رایانه منتقل می شود. ظرفیت این سنسورها برابر با ± 1000 پاسکال و دقت اندازه گیری آن نیز 0.15% در مقیاس کل است. نرخ داده برداری در این آزمایشات برابر با ۴۰۰ هرتز بوده است (شکل ۸). همچنین برای اندازه گیری پروفیل سرعت طوفان فرو وزشی، در فاصله دهانه دمنده تا سطح صفحه، از یک سنسور سیم داغ استفاده شده است. دقت نهایی سرعت سنج سیم داغ کمتر از 0.1 متر بر ثانیه می باشد. کلیه سنسورهای فشار و سرعت قبل از استفاده در سرعت ها و فشارهای مختلف قرار گرفته و نهایتاً منحنی کالیبره هر کدام به صورت مجزا بدست آمده است. برای اندازه گیری پروفیل های سرعت در دهانه خروجی دمنده از مجموعه لوله های پیتو که با نام ریک استفاده شده است (شکل ۹).



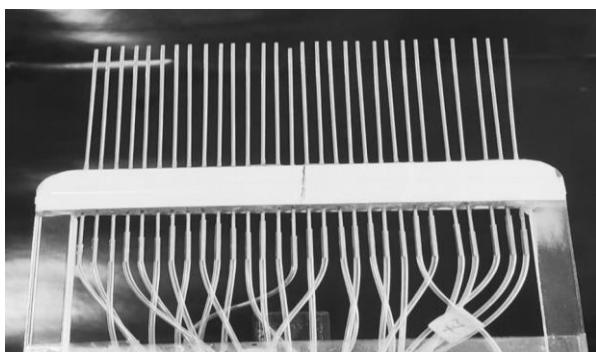
شکل ۵ مدل مکعب شکل



شکل ۶ نمای کناری از چیدمان دمنده، صفحه آزمایش و مدل



شکل ۸ جعبه سنسورها



شکل ۹ ریک



شکل ۷ سیستم اندازه گیری سرعت جابجایی صفحه

۳-۳ تجهیزات اندازه گیری

جهت اندازه گیری فشار و نیروهای مورد بحث در این تحقیق از سنسورهای فشاری استفاده شده است که اختلاف فشار وارد

² Rake

¹ Hot-wire

۴-۳- شرایط انجام آزمایش

۴- نتایج و بحث

در قسمت اول این بخش، ساختار جریان طوفان فروزشی مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه نیز به بررسی اثرات دینامیکی این طوفان بر یک سازه‌ی مکعب شکل استاندارد پرداخته شده است. در این راستا اثرات زاویه برخورد طوفان فروزشی (θ)، زاویه قرارگیری مدل یا سازه نسبت به طوفان (α) و سرعت حرکت طوفان (V_R) به صورت دینامیکی مورد بررسی قرار گرفته است.

۴-۱- بررسی ساختار طوفان فروزشی

در این قسمت، یکنواختی سرعت جریان خروجی از دهانه دمنده بررسی شد. سرعت متوسط جریان خروجی از دهانه برابر با ۱۲ متر بر ثانیه می باشد. فاصله داده برداری از دهانه خروجی نیز $0.5D$ قرار داده شد. این فاصله نسبت به پارامتر D (قطر دهانه خروجی) بی بعد شده است. این محل به این دلیل انتخاب شد تا فاصله کافی از توری و لانه زنبوری در خروجی دمنده داشته و صفحه مقابل جریان نیز بر آن تأثیری نداشته باشد [۱۰]. مقایسه این داده ها نشان می دهد که پروفیل سرعت خروجی از دهانه دمنده از یکنواختی مناسبی برخوردار بوده و نوسانات بزرگ در قطر دهانه خروجی مشاهده نمی شود. در شکل (۱۰) داده‌های مذکور به همراه مقایسه‌ای با پروفیل سرعت دهانه خروجی دمنده مورد استفاده در مقاله لچفورد و چای [۱۰]، ارائه شده است. همچنین در این نقطه، شدت آشفتگی جریان برابر با 0.46% اندازه گیری شده که بر اساس رابطه (۱) محاسبه شده است [۲۴]، [۲۵]، [۲۶].

$$Tu(\%) = \left(\frac{\sqrt{\frac{\sum u_i'^2}{n}}}{\bar{U}} \right) \times 100 \quad (1)$$

$$u_i' = u_i - \bar{U}$$

در این رابطه، \bar{U} میانگین سرعت ثبت شده، u_i' مولفه اغشاشی سرعت، u_i سرعت لحظه ای و n تعداد نمونه می باشد.

جریان خروجی از دهانه دمنده در محدوده سرعت ۱۰ تا ۱۴ متر بر ثانیه تنظیم شده است. فشارهای ناشی از این جریان خروجی توسط سنسورهای فشاری تعبیه شده بر روی مدل مکعب شکل که به جعبه فشار متصل است اندازه گیری می شود. این مدل در دو راستای قرارگیری صفر و ۴۵ درجه (α) مشخص گردیده است. همچنین این مدل در چهار زاویه برخورد با طوفان (θ)، در معرض جریان قرار می گیرد. مدل مورد بحث از نقطه $1.5D$ با دو سرعت جابه‌جایی در راستای $X(0.12)$ ، $V_R=0.6$ ، تا نقطه $1.5D$ کشیده می شود. در جدول ۱ حالات مختلف داده برداری در این پژوهش، ارائه شده است.

۳-۵- آنالیز خطا و عدم قطعیت نتایج

در کلیه آزمایشات انجام شده در این تحقیق برای تخمین ضریب فشار و نیرو از داده‌های اندازه گیری شده توسط سنسورهای فشار استفاده شده است. همانطور که در قسمت قبل به آن اشاره شد، از سنسورهای فشار تفاضلی با دقت 0.15% در مقیاس کلی استفاده شده که قبل از داده برداری همگی کالیبره شده اند. البته لازم به ذکر است که منابع خطای موجود از تخمین ضرایب فشار و نیرو، تنها محدود به سنسورها نبوده و شامل خطای کالیبراسیون سنسورها، خطای کارت داده برداری و خطای منتشر شده در فرآیند محاسبات نیز می شود. نکته دیگری که بایستی بدان اشاره شود اینست که با توجه به محدود بودن تعداد نقاط روی دیواره‌ها و المان بندی سطح مکعب، فشار در هر یک از المانها ثابت و برابر با مقدار فشار اندازه گیری شده در وسط آن المان در نظر گرفته شده است. در فرآیند محاسبه عدم قطعیت ضریب فشار و نیرو، تمام موارد بالا به غیر از مورد آخر که امکان محاسبه آن وجود نداشته است، در نظر گرفته شده که پس از محاسبه به ترتیب برای ضرایب فشار و نیرو برابر با 0.35% و 0.1% می باشد.

مکان قرارگیری مدل (X/D)	زاویه‌ی قرارگیری تخته (θ)	راستای قرارگیری مدل (α)
$X/D=0.0$ 	$\theta=90^\circ$ 	$\alpha=0^\circ$
$X/D=0.5$ 	$\theta=105^\circ$ 	$\alpha=45^\circ$
$X/D=1$ 	$\theta=120^\circ$ 	
$X/D=1.5$ 	$\theta=135^\circ$ 	
$X/D=2$ 		

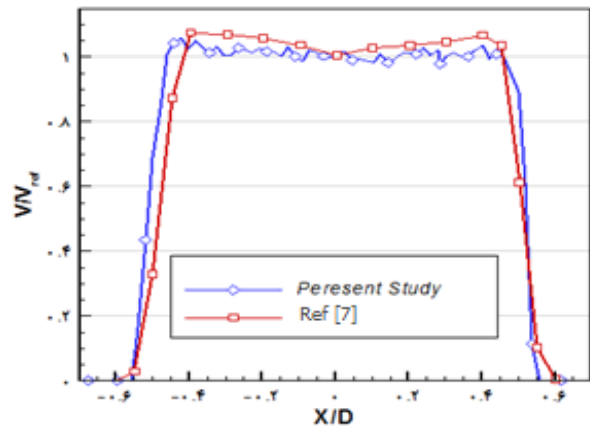
زمانی که صفحه آزمایش از روبروی جریان عبور می کند پیردازد. در شکل ۱۲ میدان فشار استاتیک در $V_R=0.12$ و $V_R=0.06$ در زاویه برخورد طوفان با سطح برابر با 90° اندازه گیری شده است. این داده ها به همراه داده میانگین و داده شبه استاتیک ارائه شده است. داده های شبه استاتیک، مربوط به توزیع فشار سطح در نسبت سرعت انتقالی (V_R) بسیار پایین می باشد. ضریب فشار در این نمودار با استفاده از رابطه ۲ محاسبه شده است [۲۷].

$$C_p = \frac{P_{static} - P_{atm}}{\frac{1}{2} \rho V_{ref}^2} \quad (2)$$

که در آن C_p ضریب فشار، P_{static} فشار استاتیک سطح، P_{atm} فشار اتمسفر، ρ چگالی سیال و V_{ref} سرعت جریان خروجی از دمنده است. با توجه به شکل (۱۲) و مقایسه نمودارهای شبه استاتیک و $V_R=0.12$ و $V_R=0.06$ می توان دریافت که با افزایش سرعت جابه جایی، قله نمودار ضریب فشار از نقطه مرکزی فرود جریان ($X/D=0$) به سمت پایین دست جریان (X/D) های منفی) متمایل پیدا کرده؛ بطوری که در نمودار $V_R=0.12$ به حدود $X/D=-0.5$ می رسد. علاوه بر این افزایش سرعت جابجایی، باعث شده تا مقدار حداکثر ضریب فشار نیز کاهش یابد. به نظر می رسد علت اصلی جابجایی نقطه سکون، سرعت نسبی بین سطح و جریان فروروشی بوده و المان های سیال موجود در زیر جریان فروروشی سرعت صفر را احساس نمی کنند. البته در پایین دست، جایی که سرعت نسبی المان ها نسبت به سطح صفر شده، ضریب فشار نیز به بیشینه مقدار خود رسیده است.

