

## بررسی تجربی اثرات فاصله نقطه مبنا از المان های زبری سطح بر مقیاس بندی لایه مرزی در تونل باد

محمد مهدی اسماعیل زاده<sup>1</sup>، محمد حجی نجف آبادی<sup>2\*</sup>، سید جلیل حسینی<sup>3</sup>

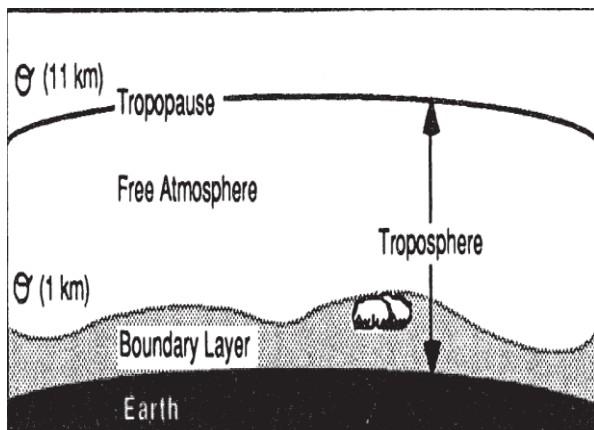
1- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، مرکز تحقیقات هوا و فضا و تبدیل انرژی واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران، mohammadmahdi2911@gmail.com

2- استادیار، دانشکده فنی مهندسی، مرکز تحقیقات هوا و فضا و تبدیل انرژی واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران، hojaji\_m@pmc.iaun.ac.ir

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



شکل 1- خسارت های ایجاد شده تحت اثر عنوان طوفان فروریزشی در سال 1396 [1]



شکل 2- سطح مقطع لایه تروپوسفر [2]

### 2- سیستم شبیه سازی جریان باد لایه مرزی

کانیهان با سیستمی که شبیه سازی جریان لایه مرزی در مناطق روستایی را انجام داده بود این بار جریان لایه مرزی در مناطق شهری را شبیه سازی کرد. اندازه گیری ها در جریان شبیه سازی شده با واقعیت مقایسه شدند و توافق قابل قبولی به دست آمد. با این وجود که اندازه گیری در مناطق شهری فقدان دارد فرضیات متعددی باید در رابطه با ویژگی های بعضی از

### چکیده

جهت شبیه سازی جریان لایه مرزی از تونل باد واقع در مرکز تحقیقات هوا فضا دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد استفاده شده است. ضخامت جریان لایه مرزی از 100 متر تا 3000 متر می باشد. در این پژوهش برای ایجاد پروفیل لایه مرزی از المان های زبری سطح، دیواره قلعه ای شکل و مولد های گردابه ای استفاده شده است؛ همچنین برای اندازه گیری سرعت و میزان آشفستگی سرعت سنج سیم داغ استفاده گردیده است. المان های زبری در دو ابعاد  $15 \times 15 \times 40 \text{ mm}$  و  $15 \times 15 \times 5 \text{ mm}$  استفاده شده است. شبیه سازی جریان لایه مرزی در این پژوهش در حومه شهر می باشد. شبیه سازی جریان لایه مرزی در تونل باد در سه حالت شبیه سازی با مد نظر قرار دادن اثر فاصله سیستم سرعت سنج سیم داغ تا آخرین ردیف المان های زبری سطح مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این آزمایش نشان می دهد، اگر فاصله سرعت سنج سیم داغ تا آخرین ردیف المان های زبری سطح بیشتر از 1.6 برابر دیواره قلعه شکل باشد؛ آشفستگی جریان لایه مرزی در محدوده مدنظر آیین نامه قرار نخواهد گرفت. همچنین نیز با افزایش فاصله طولی سرعت سنج سیم داغ از آخرین ردیف المان های زبری سطح سرعت جریان باد لایه مرزی کاهش محسوسی خواهد یافت.

واژه های کلیدی: جریان باد لایه مرزی، شبیه سازی، تونل باد، عناصر زبری

### 1- مقدمه

طوفان عبارت است از آشفستگی جوی با اختلال در فشار موجود که گستردگی طوفان های تورنادو (عرض 1 کیلومتر) تا گردبادهای حجیم (عرض 2 تا 3 هزار کیلومتر) می باشد. یکی از انواع بادهایی که در طراحی سازه ها تاثیر گذار می باشد؛ بادهای لایه مرزی می باشند.

لایه تروپوسفر از دو قسمت اتمسفر آزاد و لایه مرزی تشکیل شده است. ضخامت لایه تروپوسفر حدود 11000 متر می باشد. جریان باد لایه مرزی نزدیک به سطح زمین می باشد. حداقل ضخامت آن 100 متر و حداکثر 3000 متر می باشد و از ضخامت 3000 متر تا پایان لایه تروپوسفر را اتمسفر آزاد مینامند. این جریان ها در ارتفاعات بالاتر تاثیرات مخرب بیشتری دارد.

