



## بررسی آزمایشگاهی اثر زاویه برخورد طوفان فرو وزشی کوچک بر سازه‌ی مکعب شکل - قسمت اول: مشاهدات طوفان فرو وزشی کوچک ایستگاهی

محمد حججی نجف‌آبادی<sup>۱\*</sup>، نیما عسگری<sup>۲\*</sup>، سید جلیل حسینی<sup>۳</sup>، امیر حسین رضوانی<sup>۴</sup>، بهشاد شریف‌زاده<sup>۳</sup>

۱- دانشکده فنی مهندسی، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

۲- مرکز تحقیقات هوافضا و تبدیل انرژی، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

۳- دانشکده عمران، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۱۷

بازنگری: ۱۴۰۰/۰۸/۱۰

پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۰۴

ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۱۰/۲۹

### کلمات کلیدی:

طوفان فرو وزشی

مدل مکعب شکل

ضرایب فشار و نیرو

زاویه‌ی برخورد

شبیه‌سازی تجربی

**خلاصه:** طوفان فرو وزشی قادر به ایجاد جریان‌ات ریزشی و اگر بر روی سطح زمین است که این رفتار، متفاوت از رفتار جریان‌ات لایه مرزی اتمسفر است. در این پژوهش تأثیرات طوفان فرو وزشی بر مدلی مکعب شکل از سازه‌ها در دو راستای متفاوت برخورد با جریان ( $\alpha$ ) در چهار زاویه‌ی قرارگیری مختلف صفحه آزمایش نسبت به راستای ریزش جریان ( $\theta$ ) در فواصل شعاعی مختلف نسبت به مرکز جریان، بررسی شده‌است. شبیه‌سازی این جریان توسط دمنده‌ای که وظیفه‌ی یکنواخت‌سازی جریان ایجاد شده توسط فن تعبیه شده در پشت آن را دارد ایجاد شده‌است. سرعت و شدت آشفتگی جریان در فواصل شعاعی مختلف اندازه‌گیری شده‌است. همچنین، توزیع ضریب فشار بر اضلاع این مدل در مکان‌های و حالات اشاره شده اندازه‌گیری شده‌است. علاوه بر این در مقایسه‌ای که بین داده‌های این مطالعه با مطالعات قبلی انجام گرفت، مطابقت مناسبی بین این داده‌ها مشاهده شده‌است. مشاهده شد که در مرکز ریزش جریان، در تمام زوایای  $\theta$ ، سازه دارای ضریب فشار مثبت در اضلاع خود می‌شود. با فاصله گرفتن از مرکز، رفتار این جریان شبیه به جریان‌ات لایه مرزی خواهد شد. با افزایش  $\theta$ ، مشخص شد که اختلاف ضریب فشار بین ضلع رو به جریان با سقف و ضلع پشت به جریان بیشتر شده که در بدترین حالت حدود ۸۰٪ تغییر کرده است. با بررسی راستای برخورد جریان به مدل، مشخص شد ضرایب نیرو در زمانی که مدل در  $\alpha = 45^\circ$  قرار بگیرد، حدوداً ۳۵٪ کمتر از زمانیست که مدل در  $\alpha = 0^\circ$  قرار بگیرد. در نهایت نیز مشخص شد که بیشترین مقدار ضریب نیرو در  $X/D = 1$  بر سازه وارد می‌شود.

### ۱- مقدمه

وجود دارند. این سازه‌های کوتاه نسبت به سازه‌های مهندسی شده به‌طور معمول بیشتر تحت تاثیر بادهای شدید سطحی قرار می‌گیرند. لذا طوفان فرو وزشی به جهت جریان‌ات شدید سطحی و رفتار منحصر به فرد خود می‌تواند آثار متفاوت و پیش‌بینی نشده‌ای بر این سازه‌ها داشته باشد [۴] و بررسی آثار این طوفان بر سازه در زوایا و حالات مختلف می‌تواند کمک شایانی به شناخت این جریان کند. که این مورد جز اهداف این پژوهش بوده است. طوفان فرو وزشی<sup>۱</sup> یک جریان شدید نزولی هوا از ابر کومولونیمبوس می‌باشد که معمولاً با باران شدید یا رعد و برق همراه است.

طوفان‌ها عامل ایجاد تخریب‌های بزرگی به سازه‌های مختلف در سرتاسر جهان هستند. ولی در حال حاضر بیشتر، بادهای لایه مرزی جوی مبنای محاسبات بارهای وارده از طرف بادها بر روی سازه‌ها محسوب می‌شوند [۱]. علاوه بر این از گذشته، سازه‌های مرتفع بیشتر از سازه‌های کوتاه و سبک مورد توجه محققینی که بر روی آثار بار باد بر سازه پژوهش می‌کنند، قرار گرفته‌اند. دلیل این امر نیز به نوع پروفیل جریان بادهای لایه مرزی جوی برمی‌گردد که آثار آن بر سازه‌های بلند بیشتر است. با گذشت زمان و ظهور طوفان‌های ریزشی ناشناخته، خلأ بررسی این جریان‌ات سطحی بیشتر به چشم آمد. حتی وجود سازه‌های بلند و متراکم در کلان شهرها و سایه‌های آن‌ها باعث ایجاد نگرانی درمورد بادهایی در سطح زمین و پیاده‌روها شده است [۲ و ۳]. ساختمان‌های کم ارتفاع و سبک همچون ویلاها، سوله‌ها و غیره در مناطق روستایی و غیرشهری در سرتاسر جهان به‌صورت معمول

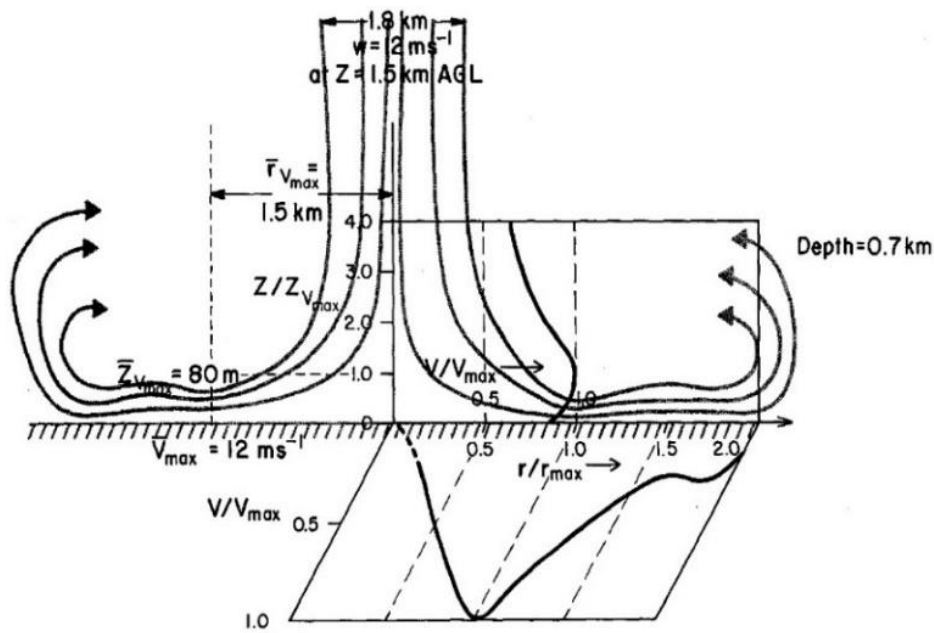
### ۲- مشخصات طوفان فرو وزشی و مطالعات قبلی در این زمینه

لچفورد<sup>۲</sup> و همکاران [۵] در پژوهش خود به بحث در خصوص مشخصه‌های کلی طوفان‌ها پرداخته‌اند. اساساً، پدیده همرفت در اتمسفر باعث ایجاد یک جریان عمودی به سمت بالا شده و این جریان رطوبت

1 Downburst

2 Letchford

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: hojaji\_m@pmc.iaun.ac.ir



شکل ۱. پروفیل سرعت طوفان فرو وزشی متعارف در طی تحقیق جاووز [۶]

Fig. 1. Velocity profile of a typical microburst during JAWS[6]

از ۴ کیلومتر مربع باشد به آن طوفان فرو وزشی بزرگ<sup>۲</sup> و اگر کمتر از ۴ کیلومتر مربع باشد به آن طوفان فرو وزشی کوچک<sup>۳</sup> گویند. معمولاً سرعت نزول باد در آن‌ها بین ۶ تا ۲۲ متر بر ثانیه است [۸]. همچنین حداکثر سرعت در نزدیکی سطح زمین رخ می‌دهد [۴]. این نوع طوفان به صورت ریزش جریان عمودی و با سرعتی معین به سمت سطح زمین حرکت می‌کند و پس از آن جریان هوا بر روی سطح زمین حرکتی موجی شکل با سرعتی بیش از سرعت اولیه را ایجاد می‌کند که می‌تواند باعث ایجاد نیروی بالابرنده و یا پسای شدید بر سازه‌ها شود [۹]. مشاهدات انجام شده در مقیاس کامل در طی آزمایش‌های نیمروود<sup>۴</sup> توسط فوجیتا [۱۰] و آزمایش‌های جاووز<sup>۵</sup> توسط هلمفلت<sup>۶</sup> باعث رسیدن به نتایج کمی مشابهی برای فرو وزش‌های کوچک شده است. به‌طور متوسط، برای این فرو وزش سرعت باد بیشینه در ارتفاع تقریباً ۸۰ متر و در فاصله تقریباً ۱/۵ کیلومتری از نقطه برخورد رخ می‌دهد. قابل توجه است که این نتایج برای قطر فرو وزش متوسط برابر با ۱/۸ کیلومتر به‌دست آمده‌اند. در نتیجه، قویترین جریانات در محدوده‌ای

گرم را که شناوری بیشتری دارد، به ارتفاع‌های بالاتر منتقل می‌کند. به همین دلیل، رطوبت در این هوا متراکم و سپس خنک شده و در نتیجه آن حرکت به سمت بالا متوقف می‌گردد. در این حالت هوای خنک با چگالی بالا به شکل یک سقوط جریان به سمت پایین حرکت می‌کند. پس بطور کلی می‌توان گفت که فرو وزش‌ها زمانی رخ می‌دهند که یک جریان قوی در حال سقوط آزاد با سطح زمین برخورد کرده و دچار واگرایی شود. خلاصه آماری از مطالعات هواشناسی نشان می‌دهد که قدرت یک طوفان فرو وزشی کوچک در وضعیت تولید حداکثر جریان، شباهت‌های زیادی با جت آزمایشگاهی دارد [۶]. لچفورد و همکاران [۵] نشان دادند با گسترش یافتن جریان بر روی سطح زمین، رفتار آن به شکل یک جریان گرانشی خواهد بود. میدان جریان ایجاد شده توسط چنین رویدادی، به‌ویژه در نزدیکی نقطه برخورد، از چندین جنبه کلی متفاوت با میدان باد لایه مرزی جوی است. مورد اول اینکه با فاصله گرفتن از سطح زمین، سرعت جریان افزایش یافته و در نزدیکی سطح و ارتفاعات پایین به حداکثر سرعت خود می‌رسد. در حالی که در ارتفاعات بالاتر از این بیشینه سرعت، سرعت کاهش می‌یابد. این مورد خلاف پروفایل لایه مرزی متعارف است که با افزایش ارتفاع، سرعت نیز افزایش می‌یابد. فوجیتا<sup>۱</sup> [۷] مشخص کرد که اگر سطح تحت تاثیر طوفان فرو وزشی بیش

- 2 Macroburst
- 3 Microburst
- 4 NIMROD
- 5 JAWS
- 6 Hjelmfelt

1 Fujita

انجام دادند. ابدلال و همکاران [۱۷] نیز به شبیه‌سازی عددی جریان طوفان فرو وزشی بر روی یک توپوگرافی واقعی پرداختند. نمونه‌ای از بررسی آثار طوفان فرو وزشی بر سازه‌ها و مطالعه بر روی مناطق تحت تأثیر این طوفان را می‌توان در تحقیق لوریدو سوزا و همکاران [۱۸] مشاهده کرد.

تا به امروز چندین تحقیق جهت ارزیابی تأثیر طوفان فرو وزشی بر روی مدل‌هایی مکعب شکل به‌عنوان شکلی عمومی از سازه‌ها صورت گرفته است. این تحقیقات در راستای بررسی و شناخت طوفان‌ها و جریان‌ات ریزشی بصورت تحقیقات تجربی و بعضاً عددی صورت پذیرفت. ولیکن این تحقیقات کماکان دچار خلأهایی از لحاظ بررسی زوایای سازه‌ها در زمین‌های شیب‌دار در لحظه‌ی برخورد طوفان به سازه می‌باشد؛ لذا هدف این پژوهش ارائه یک شبیه‌ساز کارآمد از طوفان فرو وزشی و بررسی اثرات آن بر توزیع فشار و همچنین نیروهای وارده بر یک ساختمان استاندارد مکعبی شکل می‌باشد. همچنین اثرات زاویه قرارگیری سازه نسبت به جریان و شیب زمین که در تحقیقات قبلی انجام نشده، از دیگر اهداف مهم مورد بررسی در این تحقیق خواهد بود. مقایسه‌هایی نیز با توزیع‌های فشار بدست آمده از سایر شبیه‌سازی‌های طوفان فرو وزشی، جهت بررسی صحت نتایج این تحقیق انجام شده است. با کاوش در ویژگی‌های انحصاری و مشخصات بارهای وارده بر طوفان فرو وزشی، نویسندگان بر این باورند که نتایج این تحقیق بتواند باعث افزایش شناخت جریان‌ات این طوفان خاص در حالات مذکور بر سازه‌های کوتاه گردد.