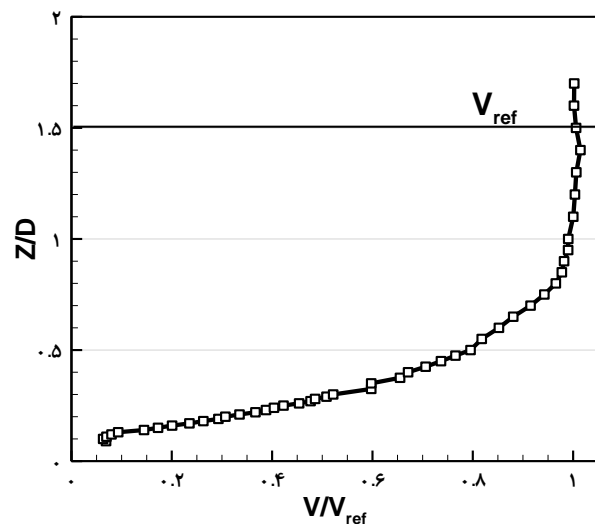
۴-۳- بررسی اثرات زاویه برخورد طوفان با سطح در حالت دینامیکی

برای بررسی بهتر اثرات دینامیکی زاویه برخورد طوفان، در ابتدا اثرات زاویه برخورد طوفان فرو زشی با سطح (θ) در حالت شبه استاتیکی اندازه گیری شده و نتایج آن در شکل (۱۳) ارائه شده است. این نتایج که به صورت توزیع فشار بر روی سطح ارائه شده، نشان می دهد که با افزایش مقدار θ ، رأس نمودار ضریب فشار از نقطه $X/D=0$ به نقاط کناری محل فرود جریان (X/D) های منفی) متمایل شده است. در عین حال، با افزایش مقدار θ ، تغییر چشمگیری در مقدار حداکثر ضریب فشار ایجاد نشده است.



شکل ۱۰ سرعت خروجی در فاصله $0.5D$

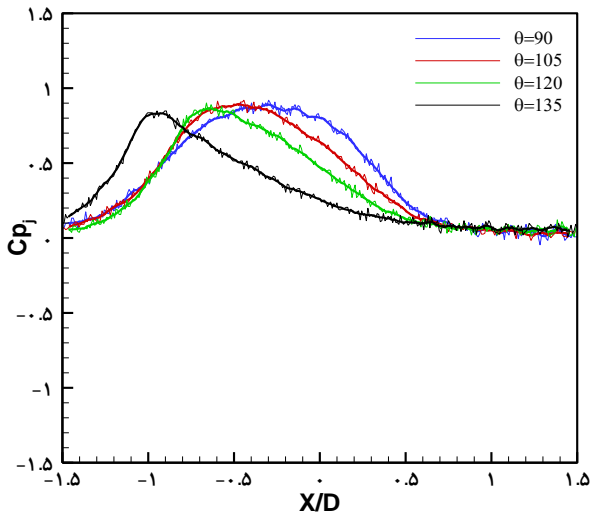
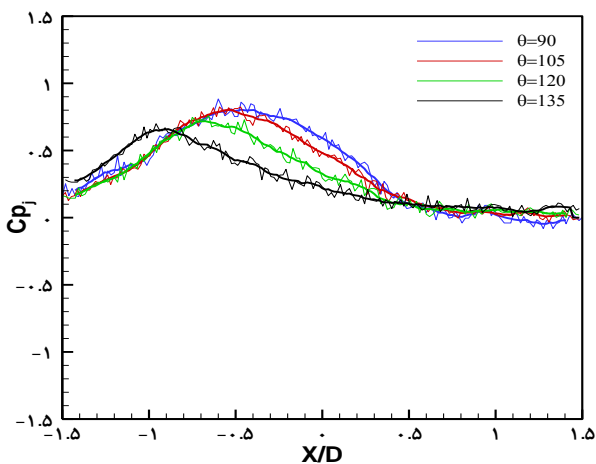
سرعت جریان در امتداد نقطه مرکزی دهانه خروجی دمنده تا صفحه آزمایش، با استفاده از سنسور سیم داغ اندازه گیری شد؛ که نتایج آن در شکل (۱۱) نشان داده شده است این نتایج نشان می دهد که جریان خروجی در مقادیر بالاتر از $Z/D=1/2$ ، جریان به مقدار کمی افت سرعت داشته است. در حالی که در مقادیر کمتر از $Z/D=0.8$ ، به شکل خطی کاهش یافته و تا رسیدن به سطح صفحه به صفر میل می کند. لذا، در ادامه تحقیقات از سرعت جریان در فاصله $0.5D$ از دهانه خروجی به عنوان سرعت مرجع دمنده (V_{ref}) در اکثر محاسبات استفاده شده است.



شکل ۱۱ افت سرعت بی بعد بین دمنده و صفحه آزمایش در امتداد نقطه مرکزی دهانه خروجی

۴-۲- بررسی اثرات حرکت انتقالی طوفان بر توزیع فشار سطح صفحه آزمایش

جهت بررسی میدان فشار استاتیکی در این تحقیق یک سنسور بر روی سطح صفحه آزمایش قرار داده شد تا به داده برداری در

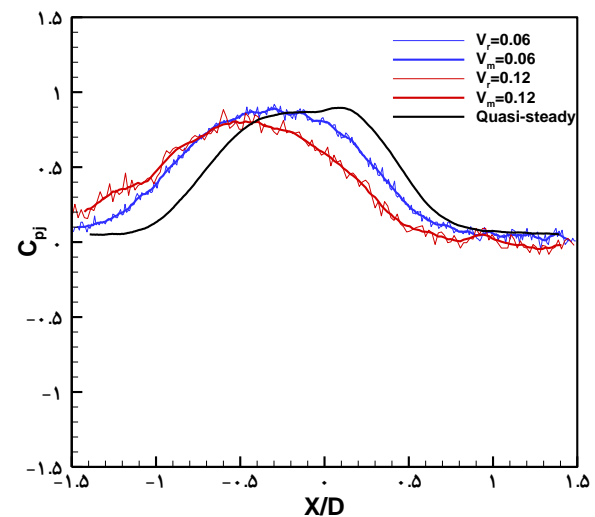
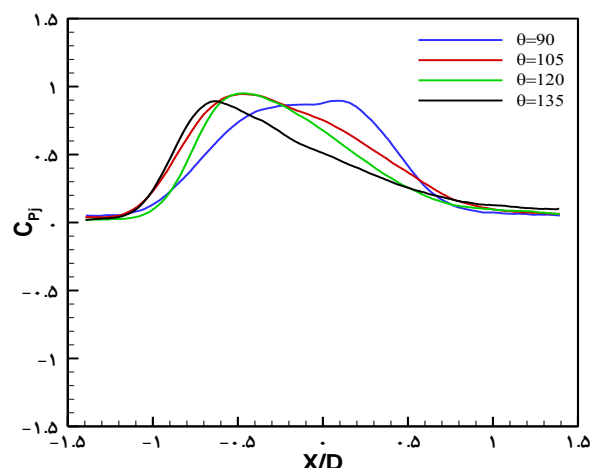
شکل ۱۴ الف- میدان فشار استاتیک در θ های متفاوت با $V_R=0.06$ شکل ۱۴ ب- میدان فشار استاتیک در θ های متفاوت با $V_R=0.12$

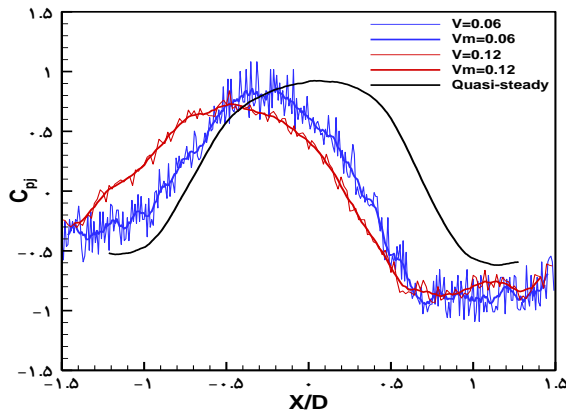
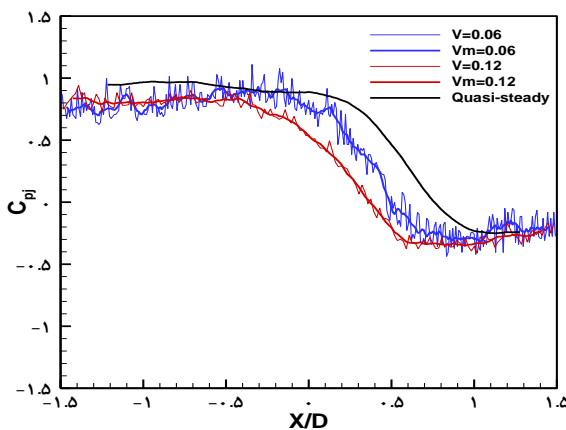
۴-۴- بررسی اثرات سرعت انتقال طوفان فرو وزشی بر سازه استاندارد مکعبی شکل

این آزمایشات در دو نسبت سرعت انتقال $V_R=0.06$ و $V_R=0.12$ انجام شده است. در شکل (۱۵) نمودار مقایسه ضرایب فشار در اضلاع مختلف مکعب و در حالتی که راستای قرارگیری مدل نسبت به جریان آزاد صفر درجه ($\alpha=0^\circ$) بوده و زاویه برخورد با سطح، برابر 90° درجه ($\theta=90^\circ$) می‌باشد، ارائه شده است. علاوه بر نمودارهای ضریب فشار مذکور، داده‌های میانگین‌گیری شده از این ضرایب و داده شبه استاتیک هم در شکل نشان داده شده است.