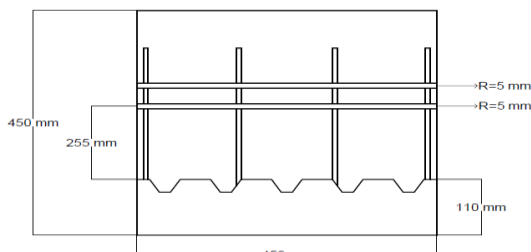


شکل 3- تونل باد لایه مرزی

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

کانیپان یک مدل توسعه یافته برای شبیه سازی لایه مرزی جو در تونل باد ارائه کرد. این مدل دارای دیواره قلعه ای شکل، مولد های گردابه بیضی و المان های زبری سطح می باشد [3, 7, 8]. این مدل توسعه یافته، نتایج دقیقی را به محققین ارائه می دهد. بسیاری از مقالات با استفاده از این مدل به شبیه سازی جریان لایه مرزی پرداخته اند [6, 9, 10]. 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 شده و المان ها در محل مشخص خود نصب شده اند.

ارتفاع دیواره ی قلعه ای شکل که اولین المان قرار گرفته در مسیر جریان باد می باشد 110 میلی متر است. در مدل شبیه سازی جریان لایه مرزی از دو میله هادی جریان استفاده شده است. قطر دو میله هادی جریان 10 میلی متر بوده و در دو ارتفاع 255 و 295 میلی متر از کف تونل قرار گرفته اند. این دو میله با بهره گیری از پژوهش توکل و همکاران برای جلوگیری از آشفتگی بیش از حد جریان باد لایه مرزی نصب شده است [11]. در پژوهش کانیپان جهت هماهنگی با فرم پروفیل سرعت جریان لایه مرزی معمول از مولد گردابه ای با فرم 1/4 بیضی استفاده شده است. در این پژوهش از چهار مولد گردابه ای با هندسه ای بیضی و با ارتفاع 370 میلی 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 [7]. شکل 4 نمای شماتیک پشت از نحوه قرارگیری سه المان و شکل 4 نمای روبرو این المان ها که در دهانه تونل باد لایه مرزی قرار گرفته اند را نشان می دهد.



شکل 4- نمای پشت از نحوه ی قرارگیری سه المان در دهانه ی تونل باد لایه مرزی

پارامترها جریان در نظر گرفته شود. در این پژوهش از عناصرزبری در دو ارتفاع 9.5 میلیمتر و 15.9 میلیمتر استفاده شده است [3].

کوزمار با استفاده از روش کانیپان در تونل باد دانشگاه فنی مونیخ برای بررسی توسعه جریان و یکنواختی از روش تجربی استفاده کرده است. در این پژوهش سرعت متوسط، شدت تلاطم، مقیاس طول انتگرال تلاطم و چگالی طیفی توان نوسانات سرعت با داده ها و یا مدل های نظری مقایسه شده است. جریان باد لایه مرزی شبیه سازی شده در تونل به خوبی با جریان باد لایه مرزی روستایی و حومه شهری مقایسه شده است [4].

کوزمار در یک پژوهش دیگر سه شبیه سازی جریان لایه مرزی در تونل باد برای رسیدگی به ویژگی های این جریان را بررسی کرده است. در ادامه به بررسی اثرات پارامتر های موجود جهت شبیه سازی جریان باد لایه مرزی در تونل باد در مقیاس (1:400, 1:220, 1:250) پرداخته است. برای این آزمایش، پارامترهای سرعت میانگین، شدت آشفتگی و تنش برشی رینولدز مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این پژوهش نشان می دهد که مقیاس های طول انتگرال به سرعت باد مرجع و ارتفاع بستگی دارد [5].

کوزمار در این پژوهش خود به یکی از مسائل کلیدی جهت انتخاب مناسب مقیاس طول شبیه سازی پرداخته است. در این پژوهش یک شبیه سازی تمام عمق با استفاده از دیوار مانع مسطح، مولدهای ورتکس و عناصر زبری انجام شده است. مولدهای گردابه ای برای شبیه سازی عمق بخش جریان لایه مرزی به کار رفته است. یک سیستم اندازه گیری سیم داغ برای اندازه گیری سرعت متوسط و نوسانات سرعت استفاده شده است. نتایج این پژوهش نشان می دهد که شبیه سازی جریان باد لایه مرزی به وسیله گردابه های مولد توسعه یافته می تواند به طور موفقیت آمیزی در شبیه سازی عمق جریان لایه مرزی در ناحیه شهری به کار گرفته شود [6].

