فصلنامه علمی - ترویجی «نشریه انرژی ایران»
دوره ۲۰، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۶، صفحه ۱۱۲-۱۰۱

تعیین ارتفاع بهینه برای نصب یک توربین بادی بر روی ساختمانی در شهر یزد

[۱]سبحان فارسی، [۲]محمدرضا نظری*

تاریخ دریافت:
۱۳۹۵/۱۲/۷

تاریخ پذیرش:
۱۳۹۶/۱۰/۱۸

کلمات کلیدی:
انرژی باد،
توربین باد کوچک،
توربین بر روی ساختمان،
دینامیک سیالات محاسباتی،
پتانسیل‌سنجی

چکیده

باد یکی از پاک‌ترین و ارزان‌ترین انرژی‌های تجدیدپذیر است. یکی از فناوری‌های تولید انرژی باد، استفاده از توربین‌های بادی کوچک نصب‌شده در مناطق شهری است. هرچند نصب این توربین‌ها در مناطق شهری با مشکلاتی از قبیل سرعت کم باد و اغتشاشات همراه است اما اگر در مکان نامناسب نصب شوند، تولید برق آن‌ها نیز صفر می‌شود. در مقاله حاضر برای استفاده از انرژی باد و نصب توربین بادی بر روی ساختمان شماره ۲ دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه یزد جریان باد شبیه سازی شده است. با استفاده از اطلاعات هواشناسی میانگین سرعت باد طی پنج سال ۲/۵۳۴ متربرثانیه به‌دست آمده است. پارامترهای سرعت و اغتشاش در ارتفاعات مختلف بررسی شده‌اند و ارتفاع ۲۲متری (۷متری پشت‌بام ساختمان) به عنوان ارتفاع مناسب و ده نقطه به عنوان نقاط مناسب مشخص شده‌اند. در یکی از این نقاط سرعت باد به ۴/۶۹ متربرثانیه می‌رسد.

۱. کارشناسی ارشد-گروه مهندسی مکانیک- دانشگاه یزد farsi@stu.yazd.ac.ir
۲. استادیار- گروه مهندسی مکانیک- دانشگاه یزد (نویسنده مسئول) mnazari@yazd.ac.ir

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-10]

۱. مقدمه

نیاز انسان به انرژی همواره از مسائل مهم در طول تاریخ بشریت بوده و بشر همواره به دنبال یافتن منابع انرژی به روش‌های گوناگون بوده‌است. توسعه و پیشرفت جوامع انسانی و نیاز حیاتی به انرژی، موجب شده‌است تا کشورهای مختلف به‌دنبال یافتن منابع انرژی باشند. در دهه‌های گذشته سوخت‌های فسیلی منبع اصلی تامین انرژی به‌شمار می‌رفتند. با توجه به روند افزایشی مصرف و پایان‌پذیری این منابع و همچنین ایجاد آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از مصرف آن‌ها، کشورهای پیشرفته و در حال توسعه به‌دنبال استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر و پاک هستند. انرژی‌های نو نظیر خورشید، باد، زیست توده، زمین‌گرمایی، امواج دریا و ... جایگزین‌های مناسبی برای سوخت‌های فسیلی به‌شمار می‌روند [۷]. انرژی باد یکی از ارزان ترین و پاک‌ترین انرژی‌های نو محسوب می‌شود. ظرفیت نصب شده توربین بادی جهان در ژوئن ۲۰۱۶ به ۴۵۶،۴۸۶ مگاوات رسیده‌است که در طی شش‌ماه اول سال ۲۰۱۶، ۲۱،۷۱۴ مگاوات به ظرفیت استفاده از انرژی بادی جهان اضافه شده‌است. کل ظرفیت بادی نصب شده در جهان تا نیمه سال ۲۰۱۶ حدود ۴/۷ درصد از تقاضای برق جهان را برآورده می‌کند [۵]. ساختمان‌ها مصرف‌کننده یک‌سوم از انرژی جهان می‌باشند. آن‌ها نقش بسیار مهمی در انتشار گاز co_2 بازی می‌کنند. زیرا آن‌ها به منابع فسیلی که اصلی‌ترین منبع تولید گازهای گلخانه‌ای می‌باشند وابسته هستند. یکی از راه‌های کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، تولید برق از توربین‌های بادی در محل ساختمان است. توربین‌های بادی شهری مقبولیت عمومی بیشتری نسبت به مزارع بادی در مقیاس بزرگ دارند. زیرا مزارع بادی در مکان‌هایی جدا از شهر ساخته می‌شوند که احتیاج به زیرساخت‌هایی برای انتقال قدرت تولیدشده دارند و انتقال آن به کاربران نهایی بسیار پرهزینه است. همچنین باعث تلفات انرژی در مسیر انتقال و توزیع می‌شوند [۱]. توربین‌های کوچک، توربین‌هایی با ظرفیت توان ۱/۴ تا ۲۰ کیلووات هستند. این توربین‌ها نیز در دو نوع محور افقی و عمودی وجود دارند. توربین‌های کوچک با توان اسمی ۵۰ وات، برق باصرفه‌تر و کم هزینه‌تری نسبت به توربین‌های بزرگ خصوصاً در مناطقی که باد ضعیف است، تولید می‌کنند. در مناطقی که از شبکه سراسری برق دور است توربین‌های کوچک می‌توانند به عنوان یک منبع مفید تولید توان عمل کنند [۱۲] .

