تاثیر تغییر فاصله المان‌های زبری از مولد های گردابه‌ای درتعیین مقیاس شبیه سازی باد لایه مرزی

سجاد رئیسی[۱]، محمد حججی نجف آبادی[۲*]،جلیل حسینی[۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، مرکز تحقیقات هوافضا و تبدیل انرژی، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاداسلامی، نجف آباد، ایران، sajadraeisi@sci.iaun.ac.ir

۲- استادیار، دانشکده فنی مهندسی، مرکز تحقیقات هوافضا و تبدیل انرژی، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران، hojaji_m@pmc.iaun.ac.ir

۳- استادیار، دانشکده عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران، s.j.hosseini@pci,iaun.ac.ir

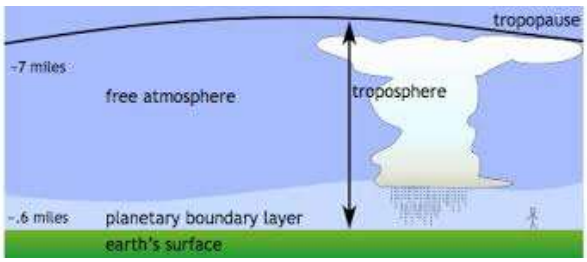
چکیده

با توجه به اهمیت زیاد جریان لایه مرزی برای شناخت ابعاد مختلف این جریان نیاز به شبیه سازی آن در تونل باد است. برای شبیه سازی جریاد باد لایه مرزی از تونل موجود در مرکز تحقیقات هوافضا و تبدیل انرژی دانشگاه آزاد نجف آباد استفاده شد. در این پژوهش دو حالت چیدمان المان های زبری سطح (Surface roughness elements) بر اساس فاصله المان‌های زبری از مولد های گردابه‌ای (Vortex generator) مورد بررسی قرار گرفته است. در حالت اول فاصله المان های زبری سطح تا مولدهای گردابه ای ۱۲ سانتی متر و در حالت دوم این فاصله ۶۷ سانتی متر در نظر گرفته شده است. تاثیر این دو حالت چیدمان بر تغییر مقیاس جریان لایه مرزی مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش نتایج تجربی به صورت پروفیل های سرعت و آشفتگی جریان و همچنین نمودار چگالی طیفی توان نوسانات سرعت طولی برای هر دو حالت به دست آمده است. پروفیل های سرعت و آشفتگی نشان دهنده صحیح بودن نحوه شبیه سازی در این پژوهش هستند. نتایج نشان می‌دهد که شبیه سازی جریان باد لایه مرزی در این تونل به خوبی انجام شده و همچنین نشان دهنده این است که تغییر فاصله المان‌های زبری از مولدهای گردابه‌ای می‌تواند در مقیاس جریان لایه مرزی تاثیر گذار باشد و با افزایش این فاصله مقیاس بزرگتر از حالت اول شود. همچنین با زیاد شدن فاصله المان‌های زبری سطح از مولدهای گردابه‌ای باعث افزایش ۱۷ درصدی مقیاس جریان لایه مرزی شده است.

واژه های کلیدی: *جریان باد لایه مرزی - شبیه سازی تجربی – تونل باد – مقیاس – سرعت جریان*

۱- مقدمه

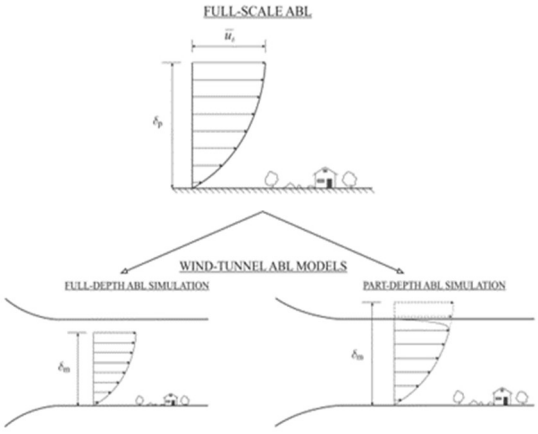
ویژگی‌های باد و آشفتگی‌های جوی همیشه مبهم یا ناشناخته بوده‌اند زیرا فرصت‌های محدودی برای جمع‌آوری داده‌های باد قابل‌اعتماد وجود دارد[۱]. بادها یکی از مخاطرات طبیعی بوده که شناخت رفتار آن‌ها و تاثیر در عوارض طبیعی و مصنوعی بر روی زمین برای مقابله با آنها بسیار مهم است. شبیه‌سازی لایه مرزی قابل قبول یک مساله کلیدی در مطالعه بارهای باد بر روی زیرساخت‌های مهندسی است زیرا ارزیابی صحیح بادهای نزدیک زمین و تلاطم جوی می‌تواند برای بهبود طراحی آیرودینامیکی سازه‌ها کمک کند[۲]. در حال حاضر، پروفیل باد لایه مرزی جوی مبنای محاسبه بارهای وارد شده از طرف باد بر روی سازه‌ها محسوب می‌شود و از این پروفیل برای شبیه سازی تونل باد به منظور به دست آوردن داده‌های بارگذاری باد به شکل صریح برای ساختمان‌های خاص و یا به شکل غیر صریح به کمک داده‌های کدگذاری شده برای شکل‌های متداول ساختمان‌ها استفاده می‌گردد [۱].



