

Experimental assessment of the Performance of Twisted Wind Flow Simulator in a Small-Scale Boundary Layer Wind Tunnel Using a 5-Hole Probe

Ali Zadehmohammad^{1*}, Mahdi Rastgari², Mohammad Hojaji³, Seyed Jalil Hoseini⁴

¹ MSc Student Structurs, Department of Civil Engineering, Na.C., Islamic Azad, Najafabad (
a.zadehmohammad@sci.iaun.ac.ir)

² MSc Student Structurs, Department of Civil Engineering, Na.C., Islamic Azad,
Najafabad(mahdirastgari@sci.iaun.ac.ir)³ Assistant Professor Mechanics, Department of Mechanical Engineering,
Na.C., Islamic Azad, Najafabad (*Correspondence: m.hojaji@iau.ac.ir)

⁴ Assistant Professor Structurs, Department of Civil Engineering, Na.C., Islamic Azad,
Najafabad(s.j.hosseini@pci.iaun.ac.ir)

ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research Paper

Received: 30 April 2025

Received in Revised form: 23 July
2025

Accepted: 20 August 2025

Available Online: 03 September
2025

Keywords:

Wind Flow

Wind Tunnel

Twisted Wind

Flow Observation

5-Hole Probe

GRAPHICAL

Given the destructive effects of storms and the importance of their simulation and investigation, this study simulates a specific type of twisted atmospheric boundary layer wind flow in a boundary layer wind tunnel. Considering the high cost and energy consumption of simulation and testing in large-scale tunnels, the aim of this study was to reduce the cost and energy waste by using a small-scale wind tunnel. To assessment the twisted wind flow, two types of simulation systems representing high and extreme twisting of the wind flow were used. The flow conditions were evaluated using a flow observation system, a laboratory hot-wire sensor, and a 5-hole probe capable of measuring parameters such as velocity, turbulence intensity, and twist angle of the flow. Finally, by studying and comparing the profiles of twist angle, velocity, and flow turbulence with previous references, it was shown that by making some changes in the simulator system, a simulation with reasonable accuracy can be performed in a small-scale wind tunnel. So the difference between the velocity and turbulence profiles measured in this study and those reported in previous references was less than 5%. Additionally, for simulators with maximum guidance angles of 15 and 30 degrees, the resulting flow twist angles were 12 and 20 degrees, respectively, with a deviation of less than 2 degrees compared to previous references. Therefore, it can be concluded that the simulation conducted in this study shows a strong agreement with prior simulations that utilized large-scale wind tunnels.

Cite this article: Hojaji, Mohammad, Hoseini ,Seyed Jalil, Zadehmohammad, Ali, Rastgari, Mahdi. Experimental assessment of the Performance of Twisted Wind Flow Simulator in a Small-Scale Boundary Layer Wind Tunnel Using a 5-Hole Probe. Journal of Fluid Mechanics and Aerodynamics 2025; 14 (1): 63-77. DOI: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23223278.1404.14.1.5.8>

بررسی تجربی عملکرد شبیه‌ساز جریان باد پیچ‌خورده در یک تونل باد لایه‌مرزی کوچک‌مقیاس با استفاده از یک پروب ۵ سوراخه

علی زاده محمد^۱، مهدی رستگاری^۲، محمد حجی نجف‌آبادی^{۳*}، سید جلیل حسینی^۴

دانشجوی کارشناسی ارشد سازه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد، نجف‌آباد (mahdirastgari@sci.iaun.ac.ir)

استادیار مکانیک، فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد، نجف‌آباد (نویسنده مسئول: m.hojaji@iau.ac.ir)

استادیار سازه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد، نجف‌آباد (s.j.hosseini@pci.iaun.ac.ir)

دانشجوی کارشناسی ارشد سازه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد، نجف‌آباد (a.zadehmohammad@sci.iaun.ac.ir)

۴

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۰ اردیبهشت ۱۴۰۴

بازنگری: ۰۱ مرداد ۱۴۰۴

پذیرش: ۲۹ مرداد ۱۴۰۴

ارائه آنلاین: ۱۲ شهریور ۱۴۰۴

چکیده

با توجه به تأثیرات مخرب طوفان‌ها و اهمیت شبیه‌سازی و بررسی آن‌ها، در این تحقیق به شبیه‌سازی نوع خاصی از جریان‌های باد لایه‌مرزی اتمسفریک پیچ‌خورده در یک تونل باد لایه‌مرزی پرداخته شده است. با در نظر گرفتن هزینه‌ها و مصرف انرژی بسیار بالای شبیه‌سازی و انجام آزمایش در تونل‌های بزرگ‌مقیاس، هدف از انجام این پژوهش کاهش هزینه‌ها و هدر رفت انرژی با استفاده از یک تونل باد کوچک‌مقیاس بوده است. برای بررسی جریان باد پیچ‌خورده از دو نوع سیستم شبیه‌ساز پیچش ملایم و شدید استفاده شده است. ارزیابی شرایط جریان توسط سیستم آشکارساز جریان (تافت)، حسگر سیم داغ آزمایشگاهی و پروب ۵ سوراخه که قادر به اندازه‌گیری پارامترهایی از جمله سرعت، شدت آشفتگی و زاویه پیچش جریان است صورت گرفته است. در نهایت بررسی و مقایسه پروفیل‌های زاویه پیچش، سرعت و آشفتگی جریان با مراجع قبلی نشان داد که با ایجاد برخی تغییرات در سیستم شبیه‌ساز می‌توان یک شبیه‌سازی با دقت مناسب در تونل باد کوچک‌مقیاس انجام داد. به‌طوری‌که اختلاف پروفیل سرعت و آشفتگی جریان اندازه‌گیری شده در تحقیق حاضر با پروفیل‌های ارائه‌شده در مراجع قبلی کمتر از ۵ درصد بوده است. همچنین، زاویه پیچش جریان برای شبیه‌سازهای با حداکثر زاویه هدایت ۱۵ و ۳۰ درجه به ترتیب برابر ۱۲ و ۲۰ درجه بوده که اختلاف آن با مراجع قبلی کمتر از ۲ درجه است. در نتیجه می‌توان گفت شبیه‌سازی انجام‌شده در این تحقیق تطابق بسیار خوبی با شبیه‌سازی‌های انجام‌شده در مراجع قبلی که در آن‌ها از تونل‌های بزرگ‌مقیاس استفاده شده بود، داشته است.

کلیدواژه‌ها:

جریان باد

تونل باد

جریان باد پیچ‌خورده

مشاهده جریان

پروب ۵ سوراخه

استناد: حجی نجف‌آبادی، محمد، حسینی، سید جلیل، علی زاده، محمد، رستگاری، مهدی. بررسی تجربی عملکرد شبیه‌ساز جریان باد پیچ‌خورده در یک تونل باد لایه‌مرزی کوچک‌مقیاس با استفاده از یک پروب ۵ سوراخه. مکانیک سیالات و آیرودینامیک (۱۴۰۴): ۱۴ (۱): ۶۳-۷۷.

DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23223278.1404.14.1.5.8>



نویسندگان.

ناشر: دانشگاه جام امام حسین (ع).

۱- مقدمه

به‌طور کلی مخاطرات طبیعی از جمله طوفان، سیل و زلزله موجب تعادل چرخه حیات زمین هستند. عدم آمادگی در مواجهه با این مخاطرات می‌تواند باعث اثرات زیان‌باری بر زندگی انسان‌ها و حتی دیگر موجودات زنده شود. این نیروها می‌توانند باعث خرابی زیرساخت‌ها از جمله ساختمان‌ها و پل‌ها شده و تبدیل به یک فاجعه شوند [۱]. این طوفان‌ها حتی می‌توانند بر سازه‌های تولید انرژی بادی نیز تأثیرات قابل‌توجهی داشته باشند [۲]، [۳] و [۴]. بنابراین، پژوهشگران برای شناسایی و کاهش اثرات ناشی از وقوع این حوادث، به بررسی رفتار آن‌ها در آزمایشگاه پرداخته و با شبیه‌سازی آن‌ها سعی در پیشگیری و حتی در مواقعی پیش‌بینی آن‌ها دارند [۵] و [۶]. به‌طور خاص در موضوع طوفان‌ها محققین از تونل‌های باد برای شبیه‌سازی جریان‌ات باد استفاده می‌کنند.

از مهم‌ترین پژوهش‌ها در زمینه تونل باد پژوهش‌های کوزمار است. در یکی از این پژوهش‌ها به بررسی اثر پارامترهای مختلف جهت به دست آوردن مقیاس جریان لایه‌مرزی پرداخته شده است. در این آزمایش سه مدل لایه‌مرزی شهری در یک تونل باد بررسی شده‌اند. نتایج این پژوهش به‌صورت پروفیل‌های سرعت، آشفتگی، تنش رینولدز و طیف قدرت انرژی ارائه شده است [۷]. کوزمار در یکی دیگر از پژوهش‌های خود به بررسی تأثیر تراکم ساختمان‌ها در مناطق روستایی و حومه شهری بر جریان لایه‌مرزی پرداخته است. وی در این پژوهش دریافت که با کوچک‌تر شدن فاصله بین ساختمان‌ها، آشفتگی جریان به دلیل افزایش اصطکاک بین جریان هوا و سطح بیشتر شده درحالی‌که سرعت میانگین جریان باد کمتر شده است [۸].

به‌عنوان یکی از مخرب‌ترین طوفان‌ها می‌توان به طوفان پیچ‌خورده اشاره کرد. طوفان پیچ‌خورده به دلیل اعمال یک کویل نیرو که در خلاف جهت یکدیگر به المان‌های مقابل خود وارد می‌کند، می‌تواند باعث خرابی‌هایی در ابعاد بسیار وسیع شود. در نظر گرفتن اثر بادهای پیچ‌خورده در آزمایش‌های تونل باد اولین بار توسط فلی و همکاران با آزمایش‌هایی بر روی آئرو دینامیک بادبان آغاز شد. در این پژوهش با قرار دادن پره‌های طراحی‌شده در قسمت‌های بالادست سازه یکی از اولین تلاش‌های موفقیت‌آمیز برای شبیه‌سازی بادهای پیچ‌خورده انجام شد که با اندازه‌گیری‌های میدانی مطابقت خوبی داشت [۹] و [۱۰].

مندنهال به طور آماری اثر جریان باد پیچ‌خورده ناشی از گردآیدان حرارتی افقی و پایداری حرارتی را تجزیه و تحلیل و مشخص کرد که زاویه چرخش باد بر روی اقیانوس‌ها حدود ۱۰ درجه و بر روی خشکی حدود ۲۰ درجه است [۱۱].

تام ورا و همکاران ویژگی‌های باد در ساحلی در ژاپن را مطالعه نمودند که با استفاده از یک سری صفحات خورشیدی مشاهده

کردند که زاویه پیچش باد در ارتفاعات بین ۵۰ تا ۳۴۰ m حدود ۲۰ درجه است [۱۲].

تسه و همکاران به بررسی شبیه‌سازی بادهای پیچ‌خورده در تونل باد لایه‌مرزی برای آزمایش‌ها جریان باد در سطح عابر پیاده پرداختند. در این پژوهش با استفاده از شبیه‌سازهای چوبی، پروفیل باد پیچ‌خورده با زاویه‌های پیچش ۱۵ و ۳۰ درجه شبیه‌سازی شد. نتایج این پژوهش نشان داد که این بادهای تغییراتی اساسی در الگوی سرعت باد در اطراف سازه‌های تکی و ردیفی ایجاد کرده و تحلیل شرایط باد محیطی را تحت تأثیر قرار می‌دهند [۱۳].