### ۳- مدل، تجهیزات و شرایط آزمایشگاهی

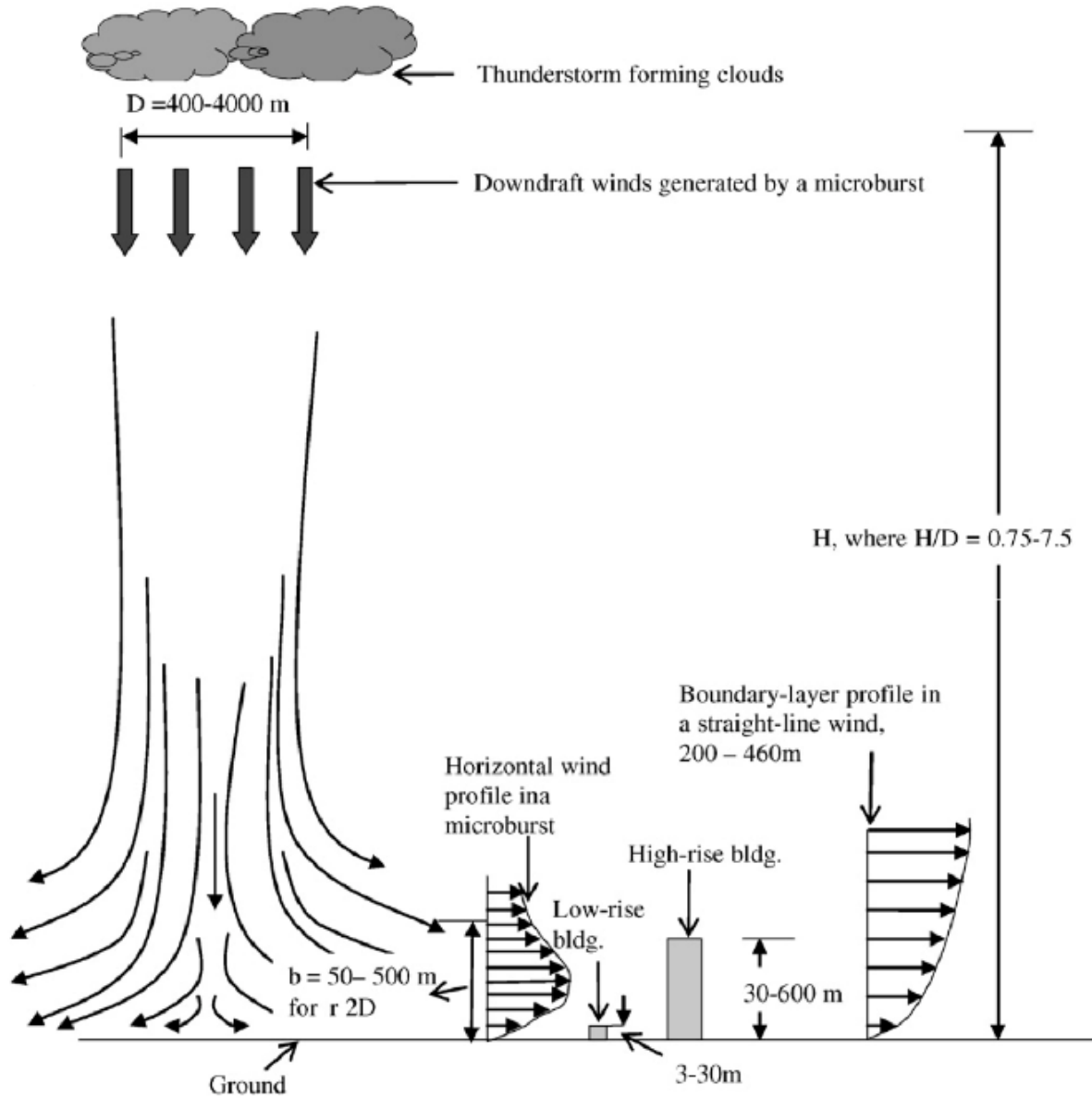
#### ۳-۱- شبیه‌ساز طوفان فرو وزشی

به‌منظور انجام این تحقیق از یک دمنده با خروجی یکنواخت ثابت استفاده شده است. جریان سیال متلاطم از یک سمت از طریق فن تعبیه شده وارد و از سمت دیگر با سرعت ثابت و با میزان آشفتگی کمتر از ۰/۵٪ خارج می‌شود. این فن با قطر ۸۰ سانتی‌متر با سرعت ۱۵۰۰ دور در دقیقه که توسط یک تغییر دهنده ساینز (آداپتور) به انتهای دمنده متصل گردیده است، وظیفه‌ی ایجاد جریان‌ات مورد نظر را برعهده دارد. جریان تولید شده توسط فن دمنده ثابت مورد استفاده، با بهره‌گیری از ساختار لانه زنبوری و توری‌هایی که در محفظه‌ی آن قرار داده شده است، جریان یکنواخت خروجی را فراهم می‌کند. برای دستیابی به فیزیک جریان طوفان فرو وزشی از یک نازل کاهنده با شعاع ۰/۲ متر که به‌وسیله‌ی پرینت سه بعدی ساخته شده است در دهانه خروجی دمنده استفاده گردیده است. همچنین فن موجود، دارای قابلیت تنظیم سرعت جریان به‌وسیله‌ی یک اینورتری که بر روی آن

به فاصله‌ی یک قطر جریان از محل برخورد جریان به‌وجود می‌آیند. سامانه اندازه‌گیری اصلی داده‌های مربوط به سرعت بادها شامل سه رادار داپلر<sup>۱</sup> [۶] و یک شبکه اندازه‌گیری مقیاس متوسط با ارتفاع کم و خودکار با فاصله میانگین ۴ کیلومتر است. در مورد روش‌های تحلیل آزمایشات مقیاس کامل و تخمین خطاها می‌توان به پژوهش ویلسون<sup>۲</sup> و همکاران [۱۱] مراجعه کرد. یومی ایدا و یوماتسو [۱۲] به بررسی عددی طوفان فرو وزشی بر روی سازه‌ها پرداختند که در تحقیق آن‌ها از شبیه‌سازی عددی استفاده شد و نتیجه بر این شد که شبیه‌سازی عددی با نتایج شبیه‌سازی آزمایشگاهی همخوانی داشته و یکدیگر را تأیید می‌کنند.

مورد دوم اینکه، فرو وزش‌ها معمولاً مقدار بالایی از تکانه‌ی<sup>۳</sup> طوفان مادر خود را حفظ می‌کنند. سرعت‌های طوفان مادر به یک سوم سرعت فرو وزش نیز می‌رسد [۵]. در سومین مورد نیز می‌توان گفت روش‌های کنونی ارزیابی بارگذاری‌های باد بر روی سازه‌ها فشار جوی را ثابت فرض می‌کنند. با این‌حال، تغییرات قابل توجه فشار جوی، در داخل میدان جریان یک فرو وزش مشاهده می‌شود [۱۳]. میدان فشار متغیر یک فرو وزش می‌تواند پیامدهای قابل توجهی را از نظر بارگذاری‌های طراحی بر روی سازه‌ها در پی داشته باشد. فوجیتا [۱۴] 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 بدون امکان عبور هوا در ناحیه جریان خروجی شوند. در شکل ۲ نمای شماتیک کلی مشخصات فیزیکی یک طوفان فرو وزشی کوچک که در این تحقیق مورد مطالعه قرار گرفته است و مقایسه آن با بادهای لایه مرزی، نشان داده شده است [۱۳]. از دیگر تحقیقات مهمی که در راستای شناخت جریان‌ات طوفان فرو وزشی انجام شده است می‌توان به مطالعه‌ی نیکولز<sup>۴</sup> و همکاران [۱۴] اشاره کرد که به بررسی ساختار جریان در اطراف یک مدل مکعب شکل تحت بار طوفان شبه فرو وزشی پرداختند. همچنین چای و لچفورد نیز با مطالعه و ساخت یک شبیه‌ساز آزمایشگاهی طوفان فرو وزشی به‌وسیله دمنده‌ی آزمایشگاهی، به بررسی فشارهای ایجاد شده بر روی مدلی مکعب شکل پرداختند [۸]. شوینی ژو و همکاران [۱۵] نیز با شبیه‌سازی عددی، به بررسی اثر زاویه‌ی شیب سقف سازه‌ها در توزیع برف بر روی آن‌ها پرداختند. همچنین لامباردو و همکاران [۱۶] در تحقیق خود، مطالعه‌ای بر روی بار وارده بر یک سازه‌ی کم ارتفاع در مقیاس کامل

- 1 Doppler
- 2 Wilson
- 3 Momentum
- 4 Nicholis



شکل ۲. میدان فشار طوفان فرو وزشی [۱۹]

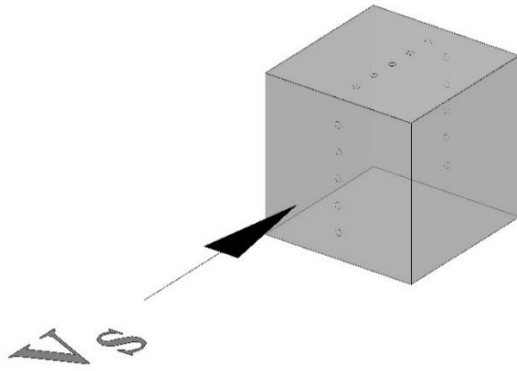
Fig. 2. Downburst pressure field [19]

از مدل‌سازی‌های تجربی انجام شده در سایر تحقیقات [۴] می‌باشد. برای انجام آزمایشات مورد بحث از یک صفحه‌ی آزمایش با قابلیت حرکت طولی به طول ۱/۵ متر و عرض ۱ متر استفاده شد. فاصله‌ی صفحه تا مرکز خروجی دمنده برابر ۰/۴ متر ( $2D$ ) دو برابر قطر دهانه خروجی دمنده در نظر گرفته شده و امکان جابجایی در محدوده  $2 \pm D$  را دارد. نمای شماتیک این سیستم در شکل ۳ نشان داده شده است. برای این تحقیق یک مدل مکعب شکل با ابعاد  $15 \times 15$  میلی‌متر با جنس ورق پلکسی به ضخامت ۲ میلی‌متر به‌عنوان یک نمونه‌ی عمومی از سازه‌ها ساخته شد. تعداد ۱۵ عدد سوراخ فشاری با

نصب شده را دارد.

### ۳-۲- مدل و صفحه‌ی آزمایش

در این بخش با استناد به پژوهش فوجیتا [۷] که در آن مشخص گردید سطح تحت تأثیر طوفان فرو وزشی می‌بایست حداقل ۴۰۰ متر را در بر بگیرد، بنابراین باتوجه به قطر دهانه‌ی خروجی دمنده مورد استفاده که برابر ۰/۲ متر می‌باشد و قطر سطح تحت تأثیر طوفان (۴۰۰ متر)، مقیاس این مجموعه آزمایشات نیز برابر با ۱:۲۰۰۰ در نظر گرفته شده است. این مقیاس برگرفته



شکل ۴. مدل مکعب شکل

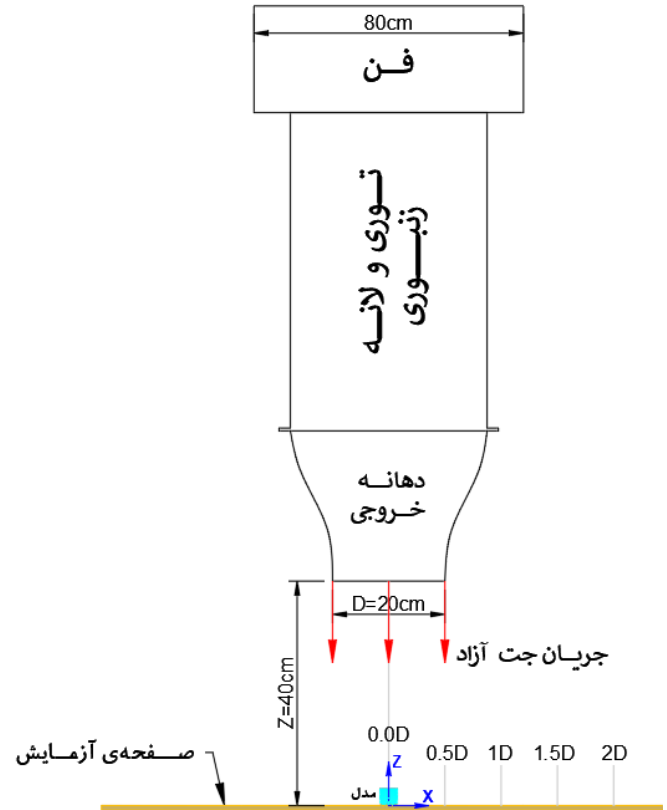
Fig. 4. Cube model

و دقت اندازه‌گیری آن نیز ۰/۱۵٪ در مقیاس کل است. داده‌های آنالوگ خروجی از سنسورها توسط پردازنده ۱۶ بیتی نصب شده در جعبه سنسورهای فشار به داده‌های دیجیتال تبدیل و نهایتاً به یک رایانه برای ثبت اطلاعات و جمع‌آوری منتقل می‌شود. نرخ نمونه‌برداری در این آزمایشات ۴۰۰ هرتز می‌باشد و مدت زمان داده‌برداری نیز ۵ ثانیه در هر آزمایش نظر گرفته شده است. جهت اندازه‌گیری پروفیل‌های سرعت در دهانه خروجی دمنده از مجموعه‌ای از لوله‌های پیتوت که به صورت موازی به شکل یک چنگک کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند، استفاده شده است که با نام ریک<sup>۲</sup> شناخته می‌شود (شکل ۷). این لوله‌های پیتوت به جعبه فشار متصل گردیده و داده‌های آنها استخراج شده است. همچنین برای بدست آوردن سرعت جریان‌ات سطحی در طوفان فرو وزشی از یک سنسور سیم داغ<sup>۳</sup> نیز استفاده شده است که داده‌های آن توسط کارت داده بردای جمع‌آوری می‌گردد.