شکل ۱- سطح مقطع زمین و تروپسفر

۲- مشخصات شبیه سازی جریان لایه مرزی

سرمک (Sermak)و همکاران به مدل سازی تونل باد لایه مرزی جوی پرداختند. آنها بیشتر ویژگی‌های جریان کلیدی لایه مرزی جوی را با موفقیت در تونل باد برای مدتی مدل سازی کردند[۳]. باربوسا (Barbosa)و همکاران به شبیه سازی جریان‌های لایه مرزی جوی با استفاده از تونل باد پرداختند و نشان دادند که چگونه لایه‌های مرزی ضخیم می‌توانند در یک تونل باد کوتاه با دید شبیه‌سازی جریان‌های جوی تولید شوند. و به طور مفصل آرایش تجربی، شامل ویژگی‌های تونل باد و ابزار دقیق را توصیف کردند[۴]. کوزمار(Kozmar) به شبیه‌سازی تونل باد در حومه جریان لایه مرزی و مقایسه آن با استانداردهای بین‌المللی پرداخت. او در این پژوهش شبیه سازی تونل باد لایه مرزی را مورد بررسی قرار داد. و پارامترهایی از قبیل سرعت میانگین، شدت آشفتگی، تنش برشی رینولدز آشفتگی، مقیاس طول انتگرال تراکم طیفی توان نوسانات سرعت را مورد بررسی قرار داد[۵]. کومار(Kumar) و همکاران تاثیر یک مش بر لایه مرزی ناشی از آشفتگی جریان آزاد و یک آلمان زبری مجزا پرداختند. و مشخص شد که مش باعث تقریبا ۳۰ ٪ کاهش در سرعت جریان آزاد و شتاب ملایم، صرف‌نظر از موقعیت دیواره نرمال آن می‌شود[۶]. قزال تی (Ghazal, T) و همکاران به مدل‌سازی جریان لایه مرزی پرداختند. آنها در این مطالعه به مدل سازی لایه مرزی برای مواجه شدن با ساختمان های بلند حومه شهری پرداختند. و در آن مطالعه قابلیت سیستم برای تولید دقیق باد های لایه مرزی برای شرایط مختلف زمین و مقیاس وسیعی را مورد بررسی قرار دادند[۷].



شکل۲- اصول شبیه سازی کلی و پروفیل لایه مرزی [۵]

جهت شبیه سازی جریان باد لایه مرزی در تونل باد و شناخت بهتر این جریان یکی از چالش های اساسی و مهم محققین ایجاد جریان لایه مرزی با مقیاس مناسب پژوهش خود می‌باشد. در این راستا تحقیقات زیادی صورت گرفته و تغییر پارامتر های مختلف بررسی شده است. با این وجود خلأ های تحقیقاتی زیادی در این باره وجود دارد . فاصله مولد گردابه‌ای با المان های زبری سطح یکی از پارامترهایست که تاثیر آن برروی مقیاس جریان لایه مرزی کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. لذا این پژوهش تغییر فاصله مولد گردابه‌ای از المان های زبری سطح را بر مقیاس جریان باد لایه مرزی بررسی کرده است. با مد نظر قرار دادن موارد فوق شبیه سازی جریان باد لایه رمزی انجام شد. در ادامه برای هر یک از حالت های شبیه سازی جریان پروفیل‌های سرعت و آشفتگی جریان استخراج شده است. همچنین پروفیل چگالی طیفی توان نوسانات سرعت طولی و مقیاس جریان باد به دست آمده است.

۳-تجهیزات آزمایشگاهی

در این قسمت مشخصات و جزئیات تجهیزات آزمایشگاهی شرح داده می‌شود.