تسه در همین زمینه نشان داد عرض معابر تأثیر بیشتری نسبت به ارتفاع ساختمان‌ها در تغییر سرعت باد دارد. نتایج این تحقیق به برنامه‌ریزان شهری کمک می‌کند تا شرایط باد در مناطق مسکونی فشرده را بهتر درک و مدیریت کنند [۱۴].

یان و همکاران به بررسی تأثیر بادهای پیچ‌خورده بر ساختمان‌های فوق بلند (تا ۵۰۰ m) از طریق آزمایش تونل باد پرداختند. یافته‌های آن‌ها نشان می‌دهد که بادهای پیچ‌خورده تأثیر قابل‌توجهی بر فشار و نیروی باد در ارتفاعات مختلف دارند، اما تغییر چشمگیری در مقادیر حداکثر بار و فشار ایجاد نمی‌کنند. این نتایج برای طراحی مقاوم به باد سازه‌های بلند مفید است [۱۵].

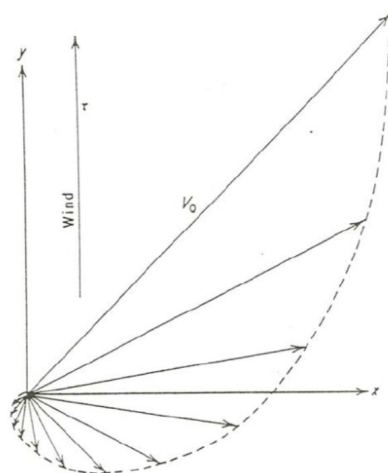
با توجه به اینکه تمام پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه طوفان پیچ‌خورده در تونل‌هایی با ابعاد حدود ۴ تا ۵ m انجام گرفته و با در نظر گرفتن هزینه‌ها و مصرف انرژی بسیار بالای انجام آزمایش در تونل‌های بزرگ‌مقیاس، به‌منظور کاهش هزینه‌ها و هدر رفت انرژی، در این پژوهش یک چیدمان مشخص برای شبیه‌سازی رفتار جریان باد پیچ‌خورده در یک تونل باد لایه‌مرزی کوچک‌مقیاس ارائه گردیده است. همچنین، با بررسی پارامترهایی از جمله فاصله المان‌های شبیه‌ساز با یکدیگر و فاصله اولین المان با دیواره تونل، میزان مطابقت ویژگی‌های جریان ایجادشده در تونل باد کوچک‌مقیاس با تونل‌های بزرگ‌مقیاس بررسی و چیدمان مناسب برای این منظور ارائه شد.

۲- مشخصات جریان باد پیچ‌خورده

در جریان‌ات باد و طوفان‌ها بر اساس اینکه راستای جریان باد لایه‌مرزی با نزدیک شدن به سطح زمین دچار تغییر شود، پروفیل باد را می‌توان به دودسته باد معمولی (CWP)^۱ و باد پیچ‌خورده (TWP)^۲ طبقه‌بندی کرد [۱۳]. TWP به پروفیل بادی اشاره دارد که در آن سرعت و جهت باد به‌طور مداوم نسبت به ارتفاع از

^۱ Conventional Wind Profile

^۲ Twisted Wind Profile



شکل (۱): مارپیچ اکمن [۱۹]

۴- تجهیزات آزمایشگاهی

۴-۱- شبیه‌ساز جریان باد لایه‌مرزی

جهت شبیه‌سازی باد لایه‌مرزی از تونل باد لایه‌مرزی مدارباز واقع در مرکز تحقیقات هوافضا و تبدیل انرژی دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد استفاده شده است. طول محفظه آزمایش این تونل برابر ۳۲۰۰ mm و عرض و ارتفاع آن برابر ۴۵۰ mm است که به‌منظور ایجاد جریانی یکنواخت و یکدست در آن از ۸ لایه توری و یک ردیف لانه‌زنبوری استفاده شده است. در این تونل از یک فن مکنده با قطر ۸۰۰ mm جهت ایجاد جریان باد استفاده شده است. لازم به ذکر است که به‌واسطه این‌تورتر نصب‌شده بر روی فن، سرعت جریان درون تونل باد تا حدود ۲۰ m/s قابل تغییر است. همچنین، شدت آشفته‌گی کلی تونل در حدود ۰/۳ درصد است.

۴-۲- سیستم تولید جریان باد پیچ‌خورده

جهت شبیه‌سازی جریان باد پیچ‌خورده در تونل باد لایه‌مرزی، از المان‌هایی از جنس پلاستیک فشرده که با پریتر سه‌بعدی ساخته شده‌اند استفاده شده است. این المان‌ها دارای ارتفاع ۳۰۰ mm، طول ۲۰۰ mm و ضخامت ۶ mm هستند. المان‌های مذکور برای ایجاد پیچش در جریان باد در وجه پشت به باد دارای انحنا هستند. این منحنی با توجه به منحنی اکمن که در مطالعات پیشین نیز استفاده شده، طراحی و مدل‌سازی شده است. در سیستم تولید جریان باد پیچ‌خورده از دو نوع زاویه پیچش استفاده شده است. نمونه اول شامل پره‌هایی با زاویه پیچش ۳۰ درجه (شکل‌های (۲-الف و ۳-الف)) و دیگری شامل پره‌هایی با زاویه پیچش ۱۵ درجه (شکل‌های (۲-ب و ۳-ب)).

سطح زمین تغییر می‌کند. باد پیچ‌خورده معمولاً در لایه‌مرزی اتمسفر (ABL)^۱ و شرایط آب‌وهوایی شدید مانند طوفان‌ها و همچنین در مجموعه زمین‌های کوهستانی رخ می‌دهد [۱۶]. هنگام تلاش برای مدل‌سازی لایه‌مرزی اتمسفر، اکثر مطالعات گذشته جهت باد را نسبت به ارتفاع از سطح زمین ثابت فرض کرده‌اند. باین حال همان‌طور که توسط مدل‌های ریاضی و مشاهدات میدانی تأیید می‌شود، جهت افقی جریان‌های باد طبیعی نسبت به ارتفاع از سطح زمین متفاوت است. این تغییر در جهت باد در درجه اول به اثرات ترکیبی چرخش زمین و سپس به اصطکاک سطح زمین نسبت داده شده است [۱۷]. نهایتاً این جریان منجر به ایجاد باد مارپیچ شکلی در لایه‌مرزی اتمسفر شده که معمولاً به‌عنوان مارپیچ اکمن شناخته می‌شود. میانگین انحراف جهت باد مارپیچ اکمن^۲ حدود ۲۰ درجه است، اما می‌تواند بین ۱۰ تا ۳۰ درجه در شرایط خاصی در لایه‌مرزی تغییر کند که معمولاً ارتفاع آن ۱ تا ۱/۵ km است [۱۸]. همچنین، جریان‌های باد پیچ‌خورده ناشی از توپوگرافی نیز به دلیل فراوانی کوه‌ها مشاهده می‌شوند. پروفیل‌های باد پیچ‌خورده مشاهده شده با زوایای پیچش باد بزرگ‌تر، به ۵۰۰ m پایین‌تر جو محدود می‌شوند؛ بنابراین ممکن است اثرات قابل توجهی هم بر سازه‌های ساختمانی و هم بر شرایط باد نزدیک به زمین تحمیل کنند [۱۳].

۳- ویژگی‌های مارپیچ اکمن

بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که برای شبیه‌سازی جریان باد پیچ‌خورده در تونل باد لایه‌مرزی از منحنی اکمن استفاده شده است [۱۳]، [۱۴] و [۱۵]. با بررسی منحنی اکمن می‌توان متوجه شد که مؤلفه افقی جریان (مؤلفه‌ای که موازی سطح است) با تغییر ارتفاع از سطح دچار پیچش می‌شود. مارپیچ اکمن نتیجه تعادل نیروی ایجادشده توسط نیروی تنش برشی، نیروی کوریولیس و اصطکاک است. بررسی‌ها نشان داده که مارپیچ اکمن در اقیانوس‌ها نیز وجود دارد. در سطح اقیانوس که نیروی تنش برشی با نیروی تنش باد مطابقت دارد و در کف اقیانوس که نیروی تنش برشی در اثر اصطکاک با کف اقیانوس ایجاد می‌شود. این پدیده برای اولین بار توسط اقیانوس‌شناس نروژی فریتسوف نانسن^۳ در طول سفر خود در سطح اقیانوس مشاهده شد. شاگرد او، اقیانوس‌شناس سوئدی واگن والفرید اکمن^۴، اولین کسی بود که این فرایند را به‌صورت فیزیکی توضیح داد [۱۹]. شکل (۱) پروفیل سرعت جریان را نسبت به عمق نشان می‌دهند.

^۱ Atmospheric Boundary Layer

^۲ Ekman

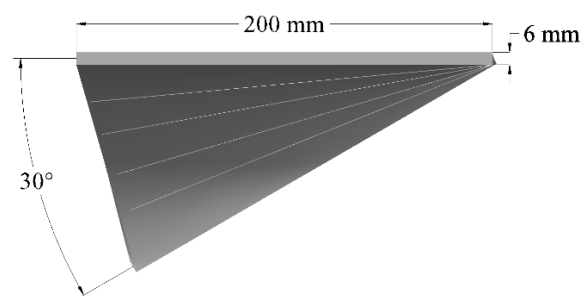
^۳ Fridtjof Nansen

^۴ Vagn Walfrid Ekman

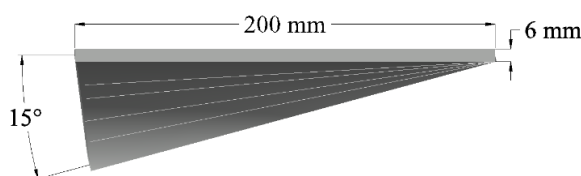
خمیر و چسب در لبه‌های جلو و عقب تخته به‌صورت رمپ (سطح شیب‌دار) تغییر شکل ایجاد شد.



شکل (۴): شبیه‌ساز جریان باد پیچ‌خورده با پیچش ۳۰ درجه



الف) شبیه‌ساز ۳۰ درجه



ب) شبیه‌ساز ۱۵ درجه

شکل (۲): نمای بالا از شبیه‌سازهای ۱۵ و ۳۰ درجه

۴-۳- مدل ساختمان بلند

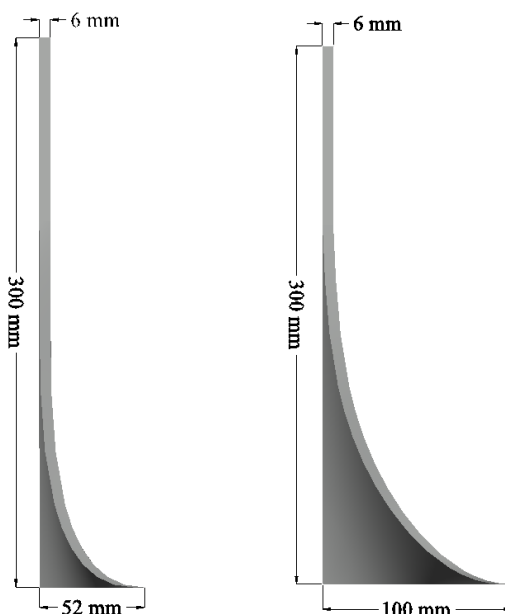
به‌منظور بررسی اثرات جریان پیچ‌خورده بر یک ساختمان بلندمرتبه از یک مدل ساختمانی با مقطع مربع استفاده شد. مدل مذکور دارای طول و عرض ۳۰ mm و ارتفاع ۱۸۰ mm بوده که با استفاده از پرینتر ۳ بعدی ساخته‌شده است. مدل ساختمان دارای ۶۰ سوراخ فشار بوده که برای استخراج داده‌های تونل مورد استفاده قرار گرفته است.

