



Journal of Environmental Studies
Vol. 48, No. 4, Winter 2023

Journal Homepage: www.Jes.ut.ac.ir
Print ISSN: 1025-8620 Online ISSN 2345-6922

Optimal Location of Microturbines in Low-rise Building Blocks for Sustainable Wind Energy Utilization (Case Study: Qazvin City)

Document Type
Research Paper

Amena Agharabi*, Maryam Darzi,

Received
August 13, 2021

Department of Architecture, Faculty of Architecture and Art, University of Guilan, Rasht, Iran.

Accepted
November 23, 2022

DOI: 10.22059/JES.2022.346825.1008346

Abstract

Small wind turbines are developed to help harvest clean wind energy within the built environment and to avoid energy losses and negative environmental effects associated with wind farms. A common issue is that the wind speed in the urban environment, especially at low altitude, does not necessarily meet the minimum speed required by the microturbines. Since the production power of the turbines has a direct relationship with the speed of the wind, it is necessary to place the turbine in a place with maximum wind speed. The purpose of this article is to identify the optimal location of the microturbine between and on the roof of buildings, so that by using the maximum available wind speed, the microturbine can show optimal performance. By comparing the wind speed at various points in 6-, 12- and 18-meters wide corridors between buildings in Qazvin City with relatively good wind potential, as well as three points on the middle axis of the rooftop, CFD simulation and 3D profiles show that it is possible to locate areas in corridors between low-rise buildings where the wind speed gets accelerated by up to 43%, which creates an opportunity for on-site use of renewable wind energy.

Keywords: Small wind turbine, Distributed generation, Natural ventilation, Computational fluid dynamics (CFD) simulation, Qazvin.

* Corresponding Author:

Email: a.agharabi@guilan.ac.ir

Extended Abstract

Introduction

Small wind turbines have entered the market to help harvest clean wind energy on the site of consumption in urban environments. The dimensions of these microturbines are between 3 and 10 meters wide and their production capacity varies between 1 and 20 kW. Despite their utility in urban areas, issues such as limited wind, the turbulence between buildings, and high level of aerodynamic noise produced by the turbines, have held off a rush towards this technology. So far in most cases, turbine installation has been demonstrative in nature, and the buildings have been built without considering microturbines in their design stage by architects.

The location of the microturbine in the building is one of the key factors in efficiently harvesting the clean energy. In the majority of scientific literature, the wind flow on the rooftop and in few cases between two low-rise buildings have been investigated separately. In general, three turbine positions can be considered in buildings: 1) rooftop 2) space between two buildings 3) on the facade of the building. This study uses Computational Fluid Dynamics (CFD) to do a comparative analysis of air flow between two low-rise buildings as well as on flat rooftops in terms of the amount of wind speed variations in the corridor between two buildings as well as different points on the rooftop. The simulation is based on information provided by Shoorjeh meteorological station in Qazvin City, where an average annual wind speed of approximately 6 m/s has made the city a place with high potential for utilizing wind energy.

Materials and Methods

In order to optimize the use of wind turbines, it is essential to first evaluate the average speed of wind at a given location. Wind energy potential for wind turbine installation at average speed less than 4 m/s is considered as being weak, at 4 to 5.5 m/s as being moderate, at 5.5 to 6.7 m/s as good to very good, and at above 6.7 m/s as being excellent. The annual wind speed at a height of ten meters from the ground in Jarandagh and Shoorjeh stations in Qazvin are reported as 5.96 and 5.95 m/s, respectively, which is considered to be a suitable speed for moving a microturbine. Moreover, in order to determine the optimal location of microturbines in buildings, Ansys Fluent software was used in this study to simulate the wind flow between two buildings as well as on the rooftop. This simulation follows a two-step process in parallel, in such a way that various measures of the width of the wind corridor between the two buildings are evaluated for a better understanding of the wind behavior, and on the other hand, different points on the roof are also simulated to determine the optimal location, and finally, by determining the optimal width of the wind corridor and the optimal point on the rooftop, these two locations are compared (Figure 1). According to the information provided by meteorological stations, the prevailing wind in Qazvin blows from the northeast and at an angle between 0 and 22.5 degrees. In our simulation, the space between the two buildings is modeled in line with the same angle and with three different widths; first, the minimum width of the wind corridor according to the municipal regulations for distance between buildings that stands at 6 meters, and in the next alternatives, the width of 12 meters and 18 meters as a commonly practiced standard in the local urban development.

Due to the fact that each floor house has two units and based on the general principles of space placement, the dimensions of the building are considered to be 10 x 20 meters. The simulation is done on the rooftop at three points of facing the wind, the center point, and the point against the wind on the

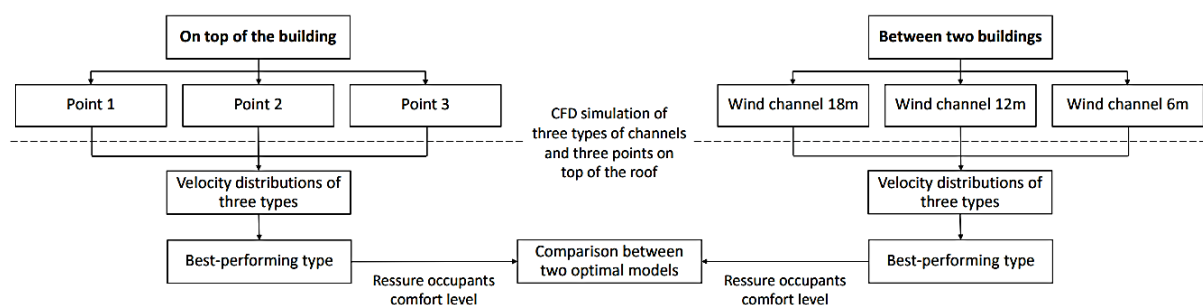


Figure 1: The Research Process Diagram

main axis of the building. This simulation is done on a single building and in the same direction as the prevailing wind.

Modeling has been done in Spaceclaim environment by drawing a wind tunnel to analyze the speed and flow of the wind around the building, as well as drawing mesh in Ansysmeshing software and using Patch Conforming Method algorithm.

Discussion

a) Analysis of the width of the wind corridor between two buildings

By examining the wind flow between two buildings that are placed at distances of 6, 12 and 18 from each other, we witnessed that in all three cases, as the wind enters the corridors, the speed of it begins to increase significantly compared to the initially reported average (Table 1). Since the performance of microturbines in the wind speed above 6.7 m/s is evaluated as excellent, it is expected that all three corridors can provide a suitable space for placing the microturbine. In the following, the details of the information obtained in all three samples will be discussed.

Table 1- The maximum speed reported in three samples with an input speed of 5.96 m/s

Distance between the two buildings	Max. Speed (m/s)	Acceleration rate
6-meter corridor	8.5	%43
12-meter corridor	8.1	%37
18-meter corridor	7.8	%31

In order to analyze and determine the optimal location for the microturbines, it is necessary to check the speed of the wind in the corridor on all three axes. Simulating the flow of the wind at different heights helped us conclude that the wind speed of the 6-meter corridor reaches its maximum at a height of 12.5 meters from the ground and as the height is increased, the wind speed would relatively decrease until reaching the roof at 20 meters. In general, maximum wind speed occurs at the heights of between 5.5 to 12.5 meters, while a speed of more than 8 m/s can be expected from the height of 2.5 meters from the ground up to the top of the building.

Horizontally and along the corridor in the direction of the wind flow, at the distances from 3 to 9 meters from the point of entry the wind speed is generally above 8 m/s. More specifically, the distances between 6 and 7 meters form a range and at a distance of one meter from both sides of the wind flow axis, the wind speed is reported to be above 8 m/s, which creates a good space for placing the microturbine.

In the case where the two buildings are located at a distance of 12 meters from each other, it is also possible to consider an area in the corridor, where the wind speed is above 8 m/s at all points. The highest speed reported in this example is 8.15 m/s, which, like the 6-meter model, occurs in the point of entry of the wind and in the first half of the flow path. The important point in this example is that, unlike the 6-meter corridor, the wind speed in the axis in the middle of the corridor is almost constant up to a two-meter distance from both sides.

In the 18-meter corridor, the wind speed decreases with the increase of the distance between the two buildings, which, of course, considering the maximum speed of 7.8 m/s and the 31% acceleration rate, still creates a suitable environment for the use of microturbines. Due to the increase in the distance between the two buildings, the behavior of the wind is very different in this case compared to the previous two examples. Unlike the 6- and 12-meter corridors where the maximum wind speed occurs at the point of entry and on the middle axis of the corridor, in the 18-meter corridor it is advisable to choose an area on both sides of this axis for the optimal location of the microturbine, so that the turbine is placed in the first half of the corridor at a height of 5-10 meters and at a distance of 4-5 meters from the main axis of the corridor.

b) Analysis of wind speed on the rooftop

The changes of wind speed on the roof at the windward point (point 1), the central point (point 2) and the point against the wind (point 3) on the main axis of the building have been investigated. At the beginning of the wind flow path on the building, the maximum wind speed occurs at the edge and at a

low height. As the flow approaches the end of the building, it is necessary to increase the height of the microturbine to receive the high-speed wind. Also, in the whole path of the wind flow on the rooftop, the wind speed is very low at the height near the roof, and for the optimal performance of the microturbines at any point of the roof, a suitable height should be considered for them. The comparison of wind behavior in these three points is as per the following:

- At point 1, the wind speed on the rooftop (at the height of 20 meters) is zero and increases up to a height of 23 meters and reaches a maximum value of 7 m/s and then starts to decrease. Therefore, the height of 3 meters above the rooftop is a suitable place for placing the microturbine at point 1.
- At point 2, the wind speed at a height of 8 meters from the roof reaches its maximum value of 7.16 m/s, which is higher than the maximum speed of point 1. Therefore, the height of 8 meters above the roof is a suitable place for placing the microturbine at point 2.
- At point 3, in general, the maximum wind speed is lower than the first two points and reaches 6.9 m/s at a height of 9 meters above the rooftop.