#### ۳-۴- شرایط انجام آزمایش

در این آزمایش سرعت جریان خروجی از دهانه دمنده در محدوده ۱۰ تا ۱۴ متر بر ثانیه تنظیم شده است. به منظور بررسی اثرات طوفان فرو وزشی، مدل مکعب شکل مذکور بر روی یک صفحه آزمایش در مقابل جریان هوای خروجی از دمنده قرار گرفته است. همچنین صفحه‌ی برخورد در چهار زاویه مختلف ( $۹۰^{\circ} - ۱۰۵^{\circ} - ۱۲۰^{\circ} - ۱۳۵^{\circ}$ ) که به اختصار  $\theta$  نام‌گذاری شده قرار گرفته است. علاوه بر این دو راستای صفر و ۴۵ درجه نسبت به جریان

2 Rake  
3 Hotwire



شکل ۳. شماتیک نمای بالای سیستم آزمایشگاهی

Fig. 3. Laboratory system's schematic top view

قطر ۰/۵ میلی‌متر در راستای خط مرکزی مدل برای اندازه‌گیری فشار روی مدل نصب شده است. شکل ۴ مدل مورد بحث را نشان می‌دهد که در این شکل،  $V_S$  جریان بر روی سطح است. در شکل ۵ نمای کناری از چیدمان تجهیزات مشخص است.

#### ۳-۳- تجهیزات اندازه‌گیری

سنسورهای فشار استفاده شده در این تحقیق (شکل ۶) اختلاف فشار وارد شده را نسبت به فشار اتمسفر اندازه‌گیری می‌کنند. این سنسورها قادر به اندازه‌گیری فشارهای منفی نیز هستند. یعنی فشارهایی کمتر از فشار اتمسفر را به خوبی نشان می‌دهند. قبل از انجام آزمایشات، تمام سنسورهای مورد استفاده، در شرایط استاندارد کالیبره شده‌اند. مدل سنسورهای مورد استفاده از نوع سنسور تکنیک<sup>۱</sup> بوده و ظرفیت این سنسورها برابر با  $\pm 1000$  پاسکال

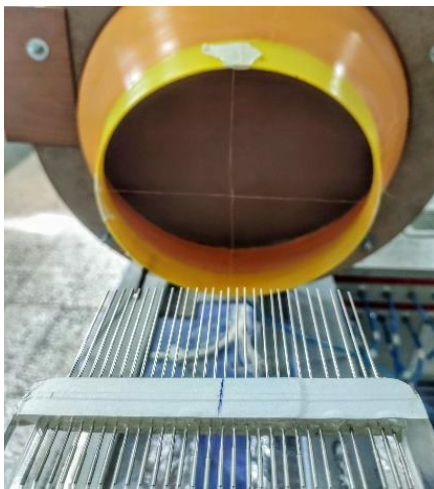
1 Sensortechnik/HCXPM010D6H





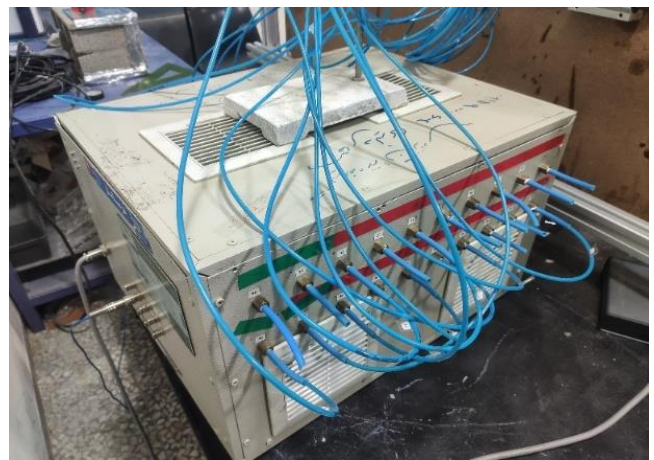
شکل ۵. نمای کناری از چیدمان دمنده، صفحه‌ی آزمایش و مدل

Fig. 5. Side view of blower arrangement, test plate and model



شکل ۷. ریک

Fig. 7. Rake



شکل ۶. جعبه قرارگیری سنسورهای فشار

Fig. 6. Pressure box

#### ۴- نتایج و بحث

در این بخش به ارائه‌ی نتایج آزمایشات انجام شده و بررسی آن‌ها پرداخته شده است. این آزمایشات در مرحله‌ی اول شامل بررسی سرعت و شدت آشفتگی در دهانه خروجی دمنده و در نزدیکی سطح صفحه‌ی آزمایش

سطحی قرار داده شد. این زاویه با  $\alpha$  مشخص شده است. مدل مذکور در پنج مکان مختلف نسبت به مرکز جریان خروجی از دمنده (۲، ۱/۵، ۱، ۰/۵،  $X/D=0$ ) قرار داده شده و مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. در جدول ۱ حالات مختلف داده‌برداری در این تحقیق، ارائه شده است.

جدول ۱. حالات مختلف داده برداری

Table 1. Different test cases of data collection

مکان قرارگیری مدل (X/D)	زاویه‌ی قرارگیری تخته ( $\theta$ )	راستای قرارگیری مدل ( $\alpha$ )
X/D=۰/۰	$\theta=90^\circ$	$\alpha=0^\circ$
X/D=۰/۵	$\theta=105^\circ$	
X/D=۱	$\theta=120^\circ$	
X/D=۱/۵	$\theta=135^\circ$	
X/D=۲		

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

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

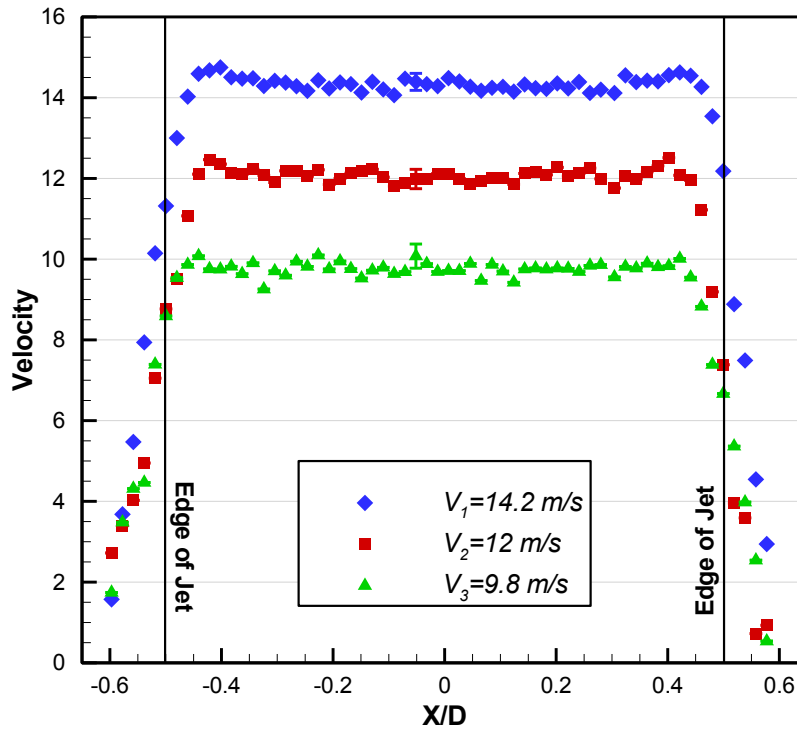
که در آن  $\bar{U}$  میانگین سرعت ثبت شده و  $\bar{u}i'$  مولفه‌ی اغتشاشی سرعت  $u_i$  سرعت لحظه‌ای اندازه‌گیری شده و  $n$  تعداد نمونه اندازه‌گیری شده می‌باشد.

در شکل ۹ پروفیل سرعت خروجی در سه فاصله‌ی متفاوت از دهانه خروجی دمنده ( $Z/D$ ) نشان داده شده است. این فاصله نسبت به پارامتر  $D$  (قطر دهانه خروجی) بی‌بعد شده است. این تغییرات نشان‌دهنده‌ی ارتباط بین پروفیل تغییرات سرعت جریان خروجی از دمنده، در فواصل مختلف از دهانه خروجی می‌باشد. می‌توان به این نکته پی برد که این طوفان با افزایش فاصله از مبدأ ریزش خود به میزان کمی دچار پراکندگی شده و هسته اصلی آن دچار افت نشده است. لذا با توجه به فاصله دو برابری دمنده

بوده است. در ادامه نیز داده‌های ضرایب فشار و ضرایب نیروی اعمالی از سوی طوفان فرو وزشی به مدل ارائه شده است.

۴-۱- بررسی پروفیل سرعت خروجی از سیستم شبیه‌ساز طوفان فرو وزشی به منظور بررسی اثرات سرعت طوفان فرو وزشی، دمنده در سه سرعت مختلف تنظیم و پروفیل سرعت به موازات دهانه خروجی آن اندازه‌گیری شد. شکل ۸ پروفیل سرعت دهانه خروجی دمنده را در فاصله‌ی  $D/5$  از دهانه ( $Z/D = 1/5$ ) و در سه سرعت متفاوت نشان می‌دهد ( $V_3 < V_2 < V_1$ ). همچنین عدم قطعیت مربوط به نتایج این آزمایش نیز در این داده‌ها نشان داده شده است. این محل به این دلیل انتخاب شد تا فاصله کافی از توری و لانه زنبوری در خروجی دمنده داشته و صفحه‌ی مقابل جریان نیز بر آن تأثیری نداشته باشد. مقایسه این شکل‌ها نشان می‌دهد که پروفیل سرعت خروجی از دمنده از یکنواختی مناسبی برخوردار می‌باشد. همچنین در این سه سرعت مقدار شدت آشفتگی در مرکز دمنده و در فاصله‌ی  $D/5$  از دهانه خروجی دمنده، اندازه‌گیری شد که مقادیر آن در جدول ۲ گزارش شده است. در رابطه‌ی (۱) نحوه‌ی محاسبه‌ی شدت آشفتگی<sup>۱</sup> بیان شده است [۲۰].

1 Turbulence Intensity



شکل ۸. پروفیل سرعت خروجی در فاصله‌ی  $0.5D$  از دهانه خروجی در ۳ سرعت متفاوت

Fig. 8. Output velocity profile at a distance of  $0.5D$  from the blower outlet at 3 different blower outflow speeds

جدول ۲. شدت آشفتگی در فاصله‌ی  $0.5D$  از دهانه خروجی

Table 2. Turbulence intensity at a distance of  $0.5D$  from the blower outlet

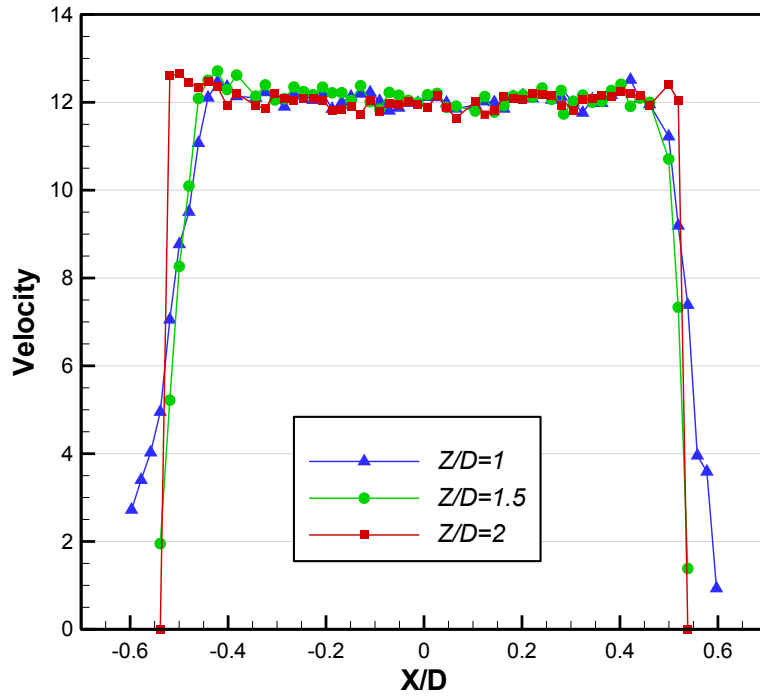
سرعت (m/s)	۱۴/۲	۱۲	۹/۸
شدت آشفتگی (%)	۰/۴۵	۰/۴۶	۰/۴۷

۴-۲- مشخصه‌های جریان ناشی از شبیه‌سازی طوفان فرو وزشی بر روی سطح

در نمودارهای ارائه شده از پروفیل سرعت و میزان آشفتگی طوفان فرو وزشی، پروفایل‌های سرعت متوسط بر روی سطح صفحه آزمایش به شکل تابعی از موقعیت دمنده نشان داده شده‌اند. داده‌ها در این نمودارها در  $\theta = 90^\circ$  اندازه‌گیری شده‌اند. همچنین، سرعت‌ها با استفاده از سرعت خروجی دهانه دمنده در موقعیت مرجع، بی‌بعد سازی شده و ارتفاع‌ها نیز با استفاده از قطر دهانه دمنده بی‌بعد سازی شده‌اند. این سرعت‌ها با استفاده از سنسور سیم داغ به‌دست آمده و نشان‌دهنده بزرگی سرعت هستند. سنسور سیم داغ از برند آیروتک<sup>۱</sup> سه کاناله و با سیمی از جنس تنگستن بوده است.