۴-۴- حس‌گر فشار

در این پژوهش جهت استخراج داده‌ها از تونل باد، از ۵ حس‌گر فشار HCXPM010D6H-0612 با محدوده اندازه‌گیری ۱۰۰۰ Pa استفاده شده است. این سانسورها اختلاف فشار وارده را نسبت به فشار اتمسفر با دقت ۰/۱۵ درصد در مقیاس کلی استخراج کرده و به‌وسیله پردازنده ۱۲ بیتی به رایانه انتقال می‌دهند. پیش از آنکه از این سانسورها استفاده شود، فرآیند کالیبراسیون آن‌ها به‌وسیله یک مانومتر انجام شده است.

۴-۵- حس‌گر سیم داغ^۱

به دلیل توانایی حس‌گر سیم داغ در داده‌برداری با دقت بالا، در این پژوهش برای محاسبه پروفیل سرعت و آشفتگی جریان از حس‌گر سیم داغ آزمایشگاهی استفاده شده است. این حس‌گر دارای یک رشته سیم بسیار نازک به قطر حدود ۵ میکرومتر بوده که از جنس تنگستن است. برای تبدیل داده‌های آنالوگ به دیجیتال حس‌گر سیم داغ به کارت داده‌برداری ۱۶ بیتی متصل شده است.



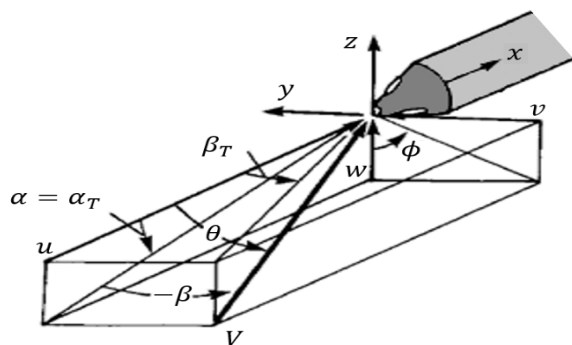
الف) شبیه‌ساز ۳۰ درجه ب) شبیه‌ساز ۱۵ درجه

شکل (۳): نمای روبرو از شبیه‌سازهای ۱۵ و ۳۰ درجه

همان‌طور که در شکل (۴) قابل مشاهده است، در هریک از این سامانه‌ها از سه المان شبیه‌ساز استفاده شده است. در این تحقیق به بررسی اثر فاصله بین پره‌ها و فاصله آن‌ها با دیواره تونل بر پروفیل سرعت جریان پرداخته شده است. این سامانه‌ها به صورتی در تونل قرار داده شده‌اند که سمت منحنی شکل آن‌ها پشت به جریان باد باشد. لازم به ذکر است که برای تنظیم فاصله بین پره‌ها از یک تخته چوب به ضخامت ۵ mm استفاده شده است که در زمان انجام آزمایش‌ها به‌منظور یکنواختی جریان، با استفاده از

^۱ Hot Wire

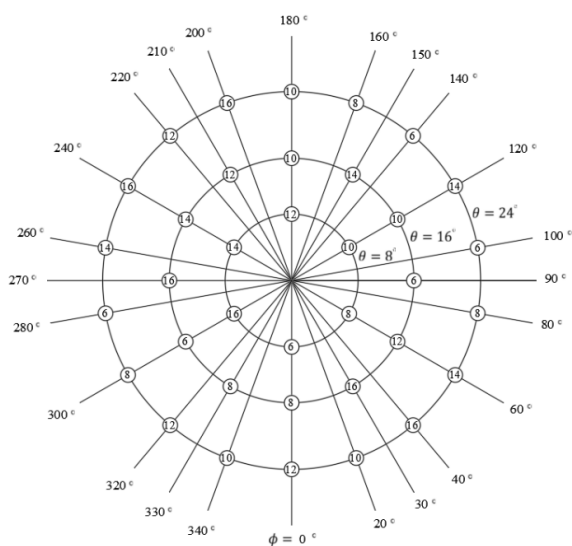
$$C_{\alpha_T} = \frac{P_3 - P_1}{P_5 - P_{1-4}} \quad (1)$$



شکل (۶): نحوه قرارگیری پروب در زوایای مختلف

جدول (۱): تبدیل مختصات قطبی به کارتزین

Conventional	Polar	Tangent
$u = V \cos \alpha \cos \beta$	$u = V \cos \theta$	$\alpha_T = \arctan \frac{w}{u}$
$v = -V \sin \beta$	$v = V \sin \theta \sin \phi$	$\beta_T = \arctan \frac{v}{u}$
$w = V \sin \alpha \cos \beta$	$w = V \sin \theta \cos \phi$	



شکل (۷): زوایه‌ها و سرعت‌های مورد استفاده در فرایند کالیبراسیون

پروب ۵ سوراخه

$$C_{\beta_T} = \frac{P_4 - P_2}{P_5 - P_{1-4}} \quad (2)$$

$$C_o = \frac{P_5 - P_t}{P_5 - P_{1-4}} \quad (3)$$

$$C_q = \frac{P_5 - P_{1-4}}{P_t - P_5} \quad (4)$$

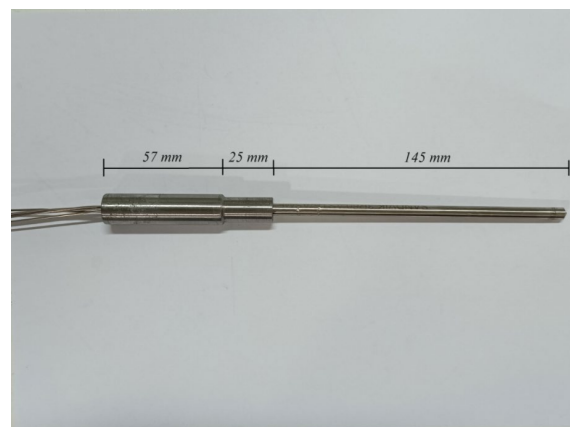
$$\frac{1}{2} \rho V^2 = \frac{P_5 - P_{1-4}}{C_q} \quad (5)$$

در روابط (۱) تا (۵)، P_t فشار به‌دست‌آمده از سوراخ نام، P_{1-4} میانگین فشار سوراخ‌های کناری (سوراخ‌های ۱ تا ۴)، P_t فشار کل جریان، P_5 فشار استاتیک جریان، ρ چگالی هوای آزاد و V

لازم به ذکر است که قبل از استفاده از این حس‌گر، کالیبراسیون آن به‌وسیله حس‌گر سیم داغ دیجیتال ساخت شرکت کیمو و پروب‌های پیتو و استاتیک استاندارد انجام شده است.

۴-۶- پروب پنج سوراخه^۱

پروب ۵ سوراخه دارای طول ۲۲۷ mm و قطر ۶ mm است. با این پروب سرعت جریان، درصد آشفستگی (که نحوه محاسبه آن در ادامه همین تحقیق ذکر شده است) و همچنین زاویه پیچش طولی و عرضی جریان پیچ‌خورده محاسبه شده است. پروب ۵ سوراخه مورد استفاده در این تحقیق در شکل (۵) قابل مشاهده است. برای استفاده از پروب ۵ سوراخه ابتدا باید آن را کالیبره کرد.



شکل (۵): پروب ۵ سوراخه

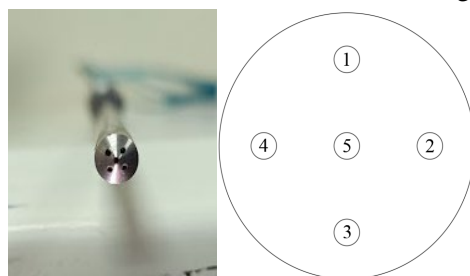
برای انجام فرایند کالیبراسیون، پروب ۵ سوراخه بر روی یک سیستم دوار نصب شده که با استفاده از آن می‌توان پروب را با دقت یک درجه در هر زاویه دلخواه نسبت به راستای جریان قرارداد. نحوه قرارگیری پروب در زوایای مختلف در شکل (۶) قابل مشاهده است. لازم به ذکر است که برای تبدیل زوایه‌های ϕ و θ به زوایه‌های α و β از جدول (۱) استفاده شده است. α زاویه جریان نسبت به امتداد عرضی تونل و β زاویه جریان نسبت به امتداد طولی تونل است.

در این پژوهش برای کالیبراسیون پروب ۵ سوراخه از ۲۴ حالت زاویه ϕ ، ۳ حالت زاویه θ و ۶ سرعت جریان متفاوت استفاده شده است. به‌طوری‌که در هر آزمایش حداقل یکی از پارامترهای θ ، ϕ و یا V با دیگر آزمایش‌ها متفاوت است. زوایه‌ها و سرعت‌های مورد استفاده در فرایند کالیبراسیون در شکل (۷) قابل مشاهده می‌باشند.

سپس با استفاده از داده‌های خروجی و معادلاتی که در ادامه بیان شده، ضرایب کالیبراسیون این پروب به‌دست‌آمده است.

^۱ 5 Hole Probe

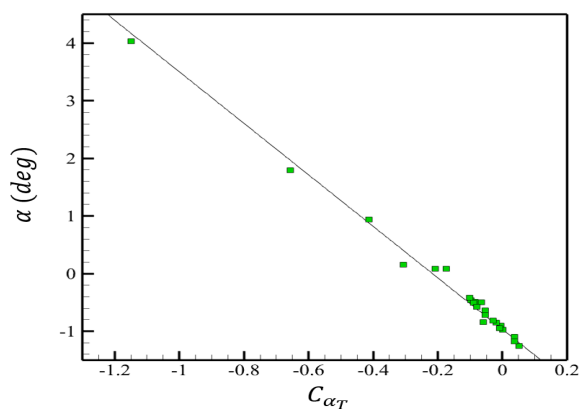
سرعت جریان آزاد است. نحوه شماره‌گذاری سوراخ‌ها در شکل (۸) قابل‌مشاهده است.