Conclusion

The wind flow around low-rise buildings has a low speed due to the presence of many obstacles in the urban environment. Our findings show that adjusting the distance between buildings can effectively increase the wind speed for use in microturbines in low-rise residential buildings. For example, by examining the behavior of the wind between two buildings located at distances of 6, 12 and 18 meters from each other, the simulation shows that the 6-meter corridor can help accelerate the wind speed by 43%, allowing it to reach 8.53 m/s, that can provide very favorable conditions for the use of microturbines in the urban environment. Since the production power of turbines has a direct relationship with the wind speeds, a 1.43 times acceleration in the speed of the wind through the 6-meter corridor translates into nearly tripling the output of the microturbines. In addition, the 12 and 18-meter samples can also offer optimal locations that can be used by architects as next priorities, with acceleration rates of 37% and 31%, respectively.

Our simulation and analysis of the wind behavior and its varying speed on the rooftop of the building on three points of entry (point 1), the middle point (point 2) and the end of the path (point 3) showed that in all points, the wind speed is very low and tending towards zero in the area closer to the roof, and the speed increases at higher points above the roof top (7m/s at 3 meters above the rooftop).

In comparison, we argue that in order to maximize the chance of utilizing the energy from the wind, the 6-meter corridor is the best option for use in architecture among the three investigated corridors. At the same time, placing the turbine between the buildings in a narrower corridor always yield better results compared to rooftop installation; even at point 1 which is the best roof option, the acceleration rate is 17% only with the wind reaching a speed of 7 m/s. Should it not be possible to install microturbines in corridors between the buildings, rooftop installation at Point 1 can be considered as the second-best option.

بهینه‌یابی مکان میکروتوربین در بلوک‌های ساختمانی کم ارتفاع برای استفاده از انرژی پایدار باد (نمونه موردی شهر قزوین)

آمنه آقاریع*، مریم درزی

گروه معماری، دانشکده معماری و هنر، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۹/۰۲

تاریخ وصول مقاله: ۱۴۰۰/۰۵/۲۲

چکیده

با توجه به مزایای استفاده از انرژی پاک باد و نظر به تأثیرات منفی محیطی مزارع بادی و توربین‌های بزرگ و اتلاف انرژی در مرحله انتقال برق، توربین‌های کوچکی با قابلیت بهره‌برداری از انرژی باد در محل تقاضا ساخته شده‌اند. این میکروتوربین‌ها در مقیاس‌های کوچک و بین ساختمان‌ها قابل استفاده است؛ لیکن در شرایط عادی سرعت باد در محیط شهری و به‌ویژه در ارتفاع پایین، حداقل سرعت مورد نیاز توربین‌ها را برآورده نمی‌کند. از آنجاکه توان تولیدی توربین‌ها با مکعب سرعت باد رابطه مستقیم دارد؛ قرارگیری توربین در مکانی با حداکثر سرعت باد ضروری است. هدف این مقاله ایجاد کانالی برای تشدید جریان هوا و شناسایی مکان بهینه قرارگیری میکروتوربین در بین و بر روی بام ساختمان‌های کم‌ارتفاع است؛ به طوری که با تقویت سرعت باد، نیاز میکروتوربین برای عملکرد مناسب برطرف گردد. این مطالعه با مقایسه سرعت باد در سه کانال ۶، ۱۲ و ۱۸ متری بین ساختمان‌ها بعنوان معیار استاندارد شهری، در غرب شهر قزوین با پتانسیل باد نسبتاً خوب و همچنین سه نقطه بر روی محور میانی بام ساختمان از طریق شبیه‌سازی CFD و ایجاد پروفایل سه‌بعدی، افزایش سرعت باد در تمامی موارد را نمایش می‌دهد. حداکثر تشدید سرعت باد در کانال ۶ متری تا ۴۳٪ مشاهده شده که گزینه بهینه از موارد مطالعه شده برای استفاده از انرژی تجدیدپذیر باد می‌باشد. همچنین در بین موقعیت‌های روی بام نقطه بادگیر ابتدای ساختمان با افزایش ۱۷٪ شدت باد در فاصله ۳ متری روی سقف، بعنوان گزینه عملی اولویت دوم معرفی شده است.

کلید واژه‌ها: توربین بادی کوچک، تولید پراکنده، ساختمان‌های غیر مرتفع، شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)، قزوین.

سراغاز

ساختمان‌ها حدود ۴۰٪ درصد از مصرف سوخت جهان را سهم هستند و همچنین یک سوم گازهای آلاینده نیز توسط انرژی مورد استفاده ساختمان‌ها، تولید می‌شود (Bataneh & Alrabee, 2018). همچنین پیش‌بینی می‌شود با رشد سریع جمعیت، میزان مصرف انرژی جهانی بین سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۴۰ تا ۵۶٪ افزایش یابد (KC et al., 2019). در ایران ساختمان‌ها، تجاری و مسکونی روی هم، حدود ۴۰ درصد

بخش بزرگی از انرژی مصرفی در جهان از سوخت‌های فسیلی تأمین می‌شود که در این بین، ساختمان‌ها سهم قابل توجهی از این انرژی را به خود اختصاص داده‌اند. بر اساس گزارش آژانس بین‌المللی انرژی، در سال ۲۰۱۸، ۷۲/۶٪ از مصرف کل انرژی از منابع تجدیدناپذیر و ۲۷/۴٪ از منابع تجدیدپذیر تأمین شده است. امروزه به‌طور کلی

سرعت باد، تولید الکتریسیته توربین ۸ برابر می‌شود. بنابراین قرارگیری توربین در جایی که سرعت باد حداکثر است، اهمیت بسیاری دارد. Dabiri (۱۳۹۰) پیش‌بینی می‌کند که توربین‌های بادی کوچک می‌توانند نیروی باد ارزان‌تری نسبت به توربین‌های بادی بزرگ تولید کنند. در شهرهایی که میانگین سرعت باد در آن‌ها برای استفاده از میکروتوربین‌ها قابل قبول است، این فناوری می‌تواند به‌عنوان یک منبع مفید و مهم در فضای شهری و معماری بنا قرار بگیرند و از این پتانسیل طبیعی استفاده کنند.

مطالعات زیادی در راستای تولید برق بادی در ساختمان‌ها انجام شده که در اغلب موارد بر روی ساختمان‌های بلندمرتبه متمرکز بوده است. Nasarullah و Chaudhry و همکاران (۱۳۹۲) با تمرکز بر شکل و مورفولوژی ساختاری به بررسی عملکرد توربین در بین برج‌هایی با مقاطع مثلثی، مربع و دایره پرداختند. همچنین در مقاله‌ای مشابه، Heu و همکاران (۱۳۹۵)، تولید انرژی یک توربین ۱۱۰ کیلوواتی را در بین دو برج و در حالت مستقل مقایسه کردند و پی بردند که قرارگیری توربین بادی در بین دو ساختمان بلندمرتبه، باعث بهبود عملکرد و بالا رفتن توان خروجی آن می‌شود. Cho و همکاران (۱۳۹۲)، با تأکید بر قرارگیری توربین در بالای ساختمان، ۵ نمونه متفاوت از شکل سقف را در ساختمان‌های بلندمرتبه مقایسه کردند. Park و همکاران (۱۳۹۴) در دیدگاهی متفاوت، استفاده از توربین‌های بزرگ در تعداد محدود را نقد کرده و طرح پوسته‌ای مدولار از میکروتوربین‌های کوچک با قطر کمتر از یک متر را برای استفاده از بدنه ساختمان‌های بلندمرتبه جهت تولید انرژی مطرح می‌کند. بدیهی به نظر می‌رسد که هرچه ارتفاع قرارگیری میکروتوربین‌ها در محیط شهری بالاتر باشد، از جریان هوای پرتلاطم و آشفته بیشتر فاصله گرفته و عملکرد بهتری را از خود نشان می‌دهند؛ اما محدود کردن انرژی بادی در شهر به ساختمان‌های بلندمرتبه و تجاری، موجب نادیده گرفتن پتانسیل بزرگی از انرژی در سطح شهر و ساختمان‌های کم ارتفاع شده که نیاز به بررسی و تحلیل

از کل مصرف انرژی کشور را تشکیل می‌دهند (Ramin & Karimi, 2020). از آنجایی که بحران جهانی انرژی در حال تشدید شدن است، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر برای بسیاری از صنایع در کشورهای مختلف در اولویت قرار گرفته است (Chang et al., 2017). در این بین، انرژی باد، با کمترین تأثیرات منفی بر محیط زیست، توجه فزاینده‌ای را از سوی صنعت ساختمان‌سازی به خود جلب کرده است. به‌عنوان مثال، مرکز تجارت جهانی بحرین، به‌عنوان اولین نمونه عملی در جهت استفاده از توربین‌های بادی بزرگ بر روی برج‌ها در سال ۲۰۰۸ شناخته می‌شود که از ۳ توربین افقی با قطر ۲۹ متر تشکیل شده که در بین دو برج ۳۴ طبقه به صورت معلق قرار گرفته است (Bobrova, 2015). برج کور (COR) میامی نیز دارای چندین توربین بادی افقی است که روی چهار دیوار بیرونی در بالای ساختمان نصب شده است (Minner, 2010). برج استراتا (Strata Tower) در لندن و برج رودخانه مروارید (Pearl River Tower) در گوانژو چین دیگر نمونه‌های ساختمان‌هایی است که دارای توربین‌های یکپارچه ساختمانی هستند. با وجود کارایی قابل قبول این توربین‌ها، مشکلاتی مانند آلودگی صوتی و ارتعاش ناشی از حرکت توربین‌ها در ساختمان و همچنین ناراضیاتی از جنبه‌های زیبایی‌شناختی، چالش‌های باقیمانده در استفاده از این فناوری هستند. (Park et al., 2015).

