



Investigating the Effect of Surface Roughness on Efficiency of Large Wind Farms by Large Eddy Simulation

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Mazidi Sharafabadi V.¹ MSc,
Fathali M.^{*1} PhD

How to cite this article

Mazidi Sharafabadi V, Fathali M. Investigating the Effect of Surface Roughness on Efficiency of Large Wind Farms by Large Eddy Simulation. Modares Mechanical Engineering, 20-19;19(10): 2367-2374.

ABSTRACT

With the recognition of wind energy in the world, wind farms are expected to become more extended and cover increasingly larger surface areas. The most important issue in large wind farms is increasing power and efficiency. When wind turbines are deployed in large arrays, their efficiency decreases due to complex interactions among themselves and with the atmospheric boundary layer (ABL). When the length of the wind farms exceeds the height of the ABL by over an order of magnitude, a "fully developed" flow regime can be established. Since the length of the farm is larger than the atmospheric boundary layer thickness, changes in the streamwise direction can be neglected and the relevant exchanges occur in the vertical direction. In the wind farms established in the fully developed atmospheric boundary layer, the kinetic energy extracted by the wind turbines is transported into the wind-turbine region by vertical fluxes associated with turbulence. Surface roughness is one of the most important factors affecting this phenomenon. In this research, the effect of surface roughness on the efficiency of the large wind farm in the ABL by large eddy simulation is investigated. For this purpose, the large eddy simulation (LES) is applied to solve the turbulence flow equations. In this article wind turbines are modeled using the classical drag disk. The various surface roughnesses are modeled by logarithmic wall functions applied to the bottom of the domain. The results show that the efficiency and power of the wind farm are decreased by increase of surface roughness.

Keywords Wind Farm; Actuator Disk; Surface Roughness; Atmospheric Boundary Layer

¹Aerospace Engineering Department, Aerospace Engineering Faculty, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Aerospace Engineering Faculty, K. N. Toosi University of Technology, Daneshgah Boulevard, Ehsan Street Exit, East Zeynoddin Highway, Tehran, Iran
Phone: +98 (21) 77791044
Fax: +98 (21) 77791044
mfathali@kntu.ac.ir

Article History

Received: April 16, 2018
Accepted: February 13, 2019
ePublished: October 22, 2019

CITATION LINKS

- [1] Large eddy simulation study of scalar transport in fully developed wind-turbine array boundary layers [2] European wind atlas [3] Direct numerical simulation of the Ekman layer: A step in Reynolds number, and cautious support for a log law with a shifted origin [4] Turbulent flows [5] Wind-farm layout optimisation using a hybrid Jensen-LES approach [6] Large eddy simulations of large wind-turbine arrays in the atmospheric boundary layer [7] Large eddy simulation study of fully developed wind-turbine array boundary layers [8] A large-eddy-simulation model for the study of planetary boundary-layer turbulence [9] A scale-dependent Lagrangian dynamic model for large eddy simulation of complex turbulent flows [10] A model for unsteady rotor aerodynamics [11] Wind energy handbook [12] Advances in large-eddy simulation of a wind turbine wake [13] Large-eddy simulation of wind-turbine wakes: Evaluation of turbine parametrisations [14] Meteorological and air quality models for urban areas [15] Introduction to geophysical fluid dynamics: Physical and numerical aspects

بررسی تاثیر زبری سطح زمین بر بازدهی مزارع بادی بزرگ با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ

وحید مزیدی شرف‌آبادی MSc

گروه مهندسی هوافضا، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

مانی فتحعلی* PhD

گروه مهندسی هوافضا، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

چکیده

با گسترش انرژی بادی در جهان مساحت مزارع بادی برای تولید توان بیشتر به صورت چشمگیری در حال افزایش است. مساله مهم در مزارع بادی بزرگ، افزایش توان و بازده است. با افزایش توربین‌های بادی در قالب مزارع بادی بزرگ، بازده این نوع مزارع بادی به دلیل اندرکنش پیچیده بین توربین‌ها با خودشان و با لایه مرزی جوی کاهش می‌یابد. زمانی که طول مزارع بادی یک مرتبه از ارتفاع لایه مرزی جوی بیشتر باشد جریان به حالت کاملاً توسعه یافته سوق پیدا می‌کند. چون طول مزرعه باد نسبت به ضخامت لایه مرزی اتمسفری، بسیار بزرگتر است، مزرعه باد در راستای جریان نامحدود فرض شده و از تغییرات در راستای جریان صرف‌نظر شده است. در مزارع بادی بزرگ که در داخل لایه مرزی کاملاً توسعه یافته قرار می‌گیرند، انرژی جنبشی جذب شده توسط توربین‌های بادی به وسیله انتقال انرژی به صورت عمودی از لایه‌های بالای مزرعه باد به داخل آن تامین می‌شود. زبری سطح از عوامل مهمی است که تاثیر بسیار زیادی روی این پدیده می‌گذارد. در این پژوهش به بررسی اثر زبری سطح زمین روی بازده مزارع بادی بزرگ واقع در لایه مرزی جوی پرداخته شده است. برای این منظور از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ برای حل معادلات جریان توربولانس بهره گرفته شده است. در این مقاله توربین‌های بادی با استفاده از روش دیسک محرک مدل‌سازی شده است. برای اعمال تاثیر زبری‌های متفاوت از توابع دیوار لگاریتمی روی دیواره ناحیه شبیه‌سازی استفاده شده است. نتایج این شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با افزایش میزان زبری سطح توان مزرعه باد به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد.