در این شکل‌ها مشاهده می‌شود که رفتار نمودارهای ضریب فشار در دو نسبت سرعت V_R شبیه به یکدیگر می‌باشد، ولیکن مقدار حداکثر ضریب فشار در ضلع رو به جریان و در زمانی که

در ادامه، در شکل (۱۴) اثرات طوفان فرو وزشی در دو نسبت سرعت انتقالی مختلف و در θ های متفاوت، بر توزیع فشار روی سطح نشان داده شده است. افزایش این زاویه باعث شده تا قله نمودار ضریب فشار، از $X/D=0$ به سمت X/D های منفی تمایل پیدا کند. با مقایسه شکل (۱۲)، شکل (۱۳) و شکل (۱۴) ضمن ذکر این نکته که رفتار نمودارهای فشار ارائه شده شبیه به یکدیگر بوده؛ می‌توان به این نکته پی برد که اثرات افزایش زاویه θ و نسبت سرعت V_R ، باعث تشدید تغییر مکان قله نمودار فشار به سمت X/D های پایین‌تر و کاهش نسبی در مقدار حداکثر ضریب فشار در حالت دینامیکی شده است. این موضوع در $\theta=135^\circ$ بیشتر نمایان است. به نظر می‌رسد عامل اصلی کاهش ضریب فشار در حالت دینامیکی افزایش میزان افت فشار کل درون جریان است. البته با افزایش θ ، این تلفات افزایش یافته است.

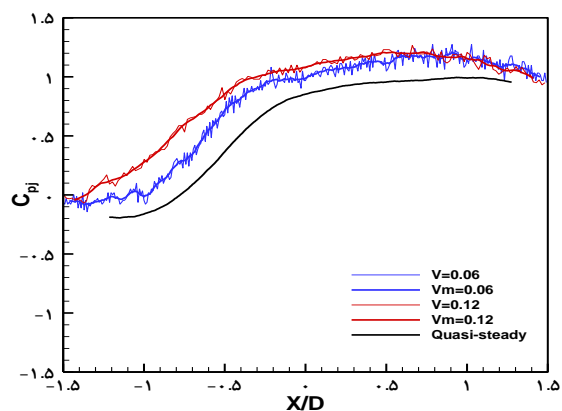
شکل ۱۵ میدان فشار جریان خروجی از دمنده بر سطح صفحه آزمایش در $\theta=90^\circ$ شکل ۱۶ میدان فشار شبه استاتیک در θ های مختلف

شکل ۱۵ ب- ضرایب فشار بر مکعب در $\alpha=0^\circ$ و $\theta=90^\circ$ ضلع سقفشکل ۱۵ ج- ضرایب فشار بر مکعب در $\alpha=0^\circ$ و $\theta=90^\circ$ ضلع پشت به جریان

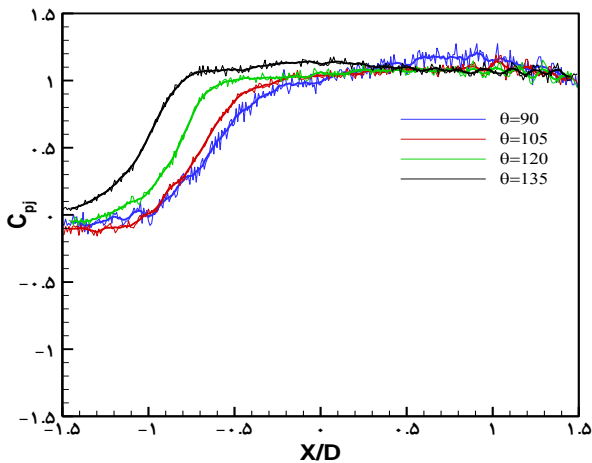
۴-۵- بررسی اثرات دینامیکی زاویه برخورد طوفان فروزشی بر مدل مکعب شکل استاندارد

در شکل (۱۶) داده های ضریب فشار در $V_R=0.06$ و در θ های مختلف نشان داده شده است. در ضلع رو به جریان مشخص است که میزان حداکثر ضریب فشار در همان ابتدای مسیر بر روی ضلع وجود داشته و در θ های مختلف این حداکثر فشار تقریباً برابر با یکدیگر بوده است. ولیکن مشاهده شده است که میزان حداکثر ضریب فشار در θ های بزرگتر، ثبات بیشتری داشته و در طول مسیر بیشتری، این حداکثر حفظ می شود. در سقف مدل نیز مشاهده می شود که در $\theta=90^\circ$ ، بیشترین بازه تغییرات ضریب فشار بر مدل وارد شده است که شامل بزرگترین اعداد در طول مسیر حرکت می شود. با افزایش θ ، این بازه تغییرات کوچکتر شده و قله فشار مثبت نیز به سمت انتهای مسیر متمایل می شود. به نظر می رسد با افزایش زاویه θ ، رفتار طوفان فروزشی در محدوده ای که جریان های سطحی ایجاد می کند، به رفتار طوفان های اتمسفریک لایه مرزی نزدیک شده

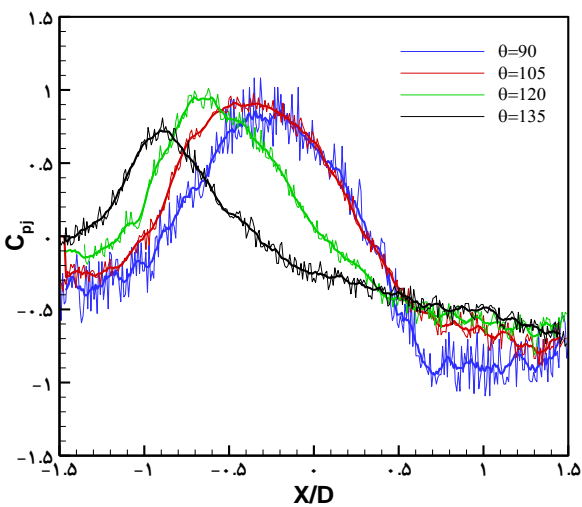
نسبت سرعت انتقالی بیشتر است، مقدار بیشتری را نسبت به زمانی که مدل با نسبت سرعت انتقالی کمتر حرکت می کند، نشان می دهد. همچنین مشخص است که در ابتدای محدوده حرکت ($X/D=+1/5$)، فشار زیادی بر ضلع رو به جریان وارد می شود، اما حداکثر این مقدار در $X/D=1$ ایجاد شده است. در $X/D=-0.5$ و پس از آن، مشاهده می شود که فشار با شیب شدیدی کاهش می یابد و به سمت صفر میل می کند. این نتایج نشان می دهد در حالتی که صفحه رو به جریان در محدوده X/D های مثبت در مواجهه با جریان فروزشی سطحی است، ضریب فشار بیشترین مقدار را داشته و با عبور جریان فروزشی از روی آن ضریب فشار به شدت کاهش می یابد. البته در حالت دینامیکی به علت جابجا شدن نقطه سکون این روند به سمت پایین دست منتقل شده است. در سقف مدل، تا حدودی عکس این مورد پیش می آید. به صورتی که در حالتی که $V_R=0.12$ است، مقدار ضریب فشار، بازه تغییرات کوچکتری نسبت به سرعت $V_R=0.06$ پیدا می کند. در ابتدای حرکت و تا حدود $X/D=+0.5$ ، فشار منفی زیادی بر سقف مدل وارد شده است ولی در ادامه مسیر و با شیب شدیدی این فشار در $X/D=-0.5$ به حداکثر مثبت خود می رسد. به نظر می رسد علت کم بودن ضریب فشار در X/D های منفی و مثبت، وجود جریان های سطحی ناشی از جریان فروزشی است و با رسیدن سقف بر ناحیه سکون جریان فروزشی و کاهش سرعت، ضریب فشار افزایش یافته است. در ضلع پشت به جریان نیز که در ابتدای مسیر مقدار فشار منفی بوده، مشاهده می شود که در $X/D \geq +0.5$ ، به سمت فشارهای مثبت حرکت کرده است. روند تغییرات ضلع پشت به باد تقریباً با ضلع رو به جریان شبیه می باشد. البته با این تفاوت که در X/D ها منفی ضلع پشت به باد به حالت رو به باد تبدیل می شود.

