

بررسی تجربی اثرات تراکم المان های زبری سطح بر مقیاس بندی جریان باد لایه مرزی در تونل باد

امیرحسین صادقی^۱، محمد حجی نجف آبادی^{۲*}، سید جلیل حسینی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران، Amirsadeghi@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 شبیه سازی جریان باد لایه مرزی و نحوه چیدمان المان های مورد نیاز در تونل باد، برای ایجاد لایه مرزی مناسب از تونل باد لایه مرزی واقع در مرکز تحقیقات هوافضا دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد استفاده شد. دو حالت شبیه سازی جریان باد لایه مرزی در تونل باد با مدنظر قرار دادن منطقه حومه شهری، مورد بررسی قرار گرفت. این پژوهش جهت بررسی تاثیر تراکم عناصر زبری سطح (Surface roughness elements) بر مقیاس بندی جریان باد لایه مرزی انجام شده است. نحوه بدست آوردن مقیاس جریان باد مشخص شده است. نتایج تجربی به صورت پروفیل های آشفتگی جریان، سرعت میانگین و چگالی طیفی توان نوسانات سرعت طولی برای هر یک از حالت های شبیه سازی جریان باد استخراج شده است. پروفیل های سرعت و آشفتگی جریان باد نشان دهنده صحت تولید جریان باد لایه مرزی در این پژوهش می باشد. نتایج آزمایشات نشان می دهد که تونل باد مورد استفاده در صورت رعایت موارد لازم جهت شبیه سازی جریان باد، به خوبی می تواند جهت شبیه سازی جریان باد لایه مرزی مورد استفاده قرار گیرد. همچنین در این پژوهش مشخص شد که با کاهش حدود ۳۳ درصد از تراکم المان های زبری سطح، مقیاس جریان باد لایه مرزی حدود ۴۴ درصد کاهش می یابد.

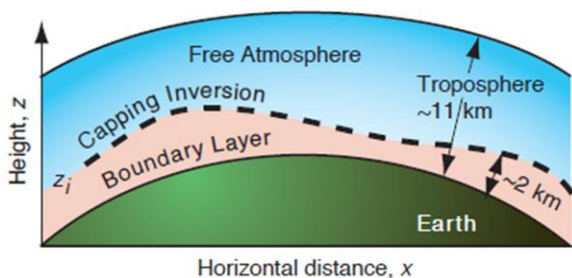
واژه های کلیدی: شبیه سازی - تونل باد - جریان باد لایه مرزی

۱- مقدمه

به طور کلی مخاطرات طبیعی که یکی از آن ها بادها و طوفان ها هستند، موجب تعادل چرخه حیات کره زمین می شوند. ولی عدم آمادگی در مواجهه با این مخاطرات باعث می شود تا نیروی مخرب آن ها اثرات زیانباری داشته باشد. این نیرو می تواند باعث خرابی ساختمان ها و زیر ساخت ها، خرابی پل ها و غیره گردد و می تواند تبدیل به یک فاجعه شود [۱].

استول (Stall) در پژوهش خود نشان داد سطح پایینی تروپوسفر (Troposphere) که بین سطح زمین و اتمسفر آزاد (Free atmosphere) قرار گرفته است، جریان لایه مرزی نام دارد. آب و هوای روزانه و دمای کره زمین توسط جریان باد لایه مرزی کنترل می شود. هر زمانی که هوا گرم تر باشد، لایه مرزی ناپایدارتر است. هر زمانی که هوا سرد تر باشد لایه مرزی پایدارتر است. شکل ۱ نشان دهنده سطح مقطع عمودی زمین و تروپوسفر است [۲].

گارسیا (Garcia) و همکاران نشان داده اند که لایه مرزی جو معمولاً در حالت آشفته است. ضخامت کم این لایه به این علت است که جریان اتمسفر آزاد بالای آن از جابجایی عمودی هوا جلوگیری می کند. ضخامت جریان لایه مرزی بسته به شرایط محیطی معمولاً از چند صد متر تا ۱ یا ۲ کیلومتر متغیر است [۳]. شبیه سازی جریان باد لایه مرزی برای مطالعاتی مانند پراکندگی آلودگی هوا، شناخت طوفان های مختلف، بارگذاری و اثرات جریان باد روی سازه ها و بسیاری از حیطه های مطالعاتی دیگر حائز اهمیت می باشد. در شکل ۲ خسارت های مربوط به طوفان چارلی در سال ۲۰۰۴ مشاهده می شود.



شکل ۱- سطح مقطع عمودی زمین و تروپوسفر [۲]



شکل ۲- خسارت های مربوط به طوفان چارلی در کوبا و ایالت فلوریدا آمریکا در سال ۲۰۰۴ [۴]

۲- شبیه سازی جریان باد لایه مرزی

بررسی جریان باد لایه مرزی در طبیعت دشوار و پرهزینه است. با وجود اینکه در شرایط آزمایشگاهی ممکن است محدودیت هایی برای بررسی این جریان ها وجود داشته باشد ولی راحت تر می توان جریان باد لایه مرزی را بررسی و شبیه سازی کرد. به طور مثال باربوسا (Barbosa) و همکاران در پژوهش خود نشان داده اند که چگونه می توان در یک تونل باد با محفظه تست کوچک، یک لایه مرزی ضخیم را شبیه سازی کرد [۵].