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-10]

بازار جهانی توربین باد کوچک، طی سالیان اخیر رشد داشته‌است. تا پایان سال ۲۰۱۴ حدود ۹۴۵،۰۰۰ توربین بادی کوچک در سرتاسر جهان نصب شده‌است که نسبت به سال ۲۰۱۳، ۸/۳ درصد افزایش یافته‌است. تا پایان سال ۲۰۱۴ ظرفیت توربین‌های کوچک نصب‌شده برابر ۸۳۰ مگاوات است که نسبت به سال قبل (۷۴۹ مگاوات) ۱۰/۹ درصد افزایش داشته‌است. بیشترین رشد تنها در سه کشور چین، آمریکا و انگلیس اتفاق افتاده‌است. چین همچنان در این زمینه پیشتاز است: ۶۴۰۰۰ توربین در سال ۲۰۱۴ اضافه شده که ۹۰۰۰ توربین بیش از سال قبل بوده‌است. در مجموع ۶۸۹،۰۰۰ واحد توربین کوچک تا پایان سال ۲۰۱۴ در چین نصب شده‌است [۱۳] . نصب توربین باد کوچک در بالای منازل یک اقدام برای کاهش قیمت و سادگی توربین می‌شود. استفاده از پشت‌بام منازل ارتفاع لازم برای نصب توربین را فراهم می‌کند تا اثر سایر موانع در کاهش سرعت باد و اغتشاش کمتر شود. باید نکاتی مانند ارتعاش توربین، آلودگی صوتی و ظاهر خانه را برای نصب توربین باد بر پشت‌بام منازل در نظر گرفت [12]. همان‌طور که در سال ۲۰۱۵ پیش‌بینی شده تجارت جهانی توربین‌های کوچک در طول سال ۲۰۱۴ متوقف شده‌است و انتظار می‌رود که حداقل روند ظرفیت نصب آن‌ها از سال ۲۰۱۵ افزایش پیدا کند که اساساً به دلیل افزایش سایز توربین‌های جدید نصب‌شده در چین و اروپا است. حداقل نرخ رشد ۱۱ درصد تا سال ۲۰۱۶ پیش‌بینی شده‌است. انتظار می‌رود حداقل ۱۱۵ مگاوات ظرفیت جدید در سال ۲۰۱۶ اضافه شود. بر اساس یک فرض معقول، بازار می‌تواند شاهد یک رشد ۲۰ درصدی از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ باشد. پیش‌بینی می‌شود سالانه ۲۴۰ مگاوات ظرفیت جدید تا سال ۲۰۲۰ اضافه شود و مجموع ظرفیت نصب شده تا سال ۲۰۲۰ به ۱/۷۵ گیگاوات برسد [۹].