شکل ۱۵ الف- ضرایب فشار بر مکعب در $\alpha=0^\circ$ و $\theta=90^\circ$ ضلع رو به جریان

یافته و به تدریج تبدیل به نیروی مکشی می شود؛ به طوری که در حدود $X/D = -0.5$ تا $X/D = -1$ ، به بیشترین مقدار نیروی مکشی در زوایای θ ی مختلف ایجاد شده است. با توجه به مقادیر نیروی وارده در راستای X و Z می توان گفت که بیشترین مقدار نیرو کل بر سازه، در محدوده $X/D \geq +0.5$ بر مدل وارد خواهد شد. افزایش زاویه θ ، باعث شده است که بازه تغییرات نیرو کمتر شده و همچنین نیرو با شیب کندتری تغییر کند. این موضوع نشان می دهد که قرارگیری سازه ها در دامنه ها و زمین های شیب دار کمک به افزایش ایمنی آن ها در برابر این جریان خواهد داشت. با توجه به اینکه روند تغییرات ضرایب فشار در دو سرعت بررسی شده به یکدیگر شبیه بوده و رفتار یکسانی را ارائه می دهند، می توان شباهت نمودارهای نیرو را در این دو نسبت سرعت انتقالی نتیجه گرفت. شکل (۱۹) نیز داده های تکرارپذیری را در $\theta = 135^\circ$ و $\alpha = 45^\circ$ نشان می دهد.



شکل ۱۶ الف- ضرایب فشار بر مدل مکعب شکل در θ های متفاوت و در $\alpha = 0^\circ$ و $V_R = 0.06$ ضلع رو به جریان



شکل ۱۶ ب- ضرایب فشار بر مدل مکعب شکل در θ های متفاوت و در $\alpha = 0^\circ$ و $V_R = 0.06$ ضلع سقف

و لذا کاهش ضریب فشار مانند حالت $\theta = 0^\circ$ مشاهده نمی شود. این کاهش اثر بعد از عبور جریان فروروزشی، کمتر نیز می شود که به علت کاهش سرعت جریان سطحی در این ناحیه می باشد. در ضلع پشت به جریان، ضریب فشار در θ های کوچکتر، زودتر و با شیب بیشتری افزایش می یابد، علاوه بر این، مقدار فشار وارد بر این ضلع بیشتر می باشد. به علاوه این نتایج نیز همانطور که در قسمت قبل به آن اشاره شد، نشان می دهد که اثرات ناشی از طوفان فروروزشی در حال کاهش و رفتار آن به رفتار طوفان لایه مرزی نزدیک می شود.

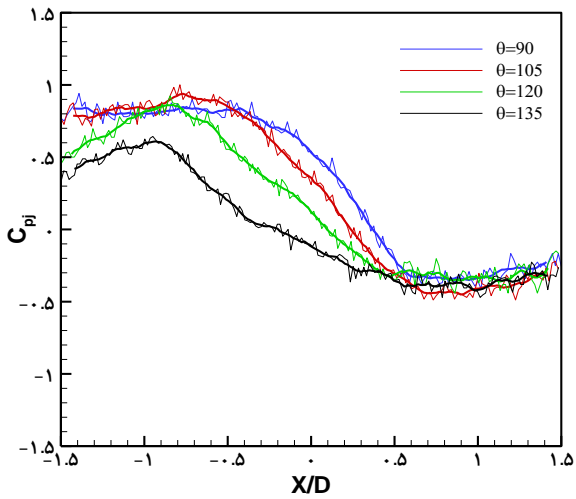
شکل (۱۷) داده های ضریب فشار درحالتی که نسبت سرعت انتقالی به دو برابر افزایش یافته ($V_R = 0.12$)، ارائه شده است. سایر شرایط آزمایش مشابه حالت قبل می باشد. نتایج نشان می دهد که رفتار نمودارهای ضریب فشار شبیه به زمانی است که $V_R = 0.06$ بوده است؛ در حالی که تغییرات بسیار ناچیزی نیز در بازه تغییرات ضریب نیرو در هر ضلع مشاهده می شود. عمده تفاوت در این دو سرعت جابجایی، مربوط به مکان و شیبی است که در آن ضریب فشار به حداکثر خود می رسد.

شکل (۱۸) ضرایب نیرو اندازه گیری شده در شرایط بالا را در دو راستای X و Z نشان می دهد. در رابطه (۴) نحوه محاسبه ضرایب نیرو ارائه شده است.

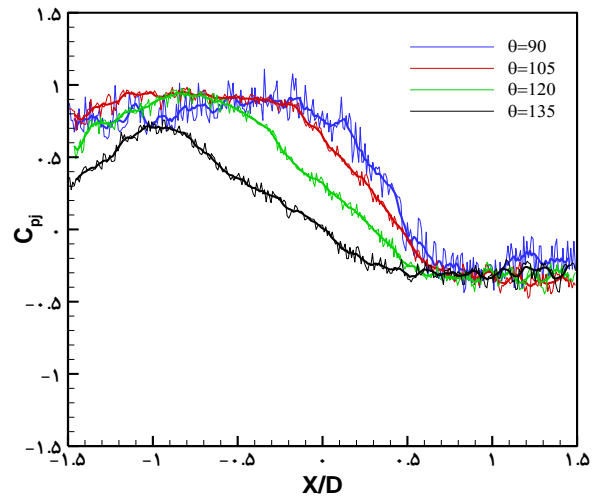
$$C_F = \left(\frac{\sum P \cdot A}{\frac{1}{2} \rho V_{ref}^2 S_{ref}} \right) \quad (1)$$

که در آن C_F ضریب نیرو، P فشار کل، A مساحت هر المان است که طول هر المان در واحد عمق آن المان در نظر گرفته شده است، ρ چگالی سیال، V_{ref} سرعت جریان خروجی از دمنده و S_{ref} ارتفاع مدل در واحد عمق آن است.

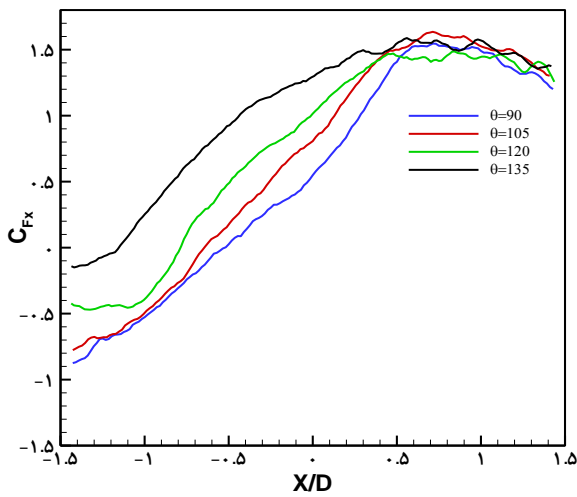
با بررسی این شکل ها می توان دریافت که در راستای X ، اختلاف نیرو بین دو ضلع سازه زیاد بوده و باعث افزایش مقدار نیرو در ابتدای مسیر حرکت شده است. در حدود $X/D \leq +0.5$ ، دیده شد که نیرویی که تا قبل از آن در راستای X ، مثبت بوده، به تدریج تغییر جهت داده و به سمت مقادیر منفی میل می کند. ضمناً مقدار نیروی وارده بر سازه در ابتدای مسیر بیشتر از مقدار آن در انتهای مسیر است. همچنین با افزایش θ ، شیب تغییرات نیرو در طول مسیر کاهش یافته و با شدت کمتری تغییر می کند. در راستای Z (نیروی وارده بر سقف) نیز می توان مشاهده کرد که در ابتدای شروع جابجایی، نیروی فشاری به سقف مدل وارد شده است. در $X/D = +0.5$ و در تمام زوایای θ ، به جز زاویه $\theta = 135^\circ$ ، نیروی فشاری کاهش



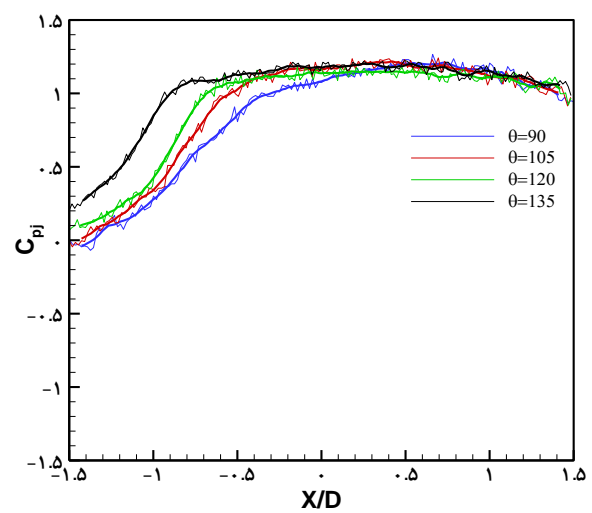
شکل ۱۷ ج- ضرایب فشار بر مدل مکعب شکل در θ های متفاوت و در $\alpha=0^\circ$ و $V_R=0.12$ ضلع پشت به جریان



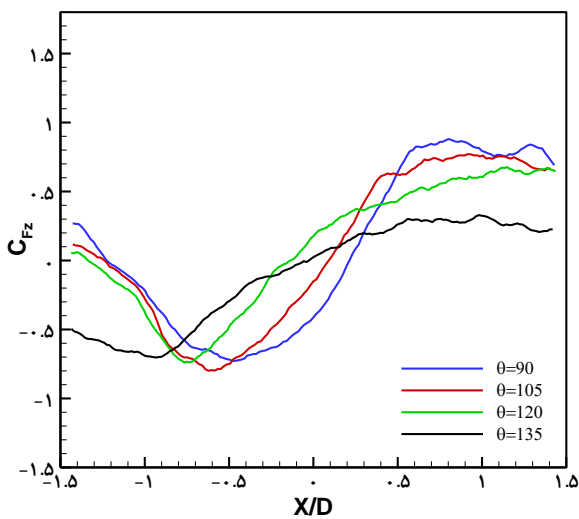
شکل ۱۶ ج- ضرایب فشار بر مدل مکعب شکل در θ های متفاوت و در $\alpha=0^\circ$ و $V_R=0.06$ ضلع پشت به جریان