۳-۱- تونل باد

در بررسی ازمایشگاهی این مقاله از تونل باد موجود در مرکز تحقیقات هوا فضا و تبدیل انرژی دانشگاه آزاد واحد نجف آباد استفاده شد. که محفظه تست تونل داری عرض ۴۵ سانتیمتر، ارتفاع ۴۵ سانتیمتر و طول ۳۲۰ سانتیمتر می‌باشد. که این محفظه شامل دو قسمت است، قسمت اول شامل دیوار قلعه‌ای شکل (Castellated barrier wall)، مولد گردابه‌ای و المان های زبری سطحی با آرایش مشخص است. و در قسمت دوم ابزار اندازه گیری قرار گرفته است.

شکل۳- تونل باد مرکز تحقیقات هوافضا دانشگاه آزاد نجف آباد

۳-۲- دیوار قلعه‌ای شکل

در ابتدای محفظه تست یک دیوار به صورت قلعه ای شکل قرار گرفته است. ارتفاع این دیوار ۱۱ سانتیمتر و طول آن ۴۵ سانتیمتر است. در بالای دیوار قلعه‌ای شکل دو میله هادی جریان قرار گرفته است. که شعاع هر کدام از میله‌ها ۵ میلیمتر می‌باشد. یکی از میله‌ها در ارتفاع ۲۵.۵ سانتیمتر و دیگری در ارتفاع ۲۹.۵ سانتیمتر قرار گرفته است. این دو میله برای جلوگیری از آشفتگی بیش از حد جریان باد لایه مرزی استفاده شده است[۸].

۳-۳- مولدهای گردابه‌ای

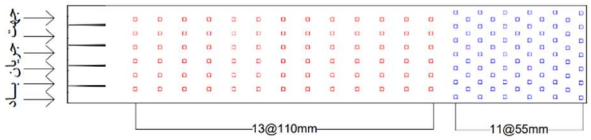
پس از قرار گیری دیوار قلعه ای شکل، مولدهای گردابه‌ای با فرم ۱/۴ بیضی جهت کنترل سرعت جریان باد در کل ارتفاع جریان باد قرار گرفته است[۹]. در این پژوهش چهار مولد گردابه با ارتفاع ۳۷ سانتیمتر و فاصله ۹ سانتیمتر در عرض تونل قرار داده شد.

شکل۴- نمای قرار گیری سه المان در دهانه تونل باد لایه رمزی

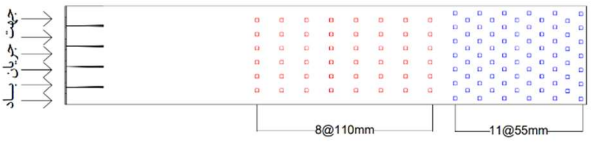
۳-۴- المان های زبری سطح

پس از قرار گیری المان های ذکر شده، المان زبری سطح با دو نوع چینش مربعی و ضربدری در دو حالت متفاوت در نظر گرفته شده است. حالت اول شامل ۱۳ ردیف مربعی شکل المان‌های بلند و ۱۱ ردیف ضربدری المان های کوتاه می‌باشد. در حالت اول فاصله اولین ردیف المان‌های زبری تا مولدهای گردابه‌ای ۱۲ سانتی متر در نظر گرفته شد. شکل(۵) نشان دهنده حالت اول چیدمان می‌باشد. حالت دوم شامل ۸ ردیف مربعی المان های

بلند و ۱۱ ردیف ضربدری المان های کوتاه می‌باشد. در حالت دوم به دلیل حذف ۵ ردیف المان‌های زبری سطح فاصله اولین ردیف المان‌های زبری تا مولدهای گردابه‌ای ۶۷ سانتی متر در نظر گرفته شد. شکل(۶) نشان دهنده حالت دوم چیدمان می‌باشد. این المان‌ها در دو اندازه با عرض ۱۶ میلیمتر، طول ۱۶ میلیمتر و ارتفاع ۴۰ میلیمتر در ابتدای جریان و المان‌هایی با عرض ۱۶ میلمتر، طول ۱۶ میلیمتر و ارتفاع ۵ میلمتر در انتهای جریان نزدیک به سیستم اندازه گیری در نظر گرفته شدند. تعیین چینش المان ها با یک تخمین انجام شد. سپس با آزمون های متعدد شکل مورد نظر و چیدمان نهایی بدست آمد. در این پژوهش تاثیر تغییر فاصله چیدمان المان‌های زبری سطح تا مولدها گردابه‌ای در جریان باد لایه مرزی بر مقیاس مد نظر است.