۲. پیشینه تحقیق

دنی پرواتا و ویدابانار[1] [11] به بررسی دو ایالت در کشور اندونزی پرداختند. آن‌ها پتانسیل‌انرژی باد در این دومنطقه رابررسی‌کردند، که در منطقه جنوبی شرایط برای نصب توربین‌های بادی مناسب است. آن‌ها با کمک CFD[2] و داده‌های اندازه‌گیری شده، جریان باد حول دو ساختمان را شبیه‌سازی کردند و

1. Dany Perwita,Wida Banar
2. Computational Fluid Dynamics

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-10]

بهترین مکان برای قراردادن توربین را مشخص کردند. درسان آیهان[1] [۴] و همکاران نشان دادند که شرایط باد در محیط‌های شهری بسیار متفاوت و متغیر است. اخیرا جهت برهم کنش بین باد و ساختمان مطالعات زیادی انجام گرفته است و به صورت ریاضی و عددی توسعه یافته‌است. دینامیک سیالات محاسباتی می‌تواند جهت مدل‌سازی جریان باد بر روی ساختمان‌ها مورد استفاده قرار بگیرد تا بتوان به کمک آن آنالیز و محل توربین‌ها را در اطراف ساختمان مشخص کرد. آن‌ها به بررسی محل قرارگیری توربین بر مکان‌های مختلف بر روی ساختمان پرداختند. ابوهلا[2] و همکاران [۹,۱۰] با استفاده از شبیه‌سازی انواع سقف خانه به این نتیجه رسیدند که بهترین نوع پشت‌بام برای افزایش سرعت باد، شکل نیم‌استوانه است. همچنین توربین باید در ارتفاع ۱/۳ برابر ارتفاع ساختمان نصب شود؛ جایی که در زیر این ارتفاع شدت اغتشاش بالا و سرعت باد پایین است. همچنین به این نتیجه رسیدند که با افزایش ارتفاع ساختمان از ساختمان‌های کناری، اثرات ساختمان‌های مجاور بر روی جریان باد کمتر می‌شود. لدو[3] و همکاران [۱۰] جریان باد بر روی سه نوع پشت‌بام مثلثی، هرمی و تخت را با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی شبیه‌سازی کرد تا بهترین مکان را برای نصب توربین پیدا کند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که مشخصه‌های جریان هوا به شدت به نوع ساختمان بستگی دارد و بر روی پشت‌بام تخت بیشتر از دو نوع دیگر می‌توان انرژی تولید کرد. چو[4] و همکاران [۷] به بررسی نوع معماری و شبیه‌سازی جریان باد بر روی چهارتا از برج‌های مشهور موجود در جهان جهت استفاده از آن‌ها جهت بهره‌برداری از انرژی باد پرداخته‌اند. برحسب نوع و شکل ساختمان بین ۲۰ تا ۴۰ درصد در سرعت باد افزایش ایجاد می‌کنند. همچنین بهترین بازدهی توربین زمانی است که جریان باد آرام و قوی که در یک جهت به توربین برخورد کند.

1. Dursun Ayhan
2. Islam Abohela
3. Ledo
4. Kang-Pyo Ch

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-10]