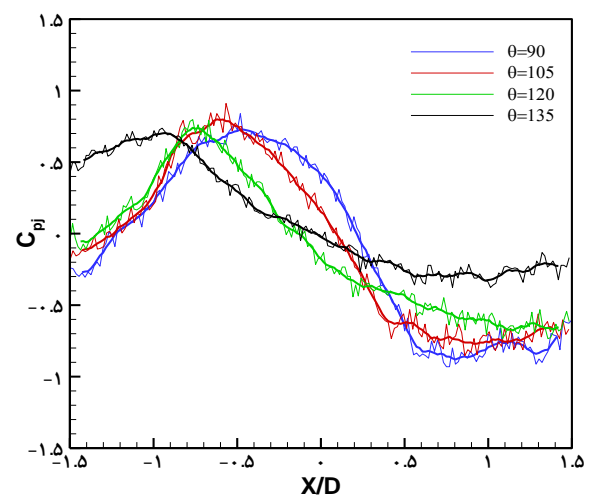
شکل ۱۸ الف- ضرایب نیرو در $\alpha=0^\circ$ و θ های متفاوت $C_{FX} - V_R=0.12$



شکل ۱۷ الف- ضرایب فشار بر مدل مکعب شکل در θ های متفاوت و در $\alpha=0^\circ$ و $V_R=0.12$ ضلع رو به جریان

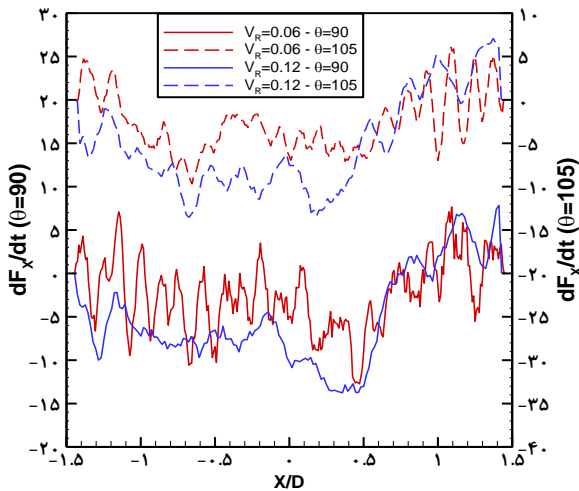


شکل ۱۸ ب- ضرایب نیرو در $\alpha=0^\circ$ و θ های متفاوت $C_{FZ} - V_R=0.12$

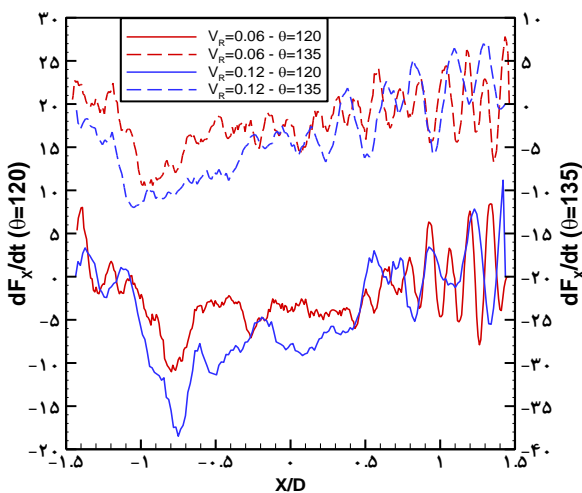


شکل ۱۷ ب- ضرایب فشار بر مدل مکعب شکل در θ های متفاوت و در $\alpha=0^\circ$ و $V_R=0.12$ ضلع سقف

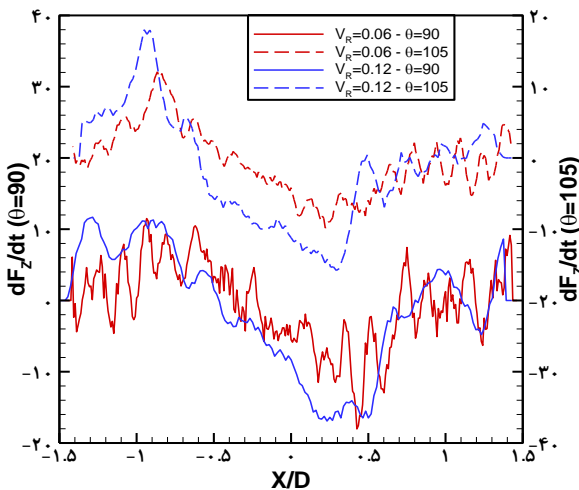
می افتد. علاوه بر این، افزایش نسبت سرعت انتقالی طوفان، باعث قوی تر شدن ضربات وارده بر سازه شده است.



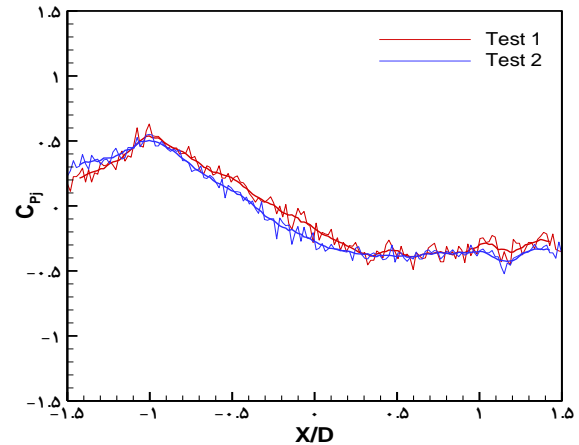
شکل ۲۰ الف- تغییرات نیرو بر حسب زمان (ضربه) در $\alpha=0^\circ$ $dF_{X}/dt - \theta=90^\circ$ و 105°



شکل ۲۰ ب- تغییرات نیرو بر حسب زمان (ضربه) در $\alpha=0^\circ$ $dF_{X}/dt - \theta=120^\circ$ و 135°



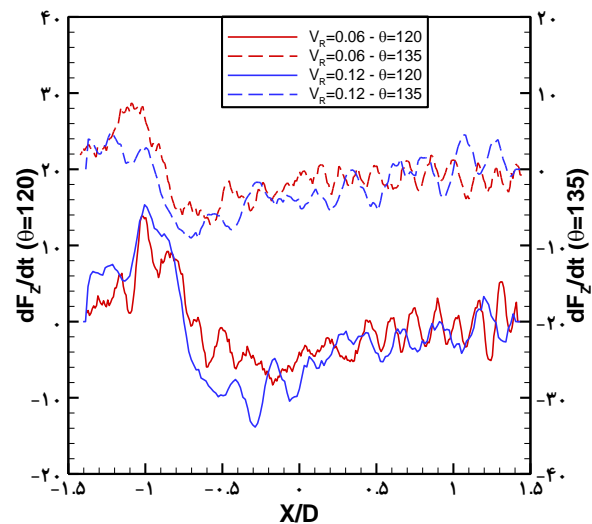
شکل ۲۰ ج- تغییرات نیرو بر حسب زمان (ضربه) در $\alpha=0^\circ$ $dF_{Z}/dt - \theta=90^\circ$ و 105°



شکل ۱۹ پروفیل تکرارپذیری آزمایشات در $\theta=135^\circ$ و $\alpha=45^\circ$

در ادامه، به بررسی تغییرات نیرو بر حسب زمان (ضربه)، در راستای $\alpha=0^\circ$ و دو جهت نیروی X و Z ، پرداخته می شود. این نمودارها نشان می دهند که در هر موقعیت مکانی، میزان نیرو با چه شیبی در حال تغییر بوده است. نهایتاً این منجر به شناختی از میزان تغییرات ناگهانی اندازه و راستای نیروی وارده بر سازه می شود. شکل (۲۰) تغییرات نیرو بر حسب زمان را در جهت X و Z نشان می دهد. این داده ها در θ های مختلف و راستای $\alpha=0^\circ$ ارائه شده اند. نتایج مشخص کرده است که به طور کلی، سازه در $\theta=90^\circ$ و در نسبت سرعت انتقال بالاتر ($V_R=0/12$)، ضربه بیشتری را دریافت کرده؛ ولیکن در $V_R=0/06$ ، مدل تحت نوسانات نیرویی شدیدتری بوده که متعاقباً منجر به لرزش شدیدتری می شود. با افزایش زاویه θ ، مشاهده می شود که این اختلاف بین دو سرعت موجود، به مقدار بسیاری کاسته شده است. همچنین می توان دریافت که افزایش زاویه θ ، نوسانات ضربه وارده بر سازه در محدوده $X/D \geq 0/5$ را افزایش می دهد. این موضوع در هر دو سرعت انتقالی مورد بررسی، قابل مشاهده است. داده های ارائه شده در جهت Z نشان می دهند که همچون حالت قبل، مدل در $\theta=90^\circ$ ، نوسانات ضربه متعددی را در نسبت سرعت انتقالی $V_R=0/06$ ، تحمل کرده است. در عین حال، در نسبت سرعت $V_R=0/12$ ، علی رغم کمتر بودن نوسانات ضربه، شیب تغییرات نیرو نسبت به سرعت انتقالی $V_R=0/06$ ، شدیدتر بوده و به سازه ضربات قوی تری وارد شده است. علاوه بر موارد فوق، می توان گفت که قوی ترین ضرباتی که به سازه در طول مسیر این طوفان وارد می شود، در راستای X ، در $X/D=-0/7$ و $\theta=120^\circ$ بوده و در جهت Z ، در $X/D=-0/9$ و در $\theta=105^\circ$ بوده است. هر دوی این ضربات در نسبت سرعت انتقالی $V_R=0/12$ به سازه وارد شده اند. بطور کلی این موضوع بیان می کند که قوی ترین ضربات، کمی بعد از رسیدن جریان و همچنین بعد از عبور کامل جریان اتفاق