شکل۵- نحوه قرارگیری المان‌های زبری سطح در حالت اول



شکل۶- نحوه قرارگیری المان‌های زبری سطح در حالت دوم

شکل۷- نحوه قرارگیری المان‌های زبری

۳-۵- سیستم اندازه گیری

سرعت سنج سیم داغ (Hot wire) جهت داده برداری جریان باد لایه مرزی در این پژوهش استفاده شده است. سرعت سنج سیم داغ به وسیله سرعت سنج دیجیتال و پروب متصل به جعبه فشار که دقت بالایی دارند، کالیبره شده است. این سرعت سنج توانایی داده برداری در فرکانس بالا و در زمان کاهش سرعت جریان باد را دارد و داده های دقیقی را ارئه می دهد. مدت زمان داده برداری برای هر داده ۵ ثانیه می باشد. سرعت سنج با استفاده از یک سیستم انتقالی الکترونیکی قابلیت جابجایی در دو راستای طول و ارتفاع محفظه تست با دقت ۱ میلیمتر را دارا می‌باشد. فاصله آخرین ردیف المان‌های زبری سطح تا سرعت سنج سیم داغ ۱۷/۵ سانتیمتر در نظر گرفته شده است.

شکل۸- سرعت سنج سیم داغ

۴- نتایج و بحث

در این قسمت نتایج آزمایشات و پژوهش های انجام شده مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. پروفیل‌های سرعت و آشفتگی حالت‌های مختلف قرار گیری المان‌های زبری و آرایش آن‌ها ارائه شده است.

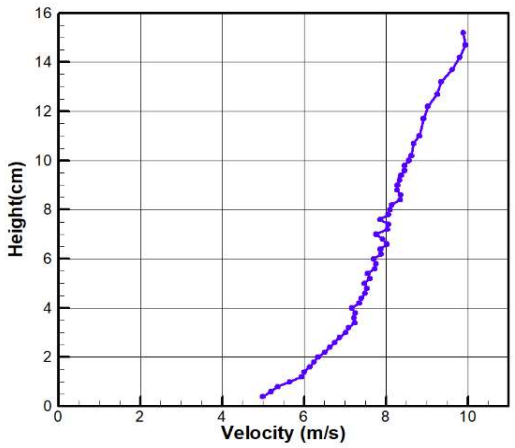
۴-۱-پروفیل‌های سرعت و آشفتگی جریان در حالت اول

پس از قرار گیری المان های تاثیر گذار در شبیه سازی جریان باد لایه مرزی و همچنین قرار دادن المان های زبری بر اساس آرایش‌های گفته شده، سرعت جریان باد لایه مرزی در ارتفاع تونل توسط سرعت سنج سیم داغ اندازه گیری شد. پروفیل سرعت این پژوهش بر اساس تابع توانی (Power-law) ارائه شده توسط هلمن (Hellman) مورد محاسبه قرار گرفته است[۱۰]. در رابطه (۱) این تابع توانی آورده شده است.

$$\frac{\bar{u}_z}{u_{ref}} = \left(\frac{z-d}{z_{ref}-d}\right)^{\alpha} \qquad (۱)$$

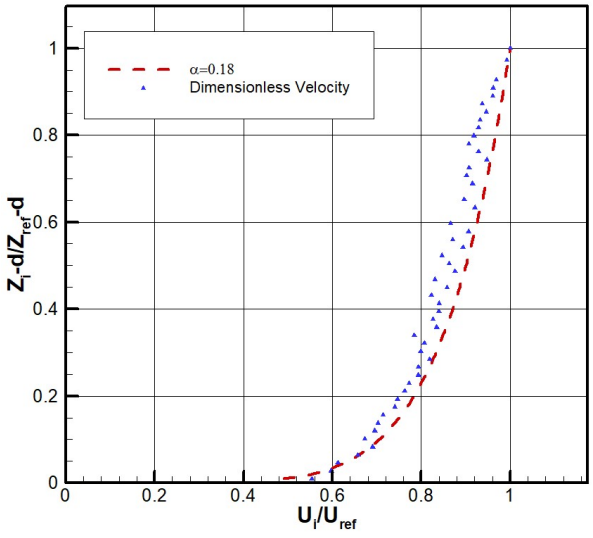
در رابطه (۱) $\overline{u_z}$ میانگین سرعت جریان در نقطه داده برداری از کف تونل است. u_{ref} میانگین سرعت جریان در ارتفاع مبنا است. همچنین مقدار Z برابر ارتفاع نقطه داده برداری از کف تونل و Z_{ref} ارتفاع مبنا داده برداری از کف تونل می‌باشند. ارتفاع مبنا در این پژوهش ۱۱ سانتی متر از کف تونل در نظر گرفته شده است. d در این رابطه ارتفاع جابجای است. مقدار α در رابطه بالا براساس آیین نامه ESDU-72026 [۱۱] براساس شرایط منطقه‌ای بدست می آید.