باشد. سرعت جریان باد درون تونل تا مقدار ۲۰ متر بر ثانیه قابل افزایش می‌باشد.

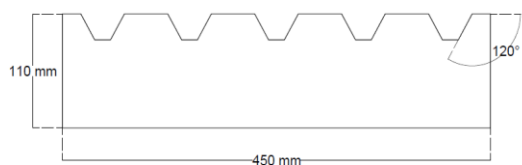


شکل ۳- تونل باد لایه مرزی

2-3-2- المان های شبیه سازی جریان باد لایه مرزی

کانیهان (Counihan) یک مدل ارتقا یافته برای شبیه سازی لایه مرزی جو در تونل باد ارائه کرد. این مدل دارای دیواره قلعه ای شکل (Castellated barrier wall)، مولد های گردابه بیضی و المان های زبری سطح می باشد [۱۱-۱۳]. این مدل ارتقا یافته، نتایج دقیقی را به محققین ارائه می دهد. بسیاری از مقالات با بهره گیری از این مدل به شبیه سازی جریان لایه مرزی پرداخته اند [۷، ۱۴، ۱۵]. در این پژوهش با مطالعه دقیق پژوهش های قبلی، یک نقشه اولیه تخمینی جهت ساخت المان ها و قطعات مورد نیاز و نحوه چینش آن ها در تونل باد تهیه شد و المان ها در محل مشخص خود نصب شدند.

ارتفاع دیواره ی قلعه ای شکل که اولین المان قرار گرفته در مسیر جریان باد می باشد ۱۱ سانتی متر است. این دیواره کل عرض تونل را پوشش می دهد. شماتیک این دیواره در شکل ۴ مشاهده می شود. در مدل شبیه سازی جریان لایه مرزی این پژوهش از دو میله هادی جریان با اقتباس از پژوهش توکل و همکاران برای جلوگیری از آشفتگی بیش از حد جریان باد لایه مرزی استفاده شده است [۱۶]. قطر دو میله هادی جریان یک سانتی متر بوده و در دو ارتفاع ۲۵/۵ و ۲۹/۵ سانتی متر از کف تونل قرار گرفته اند. در پژوهش کانیهان جهت هماهنگی با فرم پروفیل سرعت جریان لایه مرزی معمول از مولد گردابه ای با فرم بیضی استفاده شده است. در این پژوهش از چهار مولد گردابه ای با هندسه ای بیضی و با ارتفاع ۳۷ سانتی متر استفاده شده است. این مولد ها در عرض تونل و پشت دیواره قلعه ای شکل قرار داده شده است. مولد گردابه ای جهت کنترل سرعت جریان باد در کل ارتفاع جریان باد استفاده شده است [۱۳]. شکل ۵ نمای شماتیک پشت از نحوه قرارگیری سه المان ابتدایی و شکل ۶ نمای روبرو این المان ها که در دهانه تونل باد لایه مرزی قرار گرفته اند را نشان می دهد.



یکی از اساسی ترین مشکلات در زمینه شبیه سازی جریان باد لایه مرزی، بدست آوردن مقیاس مناسب این جریان می باشد. کوزمار (Kozmar) در پژوهش خود از چند مدل مختلف جهت شبیه سازی جریان باد لایه مرزی شهری و حومه شهری استفاده کرده است. در این پژوهش ها به بررسی تأثیر ابعاد المان های زبری، مولد گردابه ای (Vortex Generator) و سایر عوامل موثر بر تغییر مقیاس لایه مرزی پرداخته شده است. در انتها پروفیل های سرعت و آشفتگی جریان باد شبیه سازی شده و با پروفیل های استاندارد مقایسه شده اند [۶، ۷]. در یکی دیگر از پژوهش های کوزمار این نکته که تراکم ساختمان ها در مناطق روستایی و حومه شهری چه تاثیری بر جریان لایه مرزی دارد، مد نظر قرار گرفته است. در ادامه این پژوهش مشخص شد که با کوچک تر شدن فاصله ساختمان ها سرعت میانگین کند می شود. در حالی که شدت آشفتگی به دلیل افزایش اصطکاک بین سطح و جریان هوا افزایش می یابد [۸]. شجاعی و همکاران به طراحی، تحلیل محاسباتی و آزمایش تجربی تونل باد به منظور شبیه سازی مشخصات لایه مرزی جو پرداخته اند. جهت شبیه سازی جریان باد لایه مرزی از مناره ها و چند ردیف عناصر زبری سطح مکعبی در ورودی تونل باد استفاده شده است. در ادامه تحلیل محاسباتی آن ها مشخص شد که طراحی مورد نظر، ضخامت لایه مرزی لازم را در اختیار قرار می دهد. همچنین نتایج آزمایشگاهی این پژوهش، نتایج قابل قبولی را نشان می دهد [۹]. این نکته که ارتفاع ساختمان های بلند ممکن است از لایه مرزی جو فراتر برود، توسط سان (Sun) و همکاران مورد بررسی قرار گرفت. آن ها به بررسی توزیع فشار در مقیاس بزرگ بر روی یک ساختمان بلند در کشور چین پرداخته اند. ارتفاع زیاد مدل، مشکلات فنی زیادی برای شبیه سازی ایجاد می کند. آنها مشکلات فنی آزمایش های تونل باد را شرح داده اند و ضرایب فشار متوسط و شدید را بررسی کرده اند [۱۰].