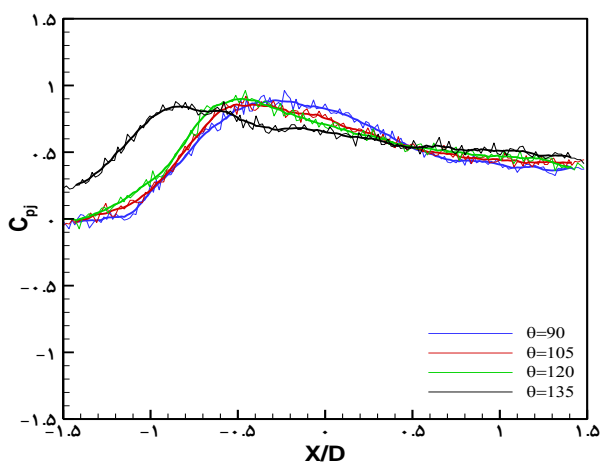
شکل (۲۲) نمایش دهنده میزان ضریب نیرو بر روی مدل در حالت $\alpha=45^\circ$ است که در دو راستای X و Z و همچنین θ های مختلف اندازه گیری شده است. در این داده ها مشخص است که نمودار نیرو در راستای X، بازه تغییرات کمتری نسبت به همین داده ها در $\alpha=0^\circ$ داشته، در عین حال که تفاوت چندانی در رفتار این نمودار با نمودار ضریب نیرو در راستای X و در حالت $\alpha=0^\circ$ مشاهده نمی شود. بطور میانگین، حدود ۵۰٪ از بازه تغییرات نیرو در این راستا کاهش یافته است. در راستای Z، این کاهش بازه در محدوده نقاطی که تحت نیروی فشاری قرار داشته اند، بیشتر بوده و در نقاط تحت نیروی مکشی کمتر مشاهده شده است. در این راستا، حدود ۲۰٪ کاهش در بازه تغییرات مشاهده می شود. این نتایج، مشخص می کنند که نیرو کل وارد بر سازه نیز، در راستای $\alpha=45^\circ$ ، با کاهش بازه تغییرات مواجه خواهد شد که عاملی بر افزایش ایمنی این سازه در برابر جریانات طوفان فرو وزشی می باشد.



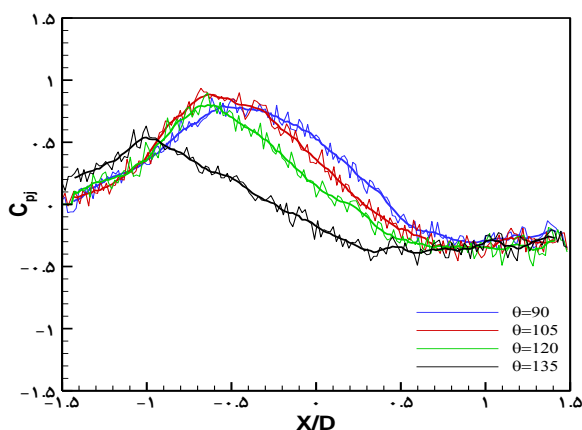
شکل ۲۰- تغییرات نیرو بر حسب زمان (ضربه) در $\alpha=0^\circ$ $dF_z/dt - \theta=120^\circ$ و 135°

۴-۶- بررسی اثرات زوایه قرارگیری مدل مکعب شکل استاندارد نسبت به جریان سطحی

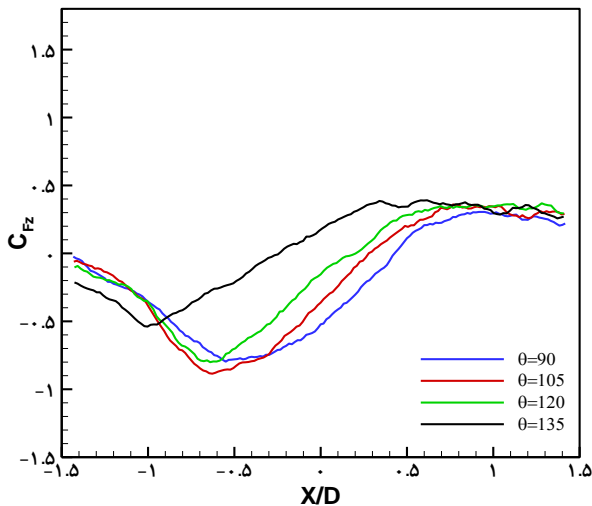
در ادامه اثرات زوایه قرارگیری مدل نسبت به جریان سطحی مورد بررسی قرار گرفت. این آزمایشات نیز در دو سرعت جابه جایی $V_R=0.06$ و $V_R=0.12$ و در θ های متفاوت صورت پذیرفته است. شکل (۲۱) این داده ها را نمایش می دهد. با توجه به داده های ارائه شده و مقایسه آن ها با $\alpha=0^\circ$ ، می توان دریافت که مدل در ضلع رو به جریان در زوایای θ مختلف، تحت فشار کمتری قرار می گیرد. در ضمن، تفاوت هایی در رفتار نمودارهای ضریب فشار در ابتدای مسیر مشاهده می شود که نشان از کمتر بودن فشار در شروع حرکت نسبت به ضلع رو به جریان در $\alpha=0^\circ$ دارد. در سقف مدل، نوع تغییرات فشار، همچون حالت $\alpha=0^\circ$ بوده با این تفاوت که بازه تغییر فشار کوچکتر می باشد. در ضلع پشت به جریان تا $X/D=+0.5$ می توان به شباهت دو نمودار مربوطه به این ضلع در $\alpha=0^\circ$ و $\alpha=45^\circ$ پی برد، ولیکن این اختلاف ها در $X/D \leq +0.5$ ، بیشتر نمایان می شود به طوری که در هر زاویه θ ، بعد از رسیدن نمودار ضریب فشار به مقدار حداکثر خود، ضریب فشار کاهش یافته است. با مقایسه داده های دو نسبت سرعت انتقالی 0.06 و 0.12 ، نتیجه حاصل شد که بین داده های این دو نسبت سرعت انتقالی، شباهت رفتاری گسترده ای وجود دارد، که نتایج مشابهی را ارائه می کنند. داده سقف $V_R=0.06$ به عنوان نمونه ارائه شده است.



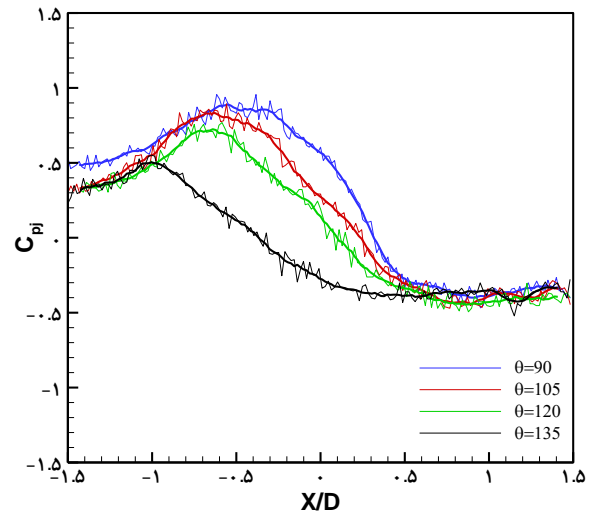
شکل ۲۱ الف- ضرایب فشار بر مدل مکعب شکل در θ های متفاوت در $\alpha=45^\circ$ و $V_R=0.12$ در ضلع رو به جریان



شکل ۲۱ ب- ضرایب فشار بر مدل مکعب شکل در θ های متفاوت در $\alpha=45^\circ$ و $V_R=0.12$ در ضلع سقف