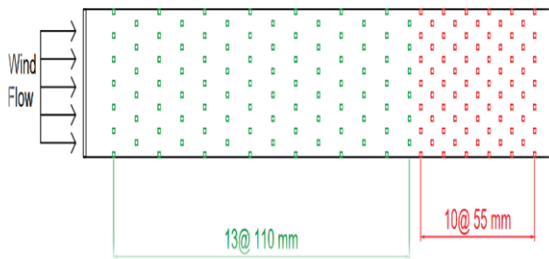
یکی از موارد اساسی در شبیه سازی جریان باد لایه مرزی در تونل باد مقیاس گذاری مناسب آن می باشد. پارامترهای زیادی بر تعیین مقیاس این جریان اثر گذار می باشند، که کماکان خلاء های تحقیقاتی زیادی در این زمینه وجود دارد. یکی از پارامتر های تاثیر گذار بر مقیاس گذاری جریان باد لایه مرزی فاصله سیستم اندازه گیری جریان باد از المان های زبری سطح می باشد. لذا هدف این پژوهش شبیه سازی جریان باد لایه مرزی در تونل باد و بررسی اثرات فاصله سیستم اندازه گیری جریان باد از المان های زبری سطح می باشد. نویسندگان بر این باورند که نتایج این تحقیق بتواند باعث افزایش شناخت پارامتر های موثر بر مقیاس گذاری این جریان گردد.

### 3- تجهیزات و شرایط آزمایشگاهی

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

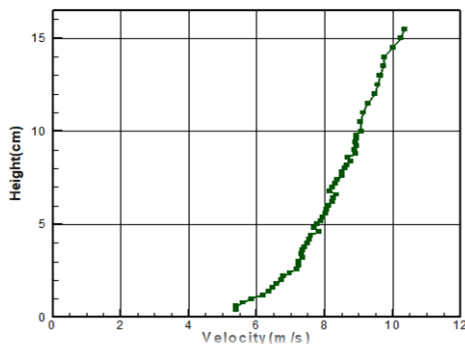
#### 3-1 تونل باد

تونل باد این پژوهش در مرکز تحقیقات هوا فضا دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد می باشد. طول تونل باد 300 سانتی متر و عرض و ارتفاع محفظه تست تونل 45 سانتی متر می باشد. نسبت طول محفظه تونل باد به ارتفاع سطح مقطع تونل برابر «1:7» می باشد. سرعت جریان باد درون تونل تا سرعت 20 متر بر ثانیه قابل افزایش می باشد.



شکل 6- المان های زبری سطح در محفظه تونل باد

4-1-1 تخمین پروفیل های سرعت و آشفتگی جریان در حالت اول برای بدست آوردن پروفیل سرعت و آشفتگی، سنسور سیم داغ بر سیستم انتقالی تونل باد در فاصله 7.5 سانتی متر از آخرین ردیف المان های زبری سطح قرار میگیرد (حالت اول) و پس از داده برداری از جریان باد شبیه سازی شده پروفیل های سرعت و آشفتگی بدست می آید. شکل 7 پروفیل سرعت را در حالت اول نشان می دهد.



شکل 7- پروفیل سرعت جریان باد لایه مرزی شبیه سازی شده در حالت اول

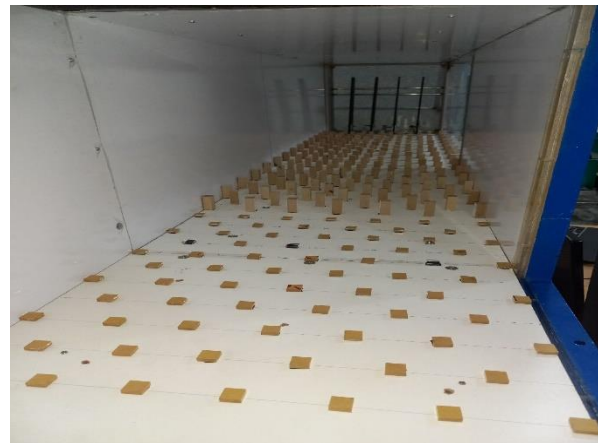
در پژوهش هلمن به ارثه تابع توانی پرداخته شده است که پروفیل سرعت جریان براساس آن بدست آمده است این تابع توانی در رابطه (1) مشخص شده است [18].

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

مقدار تابع توانی ( $\alpha$ ) در رابطه بالا براساس آیین نامه ESDU-72026 [19, 20] براساس شرایط منطقه بدست می آید. مقدار  $Z$  برابر ارتفاع نقطه داده برداری،  $Z_{ref}$  ارتفاع مبنا،  $d$  ارتفاع جا به جایی،  $\bar{u}_z$  میانگین سرعت جریان در ارتفاع داده برداری، و میانگین سرعت جریان در ارتفاع مبنا است. در این پژوهش ارتفاع مبنا برابر 11 سانتی متر می باشد [5].