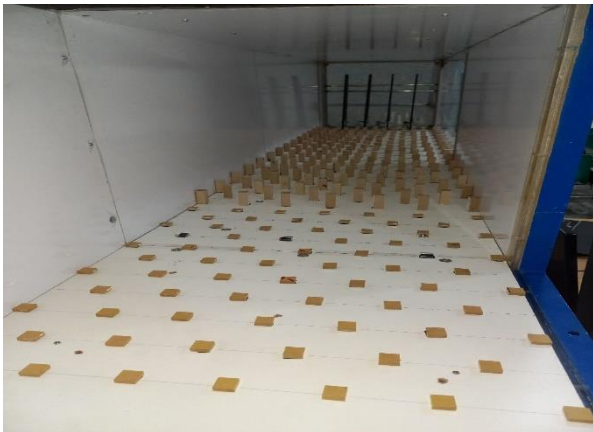
تا به امروز تحقیقات زیادی در زمینه شبیه سازی جریان باد لایه مرزی در تونل باد انجام شده است. در این تحقیقات اثرات پارامتر های مختلف بررسی شده است. ولی کماکان یکی از چالش های اساسی محققین جهت شبیه سازی این جریان باد، ایجاد جریان لایه مرزی با مقیاس مناسب می باشد. پارامترهای زیادی در رابطه با شبیه سازی و مقیاس بندی این جریان باد وجود دارند. یکی از این پارامتر ها تراکم عناصر زبری سطح می باشد. لذا این پژوهش با مدنظر قرار دادن اثر تغییر تراکم عناصر زبری سطح بر مقیاس جریان باد لایه مرزی، این جریان باد را شبیه سازی کرده است. در این پژوهش نحوه بدست آوردن مقیاس جریان باد مشخص شده است. برای هر یک از حالت های شبیه سازی جریان پروفیل های سرعت، آشفتگی جریان و چگالی طیفی توان نواسانات سرعت طولی استخراج شده است.

۳- تجهیزات و شرایط آزمایشگاهی

در این بخش مشخصات تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده جهت شبیه سازی جریان باد لایه مرزی ارائه شده است.

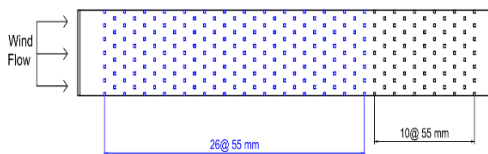
1-3-1- تونل باد

تونل باد این پژوهش که در شکل ۳ مشاهده شده است واقع در مرکز تحقیقات هوا فضا دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد می باشد. طول تونل باد ۳۰۰ سانتی متر و عرض و ارتفاع محفظه تست تونل ۴۵ سانتی متر می باشد. نسبت طول محفظه تونل باد به ارتفاع مقطع تونل برابر «۱۰:۷» می



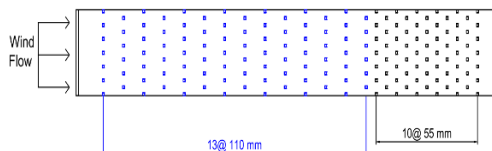
شکل ۷- نحوه قرارگیری المان های زبری سطح در محفظه تونل باد

در حالت اول قرار گیری المان های زبری، ابتدا از فاصله ۱۲ سانتی متری از مولدهای گردابه‌ای ۲۷ ردیف المان زبری سطح بزرگتر قرار گرفته است. پس از آن ۱۱ ردیف المان زبری سطح کوچکتر قرار می‌گیرد. در شکل ۸ نحوه قرار گیری المان های زبری در حالت اول مشخص شده است.



شکل ۸- نحوه قرارگیری المان های زبری سطح در حالت اول

در حالت دوم قرار گیری المان های زبری، ابتدا از فاصله ۱۲ سانتی متری از مولدهای گردابه‌ای ۱۴ ردیف المان زبری سطح بزرگتر قرار گرفته است. پس از المان های بزرگتر ۱۱ ردیف المان زبری سطح کوچکتر قرار می‌گیرد. همچنین فاصله سنسور داده برداری از آخرین المان زبری سطح در هر دو حالت ۱۷/۵ سانتی متر می‌باشد. در شکل ۹ نحوه قرار گیری المان های زبری در حالت دوم مشخص شده است.