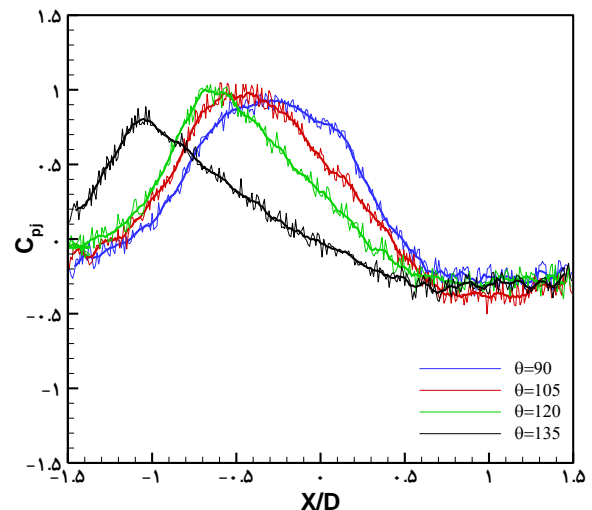


شکل ۲۲ ب- ضرایب نیرو در $\alpha=45^\circ$ و θ های متفاوت
 $C_{Fz} - V_R=0/12$

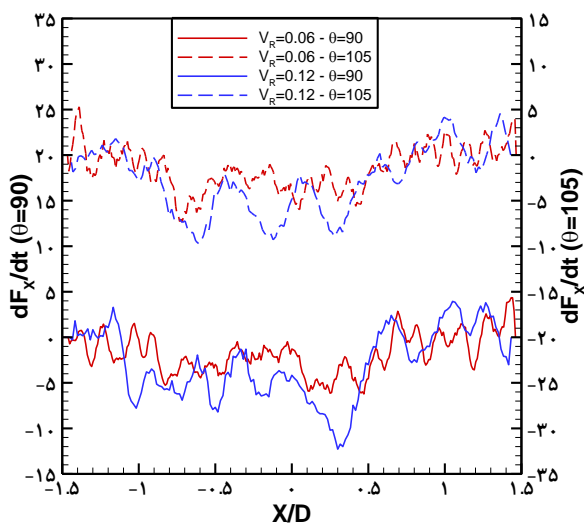


شکل ۲۱ ج- ضرایب فشار بر مدل مکعب شکل در θ های متفاوت در $V_R=0/12$ و $\alpha=45^\circ$ در ضلع پشت به جریان

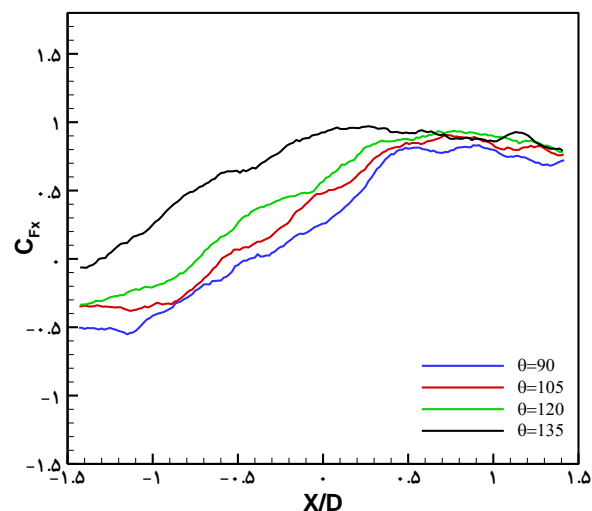
در شکل (۲۳)، با بررسی تغییرات نیرو بر حسب زمان در راستای $\alpha=45^\circ$ و راستای نیروی X می توان پی برد که قرارگرفتن سازه در این حالت، باعث می شود که نوسانات ضربه و قدرت ضربات، به مقدار بسیاری نسبت به حالت $\alpha=0^\circ$ کاهش یابد. این کاهش در شدت ضربات وارده بر سازه و تعداد آن، باعث می شود که سازه بار کمتر و یکنواخت تری را تحمل کند، که عاملی بر افزایش ایمنی سازه در برابر این جریان می باشد. در راستای Z این کاهش بار وارده بر سازه تکرار شده، که تأثیر راستای $\alpha=45^\circ$ را، حتی در این جهت نیز نشان می دهد. این کاهش شیب و نوسانات نیرو در حالی اتفاق می افتد که رفتار این داده ها در دو راستای 45° ، 0° ، به یکدیگر شبیه بوده است.



شکل ۲۱ د- ضرایب فشار بر مدل مکعب شکل در θ های متفاوت در $V_R=0/06$ و $\alpha=45^\circ$ در ضلع سقف

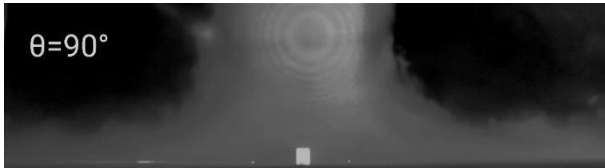


شکل ۲۳ الف- تغییرات نیرو بر حسب زمان (ضربه) در $\alpha=45^\circ$
 $dF_x/dt - \theta=90^\circ$ و 105°



شکل ۲۲ الف- ضرایب نیرو در $\alpha=45^\circ$ و θ های متفاوت
 $C_{Fx} - V_R=0/12$

شد. این تصویر به درک بهتر و مقایسه جریان طوفان فرو وزشی در سطوح شیب‌دار و غیر شیب‌دار کمک می‌کند. در این تصاویر مشخص است که مدل در $\theta=90^\circ$ ، به‌نوعی در مرکز ریزش جریان حبس شده است و باعث می‌شود در این نقطه، تمام اضلاع آن تحت فشار قرار گیرند. در عین حال در $\theta=135^\circ$ ، مشخص شده است که بیشترین فشار به ضلع رو به جریان وارد می‌شود، که این موضوع عامل ایجاد اختلاف فشار در ضلع رو به جریان با ضلع سقف و ضلع پشت به جریان است.



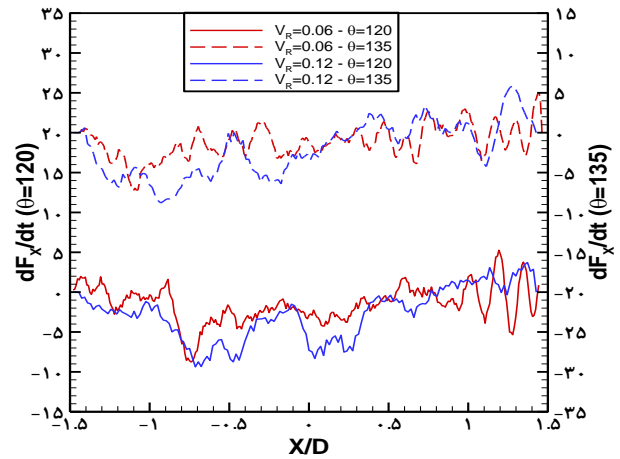
شکل ۲۴ الف- مشاهده جریان طوفان فرو وزشی در زاویه برخورد $\theta=90^\circ$



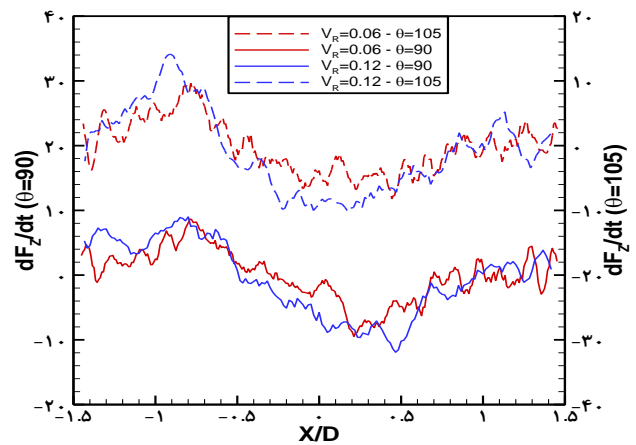
شکل ۲۴ ب- مشاهده جریان طوفان فرو وزشی در زاویه برخورد $\theta=135^\circ$

۵- نتیجه‌گیری

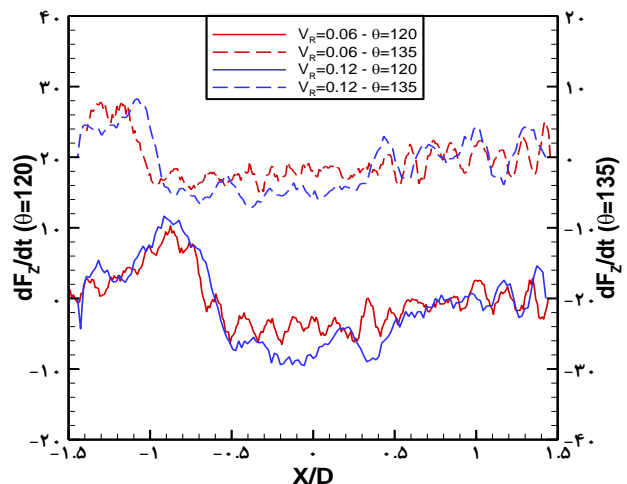
در این تحقیق، به بررسی آزمایشگاهی تأثیرات برخورد طوفان فرو وزشی در زوایا و راستاهای متفاوت و به‌صورت دینامیکی، بر روی مدل مکعب شکل پرداخته شد. همچنین با استفاده از یک سیستم انتقالی، اثرات دینامیکی این طوفان در محدوده شعاعی $X/D=\pm 1/5$ و در دو نسبت سرعت انتقالی $V_R=0/06$ و $V_R=0/12$ بررسی شده است. نتایج نشان داد که افت سرعت طوفان فرو وزشی در فاصله بین محل ریزش جریان تا سطح صفحه، در $Z/D \geq 1/2$ ، بسیار کم بوده؛ در حالی که در مقادیر $Z/D \leq 0/8$ ، سرعت به شکل خطی کاهش یافته و تا رسیدن به سطح صفحه، به صفر میل کرده است. این نتایج نشان داد که قوی‌ترین ضربات بلافاصله بعد از عبور طوفان از روی سازه اتفاق می‌افتد. علاوه بر این، افزایش نسبت سرعت انتقالی طوفان، باعث قوی‌تر شدن ضربات وارده بر سازه می‌شود. برخلاف جریان‌ات معمول لایه مرزی، با عبور طوفان‌های فرو وزشی از روی سازه، جهت نیروی اعمالی وارد بر سازه نیز برعکس می‌شود. در بررسی میدان فشار استاتیک این جریان می‌توان متوجه شد که افزایش نسبت سرعت انتقالی و زاویه برخورد