در ادامه پروفیل سرعت بی بعد شده جریان باد براساس سرعت مبنا در ارتفاع مبنا به همراه تابع توانی استخراج شده است. برای بدست آوردن مقدار  $\alpha$  از همپوشانی پروفیل تابع توانی و پروفیل سرعت استفاده

در ادامه المان های بالا المان های زبری سطح در دو اندازه مختلف قرار داده شده است. المان های بزرگتر با طول و عرض  $16 \times 16$  میلی متر و ارتفاع 40 میلی متر به کار برده شده است. همچنین المان های کوچکتر با طول و عرض  $16 \times 16$  میلی متر و ارتفاع 5 میلی متری بعد از المان های بزرگتر قرار گرفته اند. نحوه چینش المان ها، ابعاد المان ها و تراکم آن ها 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 [12-17]. در این پژوهش تغییر فاصله سیستم اندازه گیری تا آخرین ردیف المان های زبری سطح و تاثیر آن روی مقیاس بندی جریان باد لایه مرزی مد نظر است. فاصله سیستم اندازه گیری تا آخرین ردیف المان های زبری سطح در سه حالت 7.5، 17.5 و 27.5 سانتی متر ارائه شده است. شکل 5 نحوه قرارگیری المان های زبری سطح را نشان می دهد.



شکل 5- نحوه قرارگیری المان های زبری سطح در محفظه تونل باد

### 3-3 سیستم های اندازه گیری

سرعت سنج سیم داغ 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 ارائه می دهد. مدت زمان داده برداری برای هر داده 5 ثانیه می باشد. سرعت سنج با استفاده از یک سیستم انتقالی الکترونیکی قابلیت جابجایی در دو راستای طول و ارتفاع محفظه تست با دقت 1 میلی متر را دارد.

### 4- نتایج و بحث

در این بخش نتایج آزمایشات انجام شده ارائه شده است و به بررسی نتایج آزمایشات پرداخته شده است. در ابتدا نحوه بدست آوردن پروفیل های آشفتگی جریان و سرعت باد مشخص شده است. در ادامه نحوه محاسبه مقیاس جریان باد لایه مرزی ارائه شده است.

#### 4-1 چیدمان المان های زبری سطح

14 ردیف المان های بزرگتر به صورت ضربدری و 11 ردیف المان های کوچکتر به صورت ضربدری قرار گرفته اند. نحوه چینش المان های زبری سطح در شکل 6 نشان داده شده است.

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

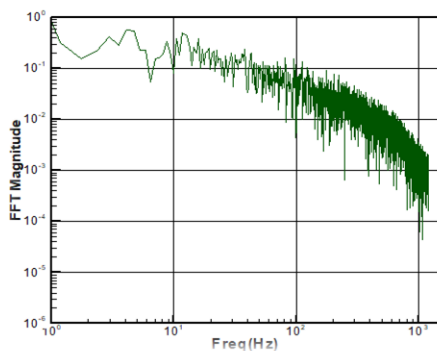
رابطه بالا از دقت مناسبی برخوردار است و در چند تحقیق دیگر نیز مورد استفاده قرار گرفته است. در این رابطه  $Z$  ارتفاع از سطح،  $d$  ارتفاع جابجایی،  $Z_0$  طول زبری سطح آیرودینامیکی و  $L_{u,x}$  انتگرال طولی مقیاس طولی هستند. از رابطه (3) می توان مقدار  $L_{u,x}$  را بدست آورد. در این رابطه  $\bar{u}_z$  میانگین سرعت در راستای  $X$  و  $f_m$  بیشترین فرکانس بدست آمده از نمودار چگالی طیفی توان نوسانات سرعت طولی می باشد.

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

مقادیر  $Z_0$  و  $d$  با استفاده از سعی و خطا قابل تعیین هستند و با رسم نمودارهای جریان لایه مرزی می توان مقدار آن ها را به صورت تخمینی بدست آورد.

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 فوریه، با روشی که بندات و پیرسول [19] پیشنهاد داده است نمودار طیف قدرت در ارتفاع مدنظر بدست می آید.

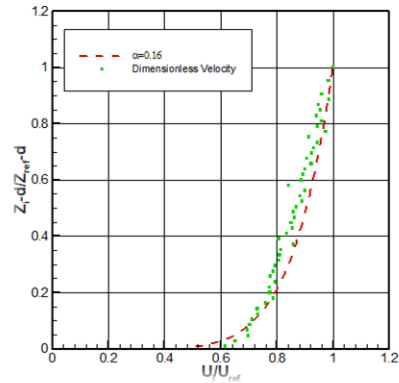
شکل 10 نشان دهنده نمودار چگالی طیفی توان نوسانات سرعت طولی حالت اول می باشد. در محدوده فرکانس 6 هرتز این طیف به بیشترین مقدار خود رسیده است. میانگین سرعت جریان  $\bar{u}_z$  در این نقطه، برابر با 9.03 متر بر ثانیه می باشد. در ادامه با استفاده از رابطه (2) مقدار  $L_{u,x}$  برابر 0.195 به دست می آید. مقدار  $d$  در این پژوهش 0.005 در نظر گرفته شده است.