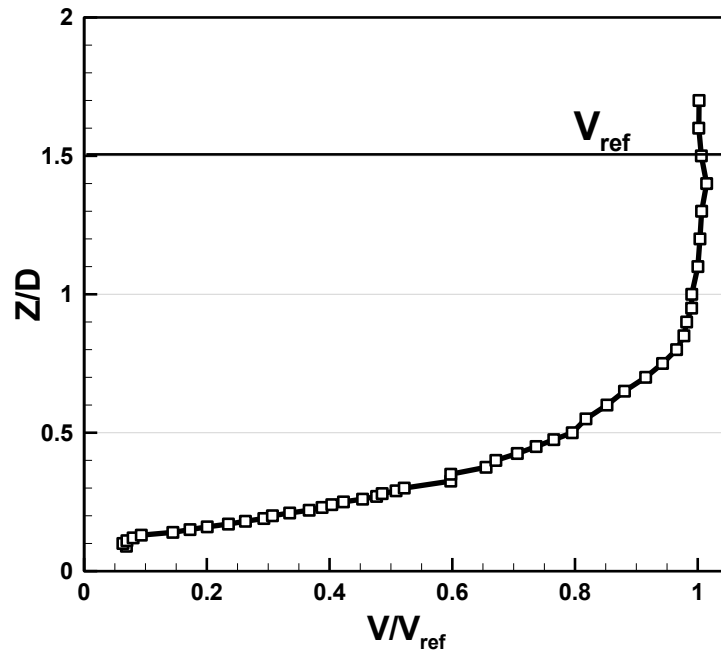
تا سطح می‌توان انتظار داشت که هسته اصلی طوفان شبیه سازی شده با کمترین میزان افت انرژی به صفحه‌ی آزمایش برخورد خواهد کرد. البته سرعت جریان با نزدیک شدن به صفحه‌ی آزمایش بتدریج کاهش می‌یابد. این موضوع از طریق اندازه‌گیری سرعت جریان در امتداد خط مرکزی جریان دمنده که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، قابل مشاهده می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهد که افت سرعت تقریباً در مقادیر بالاتر از  $Z/D = 1/2$  کوچک بوده و در مقادیر کمتر از  $0.8$  به شکل خطی کاهش یافته و تا رسیدن به سطح صفحه به صفر میل می‌کند. لذا، در ادامه تحقیقات از سرعت جریان در فاصله  $0.5D$  از دهانه خروجی که برابر با  $12 \text{ m/s}$  می‌باشد، به عنوان سرعت مرجع دمنده  $(V_{ref})$  [۶ و ۸] در اکثر محاسبات استفاده شده است.





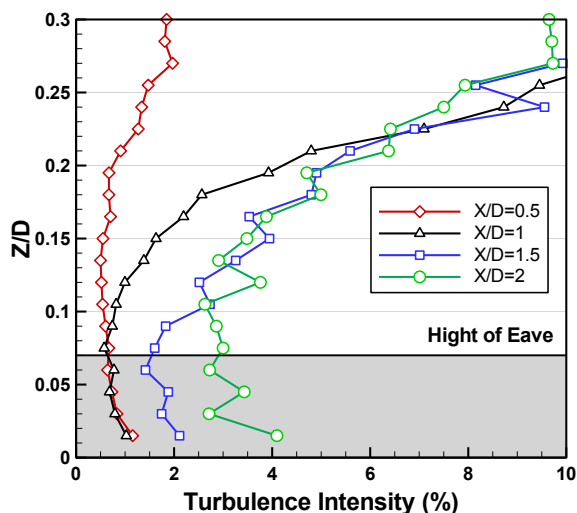
شکل ۹. پروفیل سرعت خروجی در سرعت ۱۲m/s در سه فاصله متفاوت از دهانه دمنده

Fig. 9. Output velocity profiles at 12m/s at three different distances from the blower outlet

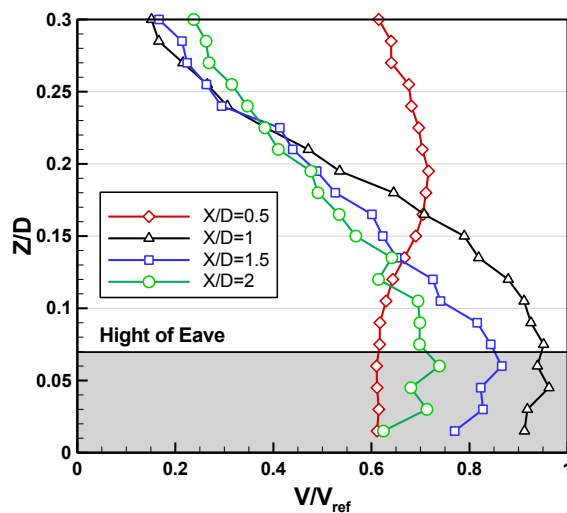


شکل ۱۰. پروفیل افت سرعت بی‌بعد بین دمنده و صفحه آزمایش در امتداد مرکز دهانه خروجی

Fig. 10. Profile of reduction dimensionless velocity between the blower and the test plate along the center of the blower outlet



ب: نمودار میزان آشفتگی جریان  
b. Flow turbulence intensity



الف: نمودار سرعت جریان  
a. Flow velocity

شکل ۱۱. نمودار سرعت و میزان آشفتگی جریان  $X/D$  های مختلف با سرعت  $12\text{m/s}$

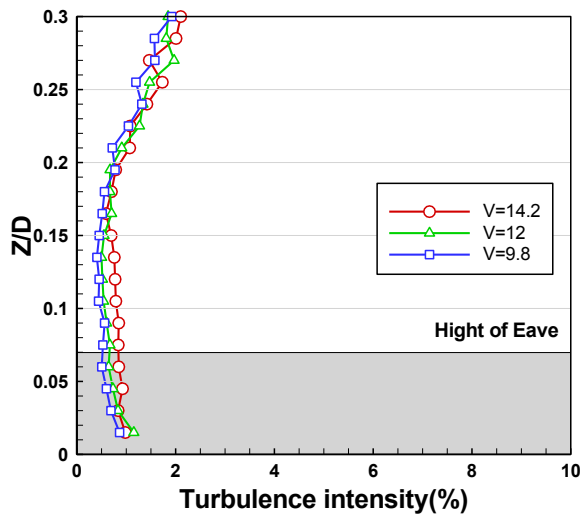
Fig. 11. Velocity and turbulence intensity of different  $X/D$ s at  $12\text{m/s}$

است که با افزایش ارتفاع و فاصله گرفتن از سطح صفحه آزمایش تغییرات زیادی در سرعت ایجاد نمی‌شود و همچنین در زمانی که نقطه اندازه‌گیری در فاصله  $X/D=1$  قرار می‌گیرد، حداکثر سرعت در این پروفایل تقریباً برابر با سرعت مرجع جریان می‌شود. در این نقطه عمده‌تاً جریان افقی است ولی با افزایش ارتفاع، میزان سرعت کاهش می‌یابد. در زمانی که نقطه اندازه‌گیری به سمت یک و نیم برابر قطر طوفان حرکت می‌کند میزان حداکثر سرعت کمتر از نقطه  $X/D=1$  می‌شود و این کاهش سرعت، با افزایش فاصله از مرکز جریان ادامه می‌یابد که در  $X/D=2$  نیز تأثیر این موضوع مشخص است. همچنین با مقایسه داده‌های سه سرعت متفاوت در این آزمایش، می‌توان به این نتیجه رسید که میزان تغییرات در پروفیل سرعت و مقدار آشفتگی با تغییر سرعت جریان، ناچیز بوده است.

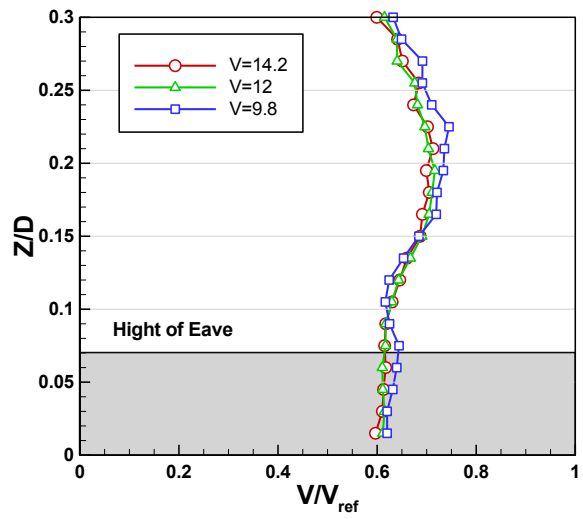
میزان آشفتگی جریان در داده‌های ارائه شده در نزدیکی سطح زمین و در ارتفاعی که مدل قرار دارد، کمترین مقدار خود را پیدا می‌کند. اگرچه با کم شدن سرعت در ارتفاع، میزان آشفتگی بطور طبیعی به شدت بزرگ می‌شود. در  $X/D=0.5$ ، دمنده باعث ایجاد شدت تلاطمی در حدود  $0.5\%$  در طی ارتفاع مکعب شده است. این در حالی است که در  $X/D=1$  که سرعت به حداکثر خود می‌رسد، شدت آشفتگی بسیار نزدیک به حدود شدت

ضخامت سیم آن  $5$  میکرومتر است و دمای کاری آن نیز  $150$  بر روی درجه سانتی‌گراد تنظیم شده است. ارتفاع مکعب نیز به‌عنوان مرجع در این شکل‌ها آورده شده است. در شکل ۱۱ نیز داده‌های مقایسه‌ای پروفیل‌های سرعت و میزان آشفتگی در نقاط شعاعی قرارگیری مختلف نسبت به مرکز دهانه‌ی خروجی ( $X/D$ )، با سرعت مرجع  $12$  متر بر ثانیه ارائه شده است. در شکل ۱۱ مشخص است که بیشترین سرعت در زمانی که مدل در نقطه‌ی  $X/D=1$  قرار می‌گیرد اتفاق می‌افتد؛ یعنی در زمانی که مدل به اندازه‌ی شعاع دهانه خروجی از مرکز جریان فاصله می‌گیرد. همچنین مقدار آشفتگی جریان نیز بسیار اندک بوده و با مقدار آشفتگی در  $X/D=0.5$  برابری می‌کند. علاوه بر این می‌توان گفت که بیشترین میزان سرعت و کمترین مقدار آشفتگی در محدوده  $X/D < 0.5$ ، در نزدیکی سطح زمین و در محدوده‌ی ارتفاعی مدل به‌وقوع می‌پیوندد، که باعث می‌شود سازه به‌شدت تحت تأثیر طوفان فرو وزشی قرار گیرد.

در اشکال ۱۲ تا ۱۵ پروفیل سرعت جریان و میزان آشفتگی بر روی سطح صفحه آزمایش در سه سرعت متفاوت و به تفکیک نقاط  $X/D$  مختلف ارائه شده است. ارتفاع مکعب نیز به‌عنوان مرجع در این اشکال آورده شده است. پروفیل سرعت و میزان آشفتگی جریان در  $X/D=0.5$  نشان دهنده این



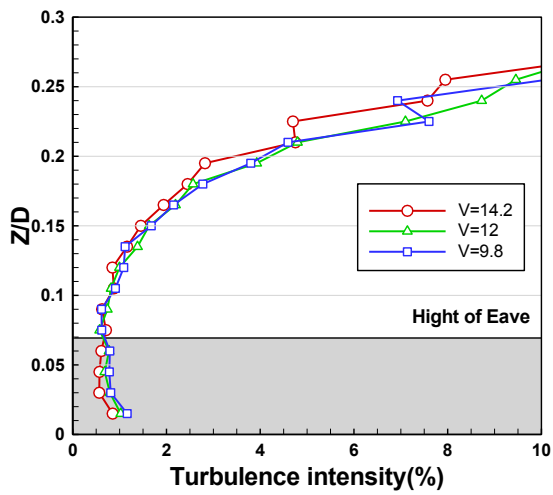
ب: نمودار میزان آشفتگی جریان  
b. Flow turbulence intensity



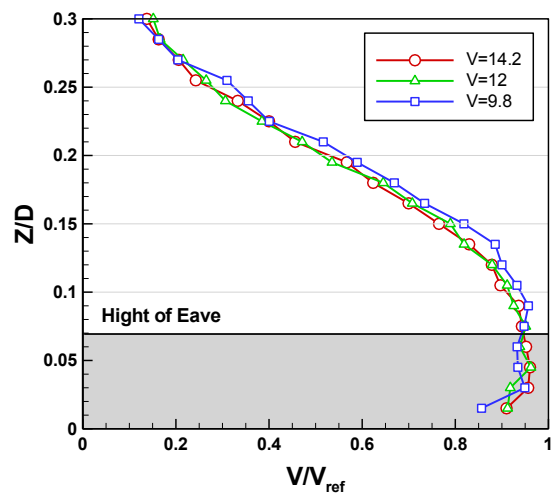
الف: نمودار سرعت جریان  
a. Flow velocity

شکل ۱۲. نمودار سرعت و میزان آشفتگی جریان در  $X/D=0.5$

Fig. 12. Flow velocity and turbulence intensity at  $X/D=0.5$



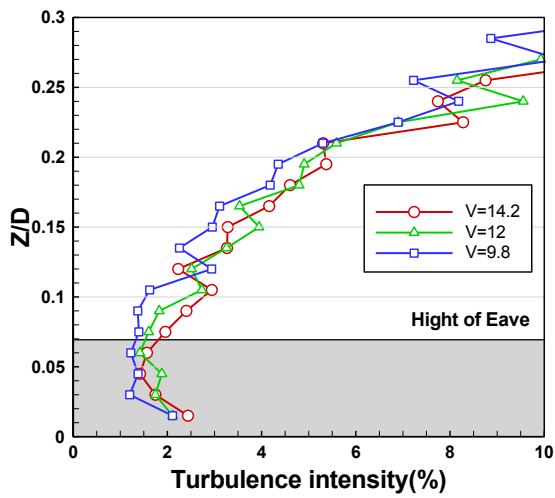
ب: نمودار میزان آشفتگی جریان  
b. Flow turbulence intensity



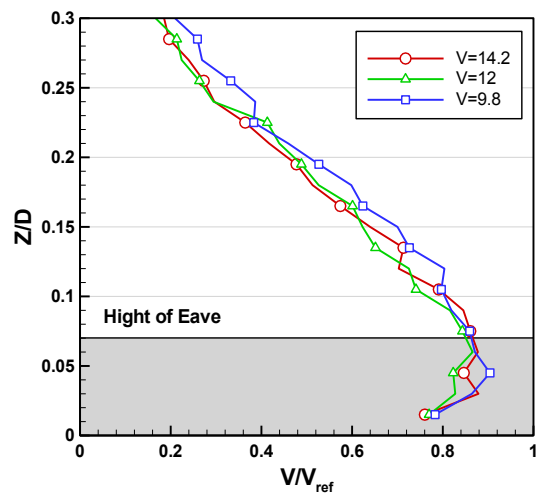
الف: نمودار سرعت جریان  
a. Flow velocity