شکل (۸): نحوه شماره‌گذاری سوراخ‌های پروب ۵ سوراخه

جدول (۲): ضرایب کالیبراسیون پروب ۵ سوراخه

K_α	K_β	K_o	K_q
-۱/۱۰۳۳۰۹	۲/۱۶۱۸۲۲۲	-۰/۲۱۸۱۳۴	۰/۲۲۵۳۲۱۳
-۴/۹۸۷۰۷۹	۰/۵۰۴۹۱۸۵	۰/۰۵۳۵۳۲۴	۰/۰۱۰۹۲۳۴
۰/۳۰۵۰۱۸۲	۵/۸۹۳۵۳۲۶	۰/۰۱۵۹۱۹۴	۰/۰۰۱۰۴۱۷
-۰/۲۷۳۸۱۳	۰/۰۳۱۸۴۵۷	-۰/۰۶۵۲۳۴	-۰/۰۰۱۵۴۳
۰/۰۴۷۴۸۳۹	۰/۲۴۵۴۲۲۱	۰/۰۰۹۷۴۶۸	۰/۰۰۱۰۸۰۶
۰/۰۳۲۰۰۱۷	-۰/۰۰۶۰۱۸	-۰/۰۶۹۹۴۳	-۰/۰۰۲۱۸۶
-۰/۰۰۸۸۳۳	-۰/۰۰۵۵۱۷	-۰/۰۰۲۸۲۱	-۰/۰۰۰۱۱۰
۰/۰۰۵۵۶۳۹	-۰/۰۰۳۰۶۶۲	-۰/۰۰۱۱۸۲	۰/۰۰۰۰۲۶۴
۰/۰۳۶۰۲۱۴	۰/۰۰۵۸۰۷۸	-۰/۰۰۳۵۶۹	-۰/۰۰۰۱۶۲
۰/۰۰۱۰۸۰۸	-۰/۰۰۴۶۷۵۱	-۰/۰۰۱۵۶۴	-۰/۰۰۰۰۳۱
-۰/۰۰۰۱۰۱	-۰/۰۰۰۴۱۸	-۰/۰۰۰۰۵۸	-۰/۰۰۰۰۰۲
-۰/۰۰۰۰۶۱	-۰/۰۰۰۰۳۷۳	۰/۰۰۰۰۱۲۳	۰/۰۰۰۰۰۱۴
$C_{\alpha T_1}$	$C_{\beta T_1}$	$C_{\alpha T_1} C_{\beta T_1}$	$C_{\beta T_1}^2$
۱/۰۰۳۹۴۸	۰/۰۰۳۶۴۵۲	۰/۰۰۲۲۶۲	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰
$C_{\alpha T_2}$	$C_{\beta T_2}$	$C_{\alpha T_2} C_{\beta T_2}$	$C_{\beta T_2}^2$
۰/۰۰۰۰۴۹۷۸	۰/۰۰۰۰۴۱۸۹	-۰/۰۰۰۰۴۹۶۰	-۰/۰۰۰۰۰۰۰۰
۱	$C_{\alpha T_m}$	$C_{\beta T_m}$	$C_{\alpha T_m} C_{\beta T_m}$
۰/۰۰۰۰۴۱۸۶	-۰/۰۰۰۰۴۱۸۶	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰



شکل (۹): مقایسه مقادیر C_{α_T} و α

در ادامه برای محاسبه ضرایب کالیبره در رابطه (۶) بجای A_i از مقادیر واقعی α ، β و یا سرعت واقعی تونل استفاده شده است.

$$A_i = \begin{bmatrix} K_1^A + K_2^A C_{\alpha_T} + K_3^A C_{\beta_T} + K_4^A C_{\alpha_T}^2 + \\ K_5^A C_{\alpha_T} C_{\beta_T} + K_6^A C_{\beta_T}^2 + K_7^A C_{\alpha_T}^3 + K_8^A C_{\alpha_T}^2 C_{\beta_T} + \\ K_9^A C_{\alpha_T} C_{\beta_T}^2 + K_{10}^A C_{\beta_T}^3 + K_{11}^A C_{\alpha_T}^4 + K_{12}^A C_{\alpha_T}^3 C_{\beta_T} \\ + K_{13}^A C_{\alpha_T} C_{\beta_T}^3 + K_{14}^A C_{\alpha_T}^2 C_{\beta_T}^2 + K_{15}^A C_{\beta_T}^4 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_m \end{bmatrix} = \quad (7)$$

$$[K] = [C^T C]^{-1} [C^T] [A] \quad (8)$$

بدین ترتیب همان‌طور که در جدول (۲) قابل‌مشاهده است، ضرایب کالیبراسیون K_α ، K_β ، K_o و K_q برای استخراج مقادیر α ، β و سرعت تونل به‌دست‌آمده است.

۱-۶-۴- آنالیز عدم قطعیت

خطای اندازه‌گیری زوایای محاسبه‌شده توسط پروب ۵ سوراخه در راستای طولی و عرضی تونل با استفاده از رابطه (۹) محاسبه‌شده است. در این رابطه E_α خطای محاسباتی زاویه α ، α_{est} مقدار زاویه α تخمین زده‌شده، α_{ex} مقدار زاویه محاسبه‌شده توسط پروب و n تعداد آزمون‌های انجام‌شده است.

$$E_\alpha = \sqrt{\frac{\sum (\alpha_{est} - \alpha_{ex})^2}{n}} \quad (9)$$

پس از انجام آزمایش‌های با استفاده از رابطه (۹) به محاسبه خطای اندازه‌گیری پرداخته شد. مقدار خطای زاویه α و β به ترتیب برابر ۰/۷ و ۰/۷۸ درجه اندازه‌گیری شده است.

در شکل‌های (۹) تا (۱۲) رابطه بین زوایای جریان محاسبه‌شده توسط پروب ۵ سوراخه با C_{α_T} و C_{β_T} (روابط ۱ و ۲) انجام‌شده است.

α و β را نمایندگی نمایند. البته همان‌طور که در رابطه (۶) ذکر شد، از یک رابطه با درجه ۴ برای تخمین α و β از روی ضرایب α و β استفاده شده است.

۷-۴- آشکارسازی جریان

ساده‌ترین روش برای آشکارسازی جریان، قرارداد نخ‌های سبک در مقطع موردنظر است. این نخ‌ها باید سبک و انعطاف‌پذیر باشند و لختی آن‌ها طوری باشد که بتوانند خود را تا حد زیادی با جهت جریان مطابقت دهند. ماده‌ای که معمولاً استفاده می‌شود نخ تاییده سبک با وزن و طول سازگار با سرعت آزمایش است. در این آزمایش از نخ پلی‌استر به رنگ مشکی استفاده شده چون به‌اندازه کافی لخت بوده و جهت جریان را به خود می‌گیرد. نخ پلی‌استر نخی پُر تاب است که بر اثر حرکت جریان هوا بر روی آن تاب‌های آن باز نشده و رشته، رشته نمی‌شود. همچنین، قطر آن به‌اندازه‌ای است که می‌تواند خطوط جریان را نشان دهد. در این آزمایش از نخ‌های ۴۰ تا ۵۰ mm استفاده شده که با فواصل ۱۰ mm بر روی یک سیم فلزی چسبانده شده‌اند.

۵- نتایج و بحث

در این بخش نتایج آزمایش‌های برای دو سیستم شبیه‌ساز ارائه و در ادامه به مقایسه این نتایج پرداخته شده است.

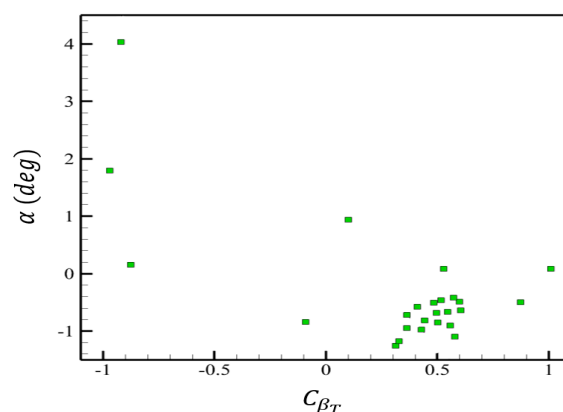
۵-۱- مشاهده جریان

۵-۱-۱- بررسی زوایا در امتداد طولی و عرضی تونل

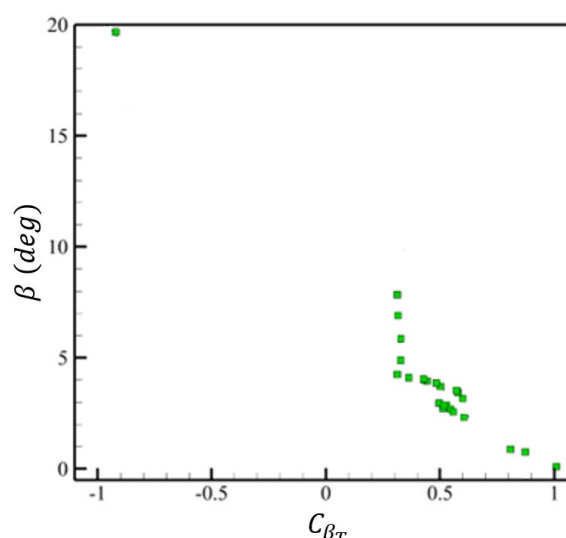
برای شبیه‌سازی و مشاهده جریان پیچ‌خورده در تونل باد لایه‌مرزی پس از نصب سیستم شبیه‌ساز باد و تافت‌ها در پایین‌دست آن، با انجام چند آزمایش به مشاهده جریان پرداخته شد. برای انجام هر آزمایش سیم فلزی حامل تافت‌ها در امتداد جریان تونل از سیستم شبیه‌ساز جریان باد دور شد. در ابتدا تافت‌ها در فاصله ۵۰ mm از شبیه‌ساز جریان قرار داشته‌اند. سپس در هر آزمایش تافت‌ها به مقدار ۵۰ mm از سیستم شبیه‌ساز فاصله گرفته تا در نهایت آخرین آزمایش در فاصله ۴۰۰ mm انجام گرفته، سیم نگه‌دارنده تافت‌ها در فاصله ۲۰ mm از کف تونل قرار داشته است. شکل (۱۳) نشان‌دهنده چند نمونه از آزمایش‌های مشاهده جریان انجام‌شده با تافت است.