در شکل (۹) پروفیل سرعت حالت اول قرار گیری المان‌های زبری اورده شده است.



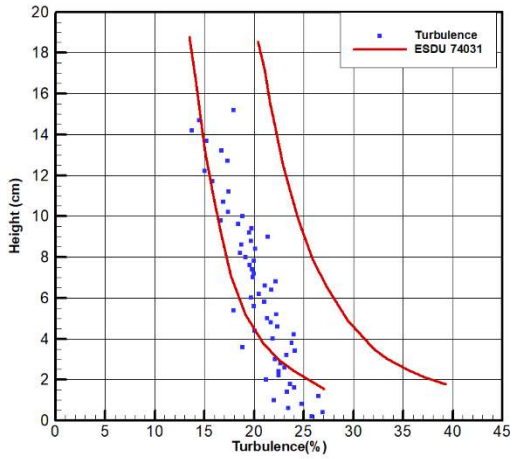
شکل۹- پروفیل سرعت جریان باد لایه مرزی در حالت اول

همان طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، پروفیل سرعت بی بعد شده جریان باد لایه مرزی آرایش حالت اول براساس سرعت مبنا در ارتفاع مبنا به همراه تابع توانی (α) بدست آمده است. همانطور که در شکل مشخص است پروفیل سرعت بی بعد شده همپوشانی نسبتا خوبی با تابع توانی دارد. مقدار تابع توانی، ۰/۱۸ بدست آمده است. مقدار تابع توانی بیش از ۰/۱۵ متناسب با شرایط حومه شهری است[۱۲]. در نتیجه پروفیل سرعت به دست آمده را تایید می‌کند.



شکل۱۰- پروفیل سرعت بی بعد شده جریان باد به همراه تابع توانی(α) درحالت اول

در شکل ۱۱ پروفیل آشفتگی سرعت جریان باد لایه مرزی در آرایش حالت اول نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشخص است، آشفتگی جریان حدود ۱۴ الی ۲۷ درصد است. در نزدیک دیواره آشفتگی جریان از مقدار استاندارد [ESDU-74031] خارج شده است. در ارتفاع بالا تر پروفیل آشفتگی جریان لایه مرزی مطابق استاندارد [ESDU-74031] می‌باشد.



شکل۱۱- پروفیل آشفتگی جریان باد لایه مرزی درحالت اول

با توجه به پارمترهای زیادی که در تعیین مقیاس یک جریان نقش دارند، به دست آوردن مقیاس یک جریان زمان بر می‌شود[۹]. رابطه (۲) رابطه ای است که کوک در پژوهش خود برای به دست آوردن مقیاس جریان لایه مرزی پیشنهاد کرده است [۱۳].

$$S = \frac{91.3(Z-d)^{0.491}}{L_{ux}^{1.403} Z_0^{0.088}} \qquad (۲)$$

در این رابطه Z_0 طول زبری سطح آیرودینامیکی (Arodynamic surfsce roughness length) و L_{ux} انتگرال مقیاس طولی هستند.

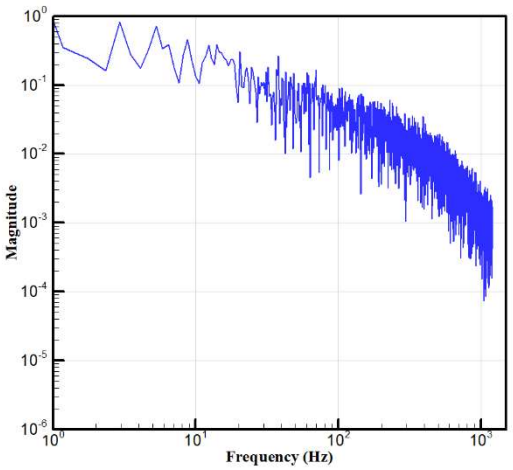
رابطه (۳) نحوه بدست آوردن مقدار L_{ux} را نشان داده است. در این رابطه $\overline{u_z}$ میانگین سرعت در راستای x است. f_M بیشترین فرکانس بدست آمده از نمودار چگالی طیفی توان نواسانت سرعت طول می‌باشد.

$$L_{ux} = \frac{0.146\,\overline{u_z}}{f_M} \qquad (۳)$$

مقادیر Z0 و d با استفاده از سعی و خطا قابل تعیین هستند[۱۴]. برای بدست آوردن f_M داده برداری توسط سرعت سنج سیم داغ در ارتفاع مد نظر انجام شد. سپس استخراج داده‌های لحظه ای انجام شد و با استفاده از تبدیل فوریه، با روشی که بندات و پیرسول پیشنهاد داده‌اند، نمودار طیف قدرت در ارتفاع مدنظر بدست می آید[۱۴].