شکل 10- نمودار چگالی طیفی توان نوسانات سرعت طولی

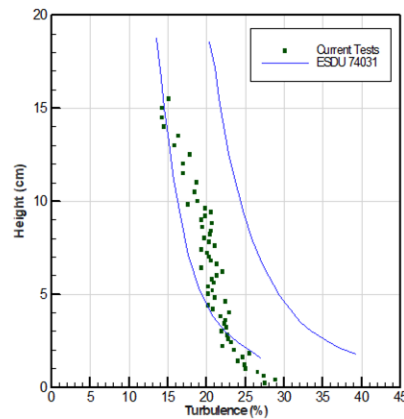
با مدنظر قرار دادن این حالت مقیاس 1:670 بدست آمده است. در پژوهش کوزمار [13] در آزمایشی دیگر به استخراج مجدد نمودار چگالی طیفی توان نوسانات سرعت پرداخته شده است تا از محاسبه صحیح مقادیر مقیاس اطمینان حاصل شود. شکل 11 استخراج مجدد این نمودار را نشان می دهد.

می کنیم. مقدار  $\alpha$  برابر با 0.16 می باشد. مقدار  $\alpha$  بدست آمده در رابطه (3) را با نمودار سرعت تطبیق داده شده است. شکل 8 میزان همپوشانی این دو نمودار را نشان می دهد.



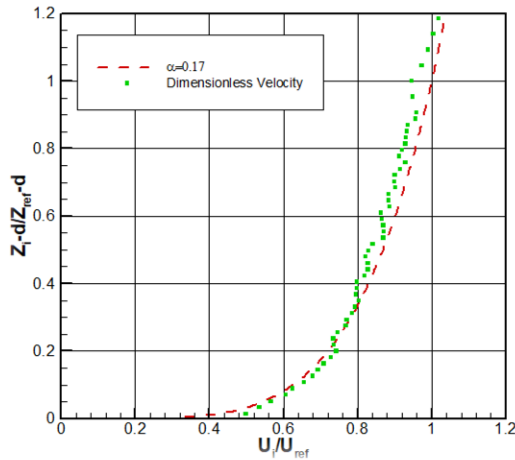
شکل 8- پروفیل بی بعد شده سرعت جریان باد لایه مرزی به همراه تابع توانی ( $\alpha$ )

در ادامه پژوهش پروفیل آشفتگی جریان بدست آمده است. همانطور که در شکل 9 مشاهده می شود، آشفتگی جریان باد این پژوهش حدود 14 الی 28 درصد می باشد. تطابق پروفیل آشفتگی جریان با آیین نامه ESDU 74031 نشان میدهد که جریان در نزدیکی دیواره تونل در محدوده این آیین نامه نمی باشد.



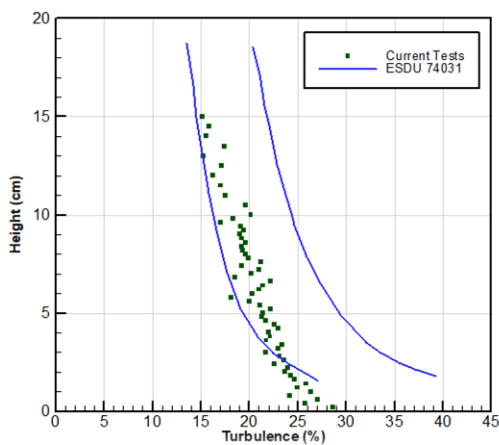
شکل 9- پروفیل آشفتگی جریان باد در حالت اول به همراه مقایسه با محدوده مدنظر آیین نامه ESDU 74031

4-1-2 محاسبه مقیاس شبیه سازی جریان باد لایه مرزی 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. کوک [14] در پژوهش خود رابطه (2) را برای بدست آوردن مقیاس جریان لایه مرزی پیشنهاد کرده است.



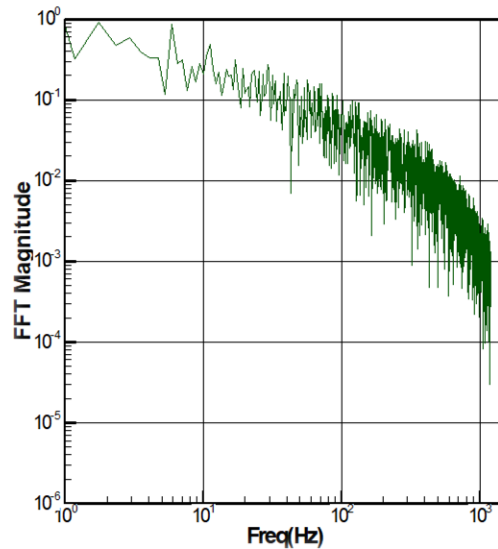
شکل 13- پروفیل بی بعد شده سرعت جریان باد لایه مرزی به همراه تابع توانی ( $\alpha$ )

همانطور که در شکل 14 مشاهده می شود، آشفتگی جریان باد این پژوهش حدود 15 الی 28 درصد می باشد. تطابق پروفیل آشفتگی جریان با آیین نامه ESDU 74031 نشان میدهد، که تنها جریان در نزدیکی دیواره تونل در محدوده این آیین نامه نمی باشد. به نظر می رسد با تغییر ارتفاع المان های زبری نزدیک به نقطه داده برداری آشفتگی جریان در این حالت کاملا در محدوده آیین نامه مدنظر قرار گیرد. شکل 14 آشفتگی جریان در حالت دوم را نشان می دهد.