در دهه‌های اخیر به علت تأثیرات منفی زیست‌محیطی احداث مزارع بادی (C. Wang & Prinn, 2010) و اتلاف انرژی در انتقال برق به محل بهره‌برداری و همچنین معایب استفاده از توربین‌های بزرگ در معماری، توربین‌های کوچکی وارد بازار شده‌اند که قابلیت بهره‌برداری از انرژی باد در محل تقاضا را فراهم می‌کنند. این توربین‌ها در مقیاس‌های کوچک و در محیط شهری مورد استفاده قرار می‌گیرند. ابعاد میکروتوربین‌ها بین ۳ الی ۱۰ متر است و ظرفیت نیروگاهی آن‌ها بین ۱ الی ۲۰ کیلووات متغیر است (Cace et al., 2007). توان تولیدی توربین‌ها با تغییرات سرعت باد رابطه مستقیم دارد؛ به‌طوری‌که با دو برابر شدن

جریان هوا داخلی (داخل ساختمان) و ترکیب این دو مورد استفاده قرار گرفته است. (Cho et al., 2011; Heo et al., 2016; Jafari & Kosasih, 2014; Lee et al., 2018; Lu & Ip, 2009; Sari, 2015; B. Wang et al., 2015). نرم‌افزارهای شبیه‌سازی CFD به معماری کمک می‌کند تا جریان باد متأثر از فرم ساختمان را پیش‌بینی کرده و در راستای ارتقا سرعت باد و عملکرد توربین گام بردارد. بنابراین انتظار می‌رود با افزایش آگاهی نسبت به عوامل تأثیرگذار بر سرعت باد اطراف ساختمان در محیط شهری، تعداد ساختمان‌های دارای میکروتوربین بادی در آینده نزدیک، افزایش یابد. به‌عنوان مثال Rafailidis (۱۳۷۶) با مدل‌سازی فیزیکی و استفاده از تونل باد در سال ۱۹۹۷، نشان داد که جریان باد بالای سقف ساختمان به شدت به شکل سقف بستگی دارد. بر این اساس مطالعات زیادی با استفاده از شبیه‌سازی CFD بر روی اشکال مختلف سقف برای بهبود عملکرد میکروتوربین‌ها بر روی سقف انجام شده است (Dutton & Halliday, 2005; Padmanabhan, 2013; Toja-Silva et al., 2016; B. Wang et al., 2017).

در واقع CFD یک زمینه مطالعاتی نوظهور برای شناسایی مکان بهینه یا اشکال بهینه ساختمانی است که می‌تواند سرعت باد را برای توربین‌های بادی افزایش دهد، یعنی ساخت توربین بادی تقویت‌شده (BAWT²). به دست آوردن نتایج مثبت در شبیه‌سازی‌های CFD در بسیاری از تحقیقات انجام شده، می‌تواند نویدبخش حضور مؤثر میکروتوربین‌ها در ساختمان‌ها و محیط شهری باشد. اتفاقی که علاوه بر تولید برق بادی و کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی، باعث دیده شدن میکروتوربین‌ها در محیط شهری و ایجاد نگرش مثبت به این فناوری می‌شود.

به‌طور کلی سه موقعیت توربین را می‌توان در ساختمان‌ها در نظر گرفت: (۱) پشت‌بام (۲) فضای بین دو ساختمان (۳) بر روی بدنه ساختمان (شکل ۱) (Abe & Ohya, 2004; Ayhan & Sağlam, 2012). قرار دادن توربین‌های بادی در فضای بین ساختمان و بر روی بدنه که معمولاً در ساختمان‌های بلند مورد استفاده قرار می‌گیرد، با هدف جذب

آن احساس می‌شود.

علی‌رغم این‌که می‌توان پتانسیل بالایی را در محیط شهری برای نصب میکروتوربین‌ها و تولید برق بادی در نظر گرفت؛ اما دلایل زیادی مانع از ایجاد نگرش مثبت به این فناوری شده است. Ledo و همکاران (۱۳۸۹) دلایل محدود بودن نصب میکروتوربین‌ها در محیط شهری را سرعت کم باد، تلاطم زیاد جریان باد و سطح بالای صدای آیرودینامیکی تولید شده توسط توربین‌ها بیان می‌کنند. Blackmore (۱۳۸۷) در کتاب خود اشاره می‌کند که اگر یک توربین در مکان نامناسبی روی سقف خانه قرار گیرد، ممکن است توان خروجی برای دوره‌های زمانی قابل توجهی به صفر برسد، حتی زمانی که باد می‌وزد. یکی دیگر از دلایل ادغام محتاطانه توربین‌های بادی کوچک در مناطق شهری، نصب اشتباه سیستم‌های بادی پشت‌بام به‌عنوان نشانه‌ای برای حمایت از ایده‌های پایداری در معماری، بدون در نظر گرفتن ایمنی، یکپارچگی ساختاری ساختمان یا عملکرد توربین است (Anderson et al., 2008). در واقع نصب در اغلب موارد به‌صورت الحاقی بوده و ساختمان بدون در نظر گرفتن میکروتوربین‌ها در مرحله طراحی، ساخته شده است و طرح معماری کمکی به بهبود عملکرد این فناوری نکرده است. با این حال، مطالعاتی در راستای شناسایی مکان بهینه برای میکروتوربین بر روی ساختمان‌های موجود شهری انجام شده است که می‌تواند مفید واقع شود (Ledo et al., 2011; Minh, Bui & Melis, 2013; Padmanabhan, 2013; Yang et al., 2016; Farsi & Nazari, 1396).

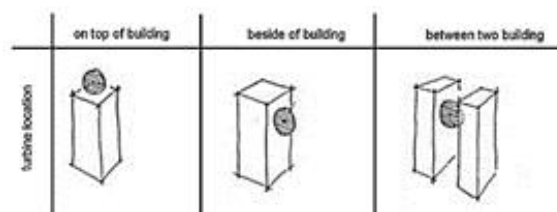
با افزایش روزافزون ظرفیت محاسباتی رایانه‌های مدرن، نظریه دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) به ابزار مهمی برای شبیه‌سازی عددی جریان باد در اطراف ساختمان‌ها تبدیل شده است. استفاده از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی دینامیک سیالات به جای ساخت نمونه‌های واقعی یا آزمایشی، در منابع مالی، زمانی و نیروی کار صرفه جویی می‌کند و به همین دلیل در بسیاری از مطالعات اخیر استفاده از این ابزار در معماری و شهرسازی به منظور پیش‌بینی رفتار جریان هوا خارجی (در محیط شهری و پیرامون ساختمان‌ها)، شبیه‌سازی

میان، مزیت تقویت شدت باد را عمدتاً در زیر سایبان و مدل‌های سایبان با فرم شیروانی عمدتاً در بالای سایبان نشان می‌دهند. سایبان شیروانی شکل دو شیب با زاویه ۲۰ درجه بیشترین تأثیر را در تقویت اثر باد دارد و موقعیت بهینه بهره‌برداری از انرژی باد درست بالای خط الراس سایبان است. در عین حال Sari (۱۳۹۴) در پژوهش خود به‌طور ویژه به تأثیر زاویه شیب بر میزان تقویت باد در سقف‌های شیروانی پرداخت و نتایج نشان داد که شیب ۳۰ درجه در سقف‌های شیب‌دار خانه نمونه ای با مساحت ۴۵ مترمربع و با ارتفاع ۶ متر، دارای بهترین عملکرد برای تسریع سرعت باد است.

Wang و همکاران (۱۳۹۳) به تأثیر کنج ایجاد شده توسط دو ساختمان با محور عمود برهم بر روی سرعت باد روی سقف پرداختند و شبیه‌سازی‌های CFD بر روی ابعاد مختلف طول، عرض، ارتفاع و همچنین فاصله جدایی گوشه بین دو ساختمان نشان داد که در حالت ورودی همگرا^۴ پتانسیل انرژی باد بر روی سقف همراه با بزرگ‌تر شدن فاصله گوشه افزایش می‌یابد، درحالی‌که در حالت ورودی واگرا^۵ با بزرگ‌تر شدن گوشه، به‌آرامی کاهش می‌یابد و در مقایسه با ساختمان منفرد، بسیاری از موارد پیکربندی گوشه‌ای در این مطالعه فشار باد بیشتری را در سقف نشان می‌دهد.

به‌طور کل، با توسعه زمینه مطالعاتی توربین‌های کوچک، پتانسیل زیادی را می‌توان برای کاربرد میکروتوربین‌ها در ساختمان‌های مسکونی کم ارتفاع در محیط شهری، در نظر گرفت. محل قرارگیری میکروتوربین در ساختمان، جزو عوامل مهم و تأثیرگذار در بازده انرژی است که در اکثر پژوهش‌های ذکر شده، عموماً به بررسی جریان باد روی سقف و در مواردی اندک در بین دو ساختمان کم ارتفاع، به‌صورت مجزا پرداخته شده است. این مقاله سعی دارد با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) به تجزیه و تحلیل مقایسه‌ای جریان هوا هم در معبر بین دو ساختمان کم ارتفاع با فرم مکعب مستطیل و هم بر روی سقف مسطح پردازد و میزان تغییرات سرعت باد در کانال

باد با سرعت بالا در ارتفاع زیاد صورت می‌گیرد که مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است (Calautit et al., 2018; Cho et al., 2011; Lu & Sun, 2014; Park et al., 2015). اگرچه، Zhou و همکاران (۱۳۹۶) در پژوهشی متفاوت با ثابت نگه داشتن عرض تونل بین دو ساختمان، به تأثیر میزان منحنی بودن لبه‌های ساختمان بر روی سرعت باد داخل تونل پرداختند و با استفاده از شبیه‌سازی CFD، فرم بهینه‌ای از ساختمان‌های کم ارتفاع را پیشنهاد داده‌اند که سرعت باد در بین این ساختمان‌ها حداقل ۴۶٪ افزایش می‌دهد.