شکل ۱۳. نمودار سرعت و میزان آشفتگی جریان در  $X/D=1$

Fig. 13. Flow velocity and turbulence intensity at  $X/D=1$



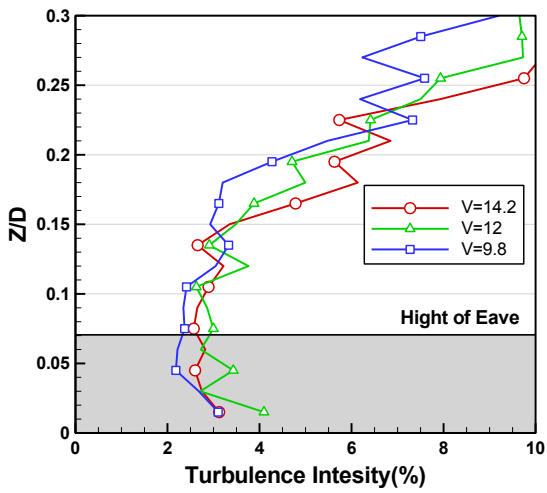
ب: نمودار میزان آشفتگی جریان  
b. Flow turbulence intensity



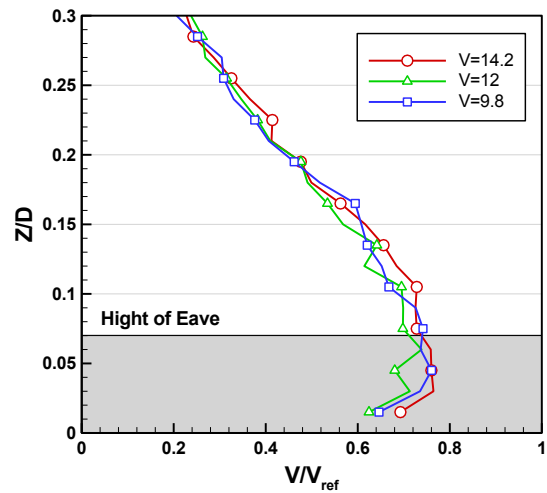
الف: نمودار سرعت جریان  
a. Flow velocity

شکل ۱۴. نمودار سرعت و میزان آشفتگی جریان در  $X/D=1/5$

Fig. 14. Flow velocity and turbulence intensity at  $X/D=1.5$



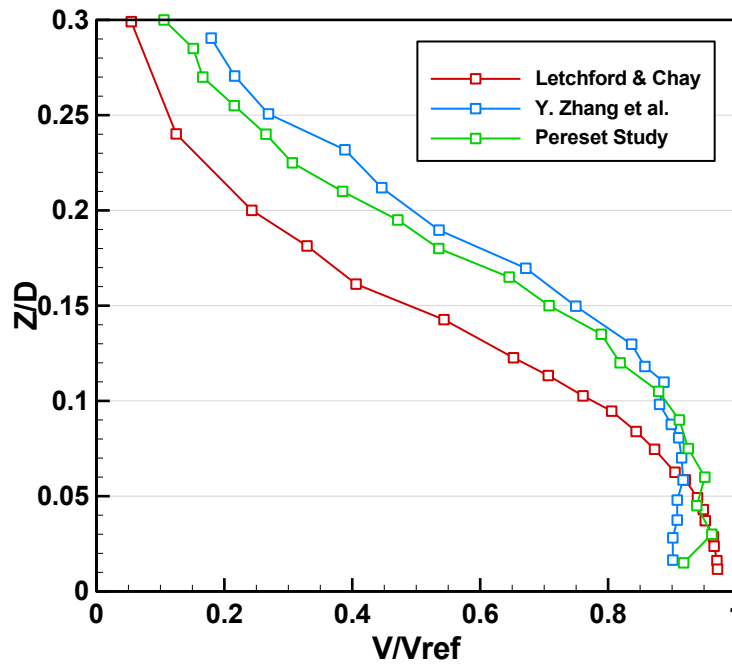
ب: نمودار میزان آشفتگی جریان  
b. Flow turbulence intensity



الف: نمودار سرعت جریان  
a. Flow velocity

شکل ۱۵. نمودار سرعت و میزان آشفتگی جریان در  $X/D=2$

Fig. 15. Flow velocity and turbulence intensity at  $X/D=2$



شکل ۱۶. نمودار مقایسه پروفیل سرعت با مطالعات قبلی در  $X/D=1$

Fig. 16. Comparison of velocity profiles with previous studies at  $X/D=1$

#### ۴-۳- میدان فشار استاتیک

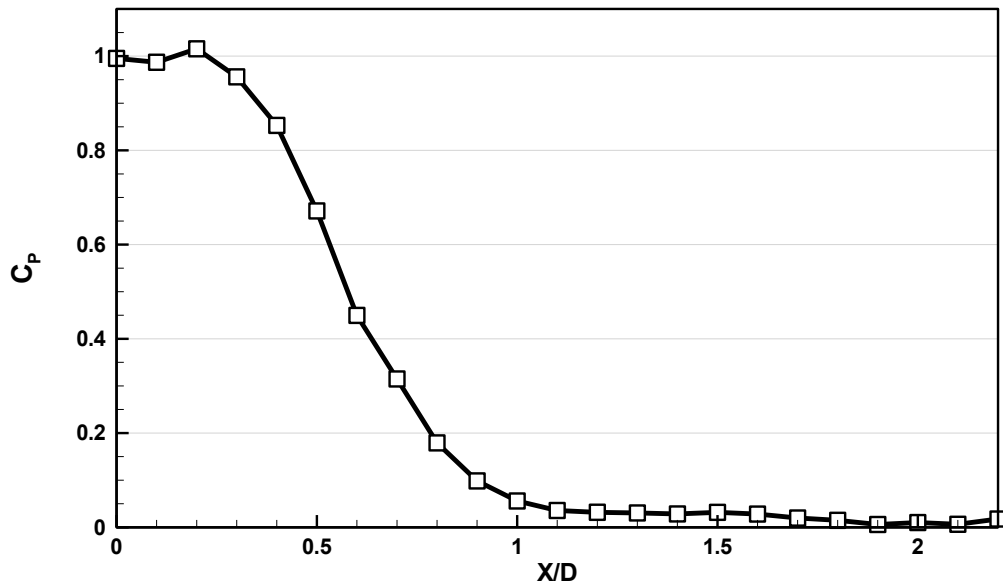
در این مرحله، یک سوراخ فشاری بر روی سطح صفحه آزمایش نصب شده که تغییرات فشار ناشی از طوفان فرو وزشی شبیه‌سازی شده را ثبت می‌کند. در رابطه (۲) نحوه تبدیل فشارهای استاتیک متوسط در هر موقعیت ( $X/D$ ) به شکل ضریب فشار نشان داده شده است.

$$C_p = \frac{P_{STATIC} - P_{ATMOS}}{\frac{1}{2} \rho V^2} \quad (2)$$

که در آن  $C_p$  ضریب فشار و  $P_{STATIC}$  فشار استاتیک کل و  $P_{ATMOS}$  فشار اتمسفر و  $\rho$  چگالی سیال و  $V_{ref}$  سرعت جریان خروجی از دمنده است. در شکل ۱۷ تغییرات فشار استاتیک به شکل تابعی از فاصله نسبت به نقطه سکون نشان داده شده است. دمنده یک ناحیه پرفشار را در محدوده  $0.25 \leq X/D \leq 0$  ایجاد کرده است که فشار در آن تقریباً برابر با فشار سکون

آشفته‌گی در  $X/D=0.5$  می‌شود. ولی در فواصل دورتر از  $X/D=1$  دچار کاهش سرعت و افزایش مقدار آشفته‌گی شده است. در شکل ۱۶ مقایسه‌ای از پروفیل سرعت اندازه‌گیری شده در محدوده اندازه‌گیری  $X/D=1$  در این آزمایش با مطالعات قبلی ارائه شده است. با مشاهده این داده‌ها می‌توان به این نتیجه رسید که طوفان شبیه‌سازی شده در این تحقیق، دارای پروفیل سرعت مشابه با سیستم‌های آزمایشگاهی مورد استفاده در مقالات چی و لچفورد [۸] با شدت آشفته‌گی ۴٪ و فاصله‌ی دمنده تا صفحه آزمایش برابر با  $1.7 D$  و در مقاله‌ی ژنگ و همکاران [۴] با شدت آشفته‌گی ۲٪ و فاصله‌ی دمنده تا صفحه خروجی برابر با  $2 D$  بوده و از تطابق مناسبی با آن برخوردار است. با توجه به تفاوت شدت آشفته‌گی جریان و فاصله‌ی دمنده تا صفحه‌ی آزمایش در این مقاله با دو مقاله‌ی قبلی، این نکته قابل ذکر است که تفاوت در این موارد، می‌تواند باعث ایجاد تفاوت در پروفیل سرعت جریان شود. در هر سه این مطالعات با افزایش ارتفاع، افت سرعت مشاهده می‌شود که این افت از شیب یکسانی بین این داده‌ها برخوردار است. این موضوع نشان دهنده رفتار یکسان شبیه‌سازهای طوفان فرو وزشی در این مقالات با یکدیگر است.





شکل ۱۷. میدان فشار استاتیک بر روی صفحه آزمایش ناشی از طوفان فرو وزشی

Fig. 17. Static pressure field on the test plate caused by the Downburst

در شکل ۱۸ نمودار مقایسه‌ای از فشارهای وارده بر دیواره‌های مکعب در حالت  $\alpha=0^\circ$  و  $\theta=90^\circ$  به همراه عدم قطعیت مربوط به نتایج مربوط به این آزمایش ارائه شده است. این داده‌ها با سرعت جریان خروجی از دهانه‌ی دمنده ( $V_{jet}$ ) بی‌بعد شده است. با توجه به این شکل می‌توان متوجه شد که در  $X/D=0$  تمام اضلاع سازه تحت فشار قرار می‌گیرد و در  $X/D=0.5$  ضلع رو به جریان مقدار بیشتری نسبت دو ضلع دیگر تحت فشار است. با این وجود در  $X/D < 0.5$  این اختلاف فشار بین ضلع رو به جریان با دو ضلع دیگر بسیار بیشتر می‌شود. علاوه بر این مشاهده می‌شود که در ضلع سقف فشار منفی بیشتری نسبت به ضلع پشت به جریان بر مدل وارد شده است. در شکل ۱۹ نیز به مقایسه‌ی ضریب فشار اندازه‌گیری شده در این تحقیق با مطالعات قبلی در  $X/D=1$  با  $\alpha=0^\circ$  و  $\theta=90^\circ$  انجام شده است. در این شکل براساس سرعت جریان در ارتفاع مکعب ( $V_{eave}$ ) بی‌بعد شده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که داده‌های بدست آمده در این قسمت در بین داده‌های مقالات قبلی بوده است و از تطابق مناسبی برخوردار می‌باشد. همچنین یکسان بودن رفتار این جریان در نقاط مختلف مدل، نشان از کارایی مناسب شبیه‌ساز حاضر دارد. شکل ۲۰ نیز مربوط به داده‌های تکرارپذیری نمودارهای ضریب فشار در  $X/D=0$  و  $X/D=1$  و  $\theta=90^\circ$  و  $\alpha=0^\circ$  می‌باشد.

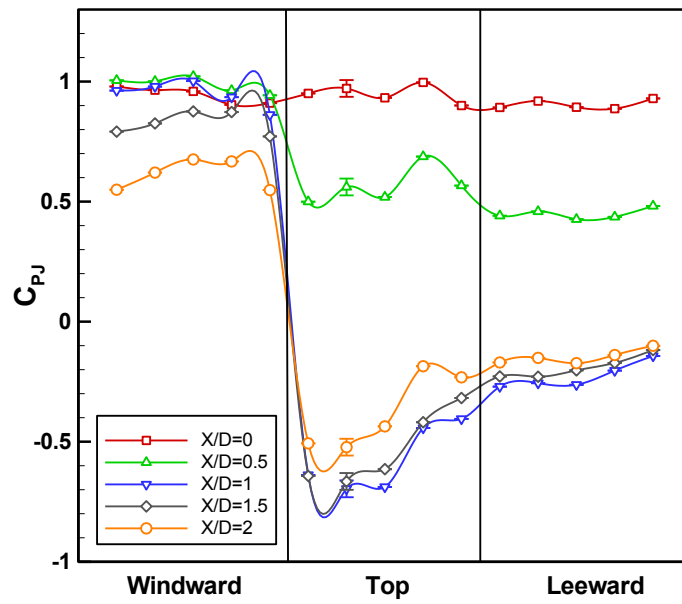
در خروجی می‌باشد. با قراردادن نقطه‌ی اندازه‌گیری دورتر از  $X/D=0.5$  فشار استاتیک دچار کاهش شدیدی شده و تقریباً در  $X/D=1$  به بعد، به فشار جو می‌رسد.

#### ۴-۴ بررسی فشار و نیروی وارد شده بر مدل مکعبی شکل

فشار بر روی مکعب برای دو راستای قرارگیری مدل نسبت به جریان ( $\alpha=0^\circ, 45^\circ$ ) و چهار زاویه برخوردی ( $\theta=90^\circ, 105^\circ, 120^\circ, 135^\circ$ ) و با قراردادن آن در محدوده شعاعی  $0 \leq X/D \leq 2$  اندازه‌گیری شده است. در جدول ۱ تمامی حالات اندازه‌گیری و نحوه قرارگیری اجزا نسبت به یکدیگر ارائه شده است. رابطه (۳) نحوه تبدیل فشارهای سطحی متوسط را به شکل ضریب نشان می‌دهد که در آن فشار محیط در محلی دور از دمنده، فشار مرجع را برای این رابطه ( $P_{ATMOS}$ ) فراهم کرده است.