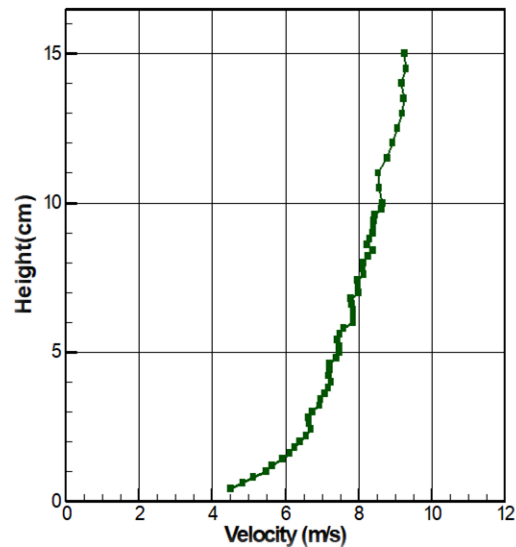
شکل 14- پروفیل آشفتگی جریان باد در حالت دوم به همراه مقایسه با محدوده مدنظر آیین نامه ESDU 74031

2-2-4 محاسبه مقیاس شبیه سازی جریان باد لایه مرزی  
شکل 15 نشان دهنده نمودار طیف قدرت حالت دوم می باشد. در محدوده فرکانس 7 هرتز این طیف به بیشترین مقدار خود رسیده است. میانگین سرعت جریان در این نقطه، برابر با 9.24 متر بر ثانیه می باشد. در ادامه با استفاده از رابطه (2) مقدار  $L_{u,x}$  برابر 0.184 به دست می آید. مقدار d در این پژوهش 0.0025 در نظر گرفته شده است.



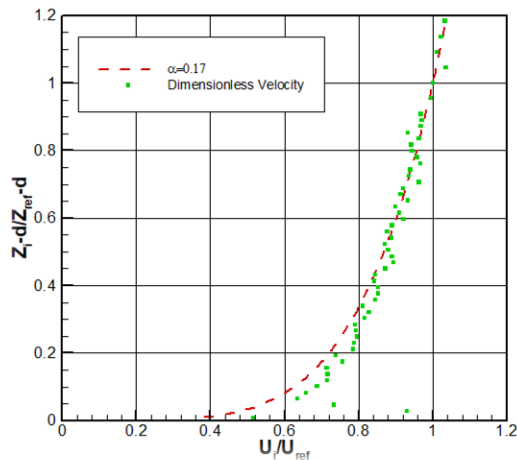
شکل 11- نمودار چگالی طیفی توان نواسانات سرعت طولی

1-2-4 بدست آوردن پروفیل های سرعت و آشفتگی جریان در حالت دوم  
برای بدست آوردن پروفیل سرعت و آشفتگی، سنسور سیم داغ بر سیستم انتقالی تونل باد در فاصله 17.5 سانتی متر از آخرین ردیف المان های زبری سطح قرار میگیرد. شکل 12 پروفیل سرعت را در حالت دوم نشان می دهد.



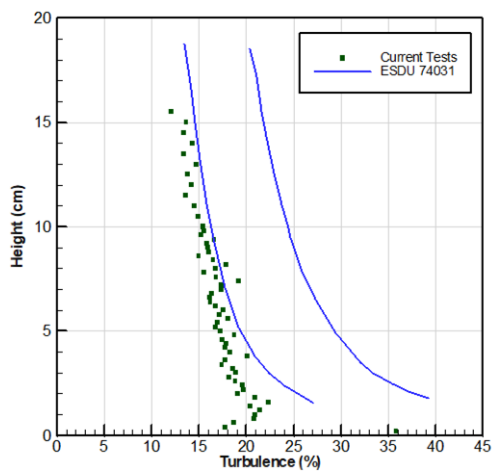
شکل 12- پروفیل سرعت جریان باد لایه مرزی شبیه سازی شده در حالت دوم

شکل 13 پروفیل بی بعد شده سرعت جریان باد لایه مرزی به همراه تابع توانی را نشان می دهد. مقدار  $\alpha$  برابر با 0.17 می باشد.