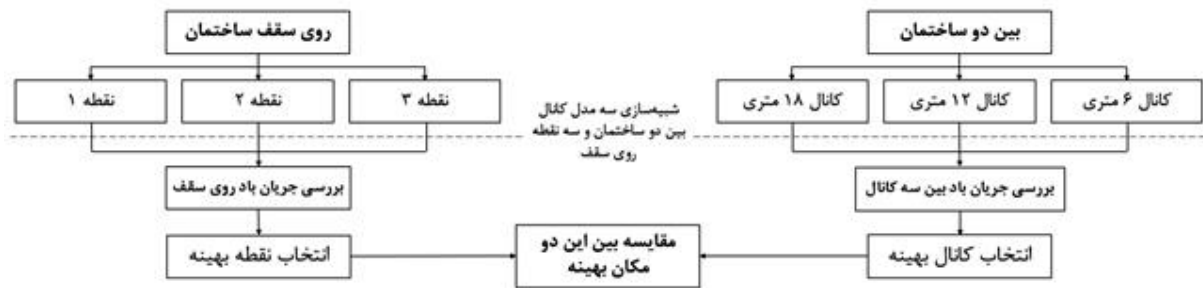


شکل ۱- موقعیت قرارگیری توربین در ساختمان
منبع: (Ayhan & Sağlam, 2012)

اکثر پژوهش‌های اخیر پیرامون به‌کارگیری میکروتوربین در ساختمان‌های کم ارتفاع، به قرارگیری توربین بر روی سقف ساختمان و روش‌های تشدید جریان باد بر روی سقف تأکید داشته‌اند. برای مثال Abohela و همکاران (۱۳۹۲) به بررسی فرم‌های مختلف شکل سقف در ساختمان‌های کم ارتفاع پرداختند و بعد از بررسی جهات مختلف باد و ارتفاع ساختمان‌ها، نشان دادند در صورت ارزیابی آگاهانه جریان باد بالای سقف‌ها، می‌توان بازده انرژی را افزایش داد و در مورد سقف طاق آهنگ^۶، این افزایش بازده باعث تولید ۱/۵۶٪ برق بیشتری خواهد شد. آن‌ها همچنین با شبیه‌سازی این نوع سقف در دو پیکربندی شهری منظم و غیرمنظم، دریافتند که حالت غیرمنظم، احتمالاً به دلیل فاصله بیشتر بین ساختمان‌ها، تأثیر کمتری بر الگوی جریان باد اطراف ساختمان‌های مورد بررسی می‌گذارد.

Wang و همکاران (۱۳۹۶) با شبیه‌سازی جریان باد بر روی سقف سرپوشیده سایبان دار با برآمدگی‌ها و زوایای شیب متفاوت، نشان دادند که مدل‌های سایبان با گودی در

ساختمان، از نرم‌افزار انسیس فلونت^۶ برای شبیه‌سازی جریان باد در بین دو ساختمان و بر روی سقف ساختمان استفاده شده است. این شبیه‌سازی از یک فرآیند دو مرحله‌ای به صورت موازی پیروی می‌کند؛ به طوری که عرض‌های مختلف کانال بین دو ساختمان برای درک بهتر رفتار باد مورد ارزیابی قرار گرفته و در طرف دیگر نقاط مختلف سقف نیز برای تعیین مکان بهینه، شبیه‌سازی می‌شود و در آخر با تعیین عرض بهینه کانال و نقطه بهینه روی سقف، این دو مکان قرارگیری با هم مقایسه می‌شوند (شکل ۲).



شکل ۲- فرآیند مدلسازی در این مطالعه

با توجه به گلاباد به‌دست آمده از این ایستگاه‌ها در ارتفاع ۱۰، ۳۰ و ۴۰ متری در پژوهش‌های نامبرده اخیر (شکل ۳)، می‌توان گفت باد غالب در غرب شهر قزوین از سمت شمال شرق و در زاویه بین صفر و $22/5$ درجه می‌وزد. بنابراین در مدلسازی کانال یا کریدور جریان باد در همین راستا و حداقل فاصله بین دو ساختمان با توجه به ضوابط شهرداری، ۶ متر و در آلترناتیوهای بعدی ۱۲ متر به‌عنوان حداقل فاصله قانونی حریم معبر و ۱۸ متر به‌عنوان استاندارد معبر جمع‌کننده محلی در نظر گرفته شده‌اند (شکل ۴). طبق تعریف ساختمان‌های کم ارتفاع بلوک‌های پنج تا هفت طبقه با حداکثر ارتفاع ۲۳ متر می‌باشند که در این پژوهش اندازه ارتفاع میانه ۲۰ متر مینا قرار گرفته است. ابعاد کف ساختمان نیز با فرض دو واحدی بودن هر طبقه و اصول کلی قرارگیری معمول فضاها، ۱۰ در ۲۰ متر در نظر گرفته شده و مدلسازی در محیط Spaceclaim و با ترسیم تونل باد برای تحلیل سرعت و جریان باد در کانال‌ها و پشت‌بام (شکل ۵) و ترسیم

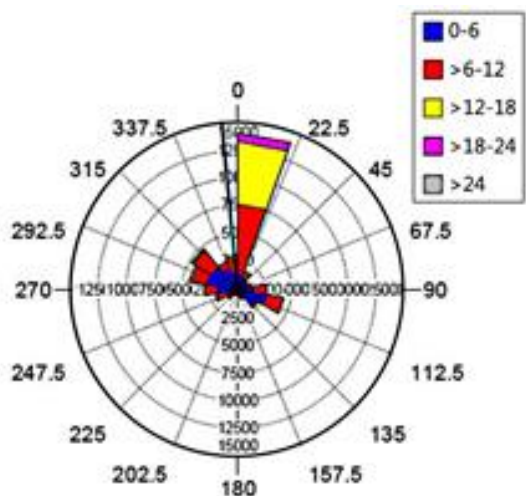
بین دو ساختمان و نقاط مختلف روی سقف را بررسی کند. این شبیه‌سازی براساس اطلاعات ایستگاه شوره در شهر قزوین صورت گرفته است که با میانگین سرعت باد سالیانه تقریباً ۶ متربرثانیه جزو مناطق با پتانسیل بالا برای استفاده از انرژی بادی است.

روش‌شناسی پژوهش مدلسازی

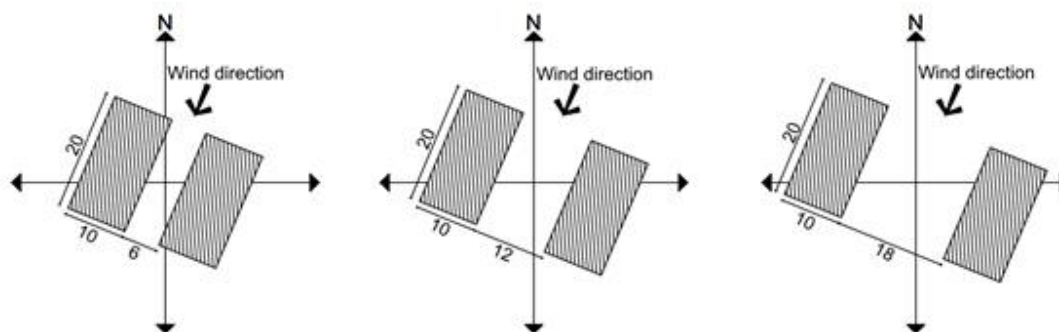
برای تعیین مکان بهینه قرارگیری میکروتوربین در

شناخت بستر مطالعه

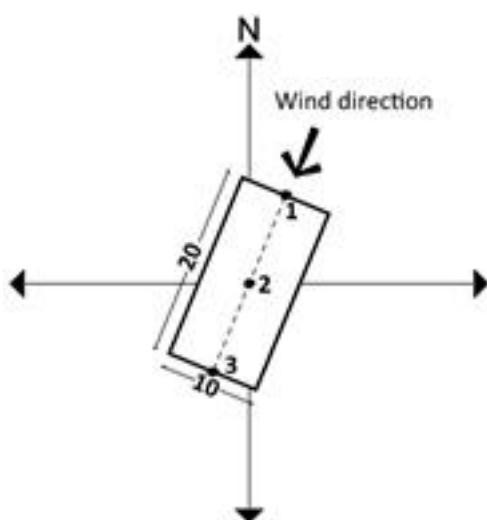
براساس پژوهش‌های انجام شده، منطقه غرب استان قزوین جزو مناطق با پتانسیل بالا برای استفاده از انرژی بادی است و مزرعه بادی کهک در سال ۱۳۹۲ در این منطقه راه‌اندازی شده است. Biglari و همکاران (۱۳۹۲) کیفیت کارایی میکروتوربین‌ها را بر اساس سرعت باد این‌گونه بیان می‌کنند: "پتانسیل انرژی باد برای نصب توربین بادی در سرعت متوسط کمتر از ۴ متربرثانیه ضعیف، ۴-۵/۵ متربرثانیه متوسط، ۵/۵-۶/۷ متربرثانیه خوب تا خیلی خوب و برای سرعت‌های بالاتر از ۶/۷ متربرثانیه عالی ارزیابی می‌شود". میانگین سرعت باد سالیانه در ارتفاع ده متری از سطح زمین در ایستگاه‌های جرنندق (Jahangiri et al., 1391) و شوره در ایستگاه‌های جرنندق (Alamdari et al., 1390) در غرب شهر قزوین به ترتیب ۵/۹۶ و ۵/۹۵ متربرثانیه گزارش شده است که بر همین اساس، سرعت مناسبی برای به حرکت در آوردن میکروتوربین بادی در قزوین ارزیابی و بعنوان مکان این پژوهش انتخاب می‌شود.



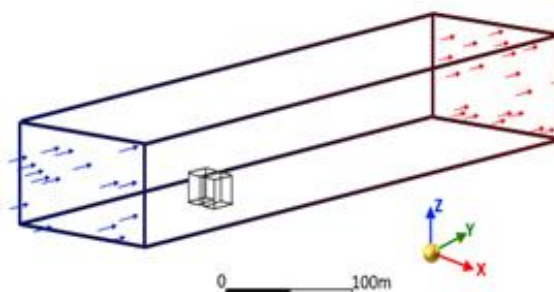
شکل ۳- گلباد سرعت و جهت ایستگاه شورجه
منبع: (علمداری و همکاران، ۱۳۹۰)



شکل ۴- مدل سازی کانال بین دو ساختمان در سه اندازه مختلف



شکل ۶- نقاط قرارگیری میکروتوربین بر روی بام

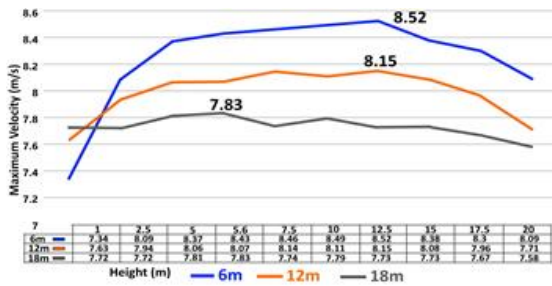


شکل ۵- تونل باد

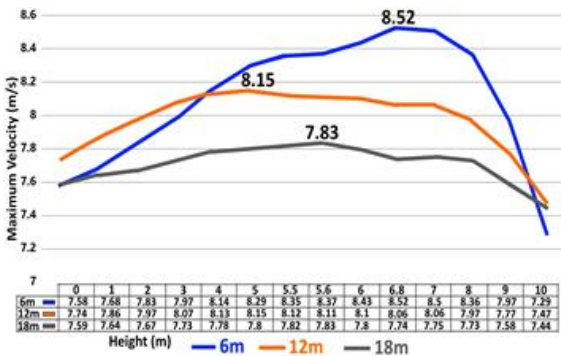
مش در Ansys meshing و با استفاده از الگوریتم Patch Conforming Method انجام شده است. در ادامه شبیه سازی بر روی سقف در نقطه بادگیر، نقطه مرکزی و نقطه پشت به باد بر روی محور اصلی ساختمان انجام می شود. این شبیه سازی بر روی ساختمان منفرد و هم جهت با باد غالب و بدون در نظر گرفتن سایر عوارض طبیعی و مصنوعی احتمالی پیرامونی صورت می گیرد (شکل ۶).