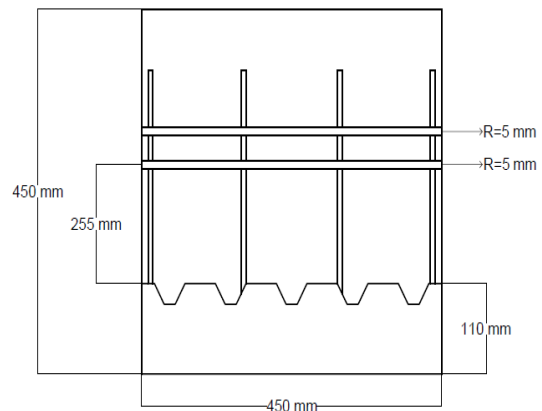


شکل ۹- نحوه قرارگیری المان های زبری سطح در حالت دوم

3-3- سیستم های 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 (Pressure Box) که دقت بالایی دارند، کالیبره شده است. این سرعت سنج توانایی داده برداری در

شکل ۴- دیواره قلعه ای شکل



شکل ۵- نمای پشت از نحوه قرارگیری سه المان در دهانه تونل باد لایه مرزی

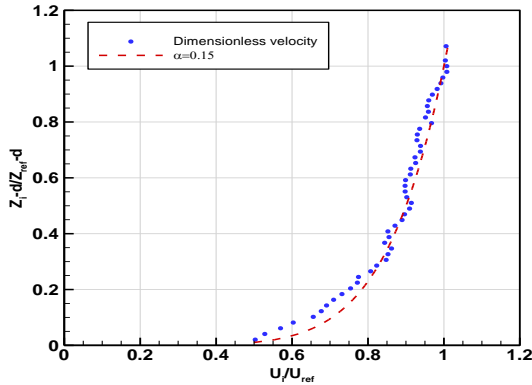


شکل ۶- نمای روبرو از نحوه قرارگیری سه المان در دهانه تونل باد لایه مرزی

در ادامه المان های بالا المان های زبری سطح در دو اندازه مختلف قرار داده شده است. المان های بزرگتر با طول و عرض $1/6 \times 1/6$ سانتی متر و ارتفاع ۴ سانتی متر به کار برده شده است. همچنین المان های کوچکتر با طول و عرض $1/6 \times 1/6$ سانتی متر و ارتفاع $0/5$ سانتی متر بعد از المان های بزرگتر قرار گرفته اند. نحوه چینش المان ها، ابعاد المان ها و تراکم آن‌ها در ابتدا با یک تخمین اولیه انجام شد و سپس با استفاده از داده برداری متعدد از جریان لایه مرزی و سعی و خطا چینش نهایی المان ها بدست آمد [۱۳، ۱۷].

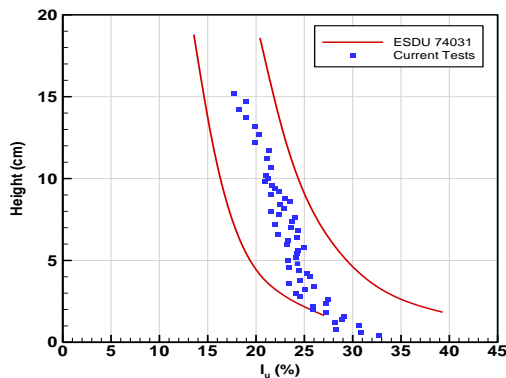
در دو حالت شبیه سازی جریان باد لایه مرزی آرایش المان ها به صورت ضربدری می‌باشد ولی تراکم المان های زبری سطح بزرگتر تغییر می‌کند. شکل ۷ نحوه قرارگیری المان های زبری سطح را نشان می‌دهد.

تابع توانی و پروفیل سرعت بی بعد پروفیل سرعت بدست آمده را تأیید می کند.



شکل ۱۱- پروفیل سرعت بی بعد شده جریان باد به همراه تابع توانی (α)

در ادامه پژوهش پروفیل آشفتگی جریان بدست آمده است. همانطور که در شکل ۱۲ مشاهده می شود، آشفتگی جریان باد این حالت حدود ۱۷ الی ۳۳ درصد می باشد. این نتایج نشان می دهد که آشفتگی محدوده مدنظر آیین نامه ESDU 74031 می باشد. تطابق پروفیل آشفتگی جریان با آیین نامه ESDU 74031 نیز صحت مقیاس بندی جریان باد را نشان می دهد.



شکل ۱۲- پروفیل آشفتگی جریان باد به همراه مقیاسه با محدوده مدنظر آیین نامه ESDU 74031

با توجه به پارامترهای زیادی که جهت بدست آوردن مقیاس جریان لایه مرزی نیاز است تا بررسی شوند، مقیاس بندی جریان باد لایه مرزی زمان بر می باشد [۱۳]. کوک در پژوهش خود رابطه (۲) را برای بدست آوردن مقیاس جریان لایه مرزی پیشنهاد کرده است [۲۱].

$$S = \frac{91.3(Z-d)^{0.491}}{L_{ux}^{1.403} Z_0^{0.088}} \quad (2)$$

در این رابطه Z_0 طول زبری سطح آیرودینامیکی (Aerodynamic surface roughness length) و $L_{u,x}$ انتگرال طولی مقیاس طولی هستند. از رابطه (۳) می توان مقدار $L_{u,x}$ را بدست آورد. در این رابطه \bar{u}_z میانگین

فرکانس بالا و در زمان کاهش سرعت جریان باد را دارد و داده های دقیقی را ارائه می دهد. فرآیند داده برداری در هر نقطه در فرکانس ۱۲۰۰ هرتز انجام می شود. همچنین 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 میلی متر را دارد.