در شکل‌های (۱۴) و (۱۵) زاویه تک‌تک تافت‌ها با امتداد طولی تونل (راستای جریان) قابل‌مشاهده است. در این شکل‌ها D فاصله

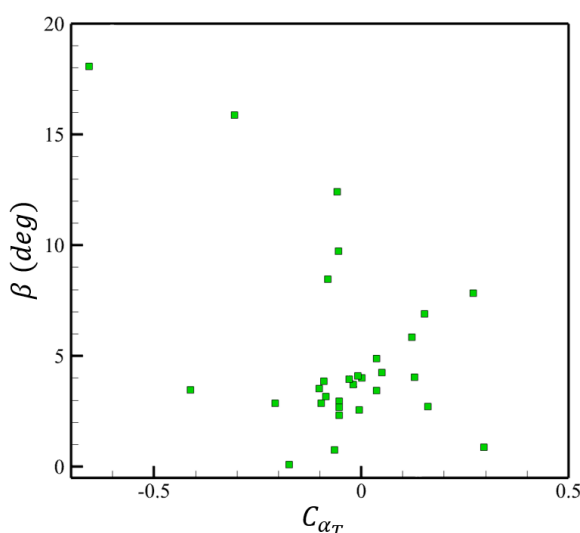
نخ‌ها از سیستم شبیه‌ساز، γ زاویه پیچش سیستم شبیه‌ساز، β زاویه پیچش جریان در امتداد طولی تونل و Tunnel Width عرض تونل است. در این شکل‌ها به‌منظور درک بهتر رفتار جریان



شکل (۱۰): مقایسه مقادیر C_{β_T} و α

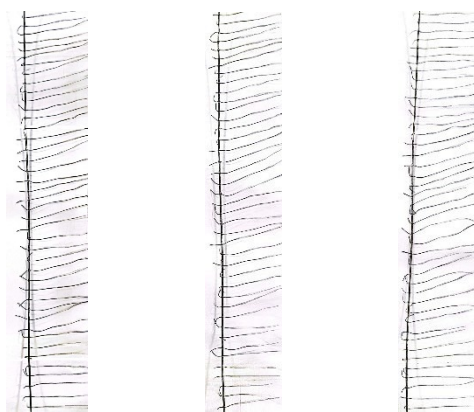


شکل (۱۱): مقایسه مقادیر C_{β_T} و β

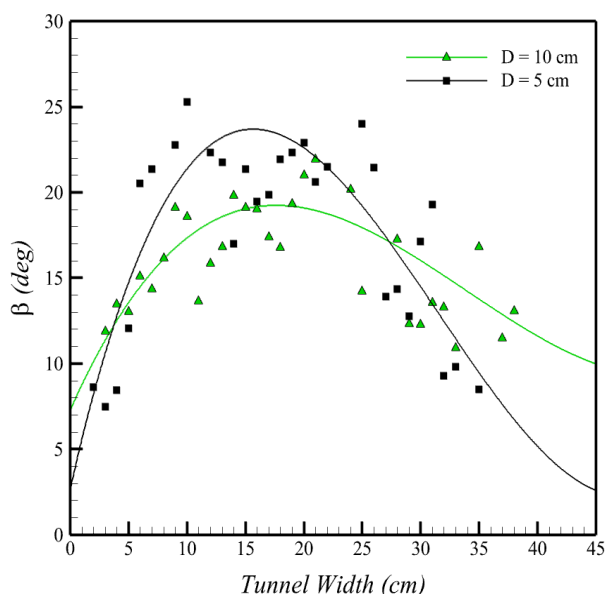


شکل (۱۲): مقایسه مقادیر C_{α_T} و β

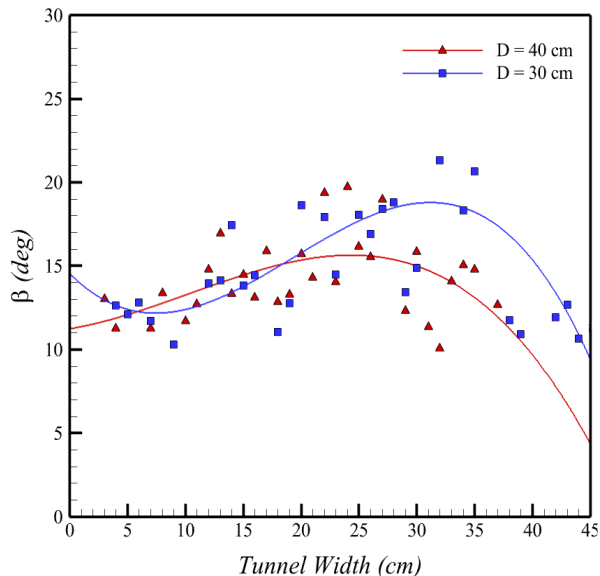
از شکل‌های (۹) تا (۱۲) مشخص است که α تابعی از C_{α_T} و β نیز تابعی از C_{β_T} است؛ اما α با C_{β_T} و β با C_{α_T} رابطه خاصی ندارد. در نتیجه می‌توان گفت C_{β_T} و C_{α_T} به‌خوبی می‌توانند مقادیر



شکل (۱۳): آزمایش مشاهده جریان (تافت) با شبیه‌ساز ۳۰ درجه
 ج) ۲۰۰ mm د) ۳۰۰ mm ه) ۳۵۰ mm

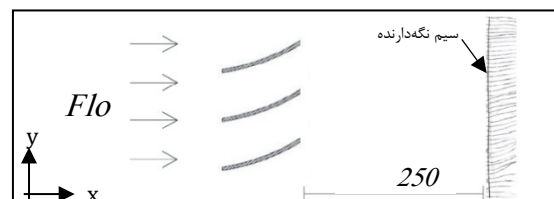


الف) زاویه تافت‌ها در فاصله ۵ و ۱۰ cm از شبیه‌ساز

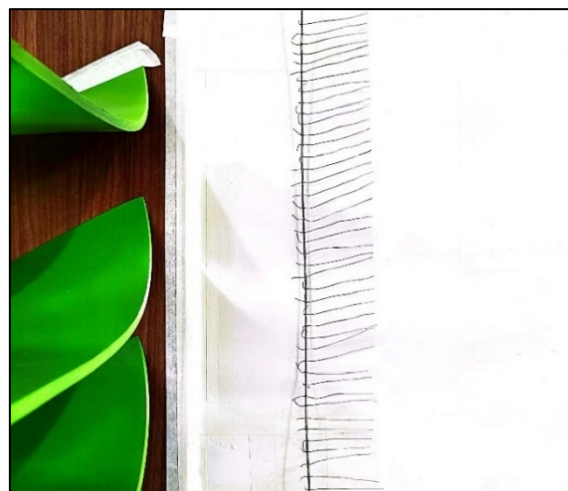


ب) زاویه تافت‌ها در فاصله ۳۰ و ۴۰ cm از شبیه‌ساز
 شکل (۱۴): زوایای مشاهده‌شده در شبیه‌ساز ۳۰ درجه

در عرض تونل یک منحنی درجه ۳ روی داده‌های به‌دست‌آمده از تافت‌ها برازش شده است. برای اندازه‌گیری زاویه تافت‌ها، در هر آزمایش یک عکس مطابق شکل (۱۲) به‌صورت عمودی از محفظه آزمایش تونل گرفته شد. سپس با استفاده از نرم‌افزار پردازش تصویر Get Data مختصات نقطه ابتدا و انتهای هر نخ روی صفحه آزمایش مشخص گردید. سپس با داشتن مختصات ابتدا و انتهای هر نخ، شیب خط بین دو نقطه، نسبت به محور طولی تونل مشخص شد. این نتایج نشان می‌دهد که به‌طور کلی زاویه عرضی جریان در کنار دیواره‌ها به دلیل اثرات دیواره به مقدار قابل‌ملاحظه‌ای از مقادیر آن در میانه تونل کمتر است. به نظر می‌رسد که نرخ تغییرات زاویه عرضی بافاصله گرفتن از شبیه‌ساز کاهش یافته است. این نشان می‌دهد که اثرات تلاطم ایجادشده ناشی از برخورد جریان به دیواره‌ها در نزدیکی شبیه‌ساز، بافاصله گرفتن از آن کاهش یافته است. همچنین، مشاهده می‌شود که میزان پیچش جریان بافاصله گرفتن از سامانه تولید جریان پیچ‌خورده کاهش معناداری نداشته است. موارد مذکور در هر دو سامانه شبیه‌ساز قابل‌مشاهده است. البته، در شبیه‌ساز ۳۰ درجه، اثرات مذکور نمایان تر است.



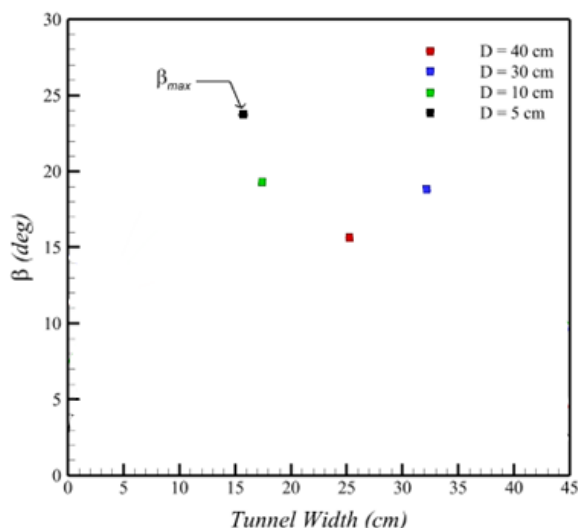
الف) شما تیک محفظه آزمایش تونل باد



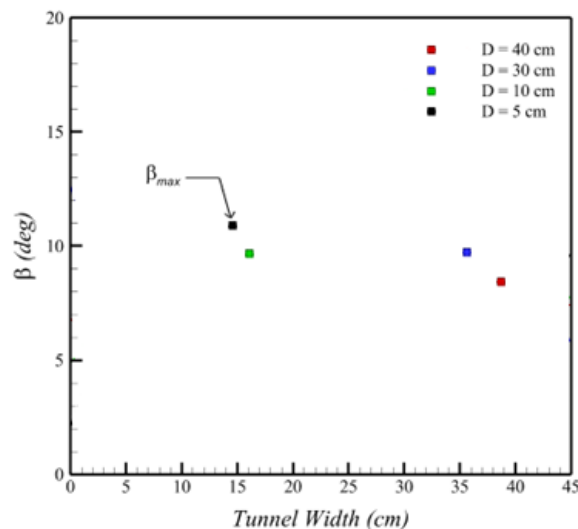
ب) سیم نگهدارنده تافت قرار گرفته در فاصله ۱۰۰ mm از پره‌های شبیه‌ساز

۱۵۰ استفاده شده که در شکل (۱۷) با پارامتر d نشان داده شده است. سیستم آشکارساز جریان (تافت) در فاصله ۲۰ mm از کف تونل نصب و برای آزمایش‌های مختلف در طول تونل جابجا شده است. در هر آزمایش میانگین زاویه تاftها محاسبه و به‌عنوان زاویه مشاهده‌شده در فاصله موردنظر از سیستم شبیه‌ساز در نظر گرفته شده است.

همان‌طور که در شکل (۱۷) قابل مشاهده است، زوایای ایجادشده توسط شبیه‌ساز ۱۵ درجه از حدود ۴ تا ۱۰ و زوایای ایجادشده توسط شبیه‌ساز ۳۰ درجه از حدود ۱۵ تا ۱۹ درجه متغیر است. در شبیه‌ساز ۳۰ درجه تغییرات فاصله پره‌ها تأثیر بسیار کمتری نسبت به شبیه‌ساز ۱۵ درجه داشته است. همچنین، در شبیه‌ساز ۱۵ درجه در حالتی که فاصله پره‌ها برابر ۱۵۰ mm بوده بیشترین پیچش در جریان باد مشاهده شده است.