می‌رسد و بعد از آن تا ارتفاع ساختمان یعنی ۲۰ متر روند کاهشی پیدا می‌کند. به‌طور کلی بیشترین سرعت باد در ارتفاع ۵/۵ تا ۱۲/۵ متری و با فاصله ۲/۵ متری از سطح زمین تا لبه بام ساختمان بالای ۸ متر برتانیه گزارش شده است.

در راستای جریان باد، با بررسی و تحلیل نیمه ابتدایی کانال به‌عنوان محدوده ورودی و حداکثر سرعت جریان باد، به‌طور کلی می‌توان گفت در فاصله ۳ الی ۹ متری از مبدأ سرعت باد عموماً بالای ۸ متر برتانیه است (نمودار ۲) و به‌طور جزئی و دقیق‌تر حد فاصل بین ۶ و ۷ متر محدوده‌ای است که می‌تواند برای قرارگیری میکروتوربین مناسب باشد؛ چراکه حداکثر سرعت جریان باد در این محدوده و در صفحه $y=6.8m$ گزارش شده است (نمودار ۲- شکل ۸).



نمودار ۱- سرعت باد در ارتفاع‌های مختلف (Z) در سه مدل



نمودار ۲- سرعت در راستای جریان باد (Y) در سه مدل

بنابراین برای تعیین مکان بهینه قرارگیری میکروتوربین لازم است خطی که دو صفحه $Z=12.5m$ و $Y=6.8m$ در آن برخورد می‌کند (راستای عمود بر جریان باد)، مورد بررسی قرار گیرد (شکل ۹). با توجه به نمودار ۳، هرچه محور حرکت جریان باد به سمت دو ساختمان نزدیک می‌شود، سرعت جریان باد کاهش پیدا کرده و در جداره ساختمان به

نتایج

الف) تجزیه و تحلیل عرض کانال باد بین دو ساختمان

با بررسی جریان باد بین دو ساختمان که با فاصله‌های ۶، ۱۲ و ۱۸ نسبت به هم قرار گرفته‌اند، نکته جالب توجه این است که در هر سه حالت سرعت باد بین دو ساختمان افزایش چشمگیری پیدا کرده است و مطابق جدول ۱، این افزایش برای هر سه نمونه بالای ۳۰ درصد گزارش شده است. از آن‌جایی که عملکرد میکروتوربین‌ها در سرعت بالای ۶/۷ متر برتانیه عالی ارزیابی شده است، پیش‌بینی می‌شود هر سه کانال فضای مناسبی را برای قرارگیری میکروتوربین فراهم می‌کند. در ادامه به جزئیات اطلاعات به دست آمده در هر سه نمونه پرداخته می‌شود.

جدول ۱- حداکثر سرعت گزارش شده در سه نمونه با سرعت ورودی ۵/۹۶ متر برتانیه

افزایش سرعت	سرعت حداکثر (m/s)	فاصله دو ساختمان
۴۳٪	۸/۵	کانال ۶ متر
۳۷٪	۸/۱	کانال ۱۲ متر
۳۱٪	۷/۸	کانال ۱۸ متر

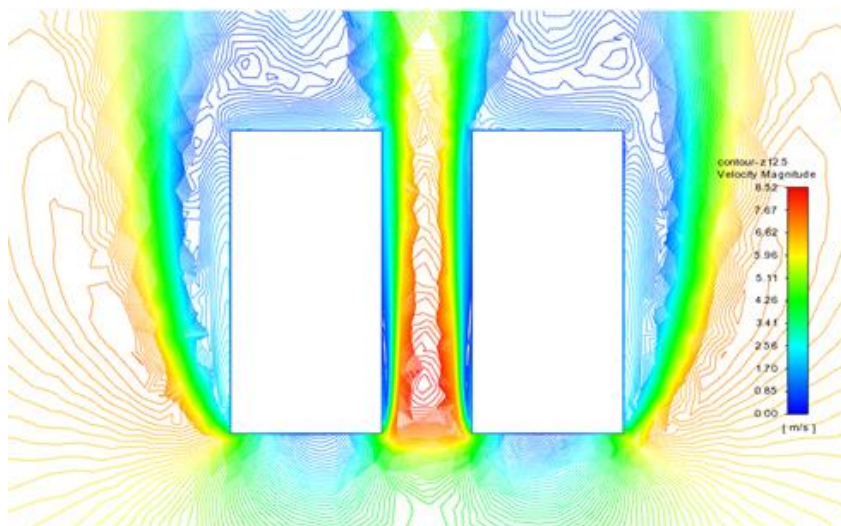
بررسی جریان باد در کانال ۶ متر

در حالتی که دو ساختمان با فاصله ۶ متر از همدیگر قرار گرفته‌اند، بیشترین افزایش سرعت در مقایسه با دو نمونه دیگر گزارش شده است. کانال ۶ متر می‌تواند تا ۴۳٪ سرعت باد را افزایش دهد و شرایط خوبی را برای به‌کارگیری میکروتوربین‌ها فراهم کند. طبق بررسی‌های انجام شده، به‌طور کلی حداکثر سرعت در محدوده ورودی باد به داخل کانال و در ابتدای مسیر جریان اتفاق می‌افتد (شکل ۷).

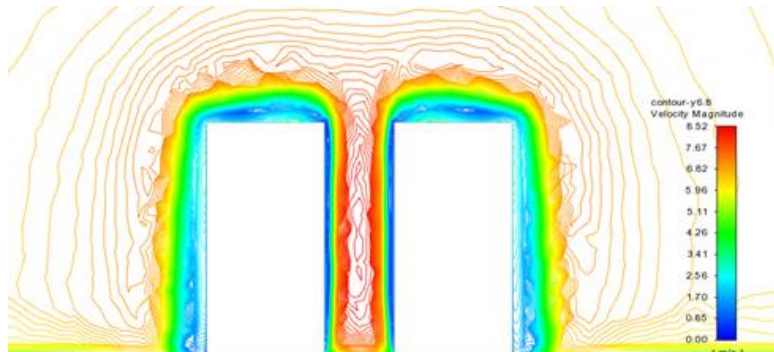
برای تحلیل و تعیین مکان بهینه قرارگیری میکروتوربین، نیاز است سرعت جریان باد کانال در هر سه راستای محور مختصات بررسی شود. از این رو با ترسیم صفحات مختلف در شبیه‌سازی و مقایسه حداکثر سرعت در بین صفحات، می‌توان گفت در راستای عمودی و بر اساس نمودار ۱، سرعت باد کانال ۶ متری در ارتفاع ۱۲/۵ متر به حداکثر خود

بیشینه میزان سرعت باد دقیقا در آکس میانی کانال تا فاصله ۲۵ سانتی‌متری از دو سوی این محور و برابر با ۸/۵ متربرثانیه است.

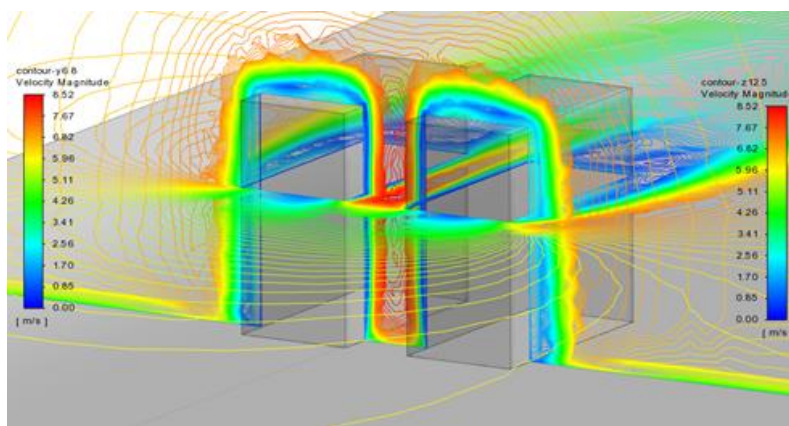
صفر می‌رسد. در فاصله یک متری از دو سمت محور جریان باد ($X=0$) سرعت باد بالای ۸ متر برثانیه گزارش شده است که فضای خوبی برای قرارگیری میکروتوربین ایجاد می‌کند.