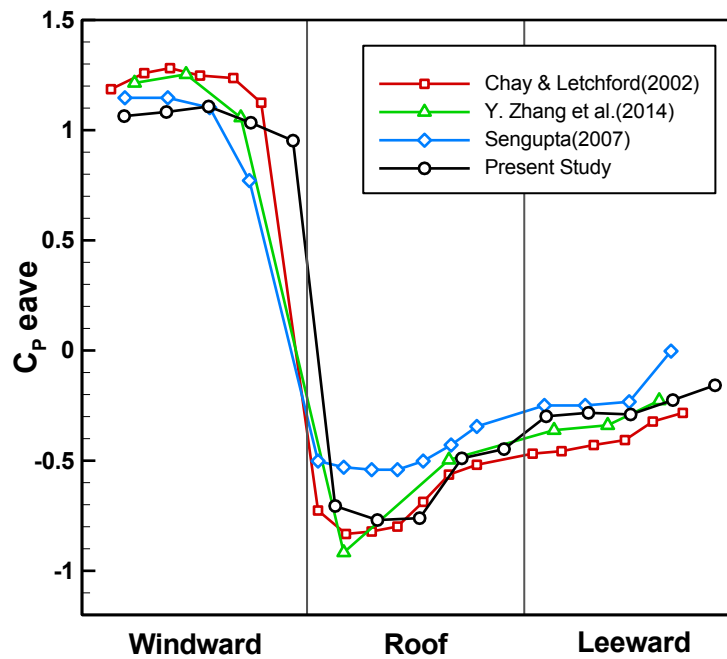
$$C_{PJ} = \frac{P - P_{ATMOS}}{\frac{1}{2} \rho V^2} \quad (3)$$

که در آن  $C_{PJ}$  ضریب فشار  $P$  فشار کل و  $P_{ATMOS}$  فشار اتمسفر و  $\rho$  چگالی سیال و  $V_{ref}$  سرعت جریان خروجی از دمنده است.



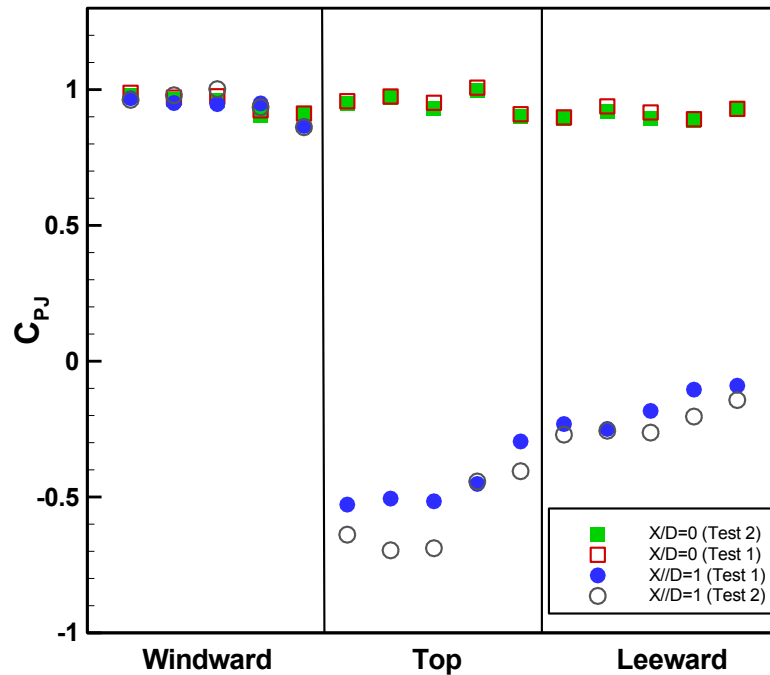
شکل ۱۸. نمودار مقایسه ضریب فشار در محدوده‌های شعاعی مختلف ( $V_{jet}$ )

Fig. 18. Comparison of pressure coefficient in different radial ranges ( $V_{jet}$ )



شکل ۱۹. نمودار مقایسه ضریب فشار با مطالعات قبلی در محدوده شعاعی ( $VEAVE$ )،  $X/D=1$

Fig. 19. Comparison of pressure coefficient with previous studies in the radial range of  $X/D=1$  ( $VEAVE$ )



شکل ۲۰. پروفیل تکرارپذیری آزمایشات در  $X/D=1$  و  $0$

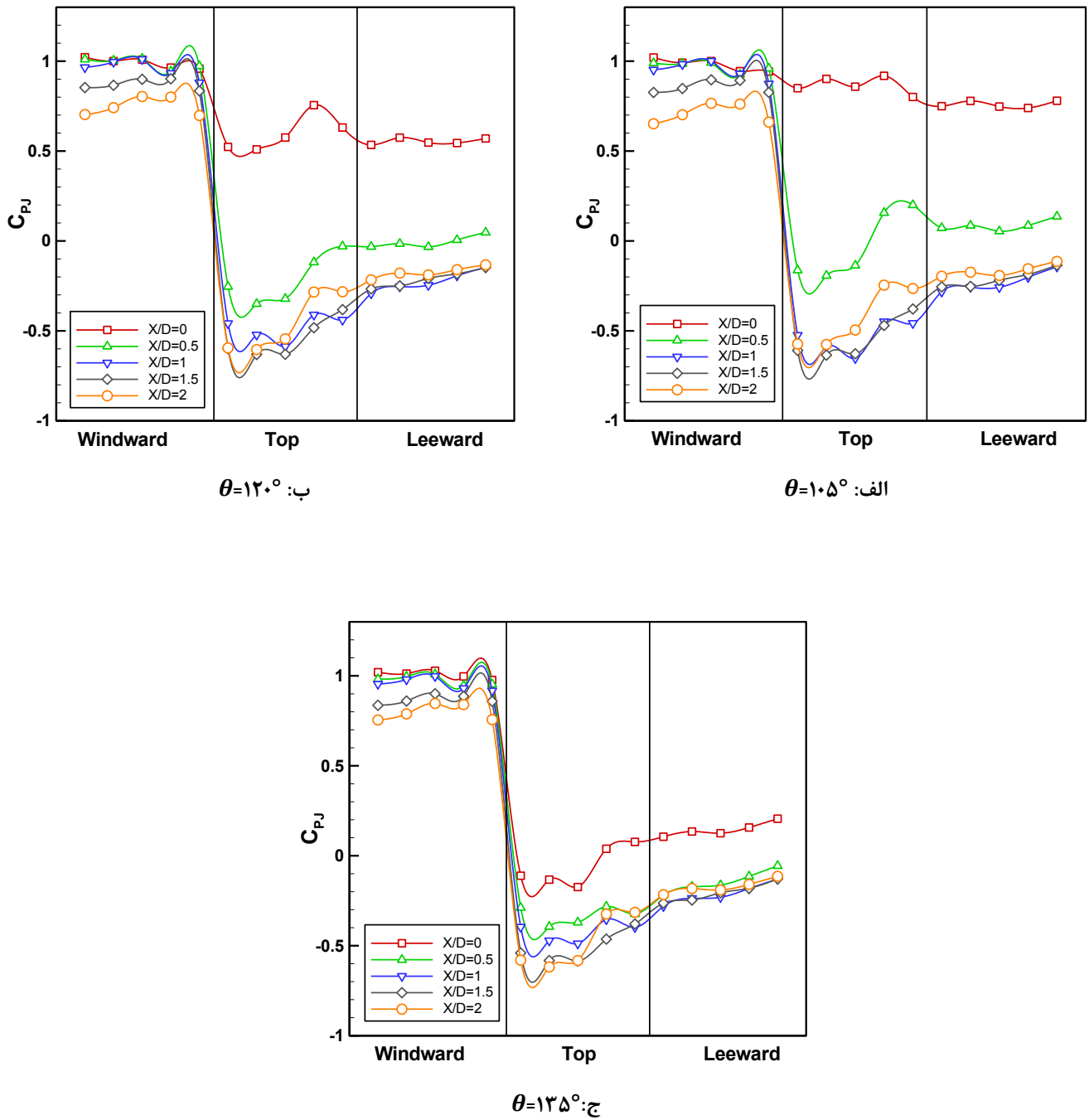
Fig. 20. Test repeatability results at  $X/D=0, 1$

۹۰ درجه است. میزان اختلاف فشار ضلع پشت به جریان با ضلع رو به جریان در مرکز ریزش جریان ( $X/D=0$ )، در  $\theta=135^\circ$  حدود ۸۰٪ بیشتر از  $\theta=0^\circ$  بوده است. همچنین با بررسی راستای قرارگیری مدل نسبت به جریان ( $\alpha$ ) می‌توان دریافت نوع رفتار نمودارهای فشار  $\alpha=0^\circ$  و  $\alpha=45^\circ$  شبیه به یکدیگر هستند، ولیکن محدوده اختلاف فشار در اضلاع مدل زمانی که مدل در  $\alpha=45^\circ$  قرار دارد، کمتر از زمانی است که در  $\alpha=0^\circ$  است. این اختلاف فشار کمتر نیز باعث ایجاد نیروی کمتری بر مدل شده است. در شکل ۲۳ به مشاهده‌ی جریان ایجاد شده توسط دمنده‌ی مذکور در  $X/D=0$  و در دو زاویه‌ی  $\theta=90^\circ$  و  $\theta=135^\circ$  پرداخته شد. این تصویر به درک بهتر و مقایسه‌ی 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.

۴-۴-۱ بررسی اثرات شیب سطح زمین نسبت به راستای طوفان فرو وزشی

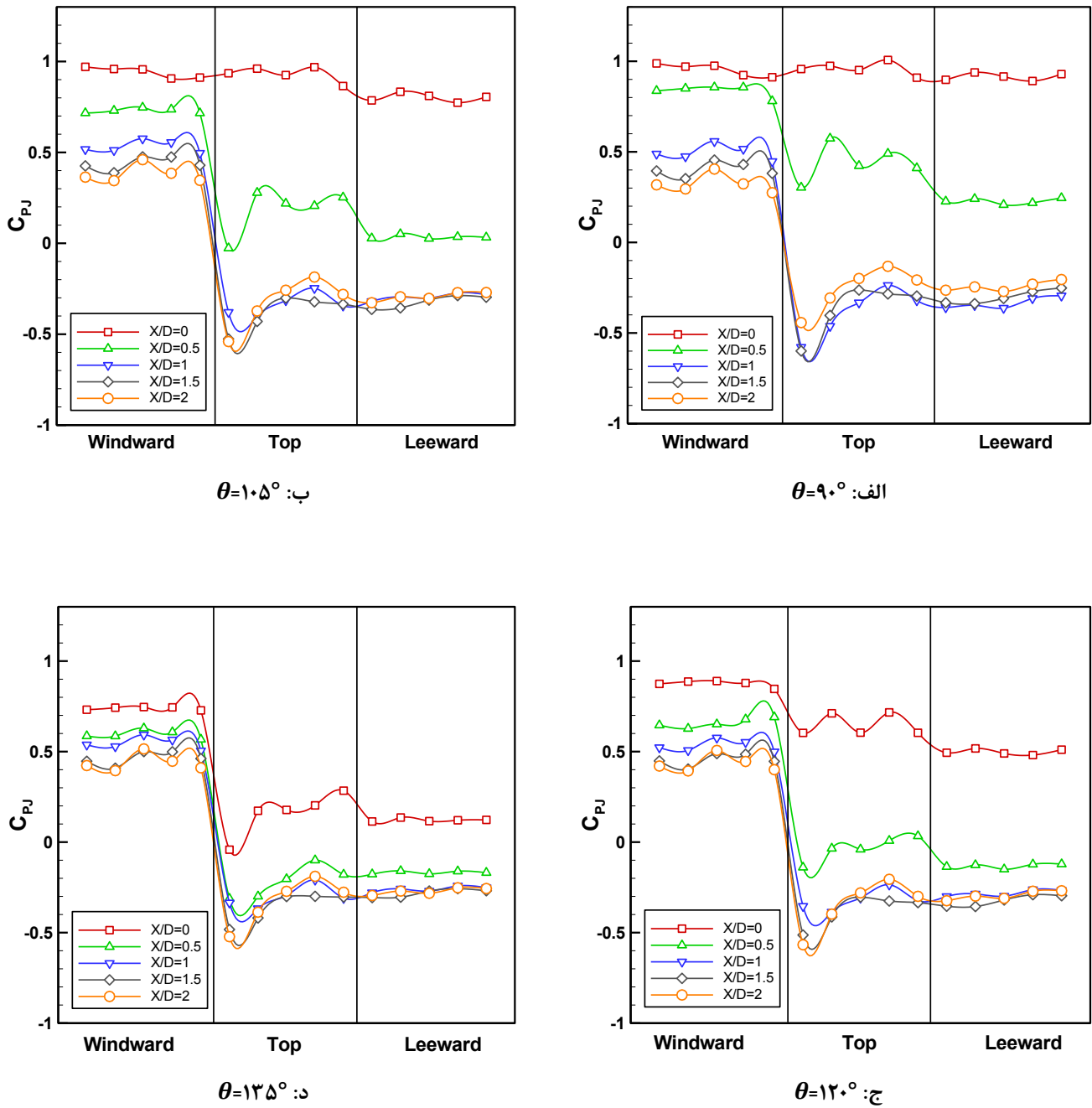
در ادامه‌ی نمودارهای تأثیرات شیب زمین نسبت به زاویه‌ی طوفان ( $\theta$ ) و راستای قرارگیری مدل نسبت به جریان ( $\alpha=0^\circ$ ،  $\alpha=45^\circ$ ) ارائه شده است. این داده‌ها بر اساس سرعت دمنده ( $V_{jet}$ ) بی‌بعد شده است. در شکل ۲۱، داده‌های مدل در راستای قرارگیری  $\alpha=0^\circ$  و در شکل ۲۲ داده‌های مدل در راستای قرارگیری  $\alpha=45^\circ$  ارائه شده است.