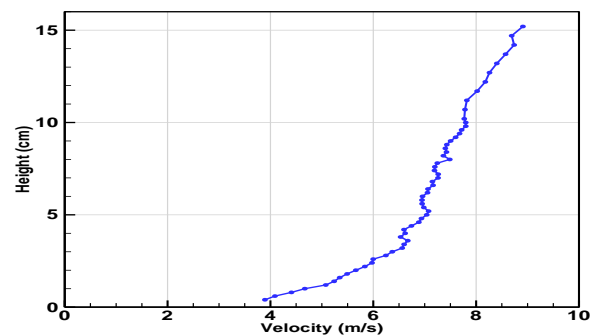
۴- نتایج و بحث

در این بخش نتایج آزمایشات برای دو چیدمان مشخص شده در قسمت قبل آورده شده است. همچنین پروفیل های سرعت و آشفتگی جریان برای هر چیدمان مشخص شده است.

1-4- چیدمان المان های زبری سطح در حالت اول

در این قسمت برای حالت اول چیدمان المان ها، ابتدا نحوه بدست آوردن پروفیل های آشفتگی جریان و سرعت باد و در ادامه نحوه محاسبه مقیاس جریان باد لایه مرزی ارائه شده است.

از سنسور سیم داغ برای بدست آوردن پروفیل سرعت و آشفتگی جریان استفاده می شود. شکل ۱۰ پروفیل سرعت بدست آمده از جریان باد در کف دیواره تونل را نشان می دهد.



شکل ۱۰- پروفیل سرعت در حالت اول شبیه سازی جریان باد

در پژوهش هلمن به ارائه تابع توانی (Power-Law) پرداخته شده است که پروفیل سرعت جریان این پژوهش براساس آن بدست آمده است این تابع توانی در رابطه (۱) مشخص شده است [۱۸].

$$\frac{\bar{u}_z}{u_{ref}} = \left(\frac{z-d}{Z_{ref}-d} \right)^\alpha \quad (1)$$

در این رابطه مقدار Z برابر ارتفاع نقطه داده برداری، Z_{ref} ارتفاع مبنا، \bar{u}_z میانگین سرعت جریان در ارتفاع داده برداری، d ارتفاع جابجایی و u_{ref} میانگین سرعت جریان در ارتفاع مبنا است. همچنین مقدار تابع توانی (α) در رابطه بالا براساس آیین نامه ESDU-72026 [۱۹، ۲۰] بدست می آید. لازم به ذکر است در این پژوهش ارتفاع مبنا برابر ۱۰ سانتی متر می باشد.

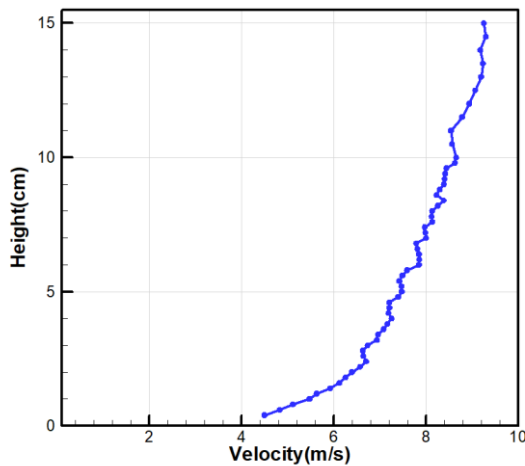
در ادامه پروفیل سرعت بی بعد شده جریان باد براساس سرعت مبنا در ارتفاع مبنا به همراه تابع توانی استخراج شده است که در شکل ۱۱ نشان داده شده است. مقدار α بدست آمده طبق پروفیل سرعت برابر ۰/۱۵ می باشد. که این مقدار مربوط به منطقه حومه شهری می باشد. همپوشانی

در نمودار بالا مشخص است که بیشترین مقدار طیف توانی محدوده فرکانس ۵ هرتز می باشد. با توجه به شکل ۱۳ و شکل ۱۴ تفاوت های زیادی بین دو نمودار مشاهده نمی شود. بنابراین مقیاس ۱:۳۱۰ مورد اطمینان است.

2-4- چیدمان المان های زبری سطح در حالت دوم

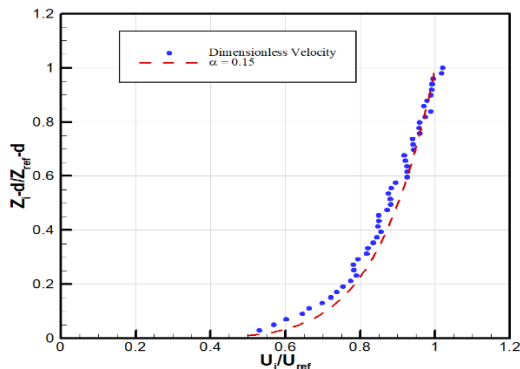
در این قسمت برای حالت دوم شبیه سازی که چیدمان المان ها با ترکم کمتر در نظر گرفته شده است، تخمین پروفیل های آشفتگی جریان و سرعت باد مشخص شده است. همچنین محاسبه مقیاس جریان باد انجام شده است.