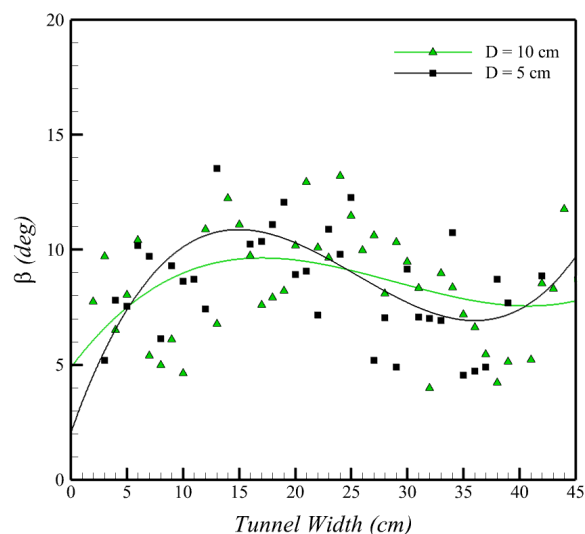
الف) شبیه‌ساز ۳۰ درجه



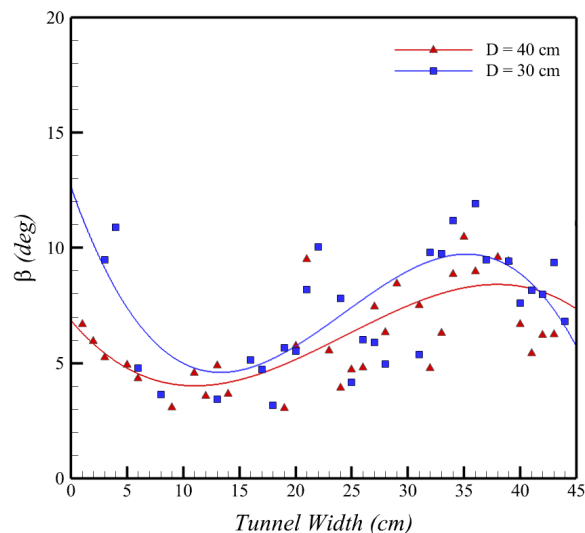
ب) شبیه‌ساز ۱۵ درجه

شکل (۱۶): پروفیل زاویه جریان در راستای عرضی تونل

از شکل (۱۶) می‌توان دریافت که ماکزیمم مقدار زوایای مشاهده‌شده برای فواصل مختلف در شبیه‌ساز ۳۰ درجه از حدود ۱۵ تا ۲۵ درجه، و در شبیه‌ساز ۱۵ درجه از ۸ تا ۱۳ درجه متغیر است. هرچه تاftها به سیستم شبیه‌ساز نزدیک‌تر شود، مقدار زوایا بیشتر می‌شود. در نزدیکی سیستم شبیه‌ساز مقدار ماکزیمم زوایا در نیمه سمت چپ تونل (۰ تا ۲۰۰ mm) قرار گرفته، و هرچه تاftها از شبیه‌ساز فاصله گرفته مقدار ماکزیمم زاویه به سمت نیمه سمت راست تونل (۲۰۰ تا ۴۵۰ mm) متمایل شده است.



الف) زاویه تاftها در فاصله ۵ و ۱۰ cm از شبیه‌ساز

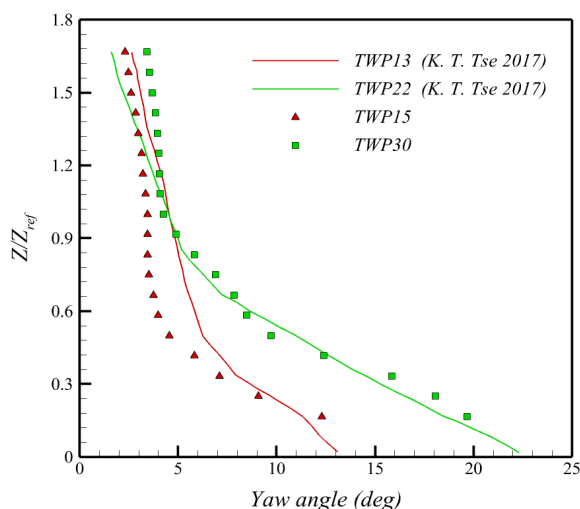


ب) زاویه تاftها در فاصله ۳۰ و ۴۰ cm از شبیه‌ساز

شکل (۱۵): زوایای مشاهده‌شده در شبیه‌ساز ۱۵ درجه

۲-۱-۵- تأثیر فاصله پره‌ها بر زاویه پیچش جریان

در این قسمت اثر فاصله بین سه پره موجود در سیستم شبیه‌ساز موردبررسی قرار گرفته است. به‌منظور بررسی اثر تغییر فاصله پره‌ها بر زاویه پیچش جریان از سه فاصله پره ۸۰، ۱۲۰ و mm



شکل (۱۸): مقایسه پروفیل زاویه پیش به‌دست‌آمده در این تحقیق، با مرجع [۱۴]

۵-۲-۲- پروفیل سرعت و آشفتگی جریان

در این قسمت ابتدا پروفیل سرعت و آشفتگی جریان با استفاده از حس‌گر سیم داغ و سپس با استفاده از پروب ۵ سوراخه به‌دست‌آمده و با نتایج ارائه‌شده در تحقیقات قبلی مقایسه شده است. درصد آشفتگی جریان با استفاده از رابطه (۱۰) محاسبه شده است.

$$TI = \frac{\sqrt{\frac{\sum (V - V_{ave})^2}{n}}}{V_{ave}} \times 100 \quad (10)$$

که در آن V سرعت لحظه‌ای جریان، V_{ave} سرعت متوسط جریان و n تعداد داده‌های استخراج‌شده از تونل است.

به‌منظور محاسبه میزان خطای اندازه‌گیری درصد آشفتگی جریان، یک‌بار با استفاده از حس‌گر سیم داغ و بار دیگر با پروب ۵ سوراخه به‌طور جداگانه در ۳۰۰ mm پایین‌دست شبیه‌سازها و در میانه عرض تونل به انجام آزمایش و داده‌برداری پرداخته شد. درنهایت با استفاده از نتایج حاصله و رابطه (۱۱) میزان خطای اندازه‌گیری آشفتگی جریان به‌طور میانگین برابر ۰/۰۶ درصد محاسبه گردید.

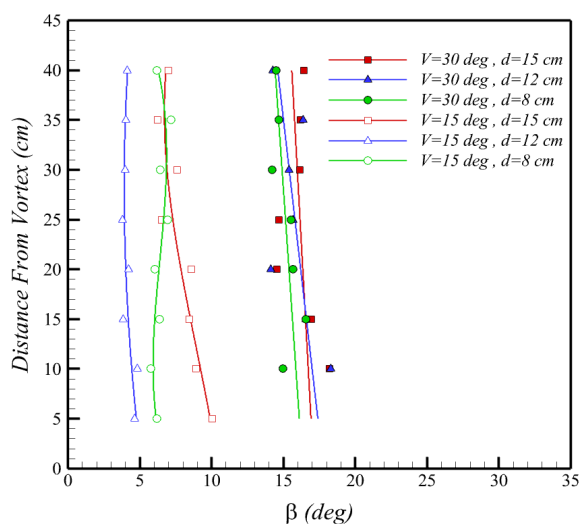
$$E_{TI} = \sqrt{\frac{\sum (TI_{\text{Hole probe}} - TI_{\text{Hot wire}})^2}{n}} \quad (11)$$

در شکل (۱۹) پروفیل‌های سرعت و آشفتگی جریان اندازه‌گیری شده با استفاده از پروب ۵ سوراخه و حس‌گر سیم داغ قابل مشاهده هستند.

۵-۲- بررسی میدان جریان به‌وسیله پروب ۵ سوراخه

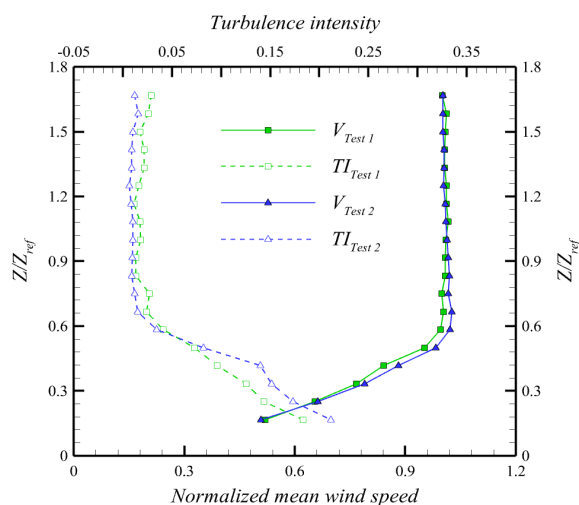
۵-۲-۱- زاویه پیش جریان

با توجه به داده‌های استخراج‌شده از سیستم آشکارساز جریان می‌توان متوجه شد که در فاصله ۳۰۰ mm از سیستم شبیه‌ساز، نوسانات کمتری در مقدار زاویه پیش جریان وجود داشته است؛ بنابراین، در این مرحله پس از نصب سیستم شبیه‌ساز در تونل، پروب ۵ سوراخه طوری در تونل قرار داده‌شده که نوک پروب در فاصله ۳۰۰ mm از سیستم شبیه‌ساز باشد. همچنین، پروب بر روی یک سیستم انتقال نصب‌شده که می‌توان با استفاده از آن پروب را در راستاهای مختلف (X ، Y و Z) انتقال داد.



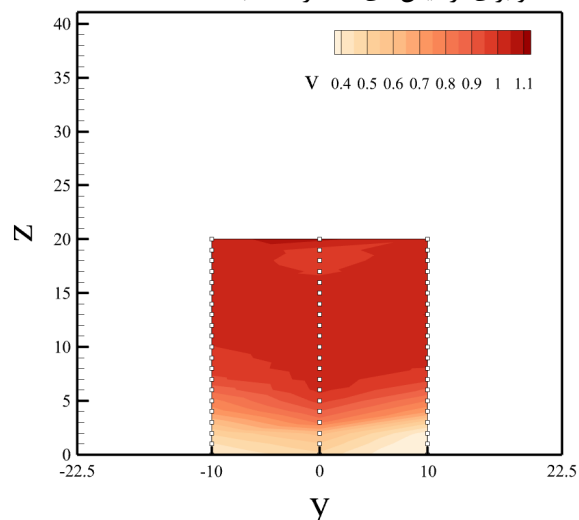
شکل (۱۷): پروفیل زاویه جریان در راستای طولی تونل

پروفیل زاویه پیش باد به‌دست‌آمده از پروب ۵ سوراخه در شکل (۱۸) قابل مشاهده است. در شکل (۱۸) مقدار β زاویه جریان نسبت به امتداد طولی تونل، Z ارتفاع پروب نسبت به کف تونل و Z_{ref} ارتفاع مرجع و برابر ۱۲۰ mm است. همان‌طور که در شکل (۱۸) مشخص است، مقدار زاویه پیش ایجادشده در جریان از حدود ۴ تا ۲۰ درجه بوده و بیشترین مقدار آن در نزدیکی کف تونل مشاهده شده است. در شکل (۱۸) می‌توان مشاهده کرد که پروفیل زاویه پیش به‌دست‌آمده با استفاده از پروب ۵ سوراخه اختلافی کمتر از ۲ درجه با نتایج ارائه‌شده در مرجع [۱۴] داشته که نشان‌دهنده تطابق قابل قبول این دو پروفیل با یکدیگر است.