با بررسی نمودارهای ارائه شده در شکل‌های ۲۱ و ۲۲ می‌توان گفت که در تمام حالات در سمت رو به جریان، بیشترین مقدار ضریب فشار ایجاد شده است، که این مورد در محدوده شعاعی  $X/D=0$ ، یعنی در زمانی که مدل در مرکز جریان قرار دارد، در بیشترین مقدار خود است، هرچند در این محدوده، فشارهای وارده بر تمام اضلاع مدل برابر می‌باشد. ولیکن با توجه به زاویه قرارگیری مدل نسبت به طوفان، مشاهده می‌شود که با افزایش زاویه  $\theta$  به بیش از  $90^\circ$ ، میزان اختلاف فشار در ضلع رو به جریان، نسبت به سقف مدل و ضلع پشت به جریان، بیشتر از زمانی است که  $\theta$  برابر با



شکل ۲۱. مقایسه ضریب فشار در  $\alpha=0^\circ$

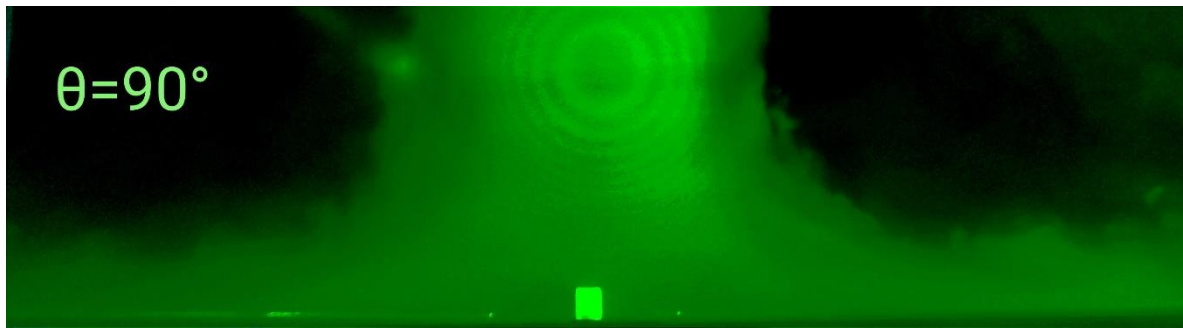
Fig. 21. Comparison of pressure coefficient at  $\alpha=0^\circ$



شکل ۲۲. مقایسه ضریب فشار در  $\alpha=45^\circ$

Fig. 22. Comparison of pressure coefficient at  $\alpha=45^\circ$





الف: مشاهده‌ی جریان در  $\theta=90^\circ$

a. Flow visualization at  $\theta=90^\circ$



ب: مشاهده‌ی جریان در  $\theta=135^\circ$

b. Flow visualization at  $\theta=135^\circ$

شکل ۲۳. مشاهده‌ی جریان طوفان فرو وزشی در زوایای مختلف برخوردی

Fig. 23. Observation of the downburst flow at different impact angles

سیال،  $V_{ref}$  سرعت جریان خروجی از دمنده و  $S_{ref}$  ارتفاع مدل در واحد عمق آن است.

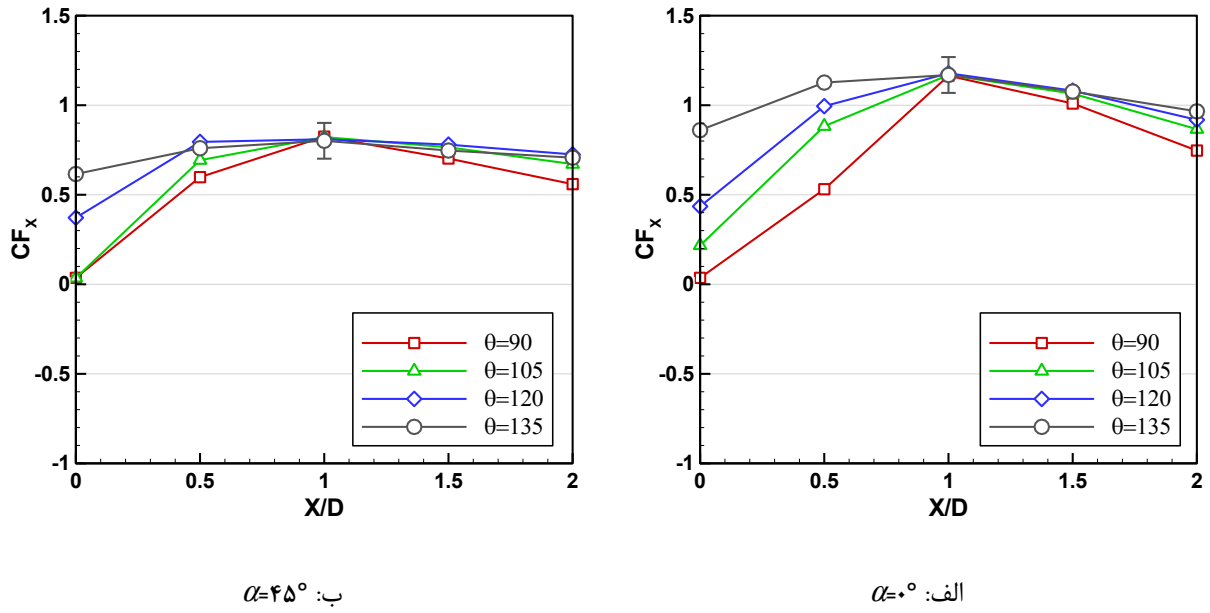
در شکل ۲۴ داده‌های ضریب نیرو در راستای  $X$  (موازیات سطح صفحه آزمایش) و همچنین عدم قطعیت مربوط به نتایج این آزمایش ارائه شده است. با بررسی این داده‌ها مشاهده می‌شود که زمانی که مدل در نقطه‌ی مرکزی زیر شعاع برخورد جریان قرار دارد، میزان نیرو کمترین مقدار خود را شاهد است. اما هرچه زاویه‌ی برخورد این جریان نسبت به سطح افزایش می‌یابد، ضریب نیرو در محدوده‌های شعاعی متفاوت نیز افزایش یافته و به مقدار یک نزدیک می‌شود. این موضوع بر روی بازه‌ی ضریب نیرو در محدوده  $X/D=0$  تا  $X/D=2$  نیز تاثیرگذار بوده است. در حالی که زمانی که  $\theta=90^\circ$  است، بیشترین تفاوت در ضریب نیرو نسبت به حالت‌های دیگر ایجاد می‌شود. در  $X/D=1$  یک دیوار فشاری و یک دیوار مکشی، یکدیگر را تقویت کرده و این باعث ماکزیمم شدن  $CF_x$  شده و بنظر می‌رسد در این حالت بیشترین ممان خمشی به ساختمان وارد شود. با توجه به داده‌های

۴-۵- بررسی تغییرات نیروی وارد شده بر سازه مکعبی شکل

در شکل‌های ۲۴ تا ۲۶ داده‌های ضریب نیرو بر روی مدل مورد بحث در زاویه  $90^\circ$ ،  $105^\circ$ ،  $120^\circ$ ،  $135^\circ$  و دو زاویه  $45^\circ$ ،  $0^\circ$  ارائه شده است. این داده‌ها در دو راستای  $X$  و  $Z$  اندازه‌گیری شده و همچنین ضریب نیروی کل نیز ارائه شده است در رابطه‌ی (۴) نحوه‌ی محاسبه‌ی ضرایب نیرو ارائه شده است.

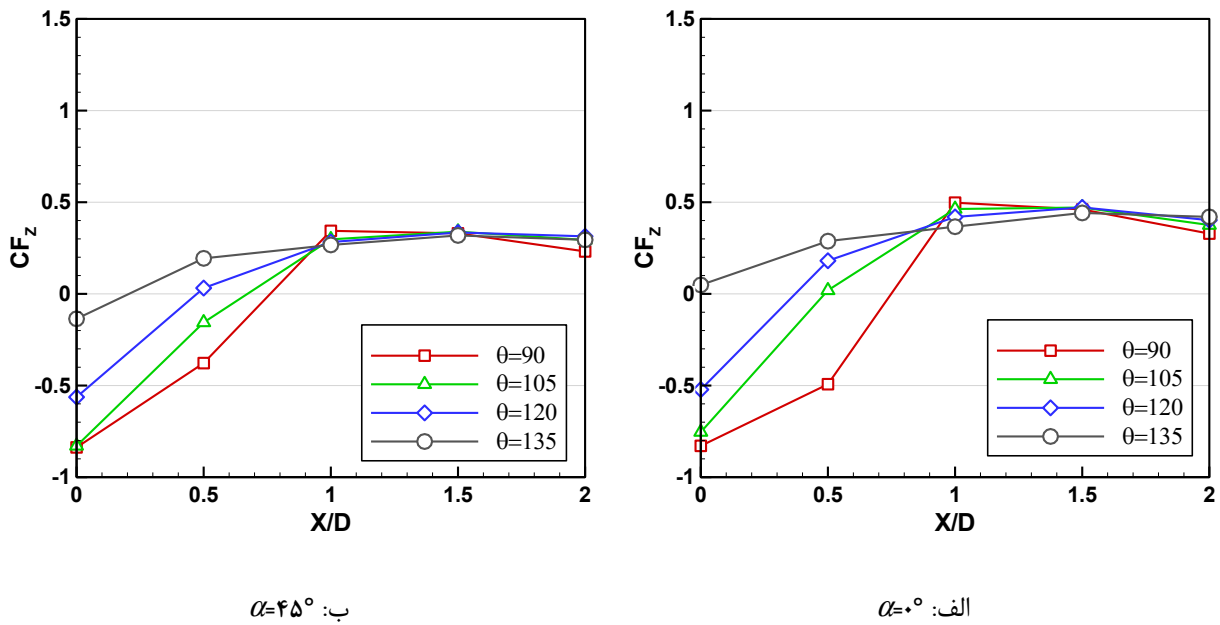
$$CF = \left( \frac{\sum P.A}{\frac{1}{2} \rho V_{ref}^2 S_{ref}} \right) \quad (4)$$

که در آن  $CF$  ضریب نیرو،  $P$  فشار کل،  $A$  مساحت هر المان است که طول هر المان در واحد عمق آن المان در نظر گرفته شده است،  $\rho$  چگالی



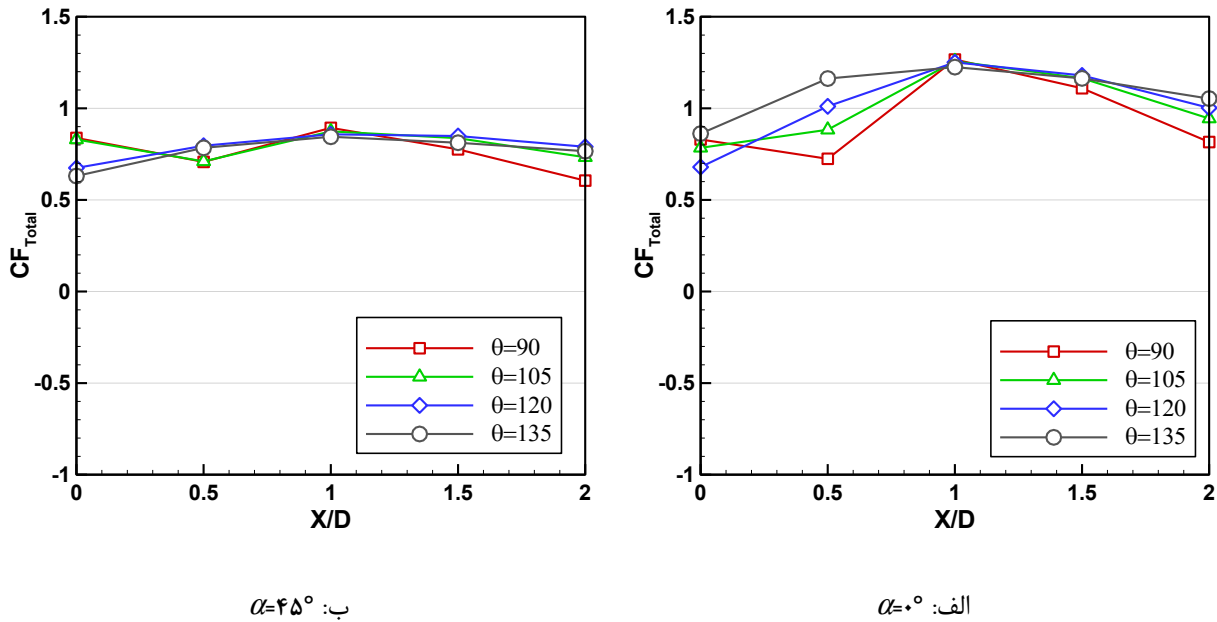
شکل ۲۴. مقایسه ضریب نیرو مدل در راستای افقی در زاویه‌های برخورد متفاوت طوفان به سطح

Fig. 24. Comparison of model force coefficient in the horizontal direction at different impact angles of downburst



شکل ۲۵. مقایسه ضریب نیرو مدل در راستای عمودی در زاویه‌های برخورد متفاوت طوفان به سطح

Fig. 25. Comparison of model force coefficient in the vertical direction at different impact angles of downburst



شکل ۲۶. مقایسه ضریب نیروی کل مدل در زاویه‌های برخورد متفاوت طوفان به سطح

Fig. 26. Comparison of the total force coefficient of the model direction at different impact angles of downburst

شکل ۲۶ نشان دهنده مقدار ضریب نیروی کل سازه در  $X/D$  های مختلف می‌باشد. این داده‌ها نشان می‌دهد که بیشترین نیرو در تمام زوایای  $\theta$  و  $\alpha$  در  $X/D=1$  به وقوع می‌پیوندد ولیکن به طور کلی، در  $\alpha=0^\circ$  و در حالت  $\theta=135^\circ$  نیروی بیشتری در نقاط مختلف  $X/D$  بر روی سازه اعمال می‌شود. این موضوع زمانی که سازه در حالت  $\alpha=45^\circ$  دارای بازه‌ی کمتری است و اختلاف بین زوایای مختلف  $\theta$  کمتر از حالت  $\alpha=0^\circ$  است. همچنین می‌توان مشاهده کرد در  $\alpha=0^\circ$  حدوداً ۳۵٪ نیروی کمتری به کل سازه نسبت به  $\alpha=0^\circ$  اعمال می‌شود.