برای حالت دوم شبیه سازی نیز از ارتفاع ۲ میلی متری جهت استخراج پروفیل سرعت داده برداری شد. شکل ۱۵ نشان دهنده پروفیل سرعت جریان باد لایه مرزی در حالت دوم چیدمان می باشد.



شکل ۱۵- پروفیل سرعت در حالت دوم شبیه سازی جریان باد

برای حالت دوم شبیه سازی نیز پروفیل سرعت بی بعد شده جریان باد که براساس سرعت مینا در ارتفاع مینا بی بعد شده است، به همراه تابع توانی ارائه شده است. همانطور که در شکل ۱۶ مشاهده می شود پروفیل تابع توانی همپوشانی خوبی با پروفیل سرعت دارد. مقدار تابع توانی در این حالت نیز برابر ۰/۱۵ می باشد. که این مقدار پروفیل سرعت بدست آمده را تأیید می کند.



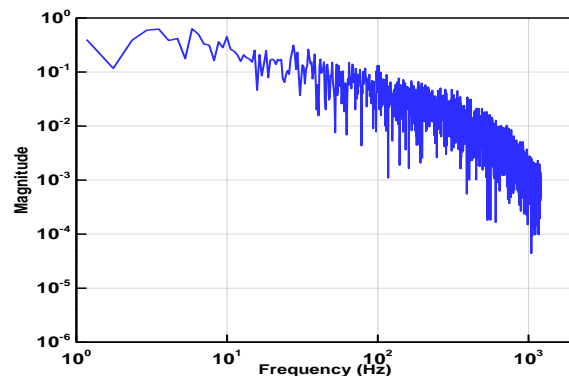
شکل ۱۶- پروفیل سرعت بی بعد شده جریان باد به همراه تابع توانی

سرعت در راستای X و f_M بیشترین فرکانس بدست آمده از نمودار چگالی طیفی توان نواسانات سرعت طولی می باشد.

$$L_{ux} = \frac{0.146 \bar{u}_z}{f_M} \quad (3)$$

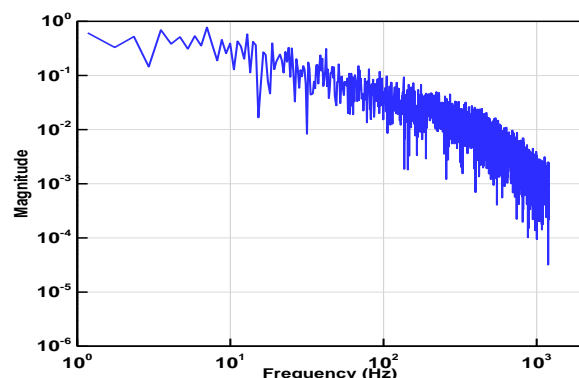
برای بدست آوردن f_M داده برداری توسط سنسور سیم داغ در ارتفاع مورد نظر انجام می شود. سپس استخراج داده های لحظه ای انجام شده و با استفاده از تبدیل فوری، با روشی که بندهات و پیرسول پیشنهاد داده است نمودار طیف قدرت در ارتفاع مدنظر بدست می آید. مقادیر Z_0 و d با استفاده از سعی و خطا قابل تعیین هستند و با رسم نمودار های جریان لایه مرزی می توان مقدار آن ها را به صورت تخمینی بدست آورد [۲۲].

شکل ۱۳ نشان دهنده نمودار طیف قدرت می باشد. در محدوده فرکانس ۵ هرتز این طیف به بیشترین مقدار خود رسیده است. میانگین سرعت جریان در این نقطه، برابر با ۸/۰۸ متر بر ثانیه می باشد. در ادامه با استفاده از رابطه (۲) مقدار L_{ux} برابر ۰/۲۳۶ به دست می آید. پس از تعیین مقدار f_M مقادیر Z_0 و d تعیین می شوند. مقدار d در این پژوهش ۰/۰۲ می باشد.



شکل ۱۳- نمودار چگالی طیفی توان نواسانات سرعت طولی

در این حالت مقیاس ۱:۳۱۰ بدست آمده است. در پژوهش کوزمار در آزمایشی دیگر به استخراج مجدد نمودار چگالی طیفی توان نواسانات سرعت پرداخته شده است تا از محاسبه صحیح مقادیر مقیاس اطمینان حاصل شود [۷]. شکل ۱۴ استخراج مجدد این نمودار را نشان می دهد.



شکل ۱۴- تکرار آزمایش نمودار چگالی طیفی توان نواسانات سرعت طولی

بنابراین با قرار دادن پارامتر های مورد نظر در رابطه (۲) مقیاس شبیه سازی جریان در حالت دوم برابر ۵۵۲ می باشد. جدول ۱ خلاصه ای از مشخصات دو حالت شبیه سازی جریان باد را نشان می دهد.