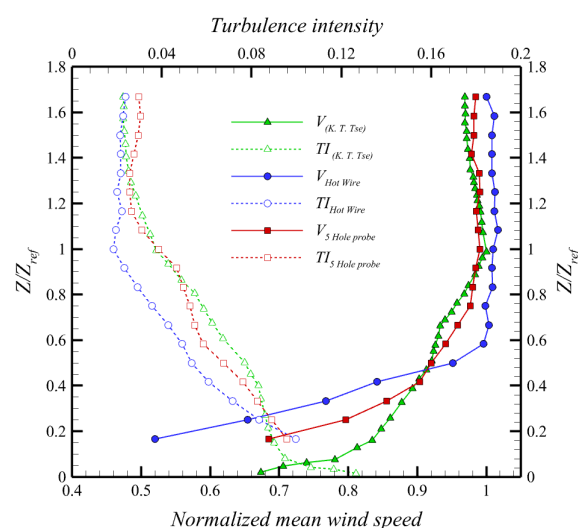
شکل (۲۰): نمودار تکرارپذیری داده‌ها در ۳۰۰ mm شبیه‌ساز و در میانه عرض تونل، برای شبیه‌ساز ۳۰ درجه

در شکل (۲۱) کانتور جریان در مقطع تونل قابل مشاهده است. کانتور جریان در ۳۰۰ mm شبیه‌ساز و در میانه عرض تونل بررسی گردید. کانتور جریان در مقطعی از تونل مورد بررسی قرار گرفته که در ادامه ساختمان بلند در همان قسمت قرار خواهد گرفت. با توجه به اینکه ساختمان بلند مورد آزمایش عرض و ارتفاعی به ترتیب برابر ۳۰ و ۱۸۰ mm دارد، ابعاد کانتور جریان بررسی شده نسبت به ابعاد ساختمان تعیین شد. با توجه به شکل (۲۱) می‌توان گفت جریان ایجاد شده در مقطع مورد نظر از تونل، یکنواختی قابل قبولی داشته و برای آزمایش‌های مدنظر مناسب است.



شکل (۲۱): کانتور جریان در مقطع ۳۰۰ mm شبیه‌ساز

در شکل (۲۲) پروفیل‌های سرعت و آشفتگی جریان در دو مقطع مختلف از تونل قابل مشاهده است. مقطع A در ۳۰۰ mm و مقطع B در ۵۰۰ mm پایین دست شبیه‌ساز جریان پیچ خورده و هردو در میانه عرضی تونل قرار دارند. این نتایج نشان می‌دهد که

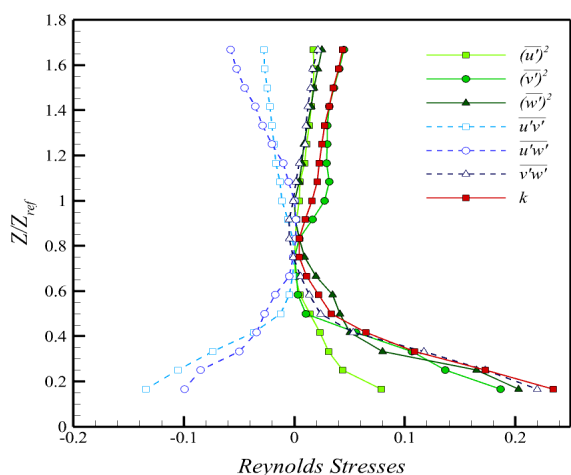


شکل (۱۹): پروفیل سرعت و آشفتگی جریان در ۳۰۰ mm شبیه‌ساز و در میانه عرض تونل، برای شبیه‌ساز ۳۰ درجه

از شکل (۱۹) می‌توان دریافت که مقدار سرعت جریان نزدیک کف تونل کمتر از ارتفاعات بالاتر بوده اما مقدار آشفتگی جریان در نزدیکی کف تونل بیشتر از ارتفاعات بالاست. از طرفی به علت کوچک‌تر بودن ابعاد و اندازه‌های تونل استفاده شده در تحقیق حاضر نسبت به تحقیقات گذشته، اختلافاتی در پروفیل‌های ارائه شده با نتایج مرجع [۱۳] مشاهده شده است. اما پروفیل‌های اندازه‌گیری شده با پروب ۵ سوراخ نسبت به حسگر سیم داغ به پروفیل‌های ارائه شده در مرجع مذکور نزدیک‌تر بوده و اختلافی کمتر از ۵ درصد با آن داشته است.

همچنین اختلاف اندکی که بین پروفیل سرعت و آشفتگی جریان به دست آمده از پروب ۵ سوراخ و حسگر سیم داغ وجود دارد به دلیل مؤلفه ارتفاعی سرعت و آشفتگی بوده که با توجه به یک بعدی بودن حسگر سیم داغ، این حسگر قادر به محاسبه آن نیست؛ به همین علت پروفیل‌های به دست آمده با پروب ۵ سوراخ از دقت بالاتری برخوردار هستند.

در ادامه برای اطمینان از تکرارپذیری نتایج به دست آمده، در دو آزمایش مشابه با استفاده از پروب ۵ سوراخ پروفیل سرعت و آشفتگی جریان اندازه‌گیری شد. در این آزمایش‌ها پروفیل‌های سرعت و آشفتگی جریان در ۳۰۰ mm پایین دست شبیه‌ساز جریان پیچ خورده ۳۰ درجه و در میانه عرض تونل اندازه‌گیری شد که نتایج آن در شکل (۲۰) قابل مشاهده است. این نتایج نشان می‌دهد که نتایج به دست آمده به طور قابل قبولی تکرارپذیر هستند.



شکل (۲۳): پروفیل تنش‌های رینولدز

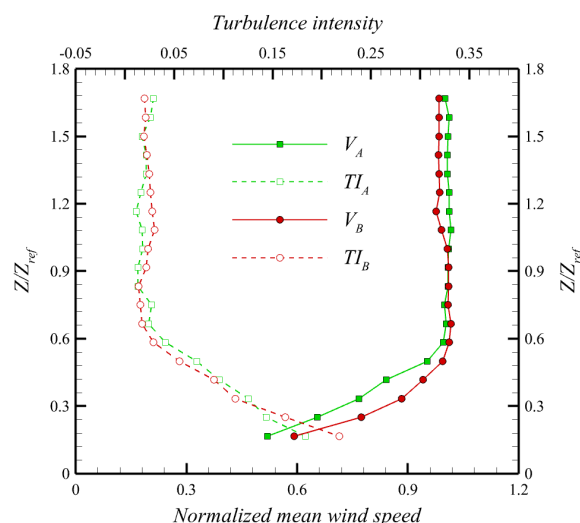
۳-۵- بررسی یک مدل ساختمان بلند در مقابل جریان

برای انجام آزمایش‌های مدل ساختمان بلند در ۳۰۰ mm پایین دست شبیه‌ساز جریان پیچ‌خورده قرار داده شد. سپس بعد از انجام آزمایش‌های لازم، نتایج حاصله به صورت توزیع فشار در شکل (۲۴) قابل مشاهده است.

با توجه به شکل (۲۰-الف) می‌توان دریافت که فشار وارده به نمای بادگیر سازه، مثبت (فشاری) و در نماهای جانبی و پشت به جریان فشار وارد شده منفی (کششی) است. مقدار عددی ضریب فشار در نمای بادگیر نیز بیشتر از دیگر نماها است. همچنین، توزیع فشار روی همه نماهای ساختمان نسبتاً یکنواخت و متقارن است. لازم به ذکر است که سرعت جریان آزاد در ۱۰۰ mm از کف تونل اندازه‌گیری شده است. با توجه به شکل (۱۹) و برازش منحنی، لبه پروفیل لایه‌مرزی جریان در ۱۳۰ mm از کف تونل قرار دارد. بنابراین، با در نظر گرفتن این موضوع که سرعت جریان آزاد دقیقاً در لبه پروفیل لایه‌مرزی جریان اندازه‌گیری نشده است، شاهد تجاوز مقدار عددی توزیع فشار (C_p) از ۱ تا حدود ۱/۰۶ هستیم.

در شکل‌های (۲۴-ب) می‌توان مشاهده کرد که با ایجاد زاویه پیش‌چسب در جریان، به دلیل انحراف جزئی جریان به سمت چپ، توزیع فشار نیز از حالت یکنواخت و متقارن خارج و اندکی به سمت چپ متمایل شده است. از طرفی می‌توان مشاهده کرد که به نیمه بالایی سازه فشار شدیدتری وارد شده است. همچنین، می‌توان گفت فشار روی نمای بادگیر تقریباً گاوسی است، اما روی نماهای جانبی و پشت به باد، به دلیل وجود جریان‌های جدا شده، توزیع غیر گاوسی مشاهده شده است.

بافاصله گرفتن از سیستم شبیه‌ساز، در پروفیل‌های سرعت و آشفتگی جریان تغییرات معناداری ایجاد نشده است.



شکل (۲۲): پروفیل‌های سرعت و آشفتگی جریان در دو مقطع مختلف در میانه عرضی تونل

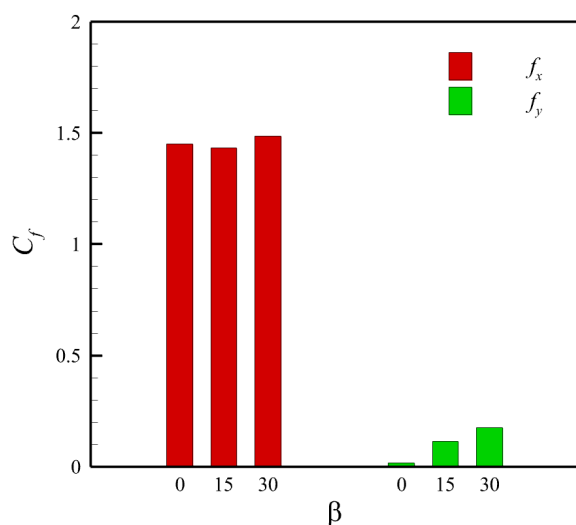
۳-۲-۵- تنش‌های رینولدز

تنش‌های رینولدز محاسبه شده با استفاده از پروپ ۵ سوراخه در شکل (۲۳) قابل مشاهده هستند. نحوه محاسبه تنش‌های رینولدز در رابطه (۱۰) آمده است. به‌طور کلی مقادیر تنش رینولدز در نزدیکی کف تونل به دلیل اصطکاک بین سطح و جریان هوا بیشترین مقدار را دارند. در قسمت‌های بالایی لایه‌مرزی، مقادیر تنش رینولدز به سرعت کاهش می‌یابد، به نظر می‌رسد محدودیت در انتقال ذرات در این ناحیه اجازه نمی‌دهد یک‌لایه متعادل به‌طور کامل ایجاد شود. پروفیل انرژی جنبشی آشفتگی (k) که در شکل (۲۳) قابل مشاهده است، طبق رابطه (۱۱) محاسبه شده است.

$$\bar{u}' = u - u_{ave} \quad (10)$$

$$k = \frac{1}{2}((\bar{u}')^2 + (\bar{v}')^2 + (\bar{w}')^2) \quad (11)$$

که در رابطه (۱۰)، u سرعت لحظه‌ای جریان در راستای x و u_{ave} سرعت متوسط جریان در راستای x است. همچنین، در رابطه (۱۱)، $(\bar{u}')^2$ ، $(\bar{v}')^2$ و $(\bar{w}')^2$ به ترتیب تنش‌های رینولدز در راستای x ، y و z جریان هستند.