شکل ۲۳ ب- تغییرات نیرو بر حسب زمان (ضربه) در $\alpha=45^\circ$ $dF_x/dt - \theta=120^\circ$ و 135°



شکل ۲۳ ج- تغییرات نیرو بر حسب زمان (ضربه) در $\alpha=45^\circ$ $dF_z/dt - \theta=90^\circ$ و 105°



شکل ۲۳ د- تغییرات نیرو بر حسب زمان (ضربه) در $\alpha=45^\circ$ $dF_z/dt - \theta=120^\circ$ و 135°

در شکل (۲۴) به مشاهده جریان ایجاد شده توسط دمنده مذکور در $X/D=0$ و در دو زاویه $\theta=90^\circ$ و $\theta=135^\circ$ پرداخته

[2] Sadeghi, A. H., Hojaji, M., and Hosseini, J., "Experimental investigation of density of surface roughness elements based on boundary layer wind flow classification in wind tunnel", *21st International Conference on Iranian Aerospace*, (2023). (in Persian فارسی)

[3] Esmailzadeh, M., Hojaji, M., and Hosseini, J., "Experimental investigation of the effects of the base point distance from the surface roughness elements on the scaling of the boundary layer in the wind tunnel", *21st International Conference on Iranian Aerospace*, (2023). (in Persian فارسی)

[4] Raeisi, S., Hojaji, M., and Hosseini, J., "The effect of changing the distance of roughness elements from vortex generators in determining the scale of boundary layer wind simulation", *21st International Conference on Iranian Aerospace*, (2023). (in Persian فارسی)

[5] Romanic, D., Nicolini, E., Hangan, H., Burlando, M., and Solari, G., "A novel approach to scaling experimentally produced downburst-like impinging jet outflows", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, DOI: 10.1016/j.jweia.2019.104025, Vol. 196, (2020).

[6] Zhang, Y., Hu, H., and Sarkar, P. P., "Comparison of microburst-wind loads on low-rise structures of various geometric shapes", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 133, pp. 181-190, DOI: 10.1016/j.jweia.2014.06.012, (2014).

[7] Hjelmfelt, M. R., "Structure and life cycle of microburst outflows observed in Colorado", *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Vol. 27, No. 8, pp. 900-927, (1988).

[8] Letchford, C., Mans., and Chay, M., "Thunderstorms their importance in wind engineering (a case for the next generation wind tunnel)", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 90, No. 12, pp. 1415-1433, (2002).

[9] Fujita, T. T., "The Downburst: Microburst and Macrobust", *SMRP Report Paper 210*, The University of Chicago, Chicago, (1985).

[10] Chay, M., and Letchford, C., "Pressure distributions on a cube in a simulated thunderstorm downburst—Part A: stationary downburst observations", *Journal of wind engineering and industrial Aerodynamics*, Vol. 90, No. 7, pp. 711-732, (2002).

[11] Chen, B., Cheng, H., Kong, H., Chen, X., and Yang, Q., "Interference effects on wind loads of gable-roof buildings with different roof slopes", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 189, pp. 198-217, (2019).

جریان فروروشی با سطح (θ) ، قله نمودار ضریب فشار را از نقطه مرکزی فرود جریان $(X/D=0)$ به سمت پایین دست جریان (X/D) های منفی) متمایل کرده است. همچنین افزایش یافتن زاویه θ موجب کاهش بازه تغییرات ضریب فشار شده است.

در بررسی ضرایب نیرو در شرایطی که زاویه جریان سطحی نسبت به سازه (α) برابر صفر می‌باشد، مشاهده شد که با افزایش زاویه θ ، بازه تغییرات نیرو را کاهش یافته و نیرو وارد شده بر سازه با شیب کندتری تغییر می‌کند. به بیان دیگر نصب سازه‌ها در زمین‌های شیب‌دار و دامنه‌ها بر کاهش نیروها و ضربات وارده بر سازه‌ها تأثیرگذار بوده و ایمنی سازه را افزایش می‌دهد. همچنین افزایش زاویه α باعث کاهش بازه تغییرات فشار و نیرو (حدود 25%) بر روی سازه شده است. بعلاوه افزایش زاویه α باعث می‌شود که نوسانات ضربه و همچنین قدرت ضربات وارده بر سازه، در هر دو جهت مورد بررسی به صورت چشمگیری نسبت به حالت $\alpha=0^\circ$ ، کاهش یابد. نصب سازه‌ها در راستای $\alpha=45^\circ$ عامل بسیار مؤثریست تا نیروی وارده از سوی این جریان به سازه کاهش یابد.

۶- فهرست علائم و اختصارات

علائم انگلیسی

A	مساحت هر المان (m^2)
C_F	ضریب نیرو
C_P	ضریب فشار
P	فشار کل (Pa)
P_{atm}	فشار اتمسفر (Pa)
S_{ref}	ارتفاع مدل در واحد عمق آن (m)
Tu	شدت آشفتگی
\bar{U}	میانگین سرعت ثبت شده (m/s)
u_i	سرعت لحظه‌ای اندازه‌گیری شده (m/s)
\dot{u}_i	مولفه اغتشاشی سرعت (m/s)
V_{ref}	سرعت جریان (m/s)

علائم یونانی

ρ	چگالی سیال (kg/m^3)
α	راستای قرارگیری مدل نسبت به جریان
θ	زاویه قرارگیری مدل نسبت به جریان

۶- مراجع

[1] ASCE., Minimum design loads for buildings and other structures, *American Society of Civil Engineers*, pp. 7-98, (1998).

- [21] Loredou-Souza, A. M., Lima, E. G., Vallis, M. B., Rocha, M. M., Wittwer, A. R., and Oliveira, M. G. K., "Downburst related damages in Brazilian buildings: Are they avoidable? ", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 185, pp. 33-40, DOI: 10.1016/j.jweia.2018.11.022, (2018).
- [22] Hojaji, M., Asgari, N., Hosseini, J., Rezvani, A., and Sharifzadeh, B., "Experimental study of the effect of impact angle of microburst on a cubic structure – Part A: Stationary microburst observation", *Journal of Mechanical Engineering Amirkabir*, DOI: 10.22060/mej.2022.20500.7250, (2022). (in Persian فارسی)
- [23] Chay, M. T., and Letchford, C. W., "Pressure distributions on a cube in a simulated thunderstorm downburst—Part A: stationary downburst observations", *Journal of wind engineering and industrial Aerodynamics*, Vol. 90, No. 7, pp. 711-732, (2002).
- [24] Wilcox, D. C., "Turbulence modeling for CFD", *DCW industries La Canada, CA*, Vol. 2, pp. 103-217, (1998).
- [25] Yadegari, M., and Bak Khoshnevis, A., "Numerical and Experimental Study of Characteristics of the Wake Produced Behind an Elliptic Cylinder with Trip Wires", *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, DOI: 10.1007/s40997-020-00373-6, (2021).
- [26] Yadegari, M., Bak Khoshnevis, A., and Boloki, M., "An Experimental Investigation of the Effects of Helical Strakes on the Characteristics of the Wake around the Circular Cylinder", *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, DOI: 10.1007/s40997-022-00494-0, (2022).
- [27] Yadegari, M., and Bak Khoshnevis, A., "Investigation of entropy generation, efficiency, static and ideal pressure recovery coefficient in curved annular diffusers", *The European Physical Journal Plus*, Vol. 136, pp. 1-19, DOI: 10.1140/epjp/s13360-021-01071-1, (2021).
- [12] Fujita, T. T., "Andrews AFB Microburst", *SMRP Report Paper 205*, The University of Chicago, Chicago, (1983).
- [13] Iida, Y., and Uematsu, Y., "Numerical study of wind loads on buildings induced by downbursts", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 191, pp. 103-116, D: 10.1016/j.jweia.2019.05.018, (2019).
- [14] Romanic, D., and Hangan, H., "Experimental investigation of the interaction between near-surface atmospheric boundary layer winds and downburst outflows", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 205, (2020).
- [15] Aboutabikh, M., Ghazal, T., Chen, J., Elgamal, S., and Aboshosha, H., "Designing a blade-system to generate downburst outflows at boundary layer wind tunnel," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 186, pp. 169-191, (2019).
- [16] Asano, K., Iida, Y., and Uematsu, Y., "Laboratory study of wind loads on a low-rise building in a downburst using a moving pulsed jet simulator and their comparison with other types of simulators", *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, Vol. 184, pp. 313-320, (2019).
- [17] Wu, Z., Iida, Y., and Uematsu, Y., "The flow fields generated by stationary and travelling downbursts and resultant wind load effects on transmission line structural system," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 210, (2021).
- [18] Nicholls, M., Pielke, R., and Meroney, R., "Large eddy simulation of microburst winds flowing around a building", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 46-47, pp. 229-237, DOI: 10.1016/0167-6105(93)90288-Y, (1993).
- [19] Letchford, C., and Chay, M. T., "Pressure distributions on a cube in a simulated thunderstorm downburst. Part B: Moving downburst observations", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 90, pp. 733-753, 07/01 DOI: 10.1016/S0167-6105(02)00163-0, (2002).
- [20] Lombardo, F. T., Mason, M. S., and A de Alba, A. Z., "Investigation of a downburst loading event on a full-scale low-rise building", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 182, pp. 272-285, DOI: 10.1016/j.jweia.2018.09.020, (2018).