۳. پتانسیل‌سنجی

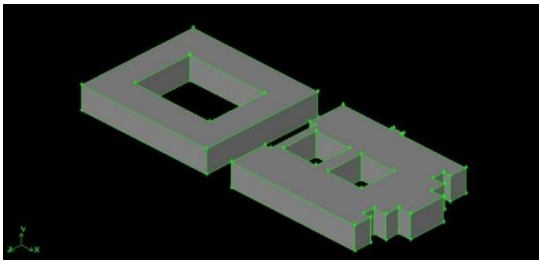
اولین مرحله در استفاده از انرژی باد پتانسیل‌سنجی منطقه موردنظر می‌باشد. درواقع نخستین گام برآورد سرعت و جهت باد غالب در منطقه موردنظر می‌باشد. یزد مرکز استان و شهرستان یزد در مرکز ایران است. میانگین بلندی شهرستان یزد از سطح دریا ۱۲۴۰ متراست. برای شبیه‌سازی جریان هوایی نیاز به داده‌های جریان هوایی به عنوان ورودی وجود دارد. برای به‌دست آوردن پروفیل سرعت باد در شهر یزد داده‌های هواشناسی از پایگاه داده سازمان هواشناسی کشور از سال ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۵ (به مدت ۵ سال) دریافت شده‌است. اطلاعات هواشناسی توسط برنامه ویندوگرافر[1] آنالیز شده و میانگین سرعت در ارتفاع ۱۰ متری به دست می‌آید. میانگین سرعت سالیانه باد، ۲/۵۳۴ متربرثانیه و جهت غالب وزش باد جهت غرب می‌باشد.

مدل‌سازی

ساختمان شماره ۲ دانشکده فنی و مهندسی واقع در مرکز دانشگاه یزد با ابعاد ۶۷ متر عرض، ۷۵ متر طول و ارتفاع ۱۵ متر قرار دارد. در کنار این ساختمان دو ساختمان شماره ۱ و ۳ نیز به فاصله ۱۵ متر قرار دارند. با توجه به نقشه موجود و اندازه‌های آن، توسط نرم‌افزار گمبیت[2] ساختمان فنی۲ مدل می‌شود. به دلیل تاثیر ساختمان فنی۳ بر جریان باد، این ساختمان نیز مدل می‌شود. دامنه محاسباتی مکعبی به ابعاد ۲۴۰ در ۲۸۰ متر با ارتفاع ۳۰ متر در نظر گرفته شده‌است. ورودی جریان تا اولین ساختمان ۲۵ متر فاصله دارد. همچنین دامنه محاسباتی به اندازه ۴۵ درجه چرخانده شده تا جهت وزش باد غالب بر ساختمان اعمال شود.

1. Windographer
2. Gambit2.4

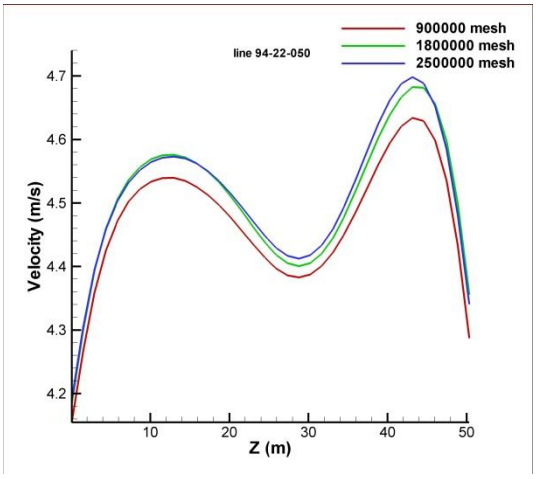
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-10]



شکل۱. مدل ساختمان فنی۲ و فنی۳ در گمبیت

شبکه بندی

یکی از کارهای مهمی که باید در راستای حل مسایل دینامیک سیالات محاسباتی انجام گیرد شبکه‌بندی مناسب مدل و تقسیم آن به حجم کنترل می‌باشد. در این مقاله از ۱۸۰۰۰۰۰ مش برای شبیه‌سازی‌ها استفاده‌شده است. به علت پیچیدگی هندسی از مش ساختار نیافته با تراکم بالا استفاده شده است. جهت عدم وابستگی حل به مش‌بندی، دامنه محاسباتی در سه حالت شبکه‌بندی شده و هر حالت به صورت جداگانه در نرم‌افزار حل شده‌است. در حالت اول ۹۹۰۰۰۰ مش، حالت دوم ۱۸۰۰۰۰۰مش و حالت سوم ۲۵۰۰۰۰۰ مش در نظرگرفته شده‌است. با توجه به شکل۲، نسبت تغییرات در دو حالت ۱/۸ میلیون و ۲/۵ میلیون کمتر است لذا از مش ۱/۸ میلیون در تمامی نتایج استفاده شده‌است.