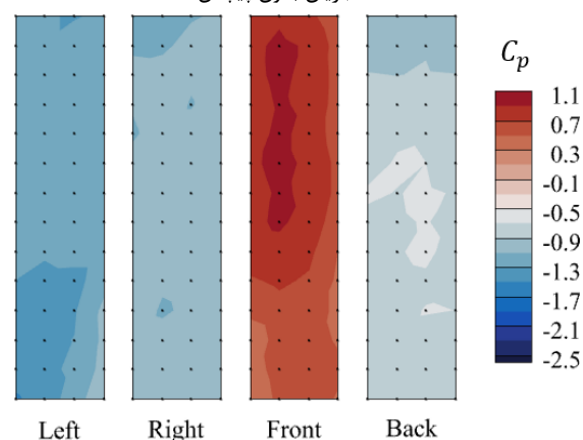
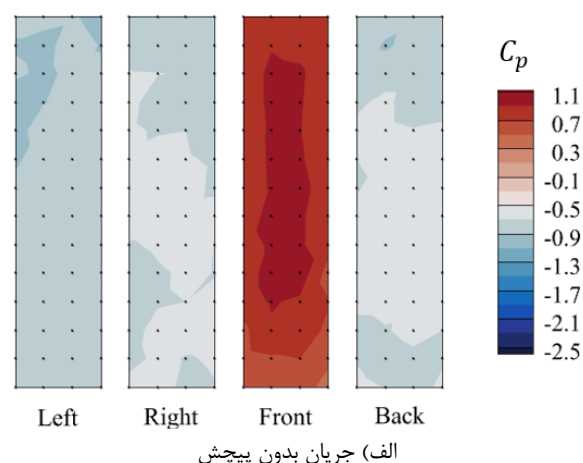
شکل (۲۴): ضرایب نیروی ساختمان قرارگرفته در مقابل جریان

۶- نتیجه گیری

در این پژوهش دو سیستم شبیه‌ساز باد پیچ‌خورده طراحی و ساخته شد. یک سیستم دارای پیچش ۱۵ درجه و دیگری ۳۰ درجه است. پس از نصب سیستم شبیه‌ساز در تونل باد لایه‌مرزی واقع در مرکز تحقیقات هوافضا و تبدیل انرژی دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد، با استفاده از حسگر سیم داغ و پروب ۵ سوراخ به داده‌برداری از تونل باد پرداخته شد. هدف از انجام این تحقیق شبیه‌سازی جریان باد پیچ‌خورده و مقایسه رفتار این جریان در یک تونل باد کوچک مقیاس با تونل‌های بزرگ مقیاس بوده است.

در نهایت پس از انجام آزمایش‌های لازم و استخراج پروفیل‌های زاویه پیچش جریان، سرعت، آشفتگی و همچنین تنش‌های رینولدز جریان، نتایج حاصله در ادامه بیان شده است:

- با تغییر برخی شرایط شبیه‌سازی از جمله تغییر فاصله المان‌های شبیه‌ساز با یکدیگر، تغییر فاصله اولین المان شبیه‌ساز از دیواره تونل و همچنین تغییر فاصله نقطه داده‌برداری نسبت به المان‌های شبیه‌ساز بهینه‌ترین حالت شبیه‌سازی انجام شد. در نهایت برای آوردن بهترین حالت شبیه‌سازی فاصله المان‌های شبیه‌ساز از یکدیگر ۱۵۰ mm، فاصله اولین المان با دیواره تونل ۲۵ mm و بهترین فاصله از المان‌های شبیه‌ساز در پایین دست برای داده‌برداری برابر ۳۰۰ mm قرار داده شد.
- با توجه به نتایج به دست آمده مشخص شد که زاویه پیچش جریان برای شبیه‌سازهای ۱۵ و ۳۰ درجه به ترتیب حدود ۱۲ و ۲۰ درجه بوده که اختلاف آن با مراجع قبلی کمتر از ۲ درجه است. همچنین، بیشترین مقدار زاویه پیچش در



شکل (۲۴): اثرات جریان پیچ‌خورده بر مدل ساختمان بلند

در شکل (۲۵) ضرایب نیروی ساختمان قرارگرفته در مقابل جریان قابل مشاهده است. همان‌طور که از این شکل قابل مشاهده است، جریان پیچ‌خورده تأثیر زیادی روی ضریب نیروی جهت x (در راستای جریان) نداشته است؛ اما باعث تغییرات قابل توجهی در ضرایب نیروی جهت y (راستای عرضی تونل) شده است. به‌طوری‌که با افزایش زاویه پیچش جریان از ۱۵ به ۳۰ درجه، ضریب نیروی ساید (جهت y) ساختمان نیز بیش از ۵۵ درصد افزایش یافته است.

- by Combining the Slat and Longitudinal Slot Effects,” *Journal of Fluid Mechanics and Aerodynamics, Imam Hossein University*, vol. 9, no. 2, pp. 39–52, 2020. (In Persian). DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23223278.1399.9.2.4.4>
- [5] M. Hojaji, N. Asgari, S. J. Hosseini, A. H. Rezvani, and B. Sharifzade, “Experimental Study of Impact Angle of Microburst Effects on a Cubic Structure - Part A: Stationary Microburst Observation,” *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering Amirkabir J. Mech. Eng.*, vol. 54, no. 5, pp. 201–204, 2022. (In Persian) doi: 10.22060/mej.2022.20500.7250
- [6] M. Hojaji, A. H. Rezvani, N. Asgari, A. H. Sadeghi, and S. J. Hosseini, “Experimental investigation of the downburst impact angle effect on a cubic structure - Part B: Moving microburst observations,” *Scientific Journal of the Iranian Society of Mechanical Engineers*, vol. 32, no. 1, pp. 13–29, 2024. (In Persian) doi: 10.30506/MMEP.2023.563653.2059
- [7] H. Kozmar, “Scale effects in wind tunnel modeling of an urban atmospheric boundary layer,” *Theor Appl Climatol*, vol. 100, no. 1, pp. 153–162, 2010. doi: 10.1007/S00704-009-0156-3/METRICS
- [8] H. Kozmar, “Influence of spacing between buildings on wind characteristics above rural and suburban areas,” *Wind and Structures*, vol. 11, no. 5, pp. 413–426, 2008. doi: 10.12989/was.2008.11.5.413
- [9] R. G. J. Flay, “A twisted flow wind tunnel for testing yacht sails,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 63, no. 3, pp. 171–182, 1996. doi: 10.1016/S0167-6105(96)00080-3
- [10] R. G. J. Flay, N. J. Locke, and G. D. Mallinson, “Model tests of twisted flow wind tunnel designs for testing yacht sails,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 63, no. 3, pp. 155–169, 1996. doi: 10.1016/S0167-6105(96)00074-8
- [11] B. R. Mendenhall, *A Statistical Study of Frictional Wind Veering in the Planetary Boundary Layer*. Fort Collins, Colorado, United States of America: Colorado State University, Department of Atmospheric Science, 1967.
- [12] Y. Tamura *et al.*, “Profiles of mean wind speeds and vertical turbulence intensities measured at seashore and two inland sites using Doppler sodars,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 95, no. 6, pp. 411–427, 2007. doi: 10.1016/J.JWEIA.2006.08.005
- [13] K. T. Tse, A. U. Weerasuriya, and K. C. S. Kwok, “Simulation of twisted wind flows in a boundary layer wind tunnel for pedestrian-level wind tunnel tests,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 168, no. 1, pp. 99–109, 2016. doi: 10.1016/J.JWEIA.2016.10.010
- [14] K. T. Tse, A. U. Weerasuriya, X. Zhang, S. W. Li, and K. C. S. Kwok, “Effects of twisted wind flows on wind conditions in passages between buildings,”
نزدیک‌ترین نقطه به کف تونل اتفاق افتاده که شباهت زیادی با نتایج مراجع مذکور دارد.
- از پروفیل‌های سرعت و آشفتگی جریان می‌توان دریافت که در نزدیک‌ترین نقطه به کف تونل سرعت و آشفتگی جریان به ترتیب کمترین و بیشترین مقدار خود را دارند. اختلاف مقدار سرعت و آشفتگی کل جریان به‌دست‌آمده از پروپ ۵ سوراخه با پروفیل‌های ارائه‌شده در مراجع قبلی نیز کمتر از ۵ درصد بوده است.
 - به‌طور کلی مقادیر مطلق تنش رینولدز در نزدیکی کف تونل به دلیل اصطکاک بین سطح و جریان هوا بیشترین مقدار را دارند.
 - بررسی اثرات جریان باد پیچ‌خورده بر روی یک مدل ساختمان بلند نشان داد که این جریان باعث اعمال یک نیروی نامتقارن و غیریکنواخت به ساختمان‌ها شده است. همچنین، در جریان باد پیچ‌خورده با افزایش زاویه پیچش جریان، نیروی ساید واردشده به ساختمان به‌طور فزاینده‌ای افزایش یافت.
- در نهایت مشاهده شد که تطابق بسیار خوبی بین داده‌های به‌دست‌آمده در این تحقیق با نتایج مراجع قبلی وجود داشته که نشان می‌دهد در یک تونل باد کوچک‌مقیاس و با کاهش هزینه‌ها و صرف انرژی کمتر، می‌توان جریان باد پیچ‌خورده را با درصد خطای بسیار پایین شبیه‌سازی نمود.
- ## ۷- مراجع
- [1] A. Doosti and N. Asadian Zargar, “Destructive effects of storms on human settlements and strategies to reduce vulnerability,” 2014, *The Second National Conference on Crisis Management and HSE in Vital Arteries*. (In Persian)
- [2] A. Sagharichi, M. J. Maghrebi, and A. Arabgolarcheh, “Numerical Investigation of the Effect of Fixed and Variable Pitch Angle Blade on Dynamic Stall of Flow Field Around Darrieus Wind Turbine Blade,” *Journal of Fluid Mechanics and Aerodynamics, Imam Hossein University*, vol. 5, no. 1, pp. 29–46, 2016. (In Persian). DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23223278.1395.5.1.3.3>
- [3] A. Ebrahimi and A. H. Hossein, “Performance Analysis of a Large-Scale Wind Turbine in Wind Shear and Inflow Turbulence Conditions,” *Journal of Fluid Mechanics and Aerodynamics, Imam Hossein University*, vol. 8, no. 2, pp. 19–29, 2020. (In Persian). DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23223278.1398.8.2.2.5>
- [4] M. Saeedi and R. A. Tough, “Investigation of the Delay in Flow Separation on the Wind Turbine Blade

- Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 177, no. 1, pp. 104–115, 2017. doi: 10.1016/j.jweia.2018.03.004
- [15] B. Yan *et al.*, “Wind Tunnel Investigation of Twisted Wind Effect on a Typical Super-Tall Building,” *Buildings*, vol. 12, no. 12, pp. 226–237, 2022. doi: 10.3390/BUILDINGS12122260
- [16] L. Zhou, G. Hu, K. T. Tse, and X. He, “Twisted-wind effect on the flow field of tall building,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 218, no. 1, pp. 104–112, 2021. doi: 10.1016/J.JWEIA.2021.104778
- [17] A. Peña, S. E. Gryning, and R. Floors, “The turning of the wind in the atmospheric boundary layer,” *J Phys Conf Ser*, vol. 524, no. 1, pp. 19–25, 2014. doi: 10.1088/1742-6596/524/1/012118
- [18] C. Dyrbye and S. O. Hansen, *Wind Loads on Structures*. Denmark: Wiley, 1997.
- [19] V. W. Ekman, “On the influence of the Earth’s rotation on ocean currents,” *Arkiv för Matematik, Astronomi och Fysik*, vol. 2, no. 1, pp. 1–52, 1905. doi: 10.1007/BF02418150