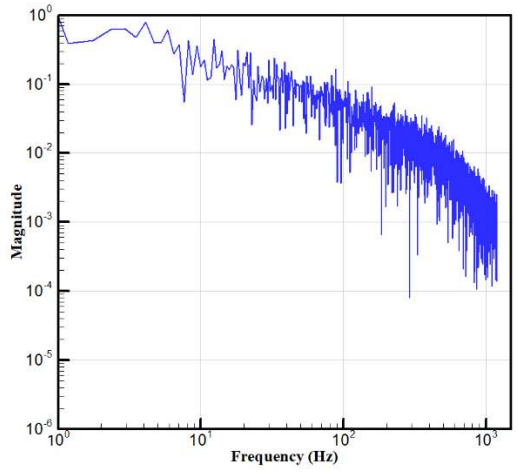
شکل ۱۲ نشان دهنده نمودار طیف قدرت است. همان طور که نشان داده شده است، در محدوده ۶ هرتز این طیف به حداکثر مقدار خود رسیده است. میانگین سرعت جریان در این نقطه برابر ۸/۷۴ متر بر ثانیه می‌باشد. با استفاده از رابطه (۳) مقدار L_{ux} برابر با ۰/۲۲ به دست آمد. پس از تعیین مقدار f_M مقادیر Z0 برابر ۰/۰۰۰۲۶ متر ، d برابر ۰/۰۰۱ متر و Z تعیین می‌شوند. پس از به دست آوردن پارمترهای مورد نظر و قرار کیری در رابطه

(۲) مقدار مقیاس به دست می آید. که در حالت اول مقیاس به دست آمده برابر ۱:۵۳۰ است.



شکل۱۲- نمودار چگالی طیفی توان نواسانات سرعت طولی

شکل ۱۳ تکرار آزمایش استخراج نمودار چگالی طیفی توان نواسانات سرعت طولی را برای اطمینان از صحت مقادیر مقیاس محاسبه شده نشان داده است. کوزمار در ازمایش خود نیز این آزمایش مجدد را انجام داده است[۱۲]. همانطور که دز شکل نشان داده شده است، در محدوده ۶ هرتز این طیف به حداکثر مقدار خود رسیده است. در نتیجه مقیاس به دست آمده صحیح است.

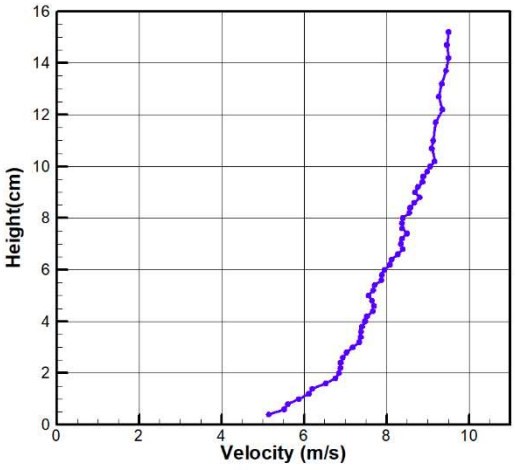


شکل۱۳- نمودار تکرار آزمایش چگالی طیفی توان نواسانات سرعت طولی

۴-۱-پروفیل‌های سرعت و آشفتگی جریان در حالت دوم

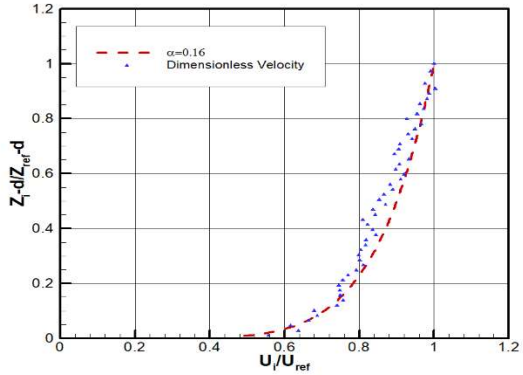
در این قسمت برای آرایش چیدمان المان های زبری سطح در حالت دوم، پروفیل های سرعت و آشفتگی و همچنین مقیاس محاسبه شده و با حالت اول مقایسه شده است.

شکل ۱۴ نشان دهنده پروفیل سرعت در چیدمان حالت دوم است. برای داده برداری چیدمان دوم مانند حالت اول و با شرایط یکسان اقدام شد.