شکل ۷- کانتور سرعت باد در ارتفاع ۱۲/۵ متری در کانال ۶ متری

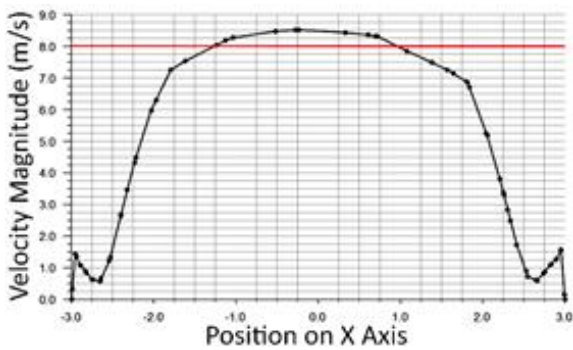


شکل ۸- کانتور سرعت باد در صفحه $y=6.8m$ در کانال ۶ متری

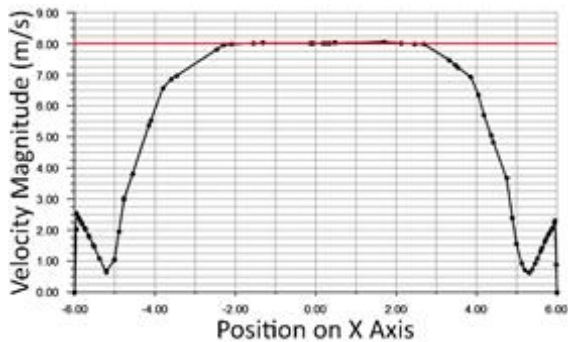


شکل ۹- فصل مشترک دو صفحه $y=6.8m$ و $z=12.5m$ در کانال ۶ متری

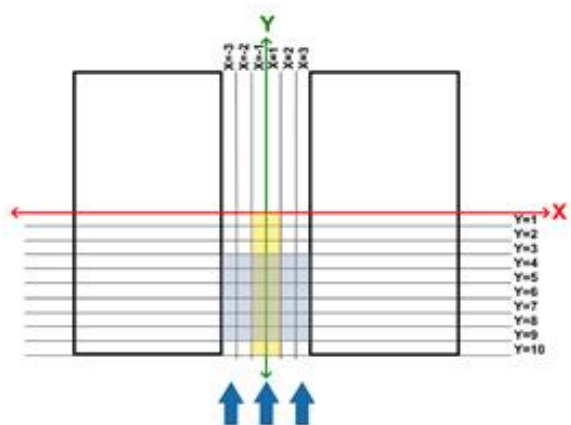
است که بر خلاف کانال ۶ متری، سرعت باد در راستای طولی حرکت در کانال، نسبت به محور مرکزی ($X=0$) تا فاصله دو متری از دو سمت تقریباً ثابت است و از این فاصله شروع به کاستن می‌کند. بر اساس تحلیل‌های انجام شده، محدوده بهینه قرارگیری میکروتوربین در کانال ۱۲ متری در قیاس با این محدوده در کانال ۶ متری در اشکال ۱۱ و ۱۲ ارائه شده است.



نمودار ۳- وضعیت سرعت باد در مقطع عرضی صفحه بیشینه بین دو ساختمان در کانال ۶ متری (x, 6.8, 12.5)

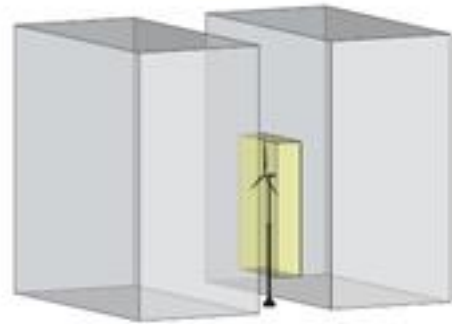


نمودار ۴- وضعیت سرعت باد در مقطع عرضی صفحه بیشینه بین دو ساختمان در کانال ۱۲ متری (x, 5, 15)



شکل ۱۱- محدوده بهینه قرارگیری میکروتوربین در راستای جریان باد و عمود بر آن در کانال ۶ متری

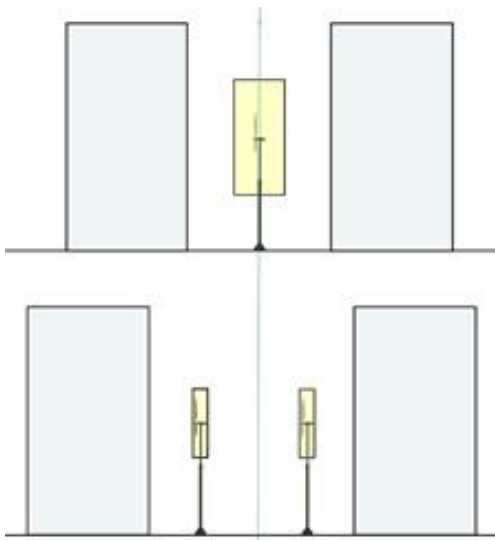
با مشخص شدن محدوده ماکزیمم سرعت در هر سه راستا، می‌توان فضایی را در کانال در نظر گرفت که نقطه برخورد سه صفحه‌ای که ماکزیمم سرعت در آن‌ها اتفاق می‌افتد و سرعت باد در تمامی نقاط آن بالای ۸ متربرثانیه است به‌عنوان بهینه‌ترین مکان برای قرارگیری میکروتوربین در نظر گرفت (شکل ۱۰).



شکل ۱۰- محدوده بهینه قرارگیری میکروتوربین در کانال ۶ متری

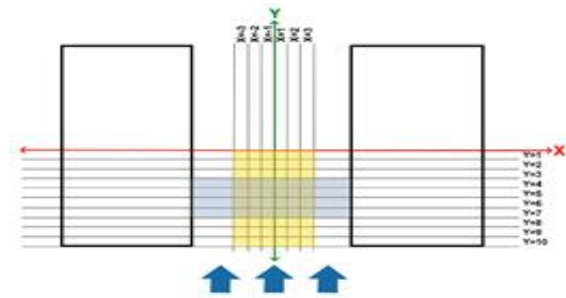
بررسی جریان باد در کانال ۱۲ متر

اگرچه در حالتی که دو ساختمان به فاصله ۱۲ متر از همدیگر قرار گرفته‌اند، افزایش سرعت کمتری نسبت به کانال ۶ متری گزارش شده است؛ اما در این نمونه نیز می‌توان محدوده‌ای را در کانال برای قرارگیری میکروتوربین در نظر گرفت که در تمامی نقاط آن سرعت باد بالای ۸ متربرثانیه است. بالاترین سرعت گزارش شده در این نمونه ۸/۱۵ متر بر ثانیه است که مشابه مدل ۶ متری، در محدوده ورودی باد به داخل کانال و در نیمه ابتدایی مسیر جریان اتفاق می‌افتد. همچنین طبق نمودار ۱ در کانال ۱۲ متری، در فاصله ۵ تا ۱۵ متری از سطح زمین سرعت باد بالای ۸ متربرثانیه است که به دلیل افزایش فاصله بین دو ساختمان، جریان باد در این محدوده نوسانات زیادی دارد و روند ثابتی را طی نمی‌کند. همچنین در راستای جریان باد (محور Y)، حداکثر سرعت در صفحه $Y=5m$ گزارش شده که ۸/۱۵ متربرثانیه است. به‌طور کلی محدوده ۳ الی ۷ متری از مبدأ، مکان مناسبی برای قرارگیری میکروتوربین است؛ چراکه سرعت باد در این محدوده بالای ۸ متربرثانیه مشاهده شده است (نمودار ۲). نکته حائز اهمیت و قابل مقایسه در نمودارهای ۳ و ۴ این



شکل ۱۳- مقایسه محدوده بهینه قرارگیری میکروتوربین در کانال ۱۲ متری (بالا) و کانال ۱۸ متری (پایین)

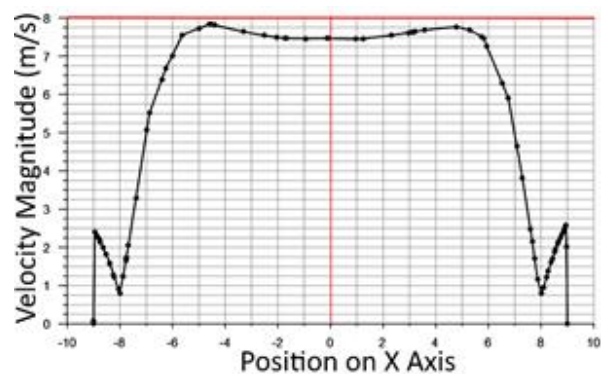
به ارتفاع ۵/۶ متر و به فاصله ۵/۶ متر از مبدأ که تلاقی صفحاتی با این مختصات است، گزارش شده. با توجه به نمودار ۵، روند تغییرات سرعت باد بر روی محور اصلی حرکت ($X=0$) به سمت دو ساختمان ابتدا افزایشی و در فاصله ۴ الی ۵ متری به حداکثر خود رسیده و بعد از آن کاهش پیدا می‌کند. بنابراین بر خلاف کانال ۶ و ۱۲ متری که حداکثر سرعت باد در ورودی و بر روی محور وسط کانال اتفاق می‌افتد، در کانال ۱۸ متری بهتر است محدوده‌ای در دو طرف این محور برای مکان بهینه قرارگیری میکروتوربین انتخاب شود؛ به طوری که توربین در نیمه ابتدایی کانال ارتفاع ۵ الی ۱۰ متری و به فاصله ۴ الی ۵ متر از محور کانال قرار بگیرد. شکل ۱۳ محدوده تقریبی بهینه مقایسه‌ای برای نصب میکروتوربین‌ها را در کانال ۱۲ و ۱۸ متری نمایش می‌دهد و در شکل ۱۴ وضعیت توزیع شدت باد در صفحه ارتفاعی ماکزیمم سرعت باد ($z=5.6m$) مشاهده می‌شود.