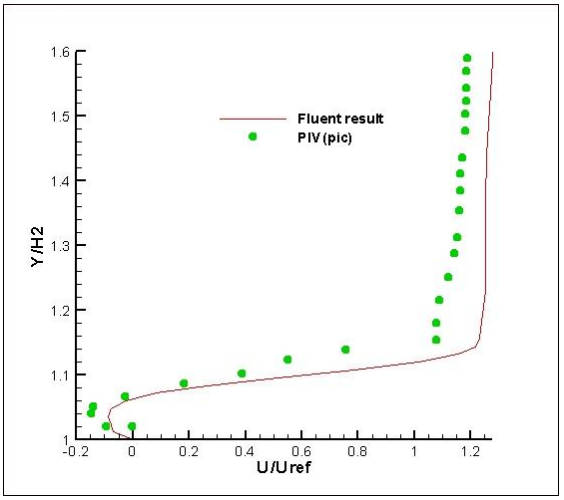
شکل ۲. مقایسه نتایج سرعت برای حالات مختلف مش‌بندی

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-10]

شرایط مرزی

در مقاله حاضر جریان هوا به صورت پروفیل سرعت توانی وارد ناحیه محاسباتی می‌شود. پروفیل سرعت توانی به صورت تابع udf نوشته شده و در شرط مرزی ورودی سرعت برای فلوئنت تعریف شده‌است. درخروجی جریان از شرط فشار خروجی استفاده شده‌است. همچنین کف دامنه محاسباتی شرط مرزی دیوار بدون لغزش و سقف و جوانب دامنه محاسباتی شرط مرزی تقارن استفاده شده‌است.

جهت اعتبارسنجی روش کار، مقاله بلوکن [6] شبیه‌سازی شده‌است. در شکل۳ نقطه‌های سبز رنگ نتایج حاصل از مقاله بلوکن و خط قرمز رنگ نتایج حاصل از شبیه‌سازی انجام‌شده در این مقاله می‌باشد.



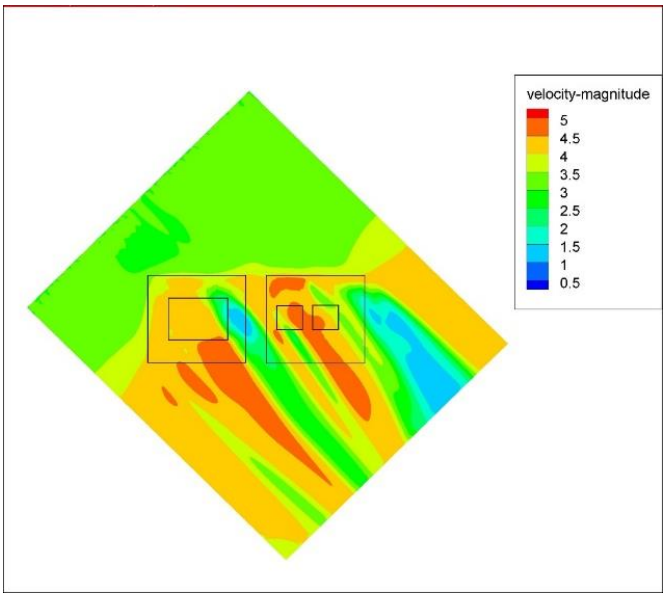
شکل ۳. مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی با مقاله بلوکن