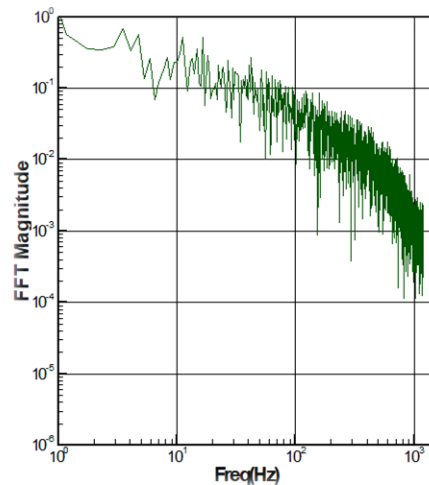
شکل 17- پروفیل بی بعد شده سرعت جریان باد لایه مرزی به همراه تابع توانی ( $\alpha$ )

در ادامه پژوهش پروفیل آشفتگی جریان بدست آمده است. همانطور که در شکل 18 مشاهده می شود، آشفتگی جریان باد این پژوهش حدود 12 الی 17 درصد می باشد. تطابق پروفیل آشفتگی جریان با آیین نامه ESDU 74031 نشان میدهد که جریان لایه مرزی در محدوده این آیین نامه نمی باشد.



شکل 18- پروفیل آشفتگی جریان باد در حالت سوم به همراه مقایسه با محدوده مدنظر آیین نامه ESDU 74031

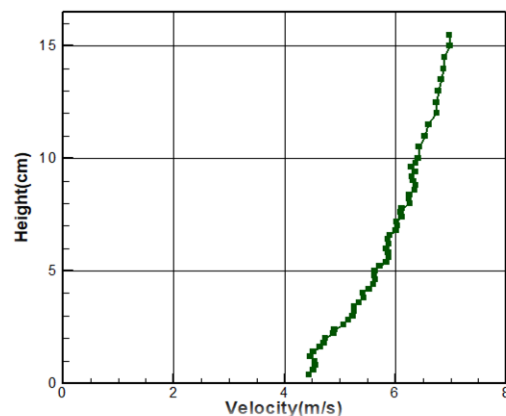
2-3-4 محاسبه مقیاس شبیه سازی جریان باد لایه مرزی شکل 19 نشان دهنده نمودار طیف قدرت حالت اول می باشد. در محدوده فرکانس 7 هرتز این طیف به بیشترین مقدار خود رسیده است. میانگین سرعت جریان  $\bar{u}$  در این نقطه، برابر با 6.84 متر بر ثانیه می باشد. در ادامه با استفاده از رابطه (2) مقدار  $L_{u,x}$  برابر 0.142 به دست می آید. مقدار d در این پژوهش 0/001 در نظر گرفته شده است.



شکل 15- نمودار چگالی طیفی توان نواسانات سرعت طولی

با قرار دادن مقادیر پارامترهای رابطه (2) مقیاس جریان لایه مرزی در این حالت برابر با 1:729 می باشد.

1-3-4 بدست آوردن پروفیل های سرعت و آشفتگی جریان در حالت سوم برای بدست آوردن پروفیل سرعت و آشفتگی، سنسور سیم داغ بر سیستم انتقالی تونل باد در فاصله 27/5 سانتی متر از آخرین ردیف المان های زبری سطح قرار میگیرد. شکل 16 پروفیل سرعت را در حالت سوم نشان می دهد.

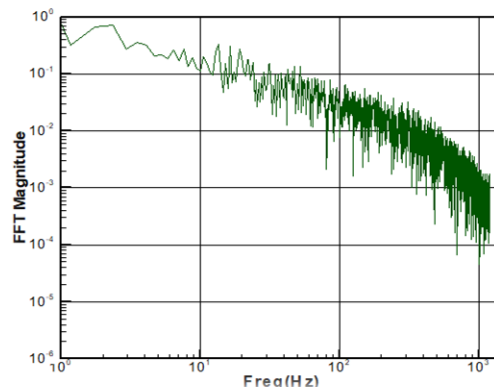


شکل 16- پروفیل سرعت جریان باد لایه مرزی شبیه سازی شده در حالت سوم

شکل 17 پروفیل سرعت بی بعد شده جریان باد لایه مرزی به همراه تابع توانید را نشان می دهد. مقدار  $\alpha$  در این حالت برابر با 0.17 می باشد.

پس در نتیجه با مقایسه این سه حالت شبیه سازی به نظر می‌رسد با دور شدن نقطه مبنا از المان های زبری سطح سرعت کاهش یافته و همچنین درصد آشفستگی جریان در محدوده مجاز آیین نامه قرار نخواهد گرفت.