شکل۱۴- پروفیل سرعت جریان باد لایه مرزی در حالت دوم

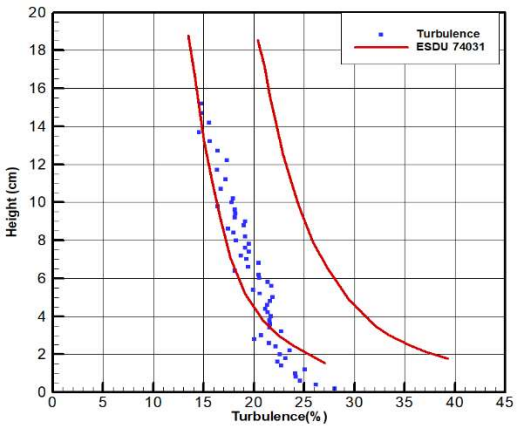
همان طور که در شکل ۱۵ نشان داده شده است، پروفیل سرعت بی بعد شده جریان باد لایه مرزی آرایش حالت دوم براساس سرعت مبنا در ارتفاع مبنا به همراه تابع توانی بدست آمده است. همانطور که در شکل مشخص است پروفیل سرعت بی بعد شده همپوشانی نسبتا خوبی با تابع توانی دارد. مقدار تابع توانی، ۰/۱۶ بدست آمده است. در نتیجه پروفیل سرعت به دست آمده را تایید می‌کند. همچنین این پروفیل نشان دهنده این است که تغییر در چیدمان المان های زبری سطح و کاهش آن‌ها و افزایش فاصله آن‌ها با مولد های گردابه‌ای مقدار α را ۰/۰۲ کاهش داده است.



شکل۱۵- پروفیل سرعت بی بعد شده جریان به همراه تابع توانی درحالت دوم

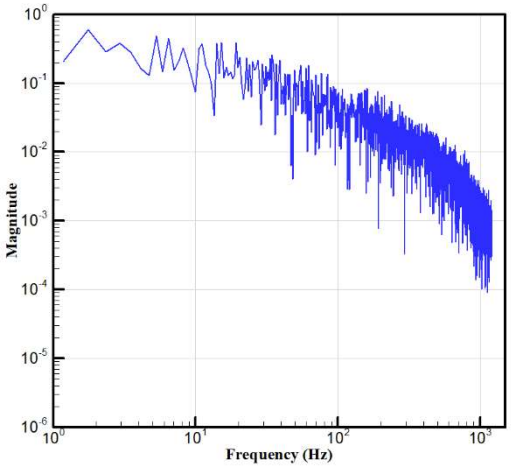
در شکل ۱۶ پروفیل آشفتگی سرعت جریان باد لایه مرزی در آرایش حالت دوم نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشخص است، آشفتگی جریان حدود ۱۵ الی ۲۸ درصد است. که یک درصد نسبت به حالت اول افزایش داشته است. در ارتفاع پایین آشفتگی جریان از مقدار

استاندارد [ESDU-74031] خارج شده است. در ارتفاع بالا تر پروفیل آشفتگی جریان لایه مرزی مطابق استاندارد [ESDU-74031] می‌باشد و نسبت به حالت اول شرایط بهتری دارد.



شکل۱۶- پروفیل آشفتگی جریان باد لایه مرزی درحالت دوم

شکل ۱۷ نشان دهنده نمودار طیف قدرت است. همان طور که نشان داده شده است، در محدوده ۵ هرتز این طیف به حداکثر مقدار خود رسیده است. که نسبت به حالت اول ۱۷ درصد کاهش پیدا کرده است. میانگین سرعت جریان در این نقطه برابر ۹/۳ متر بر ثانیه می‌باشد. که نسبت به حالت اول ۶ درصد افزایش داشته است. با استفاده از رابطه (۳) مقدار L_{ux} برابر با ۰/۲۹ به دست آمد. پس از تعیین مقدار F_m، مقادیر Z_0 برابر۰/۰۰۰۲۶ متر ، d برابر ۰/۰۰۱ و Z تعیین می‌شوند. پس از به دست آوردن پارمترهای مورد نظر و قرار گیری در رابطه (۲) مقدار مقیاس به دست می آید. که در حالت دوم مقیاس به دست آمده برابر ۱:۴۴۰ است. که نسبت به حالت اول مقیاس ۱۷ درصد بزرگتر شده است.



شکل۱۷- نمودار چگالی طیفی توان نواسانات سرعت طولی در حالت دوم

جدول ۱ مقایسه تغییرات در دو حالت چیدمان المان های زبری نشان داده شده است.