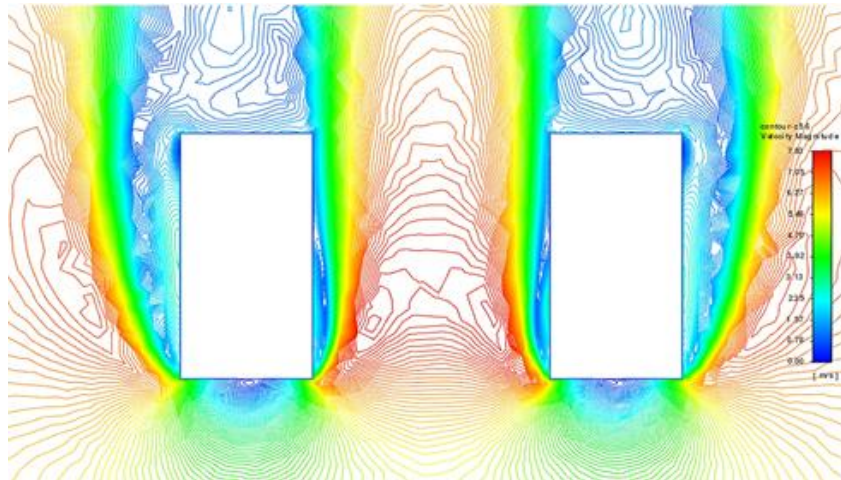
شکل ۱۲- محدوده بهینه میکروتوربین در راستای جریان باد و عمود بر آن در کانال ۱۲ متری

بررسی جریان باد در کانال ۱۸ متر

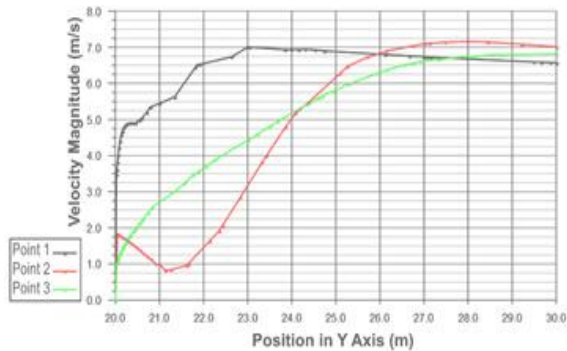
اگرچه حداکثر سرعت باد با افزایش فاصله بین دو ساختمان روند کاهشی پیدا می‌کند، اما کانال ۱۸ متری همچنان با ثبت حداکثر سرعت ۷/۸ متر بر ثانیه و افزایش ۳۱ درصدی سرعت باد، فضای مناسبی را برای به کارگیری میکروتوربین‌ها به وجود آورده است؛ چراکه عملکرد میکروتوربین‌ها بر اساس پژوهش Biglari و همکاران (۱۳۹۲) در سرعت بالای ۶/۷ متر بر ثانیه عالی ارزیابی می‌شود. اما به دلیل افزایش فاصله بین دو ساختمان، رفتار باد بسیار متفاوت و مغشوش نسبت به دو نمونه قبلی گزارش شده است. حداکثر سرعت در راستای Z و Y بر روی خطی



نمودار ۵- وضعیت سرعت باد در مقطع عرضی صفحه بهینه بین دو ساختمان در کانال ۱۸ متری ($X, 5.6, 5.6$)



شکل ۱۴- کانتور سرعت باد در صفحه $Z=5.6m$ در کانال ۱۸ متری



نمودار ۶- بررسی رفتار باد بر روی سه نقطه ۱، ۲ و ۳ تا ارتفاع ۱۰ متری بالاتر از سطح روی بام

در نقطه ۲، سرعت باد در ارتفاع ۸ متری از سقف به حداکثر مقدار خود یعنی $7/16$ متر بر ثانیه می‌رسد که بیشتر از حداکثر سرعت نقطه ۱ است. بنابراین ارتفاع ۸ متر بالاتر از سطح سقف مکان مناسبی برای قرارگیری میکروتوربین در نقطه ۲ است.

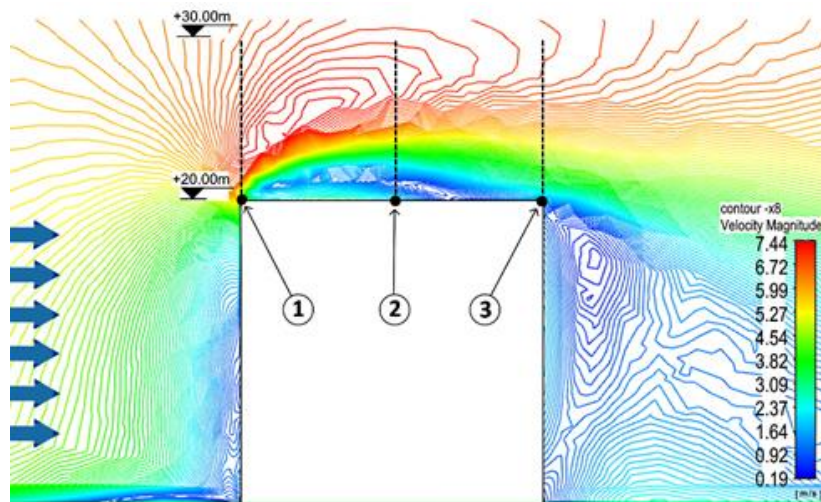
در نقطه ۳، به‌طور کلی حداکثر سرعت باد از دو نقطه ابتدایی کمتر است و در ارتفاع ۹ متر از سقف به $6/9$ متر بر ثانیه می‌رسد.

در مقایسه این سه نقطه می‌توان گفت نقطه ۱ شرایط مناسبی را برای نصب میکروتوربین نسبت به دو نقطه دیگر فراهم می‌کند؛ چراکه حداکثر سرعت باد در ارتفاع پایین‌تری اتفاق می‌افتد و این موضوع شرایط نصب میکروتوربین را بسیار تسهیل می‌کند.

ب) تجزیه و تحلیل سرعت باد بر روی سقف

تغییرات سرعت باد بر روی سقف در نقطه مقابل باد (نقطه ۱)، نقطه مرکزی (نقطه ۲) و نقطه پشت به باد (نقطه ۳) بر روی محور اصلی ساختمان مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۵). با توجه به شکل ۱۵، در ابتدای مسیر جریان باد بر روی ساختمان، حداکثر سرعت باد در لبه و ارتفاع پایین اتفاق می‌افتد و هرچه جریان به سمت انتهای ساختمان نزدیک می‌شود، نیاز است برای دریافت باد پرسرعت ارتفاع میکروتوربین بالاتر برود. همچنین در کل مسیر جریان باد بر روی ساختمان، سرعت باد در ارتفاع نزدیک به سقف بسیار کم است و برای عملکرد بهینه میکروتوربین‌ها در هر نقطه‌ای از سقف، باید ارتفاعی مناسب را برای آن‌ها در نظر گرفت. بنابراین برای تحلیل بهتر رفتار جریان باد در نقاط مشخص شده، تغییرات سرعت باد در هر سه نقطه تا ارتفاع ده متر بالاتر از سقف (۳۰ متر از سطح زمین) مورد بررسی قرار گرفته است (نمودار ۶). مقایسه رفتار باد در این سه نقطه به صورت زیر است:

در نقطه ۱، همان‌طور که گفته شد، سرعت باد بر روی سقف (۲۰ متر) صفر است و تا ارتفاع ۲۳ متر روند افزایشی دارد و به حداکثر مقدار ۷ متر بر ثانیه می‌رسد و بعد از آن روند کاهشی پیدا می‌کند. بنابراین ارتفاع ۳ متر بالاتر از سقف مکان مناسبی برای قرارگیری میکروتوربین در نقطه ۱ است.



شکل ۱۵- کانتور سرعت باد بر روی محور وسط ساختمان

بحث و نتیجه‌گیری

جریان باد اطراف ساختمان‌های کم ارتفاع با توجه به وجود موانع زیاد در محیط شهری سرعت کمی دارد. برای استفاده از باد شهری برای تولید انرژی پاک، این مقاله شبیه سازی CFD را در مرحله نخست برای پیشنهاد فواصل بهینه بلوک‌های ساختمانی ارائه می‌کند که می‌تواند به طور مؤثر سرعت باد را برای میکروتوربین‌ها در ساختمان‌های مسکونی کم ارتفاع در شهر قزوین تقویت کند. به‌عنوان مثال با بررسی رفتار باد در بین دو ساختمان با فاصله‌های ۶، ۱۲ و ۱۸ متری از هم، شبیه‌سازی به این نتیجه رسیده است که کانال ۶ متری سرعت باد را تا ۴۳٪ افزایش داده و شرایط بسیار مطلوبی را برای استفاده از میکروتوربین‌ها در محیط شهری فراهم می‌کند. از آنجایی که توان تولیدی توربین‌ها با توان سوم سرعت باد رابطه مستقیم دارد؛ با $1/43$ برابر شدن سرعت باد توسط کانال ۶ متری، توان میکروتوربین نزدیک سه برابر می‌شود. علاوه بر این، نمونه‌های ۱۲ و ۱۸ متری نیز به ترتیب با افزایش ۳۷٪ و ۳۱٪ سرعت باد، می‌توانند گزینه‌های قابل استفاده در معماری در اولویت‌های بعدی باشند. لازم به ذکر است که در این شبیه‌سازی، میانگین سرعت باد سالانه در منطقه به‌عنوان مبنا در نظر گرفته شده و بنابراین نتایج پژوهش نیز نمایانگر حالت میانگین است.

همچنین با بررسی رفتار باد و مقایسه سرعت باد بر روی بام در سه نقطه بادگیر ابتدایی (نقطه ۱)، وسط (نقطه ۲) و انتهای محور اصلی ساختمان (نقطه ۳)، شبیه‌سازی نشان داد که در همه نقاط، محدوده نزدیک به سقف سرعت باد بسیار کم و به صفر میل می‌کند و هرچه ارتفاع بیشتر می‌شود، سرعت باد افزایش پیدا می‌کند که در نقطه ابتدایی حداکثر سرعت باد در ارتفاع کمتری نسبت به دو نقطه دیگر اتفاق می‌افتد. به‌طورکلی حداکثر سرعت باد در نقطه ۱ برابر با ۷ متربرثانیه است که با نصب میکروتوربین در ارتفاع ۳ متری از سقف، می‌توان توقع عملکرد بهینه‌ای از آن را داشت. در مقایسه کلی نسبت به دو شبیه‌سازی انجام شده، می‌توان گفت که کانال ۶ متری در بین سه کانال بررسی شده، گزینه مناسبی برای استفاده در معماری است. حداکثر سرعت باد در کانال ۶ متری، $8/53$ متربرثانیه است که با سرعت ورودی $5/96$ متربرثانیه، باعث تقویت ۴۳ درصدی سرعت باد می‌شود. در مقایسه کانال ۶ متری و نقطه ۱ به‌عنوان مکان بهینه قرارگیری میکروتوربین بر روی سقف، عملکرد کانال ۶ متری بهتر است؛ چراکه نقطه ۱ به میزان ۱۷٪ سرعت باد را افزایش داده و به ۷ متربرثانیه رسانده است. در عین حال نصب توربین در وسط کانال علاوه بر تقویت بیشتر سرعت باد و در نتیجه توان تولیدی میکروتوربین، از نظر اجرایی

مسکونی علاوه بر مکان قرارگیری توربین و سرعت باد، که موضوع تحقیقاتی این مطالعه هستند، تحت تاثیر عوامل دیگری مانند ساختار فیزیکی محیطی و نوع توربین نیز می‌باشد. با وجود انواع مجموعه‌ها و شهرک‌های جدید در توسعه شهری که عموماً از بلوک‌های مکعبی همسان نظیر مدلسازی انجام شده در این پژوهش تشکیل یافته‌اند (نظیر مسکن مهر)، در مطالعات آینده می‌توان آزمایش‌هایی را در دنیای واقعی انجام داد تا نتایج عملی پیشنهادی در این مطالعه و همچنین تاثیر توربین‌های بادی مختلف موجود در بازار ارزیابی شود.