٤. نتیجه گیری

شبیه‌سازی جریان باد بر روی ساختمان فنی ۲ در دانشگاه یزد انجام شد. پارامترهای سرعت و توربولانس مورد بررسی قرارگرفتند. از آن‌جایی که سرعت باد با افزایش ارتفاع افزایش پیدا می‌کند لذا طبیعی است که محل نصب توربین در بالاترین ارتفاع باشد. اما از طرفی با افزایش ارتفاع نصب توربین، نیاز به سازه مستحکم‌تری وجود خواهد داشت که خود نوعی محدودیت محسوب می‌شود. لذا ارتفاع ۲۲ متری از سطح زمین (۷متر بالای پشت‌بام) به عنوان ارتفاع بهینه انتخاب شده‌است. شدت اغتشاش بر

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-10]

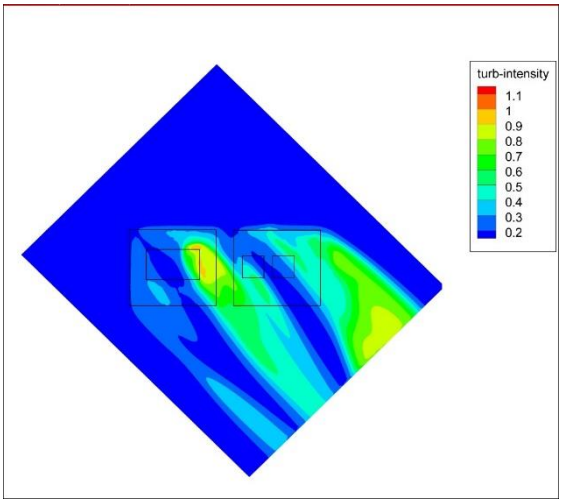
عملکرد و عمر توربین‌های بادی تاثیرگذار است. با توجه به استاندارد کمیته الکتروتکنیکال بین‌المللی[1]، یک توربین نبایستی در معرض شدت اغتشاش بیش از ۱۶٪ تا ۱۸٪ (۰/۱۶ تا ۰/۱۸) قرار گیرد [10]. معلوم بودن شدت اغتشاش بسیار برای فرایند طراحی توربین‌های کوچک ضروری هستند به‌طوری که توربین لحاظ ایمنی و بهینه کار کردن دچار مشکل نشوند. کانتورهای سرعت و توربولانس دراین ارتفاع، به ترتیب در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده‌است. با توجه به شکل۴، سرعت افزایش یافته و در بعضی نقاط از ۲/۵ متربرثانیه به حدود ۵ متربرثانیه می‌رسد. همچنین با افزایش ارتفاع به دلیل افزایش فضای باز و تاثیر کمتر لبه‌های ساختمان، اغتشاش کمتر می‌شود. کانتور شدت اغتشاش در شکل ۵ و کانتور سرعت در مقطع ضلع غربی ساختمان در شکل۶ نشان داده شده‌است.



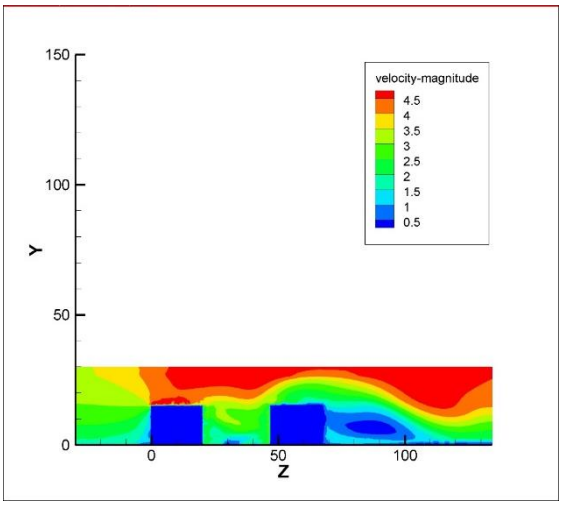
شکل ۴. کانتور سرعت در ارتفاع ۲۲ متری

1. International Electrotechnical Commission (IEC) Standard

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-10]