- [1] A. M. Loredo-Souza, E. G. Lima, M. B. Vallis, M. M. Rocha, A. R. Wittwer, and M. G. Oliveira, "Downburst related damages in Brazilian buildings: Are they avoidable?," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 185, pp. 33-40, 2019.
- [2] R. B. Stull, *An introduction to boundary layer meteorology*. Springer Science & Business Media, 1988.
- [3] J. Counihan, "Simulation of an adiabatic urban boundary layer in a wind tunnel," *Atmospheric Environment (1967)*, vol. 7, no. 7, pp. 673-689, 1973.
- [4] H. Kozmar, "Natural wind simulation in the TUM boundary layer wind tunnel," in *Proceedings of the 5th European-African Conference on Wind Engineering, Florence, Italy*, 2009.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] T. Balendra, D. Shah, K. Tey, and S. Kong, "Evaluation of flow characteristics in the NUS-HDB Wind Tunnel," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 90, no. 6, pp. 675-688, 2002.
- [11] 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.
- [12] H. Kozmar, "Influence of spacing between buildings on wind characteristics above rural



شکل 19- نمودار چگالی طیفی توان نواسانات سرعت طولی

سپس با قرار دادن پارامتر های بدست آمده در رابطه (2) مقیاس بدست می آید. مقیاس حدود 1:1058 می‌باشد.

در جدول زیر مشاهده می‌شود که در حالت اول و دوم سرعت جریان باد لایه‌مرزی در مقایسه با حالت سوم به مراتب بیشتر می‌باشد. مقیاس حالت سوم در مقایسه با مقیاس حالت های اول و دوم کوچکتر می‌باشند.

$L_{hw}$ (cm)	$F_m$ (Hz)	$V$ (m/s)	$L_{ux}$	$d$ (cm)	$Z_0$ (cm)	$S$
7.5	7.03	9.03	0.195	0.5	0.0102	670
17.5	7.32	9.24	0.184	0.25	0.0113	729
27.5	6.73	6.84	0.142	0.1	0.0105	1058

\*  $L_{hw}$ : فاصله سیستم سیم داغ تا آخرین ردیف المان های زبری سطح می باشد.

### 5 نتیجه گیری

در این پژوهش جریان لایه مرزی در تونل باد با مدنظر قرار دادن اثر فاصله سیستم سرعت سنج سیم داغ تا آخرین ردیف المان های زبری سطح شبیه سازی گردیده است. در سه فاصله مختلف شبیه سازی جریان لایه مرزی انجام شده است. حالت اول شبیه سازی، فاصله سرعت سنج سیم داغ تا آخرین ردیف المان های زبری سطح 0.68 برابر، حالت دوم 1.59 برابر و حالت سوم 2.5 برابر ارتفاع دیواره قلعه ای شکل می باشد.

برای هر حالت از شبیه سازی های انجام شده نمودار سرعت، آشفستگی جریان، سرعت بی بعد به همراه تابع توانی و نمودار چگالی طیفی توان نوسانات سرعت طولی رسم و مورد بررسی قرار گرفته اند.

بررسی های انجام شده نشان می دهد؛ حالت اول و دوم آشفستگی جریان با مقایسه ای که با آیین نامه ESDU 74031 انجام شده است در نزدیکی دیواره ها تونل در محدوده مجاز آیین نامه ای نمی باشد. آشفستگی جریان در حالت سوم و مقایسه با آیین نامه نشان می دهد که آشفستگی جریان در مقدار آیین نامه نمی باشد.

- and suburban areas," *Wind and Structures*, vol. 11, no. 10, 2008, doi: 10.12989/was.2008.11.5.413.
- [13] T. Balendra, D. A. Shah, K. L. Tey, and S. K. Kong, "Evaluation of flow characteristics in the NUS-HDB Wind Tunnel," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 90, no. 6, pp. 675-688, 2002, doi: [https://doi.org/10.1016/S0167-6105\(01\)00223-9](https://doi.org/10.1016/S0167-6105(01)00223-9).
- [14] H. Bendjebbas, A. Abdellah-ElHadj, and M. Abbas, "Full-scale, wind tunnel and CFD analysis methods of wind loads on heliostats: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 54, pp. 452-472, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.10.031.
- [15] K. S. I. Arun and F. Cesar, "Experimental issues in atmospheric boundary layer simulations: roughness length and integral length scale determination," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 89, no. 11, pp. 1059-1080, 2001, doi: [https://doi.org/10.1016/S0167-6105\(01\)00099-X](https://doi.org/10.1016/S0167-6105(01)00099-X).
- [16] F. Cesar and K. S. I. Arun, "Experiments on the wind tunnel simulation of atmospheric boundary layers," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 79, no. 1, pp. 11-35, 1999, doi: [https://doi.org/10.1016/S0167-6105\(98\)00117-2](https://doi.org/10.1016/S0167-6105(98)00117-2).
- [17] Gartshore and D. Croos, "Roughness Element Geometry Required for Wind Tunnel Simulations of the Atmospheric Wind," *Dep of Mechanical Engineering*, 1977.
- [18] G. Hellmann, *Über die Bewegung der Luft in den untersten Schichten der Atmosphäre*. Kgl. Akademie der Wissenschaften [G.] Reimer, 1919.
- [19] 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.
- [20] ESDU, "Characteristics of wind speed in the lower layers of the atmosphere near the ground: strong winds (neutral atmosphere)," vol. 72026, 1972.