یادداشت‌ها

1. IEA – International Energy Agency
2. Building augmented wind turbines
3. Barrel vaulted
4. Converging
5. Diverging
6. Ansys Fluent

سهولت بیشتری داشته و ارتعاشات احتمالی به سازه ساختمان راه پیدا نخواهد کرد. در صورتی که شرایط و محدودیت‌های طراحی و چیدمان بلوک‌های ساختمانی اجازه قرارگیری میکروتوربین در بین دو ساختمان را نداد؛ می‌توان نقطه ۱ را به‌عنوان اولویت دوم برای قرارگیری میکروتوربین بر روی سقف در نظر گرفت.

پیشنهادها

از آنجایی که فرم ساختمان پیشنهادی فقط برای تسریع جریان باد در کانال‌های بین ساختمان‌ها در نظر گرفته شده است، جریان باد در اطراف ساختمان‌ها می‌تواند سرعت پایین خود را حفظ کند و آسایش انسان را به خطر نمی‌اندازد. مشابه سایر مطالعات شبیه‌سازی CFD، این مطالعه چیدمان بلوک‌های ساختمانی را در چارچوب ضوابط شهری و از طریق شبیه‌سازی بدون انجام آزمایش در دنیای واقعی ارائه می‌کند. تولید برق توربین‌های بادی در ساختمان‌های

فهرست منابع

- Abe, K., & Ohya, Y. (2004). An investigation of flow fields around flanged diffusers using CFD. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 92(3–4), 315–330. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2003.12.003>
- Abohela, I., Hamza, N., & Dudek, S. (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, 1106–1118. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.08.068>
- Alamdari, P., Nematollahi, O., & Alemrajabi, A. (2019). Investigating the potential of wind energy in Qazvin province for the construction of a wind power plant. *5th Conference and Exhibition on Environmental Engineering*.
- Anderson, D. ., Whale, J., Livingston, P. ., & CHAN, D. (2008). *Rooftop Wind Resource Assessment using a Three-Dimensional Ultrasonic Anemometer* (p. 7). Murdoch University.
- Ayhan, D., & Sağlam, Ş. (2012). A technical review of building-mounted wind power systems and a sample simulation model. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 1040–1049. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.028>
- Bataineh, K., & Alrabee, A. (2018). Improving the energy efficiency of the residential buildings in Jordan. *Buildings*, 8(7), 1–16. <https://doi.org/10.3390/buildings8070085>
- Biglari, M., Assareh, E., Nedaee, M., & Poultagari, I. (2014). Feasibility study and economic evaluation of wind energy in north of Khuzestan province : case study of shush-tar. *Iranian Journal of Energy*, 17(1).
- Blackmore, P. (2008). *Siting Micro-Wind Turbines on House Roofs*. BRE Press.
- Bobrova, D. (2015). Building-integrated wind turbines in the aspect of architectural shaping. *Procedia Engineering*, 117(1), 404–410. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.185>
- Cace, J., Horst, E., Syngellakis, K., Niel, M., Clement, P., Heppener, R., & Peirano, E. (2007). *Urban wind turbines - guidelines for small wind turbines in the built environment*. 1–41.

- Calautit, K., Aquino, A., Calautit, J. K., Nejat, P., Jomehzadeh, F., & Hughes, B. R. (2018). A review of numerical modelling of multi-scale wind turbines and their environment. *Computation*, 6(1), 1–37. <https://doi.org/10.3390/computation6010024>
- Chang, R.-D., Zuo, J., Zhao, Z.-Y., Zillante, G., Gan, X.-L., & Soebarto, V. (2017). Evolving theories of sustainability and firms: History, future directions and implications for renewable energy research. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 48–56. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.029>
- Cho, K. P., Jeong, S. H., & Sari, D. P. (2011). Harvesting wind energy from aerodynamic design for building integrated wind turbines. *International Journal of Technology*, 2(3), 189–198. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v2i3.1056>
- Dabiri, J. O. (2011). Potential order-of-magnitude enhancement of wind farm power density via counter-rotating vertical-axis wind turbine arrays. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 3(4). <https://doi.org/10.1063/1.3608170>
- Dutton, Andrew & Halliday, Jim & Blanch, MJ. (2005). *The Feasibility of Building-Mounted/Integrated Wind Turbines (BUWTs): Achieving their potential for carbon emission reductions*. Final Report of Carbon Trust Contract 2002-07-028-1-6.
- Farsi, S., & Nazari, M. (2018). Optimal Height for a Wind Tower on a Building in Yazd. *Iranian Journal of Energy*, 20(4), 101-112.
- Heo, Y. G., Choi, N. J., Choi, K. H., Ji, H. S., & Kim, K. C. (2016). CFD study on aerodynamic power output of a 110 kW building augmented wind turbine. *Energy and Buildings*, 129, 162–173. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.08.004>
- Jafari, S. A. H., & Kosasih, B. (2014). Flow analysis of shrouded small wind turbine with a simple frustum diffuser with computational fluid dynamics simulations. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 125, 102–110. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2013.12.001>
- Jahangiri, M., Aghaei, E., & Zamani, M. (2012). Investigating renewable wind energy potential in Qazvin province, case study: Shoorje station. *2nd Conference on Environmental Planning and Management*.
- KC, A., Whale, J., & Urmee, T. (2019). Urban wind conditions and small wind turbines in the built environment: A review. *Renewable Energy*, 131, 268–283. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.050>
- Ledo, L., Kosasih, P. B., & Cooper, P. (2011). Roof mounting site analysis for micro-wind turbines. *Renewable Energy*, 36(5), 1379–1391. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.10.030>
- Lee, K. Y., Tsao, S. H., Tzeng, C. W., & Lin, H. J. (2018). Influence of the vertical wind and wind direction on the power output of a small vertical-axis wind turbine installed on the rooftop of a building. *Applied Energy*, 209(May), 383–391. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.185>
- Lu, L., & Ip, K. Y. (2009). Investigation on the feasibility and enhancement methods of wind power utilization in high-rise buildings of Hong Kong. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(2), 450–461. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.11.013>
- Lu, L., & Sun, K. (2014). Wind power evaluation and utilization over a reference high-rise building in urban area. *Energy and Buildings*, 68, 339–350. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.09.029>
- Minh Bui, D., & Melis, W. J. C. (2013). Micro Wind Turbines for Energy Gathering in Build Up Areas. *International Journal of Sustainable Energy Development*, 2(2), 105–114. <https://doi.org/10.20533/ijsted.2046.3707.2013.0016>
- Minner, K. (2010). *Marina + Beach Towers / Oppenheim Architecture + Design*. Archdaily.Com. https://www.archdaily.com/87669/marina-beach-towers-oppenheim-architecture-design?ad_medium=bookmark-recommendation&ad_name=iframe-modal
- Nasarullah Chaudhry, H., Kaiser Calautit, J., & Richard Hughes, B. (2014). The Influence of Structural Morphology on the Efficiency of Building Integrated Wind Turbines (BIWT). *AIMS Energy*, 2(3), 219–236. <https://doi.org/10.3934/energy.2014.3.219>
- Padmanabhan, K. K. (2013). Study on increasing wind power in buildings using TRIZ Tool in urban areas. *Energy and Buildings*, 61, 344–348. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.11.038>

- Park, J., Jung, H. J., Lee, S. W., & Park, J. (2015). A new building-integrated wind turbine system utilizing the building. *Energies*, 8(10), 11846–11870. <https://doi.org/10.3390/en81011846>
- Rafailidis, S. (1997). Influence of building areal density and roof shape on the wind characteristics above a town. *Boundary-Layer Meteorology*, 85(2), 255–271. <https://doi.org/10.1023/A:1000426316328>
- Ramin, H., & Karimi, H. (2020). Optimum envelope design toward zero energy buildings in Iran. *E3S Web of Conferences*, 172, 16004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017216004>
- Sari, D. P. (2015). Measurement of the Influence of Roof Pitch to Increasing Wind Power Density. *Energy Procedia*, 65, 42–47. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.01.029>
- Toja-Silva, F., Lopez-Garcia, O., Peralta, C., Navarro, J., & Cruz, I. (2016). An empirical–heuristic optimization of the building–roof geometry for urban wind energy exploitation on high-rise buildings. *Applied Energy*, 164, 769–794. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.11.095>
- Wang, B., Cot, L. D., Adolphe, L., & Geoffroy, S. (2017). Estimation of wind energy of a building with canopy roof. In *Sustainable Cities and Society* (Vol. 35). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.08.026>
- Wang B, Cot LD, Adolphe L, Geoffroy S, Morchain J. (2015). Estimation of wind energy over roof of two perpendicular buildings. In *Energy and Buildings*. 88:57-67. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.11.072
- Wang, C., & Prinn, R. G. (2010). Potential climatic impacts and reliability of very large-scale wind farms. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(4), 2053–2061. <https://doi.org/10.5194/acp-10-2053-2010>
- Yang, A. S., Su, Y. M., Wen, C. Y., Juan, Y. H., Wang, W. S., & Cheng, C. H. (2016). Estimation of wind power generation in dense urban area. *Applied Energy*, 171. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.03.007>
- Zhou, H., Lu, Y., Liu, X., Chang, R., & Wang, B. (2017). Harvesting wind energy in low-rise residential buildings: Design and optimization of building forms. *Journal of Cleaner Production*, 167, 306–316. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.166>