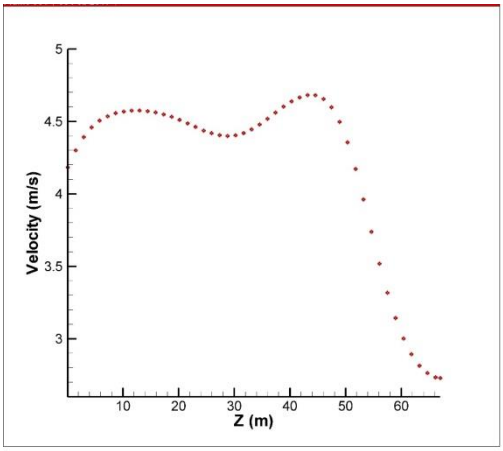
شکل ۵. کانتور شدت اغتشاش در ارتفاع ۲۲ متری

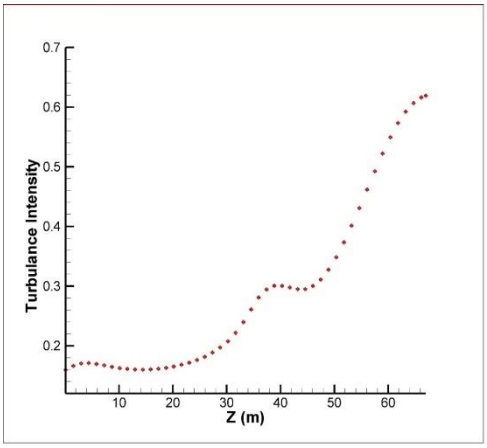


شکل ۶. کانتور سرعت در ضلع غربی ساختمان

برای یافتن محل دقیق نقاط مناسب بایستی مقادیر سرعت و شدت اغتشاش در نقاط مختلف بررسی شوند. به این منظور در فواصل یکسان (هر دو متر) از ضلع غربی ساختمان مقادیر سرعت و شدت اغتشاش را بر روی خطوط فرضی (از ضلع شمالی تا جنوبی ساختمان) به دست آورده و با بررسی هم زمان این دو پارامتر، مختصات نقاط مناسب را به دست می‌آوریم. در شکل ۷ مقادیر سرعت و شدت اغتشاش در فاصله ۴ متری از ضلع غربی ساختمان نشان داده شده‌است.

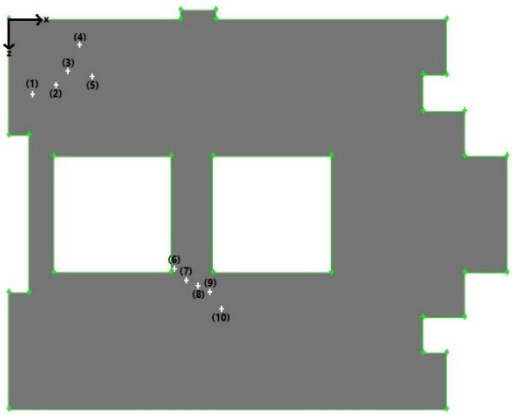
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-10]





شکل ۷. نمودار مقادیر سرعت و شدت اغتشاش در فاصله ۴ متری از ضلع غربی ساختمان

با توجه به آن مقدار سرعت در دو فاصله ۴۳ متری و ۱۳ متری از ضلع شمالی ساختمان، به ترتیب ۴/۶۷ و ۴/۵۷ متربرثانیه می‌باشد. اما بایستی مقدار شدت اغتشاش نیز در این دو نقطه بین ۱۶٪ تا ۱۸٪ (۰/۱۶ تا ۰/۱۸) باشد [10]. مقدار شدت اغتشاش در فاصله ۱۳ متری از ضلع شمالی ساختمان ٪۱۶/۵ و در فاصله ۴۳ متری ٪۳۵ می‌باشد. بنابراین فاصله ۱۳متری از ضلع شمالی ساختمان، نقطه مناسب می‌باشد. به همین ترتیب در فواصل دیگر مقادیر سرعت و شدت اغتشاش بررسی می‌شود. در نهایت نقاط نشان‌داده شده در شکل ۸ به عنوان مکان‌های مناسب برای نصب توربین بادی می‌باشند:



شکل ۸. موقعیت‌های مناسب نصب توربین بادی بر روی ساختمان فنی۲

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-10]

مختصات مکانی، مقدار سرعت و شدت اغتشاش نقاط شماره‌گذاری شده در شکل ۸ در جـدول ۱ آورده شده‌است. ارتفاع همه نقاط ۲۲ متر از سطح زمین (هفت متری پشت‌بام) می‌باشد.