جدول ۱- مقایسه دو حالت شبیه سازی جریان باد

α	Z_0 (m)	d (m)	S	حالت شماره
0.15	0.0067	0.02	310	۱
0.15	0.0000549	0.001	552	۲

تراکم المان های زبری در حالت اول برابر ۶ درصد مساحت صفحاتی که روی آن قرار داشته اند می باشد. این تراکم در حالت دوم به ۴ درصد کاهش داده شده است. همانطور که مشخص است با کاهش تراکم المان های زبری سطح مقیاس از ۱:۳۱۰ به ۱:۵۵۲ کاهش پیدا کرده است. همچنین مقادیر d و Z_0 به شدت کاهش پیدا کرده اند. ولی تغییری در پارامتر تابع توانی مشاهده نمی شود.

۵- نتیجه گیری

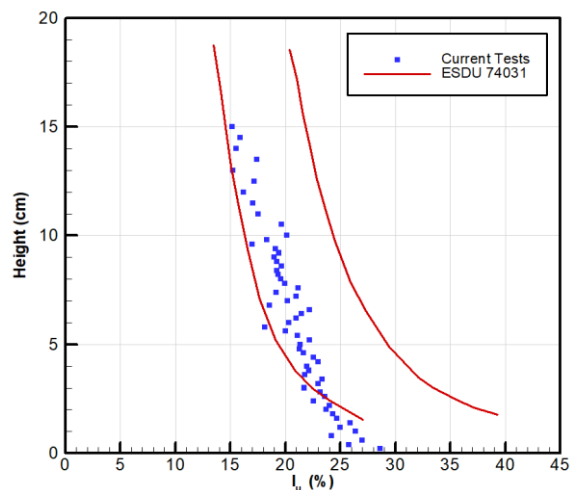
در این پژوهش اثر تغییر تراکم المان های زبری سطح بر مقیاس بندی جریان باد لایه مرزی بررسی شد. جریان باد با دو نوع المان زبری سطح با مقیاس های ۱:۳۱۰ و ۱:۵۵۲ شبیه سازی شده است. داده برداری از جریان باد شبیه سازی شده برای بدست آوردن پروفیل سرعت، آشفتگی و نمودار چگالی طیفی توان نواسانات سرعت طولی انجام شد. پروفیل آشفتگی جریان با پروفیل استاندارد مقایسه شد. برای هر کدام از حالت های شبیه سازی نحوه بدست آوردن مقیاس شرح داده شد و صحت سنجی انجام شد. طبق نتایج بدست آمده از پژوهش آشفتگی جریان در حالت اول به خوبی در محدوده مدنظر آیین نامه ESDU 74031 قرار می گیرد. در حالت دوم از دیواره تا حدود ارتفاع ۳ سانتی متری پروفیل آشفتگی کمی از محدوده مدنظر آیین نامه ESDU 74031 خارج می شود. با توجه به اینکه المان های زبری در حالت اول ۶ درصد و در حالت دوم ۴ درصد مساحت صفحاتی که روی آن قرار دارند را پوشش می دهند. نتایج نشان می دهد که کم شدن تراکم المان های زبری سطح مقیاس جریان باد را حدود ۴۴ درصد کاهش می دهد. همچنین تابع توانی در هر دو حالت یکسان بوده ولی مقادیر d و Z_0 در حالت دوم به شدت کاهش یافته اند.

۶- مراجع

- [۱] د. ا. ز. نعیمه، "اثرات مخرب طوفان بر سکونتگاههای انسانی presented at the HSE دومین کنفرانس ملی مدیریت بحران و در شریان های HSE دومین کنفرانس ملی مدیریت بحران و حیاتی، ۱۳۹۳.
- [۲] R. B. S. Roland B. Stull *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Springer, 1988.
- [۳] M. García-Villalba, H. Kuerten, and M. V. Salvetti, *Direct and Large Eddy Simulation XII*. Springer International Publishing, 2020.
- [۴]

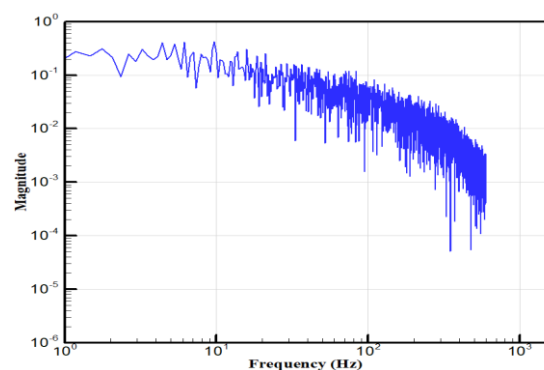
<https://www.kojaro.com/2016/10/11/122575/strongest-deadliest-hurricanes-ever-recorded/> (accessed).

در ادامه برای حالت دوم شبیه سازی نیز پروفیل آشفتگی جریان بر حسب ارتفاع بدست آمده است. در شکل ۱۷ پروفیل آشفتگی جریان مشاهده می شود. آشفتگی جریان باد در حالت دوم حدود ۱۵ الی ۲۸/۵ درصد می باشد. همانطور که مشاهده می شود، بیشتر قسمت های این پروفیل آشفتگی در محدوده مدنظر آیین نامه ESDU 74031 می باشد. ولی از کف تونل تا ارتفاع حدود ۳ سانتی متر آشفتگی در محدوده مدنظر قرار ندارد.