جدول ۱- مقایسه دو حالت شبیه سازی جریان لایه مرزی

	$Z_0(m)$	d(m)	α	Scale
آرایش حالت اول	۰/۰۰۰۲۶	۰/۰۰۱	۰/۱۸	۱:۵۳۰
آرایش حالت دوم	۰/۰۰۰۱۱	۰/۰۰۱	۰/۱۶	۱:۴۴۰

همانطور که در جدول نشان داده شده است، مقادیر $\boldsymbol{Z_0}$ و α نسبت به حالت اول کاهش داشته است. در حالت دوم مقدار α، ۰.۰۲ کاهش پیدا کرد. مقدار d درهر دو حالت ثابت باقی ماند اما مقدار $\boldsymbol{Z_0}$ در حالت دوم چیدمان ۰/۰۰۰۱۶ متر کاهش داشته است. مقیاس در حالت دوم نسبت به حالت اول ۱۷ درصد افزایش یافته است.

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش اثر تغییر فاصله المان های زبری از مولد های گردابه‌ای بر تغییر مقیاس جریان لایه مرزی شبیه سازی شده در تونل باد بررسی شد. داده برداری از دو حالت چیدمان برای بدست اوردن پروفیل های سرعت و آشفتگی و نمودار چگالی طیفی توان نوسانات سرعت جریان انجام شد. پروفیل آشفتگی سرعت با پروفیل استاندارد مقایسه و صحت سنجی شد. نحوه بدست اوردن مقیاس برای هر دو حالت چیدمان شرح داده شد. با افزایش فاصله المان های زبری از مولد های گردابه ای پروفیل سرعت جریان با شدت کمتری افزایش پیدا می‌کند. مقدار آشفتگی جریان در هر دو حالت تا ارتفاع حدود ۳ سانتی متر از استاندارد خارج شد. در ارتفاع بالاتر آشفتگی جریان در هر دو حالت مطابقت خوبی با استاندارد داشته است. با تغییر فاصله المان های زبری با مولد های گردابه‌ای از ۱۲ سانتی متر به ۶۷ سانتی متر مقیاس از ۱:۵۳۰ به ۱:۴۴۰ افزایش پیدا کرد. مقیاس حدود ۱۷ درصد افزایش داشته است. در حالت دوم مقدار تابع توانی α، ۰.۰۲ کاهش پیدا کرد. ارتفاع جابجایی (d) درهر دو حالت ثابت باقی ماند اما مقدار طول زبری سطح آیرودینامیکی(Z0) در حالت دوم کاهش داشته است.

۶- مراجع

[1] Li Q, Zhi L, Hu F. Boundary layer wind structure from observations on a 325 m tower. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics. 2010;98(12):818-32.
[2] Kozmar H, Laschka B. Wind-tunnel modeling of wind loads on structures using truncated vortex generators. Journal of Fluids and Structures. 2019;87:334-53.
[3] Cermak JE, Cochran LS, Leflier RD. Wind-tunnel modelling of the atmospheric surface layer. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 1995;54:505-13.
[4] Barbosa P, Cataldi M, Freire A. Wind tunnel simulation of atmospheric boundary layer flows. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences. 2002;24:177-85.
[5] Kozmar H. Wind-tunnel simulations of the suburban ABL and comparison with international standards. Wind and Structures, An International Journal. 2011;14(1):15-34.
[6] Kumar PP, Mandal A, Dey J. Effect of a mesh on boundary layer transitions induced by free-stream turbulence and an isolated roughness element. Journal of Fluid Mechanics. 2015;772:445-77.

[7] Ghazal T, Aboutabikh M, Aboshosha H. FLOW-CONDITIONING OF THE WIND TUNNEL AT RYERSON UNIVERSITY TO MODEL BOUNDARY LAYER FLOWS. 2019.

[8] Tavakol MM, Yaghoubi M, Ahmadi G. Experimental and numerical analysis of airflow around a building model with an array of domes. Journal of Building Engineering. 2021;34:101901.

[9] Counihan J. An improved method of simulating an atmospheric boundary layer in a wind tunnel. Atmospheric Environment (1967). 1969;3(2):197-214.

[10] Hellman G. Über die Bewegung der Luft in den untersten Schichten der Atmosphäre. Meteorologische Zeitschrift. 1916;34:273.

[11] ESDU. Characteristics of wind speed in the lower layers of the atmosphere near the ground: strong winds (neutral atmosphere). 1972;72026.

[12] Kozmar H. Scale effects in wind tunnel modeling of an urban atmospheric boundary layer. Theoretical and applied climatology. 2010;100(1):153-62.

[13] Cook N. Determination of the model scale factor in wind-tunnel simulations of the adiabatic atmospheric boundary layer. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 1978;2(4):311-21.

[14] Bendat JS, Piersol AG. Random data: analysis and measurement procedures: John Wiley & Sons; 2011.