جدول ۱. مشخصات نقاط مناسب برای نصب توربین بادی در ارتفاع ۲۲متر

شماره	X(m) فاصله از ضلع غربی ساختمان	Z(m) فاصله از ضلع شمالی ساختمان	V(m/s) سرعت	I(%) شدت اغتشاش
۱	۴	۱۳	۴/۵۸	۱۶/۵
۲	۸	۱۱/۵	۴/۵۸	۱۵/۸
۳	۱۰	۹	۴/۵۸	۱۶/۴
۴	۱۲	۷	۴/۶	۱۷/۵
۵	۱۴	۱۰	۴/۵۹	۱۷/۸
۶	۱۸	۴۳	۴/۶۸	۱۷/۳
۷	۲۰	۴۵	۴/۶۹	۱۶/۹
۸	۲۲	۴۶	۴/۶۸	۱۶/۶
۹	۲۴	۴۷	۴/۶۷	۱۶/۴
۱۰	۲۶	۵۰	۴/۶۷	۱۶/۴

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-10]

منابع

[۱] رضوی، سیده مطهره و حسین مدی (۱۳۹۲)، "یکپارچه سازی توربین‌های بادی با ساختمان"، دومین همایش ملی اقلیم، ساختمان و بهینه‌سازی مصرف انرژی، اصفهان، سازمان بهره‌وری انرژی ایران.

[2] Abohela, I., N. Hamza, and S. Dudek (2013), "Effect of roof shape, wind direction, building height and urban configuration on the energy yield and positioning of roof mounted wind turbines", Renewable Energy, 50: p. 1106-1118.

[3] Abohela, I., N. Hamza, and S. Dudek (2011), "Effect of roof shape on energy yield and positioning of roof mounted wind turbines" in Proceedings of 12th Conference of International Building Performance Simulation Association, Sydney.

[4] Ayhan, D. and Ş. Sağlam (2012), "A technical review of building-mounted wind power systems and a sample simulation model", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(1): p. 1040-1049.

[5] Benatallah, M.F. and M. Chegaar (2013), "Investigation of Wind Characteristics in the Southern Region of Algeria", Energy Procedia, 36: p. 707-713

[6] Blocken, B., et al. (2009), "The mutual influence of two buildings on their wind-driven rain exposure and comments on the obstruction factor", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 97(5–6): p. 180-196.

[7] Cho, K.-P., S.-H. Jeong, and D.P. Sari (2011), "Harvesting wind energy from aerodynamic design for building integrated wind turbines", International Journal of Technology, 2(3).

[8] Clarke, A. (1991), "Wind energy progress and potential", Energy Policy, 19(8): p. 742-755.

[9] Gsänger, S. (2016), "Small Wind World Report", WWEA.

[10] Ledo, L., P.B. Kosasih, and P. Cooper (2011), "Roof mounting site analysis for micro-wind turbines", Renewable Energy, 36(5): p. 1379-1391.

[11] Sari, D.P. and W.B. Kusumaningrum, (2014.), " A Technical Review of Building Integrated Wind Turbine System and a Sample Simulation Model in Central Java, Indonesia. Energy Procedia", 47: p. 29-36.

[12] Tummala, A., et al. (2016.), "A review on small scale wind turbines. Renewable and Sustainable", Energy Reviews, 56: p. 1351-1371.

[13] WWEA (2016), W.W.E.A., WWEA Half-year Report.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-10]