شکل ۱۷- پروفیل آشفتگی جریان باد به همراه مقایسه با محدوده مدنظر آیین نامه ESDU 74031

همانطور که گفته شد کوک در پژوهش خود از رابطه (۲) برای بدست آوردن مقیاس جریان لایه مرزی استفاده کرده است [۲۱]. نمودار طیف قدرت برای حالت دوم در شکل ۱۸ مشاهده می شود. این طیف در محدوده فرکانس ۵/۵ هرتز به بیشترین مقدار خود رسیده است. میانگین سرعت جریان در این نقطه، برابر با ۸/۸۱ متر بر ثانیه می باشد. همچنین مقدار Lu_x با استفاده از رابطه (۲) برابر ۰/۲۳۱ به بدست می آید. همانطور که گفته شد، مقدار d در این حالت برابر ۰/۰۰۱ متر و مقدار Z_0 برابر ۰/۰۰۰۵۴۹ متر می باشد. این مقادیر نسبت به حالت اول بسیار کمتر می باشند.



شکل ۱۸- نمودار چگالی طیفی توان نواسانات سرعت طولی

- [۲۱] N. Cook, "Determination of the model scale factor in wind-tunnel simulations of the adiabatic atmospheric boundary layer," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 2, no. 4, pp. 311-3. ۱۹۷۸, ۲۱
- [۲۲] J. S. Bendat and A. G. Piersol, *Random data: analysis and measurement procedures*. John Wiley & Sons, 2011.
- [۵] P. Barbosa, M. Cataldi, and A. Freire, "Wind tunnel simulation of atmospheric boundary layer flows," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences*, vol. 24, pp. 177-185, 2002.
- [۶] H. Kozmar, "Wind-tunnel simulations of the suburban ABL and comparison with international standards," *Wind and Structures An International Journal*, vol. 14, no. 1, pp. 15-34, 2011, doi: 10.12989/was.2011.14.1.015.
- [۷] H. Kozmar, "Scale effects in wind tunnel modeling of an urban atmospheric boundary layer," *Theoretical and applied climatology*, vol. 100, no. 1, pp. 153-162, 2010.
- [۸] H. Kozmar, "Influence of spacing between buildings on wind characteristics above rural and suburban areas," *Wind Struct*, vol. 11, no. 5, pp. 413-426, 2008.
- [۹] S. Shojaee, O. Uzol, and Ö. Kurç, "Atmospheric boundary layer simulation in a short wind tunnel," *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 11, no. 1, pp. 59-68, 2014.
- [۱۰] X. Sun, H. Liu, N. Su, and Y. Wu, "Investigation on wind tunnel tests of the Kilometer skyscraper," *Engineering Structures*, vol. 148, pp. 340-356, 2017, doi: 10.1016/j.engstruct.2017.06.052.
- [۱۱] J. Counihan, "Adiabatic atmospheric boundary layers: a review and analysis of data from the period 1880-1972," *Atmospheric Environment (1967)*, vol. 9, no. 10, pp. 871-905, 1975.
- [۱۲] J. Counihan, "Simulation of an adiabatic urban boundary layer in a wind tunnel," *Atmospheric Environment (1967)*, vol. 7, no. 7, pp. 673-689, 1973.
- [۱۳] J. Counihan, "An improved method of simulating an atmospheric boundary layer in a wind tunnel," *Atmospheric Environment (1967)*, vol. 3, no. 2, pp. 197-214, 1969.
- [۱۴] P. H. A. Barbosa, M. Cataldi, and A. P. S. Freire, "Wind tunnel simulation of atmospheric boundary layer flows," *Mechanical Engineering Program*, 2002.
- [۱۵] H. Kozmar, "An alternative approach to experimental simulation of wind characteristics in urban environments," *Procedia Environmental Sciences*, vol. 4, pp. 43-50, 2011, doi: 10.1016/j.proenv.2011.03.006.
- [۱۶] M. M. Tavakol, M. Yaghoubi, and G. Ahmadi, "Experimental and numerical analysis of airflow around a building model with an array of domes," *Journal of Building Engineering*, vol. 34, p. 101901, 2021.
- [۱۷] H. Kozmar, "Natural wind simulation in the TUM boundary layer wind tunnel," in *Proceedings of the 9th European-African Conference on Wind Engineering, Florence, Italy*, 2009.
- [۱۸] G. Hellman, "Über die Bewegung der Luft in den untersten Schichten der Atmosphäre," *Meteorologische Zeitschrift*, vol. 34, p. 273, 1916.
- [۱۹] H. Kozmar, "Natural wind simulation in the TUM boundary layer wind tunnel," presented at the 5th European and African Conference on Wind Engineering, EACWE 5, Proceedings, 01, 2009.
- [۲۰] ESDU, "Characteristics of wind speed in the lower layers of the atmosphere near the ground: strong winds (neutral atmosphere)," vol. 72026, 1972.