#### ۵- نتیجه‌گیری

تا کنون چندین تحقیق به منظور شناخت ویژگی‌ها و بررسی آثار طوفان فرو وزشی بر روی مدل‌هایی مکعب شکل به عنوان شکلی مرجع و عمومی از سازه‌ها صورت گرفته است. ولی این تحقیقات کماکان دچار خلأهایی از لحاظ بررسی زوایای مختلف برخورد طوفان بر سازه‌ها می‌باشد. لذا در این پژوهش با هدف بررسی و شناخت اثرات زاویه قرارگیری مدل مکعب شکل نسبت به جریان و همچنین تاثیر شیب زمین بر جریان ایجاد شده که در مطالعات قبلی انجام نگرفته است، به تهیه این مقاله پرداختند. این مدل

ضرایب فشار می‌توان متوجه شد که اختلاف فشار ایجاد شده بین ضلع رو به جریان با دو ضلع سقف و پشت به جریان، باعث ایجاد این نیروی شدید در مدل شده است. به همین دلیل بیشترین مقدار ضریب نیرو در دو راستای قرارگیری مدل ( $\alpha=0^\circ, 45^\circ$ ) در  $X/D=1$  اتفاق می‌افتد. البته این ضریب در راستای  $X$  و در  $\alpha=45^\circ$ ، حدوداً ۳۰٪ کمتر از مقدار آن در راستای قرارگیری مدل در حالت  $\alpha=0^\circ$  می‌باشد.

در شکل ۲۵ داده‌های ضریب نیرو در راستای  $Z$  (عمود بر سطح صفحه آزمایش) ارائه شده است. با بررسی این داده‌ها مشاهده می‌شود که در  $X/D=0$  و  $\theta=90^\circ$ ، مدل دچار بیشترین نیروی فشاری در راستای  $Z$  است همچنین مشخص است که با افزایش  $\theta$  نیز مقدار نیرو به صفر نزدیک می‌شود. با حرکت به سمت  $X/D$  های بزرگتر نیز این نیروی فشاری به تدریج به نیروی مکشی تبدیل شده و در  $X/D=1$  بیشترین مقدار نیروی مکشی بر مدل در راستای  $Z$  وارد می‌شود. در حالت  $\theta=135^\circ$  میزان تغییراتی که در نیروی جسم در  $X/D$  های مختلف ایجاد شده است، کمتر از دیگر زوایای  $\theta$  است و به صفر نزدیکتر می‌باشد. این مورد در هر دو راستای  $\alpha$  نیز به چشم می‌آید. همچنین در هر دو حالت  $\alpha=0^\circ, 45^\circ$ ، مقدار بازه‌ی تغییرات ضریب نیرو، کمتر از بازه‌ی آن در راستای  $X$  است.

نقاط داخلی طوفان فروزشی ( $X/D=0-0.5$ ) قرار بگیرد، دچار نیروی رو به پایین و فشاری بزرگی خواهد شد؛ در حالی که در خارج از شعاع برخوردی این طوفان، رفتار آن شبیه به جریانات بادهای سطحی خواهد شد. با قرار دادن مدل در زوایای متفاوت و بررسی جریان وارده در حالات مختلف نتایج جالب توجهی بدست آمده است که به شناخت هرچه بیشتر این جریان کمک خواهد کرد. قرار گرفتن مدل در  $\alpha=45^\circ$  باعث می‌شود که بازه‌ی تغییرات فشار بر روی مدل کمتر از  $\alpha=0^\circ$  باشد و مدل اختلاف فشار کمتری را در اضلاع مختلف خود نسبت به یکدیگر تحمل کند. در عین حال، افزایش زاویه‌ی  $\theta$ ، باعث افزایش اختلاف فشار بین ضلع رو به جریان با ضلع سقف و ضلع پشت به جریان شده است. این مورد حتی در  $X/D=0$  نیز به چشم می‌آید و می‌تواند اضلاع رو به جریان سازه‌ها را در شرایط بحرانی‌تری قرار دهد (حتی زمانی که سازه در زیر محدوده‌ی ریزش جریان قرار داشته باشد). بطور مثال میزان اختلاف فشار ضلع پشت به جریان با ضلع رو به جریان در مرکز ریزش جریان ( $X/D=0$ )، در  $\theta=135^\circ$  حدود  $80\%$  بیشتر از  $\theta=0^\circ$  است. در راستای  $X$ ، بیشترین نیروی وارده بر سازه در  $X/D=1$  ایجاد می‌شود که نشان از اختلاف فشار شدید بین دو ضلع رو به جریان و پشت به جریان در این نقطه دارد. ولی با تغییر راستای  $\alpha$  به  $45^\circ$ ، حدود  $35\%$  نیروی کمتری در راستای  $X$  نسبت به حالتی که مدل در  $\alpha=0^\circ$  قرار داشته باشد به مدل وارد می‌شود. لذا به‌عنوان یک حالت مناسب قرارگیری سازه پیشنهاد می‌گردد. ضمناً در راستای  $Z$  نیز مشاهده شده است بیشترین نیروها در هر دو راستای  $\alpha$  مورد بررسی، در  $X/D=0$  به مدل وارد شده است. هرچند که افزایش زاویه‌ی  $\theta$  در  $X/D$ های مختلف باعث کمتر شدن مقدار نیرو در طول مسیر شده است.

## ۶- فهرست علائم

علائم انگلیسی	
$P$	فشار کل. Pa
$P_{ATMOS}$	فشار اتمسفر. Pa
$P_{STATIC}$	فشار استاتیک. Pa
$V_{ref}$	سرعت جریان. m/s
$C_p$	ضریب فشار.
$CF$	ضریب نیرو.
$Tu$	شدت آشفتگی.
$u_i$	مولفه‌ی اغتشاشی سرعت. m/s
$u_i$	سرعت لحظه‌ای اندازه‌گیری شده. m/s

تحت بار طوفان فروزشی در چهار زاویه‌ی برخورد طوفان به سطح ( $\theta$ ) و  $2$  راستای قرارگیری مدل نسبت به جریان سطحی ( $\alpha$ ) قرار گرفت. بعلاوه در پنج محدوده‌ی شعاعی  $0.5, 1, 1.5, 2, X/D=0$  به اندازه‌گیری نیرو و فشار پرداخته شد. این طوفان به وسیله‌ی یک فن و دمنده‌ی ثابت که وظیفه‌ی تولید و یکنواخت کردن جریان خروجی را بر عهده داشت، شبیه‌سازی شده است. در ابتدا به‌جهت شناخت رفتار طوفان فروزشی، پروفیل سرعت در روبرو و به موازات دهانه‌ی خروجی دمنده و بطور اختصاصی در این مطالعه، در سه سرعت متفاوت و سه موقعیت  $Z/D$  متفاوت اندازه‌گیری شد که نشان داد این جریان جدا از مقدار سرعت ریزش خود، دارای یکنواختی بالایی در جریان خود است که این یکنواختی حتی در فاصله‌ای به اندازه‌ی شعاع ریزش آن ( $Z/D=1$ ) نیز حفظ می‌شود. سپس به اندازه‌گیری پروفیل سرعت و شدت آشفتگی در نزدیکی سطح صفحه‌ی آزمایش و در راستای نقطه‌ی مرکزی جریان، پرداخته شد. این داده‌ها نیز در سه سرعت متفاوت اندازه‌گیری شده است. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین مقدار سرعت جریان در نزدیکی سطح صفحه‌ی آزمایش و در محدوده ارتفاعی مدل ایجاد می‌شود. همچنین مشخص شد که بالاترین سرعت در  $X/D=1$  و کمترین شدت آشفتگی نیز در  $X/D=0.5$  و  $X/D=1$  ایجاد می‌شود. علاوه بر این مشخص شد که تغییر سرعت جریان در این قسمت، باعث نمی‌شود که طوفان رفتار متفاوتی در پروفیل سرعت و شدت آشفتگی خود نشان دهد. در مرحله‌ی بعد، به بررسی ضریب فشار وارده و مقایسه آن با مطالعات قبلی پرداخته شد که مشخص شد طوفان شبیه‌سازی شده در این تحقیق از تطابق خوبی با مطالعات قبلی برخوردار بوده و رفتار طوفان فروزشی را به‌خوبی شبیه‌سازی می‌کند. در داده‌های ارائه شده از ضریب فشار مشخص شد که با قرار گرفتن مدل در  $X/D=0$ ، تمام اضلاع آن تحت فشار یکسانی قرار می‌گیرند و قرار گرفتن مدل در موقعیت‌های  $X/D < 0$ ، باعث می‌شود که بین ضلع رو به جریان با سقف و ضلع پشت به جریان، اختلاف فشار به‌وجود آمده و بتدریج نیز بیشتر شود. در نهایت نیز داده‌های ضریب نیرو در دو جهت  $X$  و  $Z$  و  $CF_{Total}$  ارائه شد. به‌عنوان نتیجه‌گیری، تأثیرات فشار و نیروی طوفان فروزشی به جهت رژیم جریان پیچیده خود، متفاوت از تأثیرات جریانات بادهای سطحی می‌باشد. به‌طور معمول بیشترین میانگین نیرو در راستای  $X$ ، در نقطه‌ی  $X/D=1$  رخ می‌دهد. یعنی زمانی که سازه در فاصله‌ای به اندازه‌ی شعاع طوفان فروزشی از نقطه‌ی مرکزی ریزش آن فاصله گرفته باشد. ولیکن در راستای  $Z$ ، بیشترین نیرو در  $X/D=0$  و در مرکز ریزش جریان اتفاق می‌افتد. در این آزمایشات مشخص شد که اگر سازه‌ای در زیر

with different roof slopes, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 189 (2019) 198-217.

- [10] T.T. Fujita, Andrews AFB Microburst, 205, The University of Chicago, Chicago, 1983.
- [11] J.W. Wilson, R.D. Roberts, C. Kessinger, J. McCarthy, Microburst wind structure and evaluation of Doppler radar for airport wind shear detection, Journal of Applied Meteorology and Climatology, 23(6) (1984) 898-915.
- [12] Y. Iida, Y. Uematsu, Numerical study of wind loads on buildings induced by downbursts, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 191 (2019) 103-116.
- [13] Y. Zhang, H. Hu, P.P. Sarkar, An experimental study of flow fields and wind loads on gable-roof building models in microburst-like wind, Experiments in Fluids, 54(5) (2013).
- [14] M. Nicholls, R. Pielke, R. Meroney, Large eddy simulation of microburst winds flowing around a building, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 46-47 (1993) 229-237.
- [15] X. Zhou, Y. Zhang, L. Kang, M. Gu, CFD simulation of snow redistribution on gable roofs: Impact of roof slope, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 185 (2019) 16-32.
- [16] F.T. Lombardo, M.S. Mason, A.Z. de Alba, Investigation of a downburst loading event on a full-scale low-rise building, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 182 (2018) 272-285.
- [17] E.-S. Abd-Elaal, J.E. Mills, X. Ma, Numerical simulation of downburst wind flow over real topography, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 172 (2017) 85-95.
- [18] A.M. Loredou-Souza, E.G. Lima, M.B. Vallis, M.M. Rocha, A.R. Wittwer, M.G.K. Oliveira, Downburst related damages in Brazilian buildings: Are they avoidable?, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 185 (2018) 33-40.
- [19] A. Sengupta, P.P. Sarkar, Experimental measurement and numerical simulation of an impinging jet with

$\bar{U}$  میانگین سرعت ثبت شده. m/s

$A$  مساحت هر المان.  $m^2$

$S_{ref}$  ارتفاع مدل در واحد عمق آن. m

علائم یونانی

$\rho$  چگالی سیال.  $kg/m^3$

$\alpha$  راستای قرارگیری مدل نسبت به جریان

$\theta$  زاویه قرارگیری مدل نسبت به جریان

## منابع

- [1] ASCE, Minimum design loads for buildings and other structures, American Society of Civil Engineers, 1998.
- [2] H. Mittal, A. Sharma, A. Gairola, A review on the study of urban wind at the pedestrian level around buildings, Journal of Building Engineering, 18 (2018) 154-163.
- [3] L.W. Chew, L.K. Norford, Pedestrian-level wind speed enhancement with void decks in three-dimensional urban street canyons, Building and Environment, 155 (2019) 399-407.
- [4] Y. Zhang, H. Hu, P.P. Sarkar, Comparison of microburst-wind loads on low-rise structures of various geometric shapes, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 133 (2014) 181-190.
- [5] C. Letchford, C. Mans, M. Chay, Thunderstorms—their importance in wind engineering (a case for the next generation wind tunnel), Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 90(12-15) (2002) 1415-1433.
- [6] M.R. Hjelmfelt, Structure and life cycle of microburst outflows observed in Colorado, Journal of Applied Meteorology and Climatology, 27(8) (1988) 900-927.
- [7] T.T. Fujita, The Downburst: Microburst & Macroburst 210, The University of Chicago, Chicago, 1985.
- [8] M. Chay, C. Letchford, Pressure distributions on a cube in a simulated thunderstorm downburst—Part A: stationary downburst observations, Journal of wind engineering and industrial Aerodynamics, 90(7) (2002) 711-732.
- [9] B. Chen, H. Cheng, H. Kong, X. Chen, Q. Yang, Interference effects on wind loads of gable-roof buildings



[20] D.C. Wilcox, Turbulence modeling for CFD, DCW industries La Canada, CA, 1998.

application to thunderstorm microburst winds, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 96(3) (2007) 345-365.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Hojaji, N. Asgari, S. J. Hosseini, A. H. Rezvani, B. Sharifzade, *Experimental Study of Impact Angle of Microburst Effects on a Cubic Structure – Part A: Stationary Microburst Observation*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 54(5) (2022) 961-984.

DOI: [10.22060/mej.2022.20500.7250](https://doi.org/10.22060/mej.2022.20500.7250)