کلیدواژه‌ها: مزرعه باد، زبری سطح، دیسک محرک، لایه مرزی جوی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۱/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۲۴

* نویسنده مسئول: mfathali@kntu.ac.ir

۱- مقدمه

با توجه به اینکه انرژی باد سهم بسیار مهمی در تامین انرژی جهانی دارد، انتظار می‌رود روند توسعه مزارع بادی در خشکی و دریا رو به افزایش باشد. انرژی باد یک جایگزین مناسب و کم‌هزینه در مقابل سوخت‌های فسیلی می‌باشد که دارای راندمان بسیار بالا بوده و به جهت جبران‌پذیر بودن آن، امکان استفاده در شرایط مختلف را دارد. در بسیاری از کشورهای توسعه‌یافته استفاده از توربین‌های باد منجر به ایجاد مزارع بادی گردیده است که شامل تعداد زیادی توربین بادی بزرگ و کوچک در کنار هم و در یک محل مستعد تولید انرژی است.

مساحت مزارع بادی برای تولید توان بیشتر به صورت چشم‌گیری در حال افزایش می‌باشد. مسئله مهم در این مزارع، افزایش توان و بازده می‌باشد. بازده مزارع بادی بزرگ به دلیل اندرکنش پیچیده بین توربین‌ها با خودشان و با لایه مرزی جوی کاهش می‌یابد. اندرکنش لایه مرزی جوی با مزارع بادی، میزان انتقال انرژی عمودی از لایه‌های بالای مزرعه باد به داخل آن را تعیین می‌کند [1]. در این پدیده عوامل مختلفی از جمله: زبری زمین، نحوه چیدمان

مزرعه باد، جهت باد، رطوبت هوا و شرایط مختلف پایداری جوی تاثیرگذار است. از عوامل مهم تاثیرگذار روی بازده مزارع بادی زبری سطح می‌باشد. این عامل در جریان‌های جوی می‌تواند روی نرخ انتقال انرژی توربولانسی از نواحی بالاتر به نواحی نزدیک زمین تاثیر داشته باشد. زبری سطح زمین باعث افزایش تنش برشی سطح شده و درگ جریان را زیاد می‌کند. بنابراین با اعمال زبری سطح می‌توان اثرات ناهم‌واری‌های بزرگ (مانند ساختمان‌ها و درختان) و کوچک (مانند ناهمواری‌های و پوشش‌های مختلف گیاهی) را مدل‌سازی کرد [2].

در این مقاله سعی شده است تا لایه مرزی جوی (Atmospheric Boundary Layer; ABL) در حضور زبری سطح مورد ارزیابی قرار گیرد. برای این هدف از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (Large Eddy Simulation; LES) استفاده شده است. روش DNS به دلیل داشتن هزینه‌های سنگین محاسباتی و همچنین محاسبه تمام مقیاس‌های جریان نمی‌تواند روش مناسبی برای شبیه‌سازی ABL باشد. از این روش می‌توان برای شبیه‌سازی جریان با رینولدزهای پایین استفاده کرد. رینولدز جریان برای شبیه‌سازی لایه مرزی جوی بی‌نهایت بوده که خود دلیل استفاده نکردن از روش DNS می‌باشد [3]. روش RANS برای حل جریان روش مناسبی می‌باشد اما برای شناسایی جریان‌های جوی و محاسبه مقیاس‌های مختلف جریان، روش مناسبی نیست. این روش براساس میانگین‌گیری زمانی می‌باشد. در این روش بیشتر مقیاس‌های جریان مدل‌سازی می‌شود. انتقال انرژی در جریان‌های ABL توسط گردابه‌های بزرگ صورت می‌گیرد. روش LES برای حل مستقیم مقیاس‌های بزرگ و مدل‌سازی مقیاس‌های ریز جریان‌های توربولانسی کاربرد دارد [4]. بنابراین روش LES مناسب‌ترین روش برای شبیه‌سازی جریان‌های جوی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

پس از اینکه مدل‌سازی جریان صورت می‌گیرد و جریان کاملاً توربولانسی جوی به عنوان شرایط اولیه آماده می‌شود، نوبت به مدل‌سازی توربین‌های بادی می‌رسد. مدل‌سازی توربین باد روش‌های مختلفی دارد.

مدل‌هایی که برای توربین باد در نظر گرفته می‌شود، باید دقت کافی در پیش‌بینی دنباله‌های پشت توربین را داشته باشد [5]. برای شبیه‌سازی یک مزرعه باد به روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ نیاز است تا علاوه بر آماده کردن شرایط مرزی، مدل توربین باد نیز در آن شبیه‌سازی قرار گیرد. منظور از مدل‌سازی توربین باد توزیع نیروهای ناشی از توربین باد (لیفت، درگ و تراست) روی یک ناحیه خاص برای مدل‌سازی رفتار توربین باد می‌باشد. در شبیه‌سازی مزارع بادی بزرگ اغلب از مدل دیسک محرک برای مدل‌سازی توربین باد استفاده می‌شود.

یکی از مراجع مهم در زمینه مدل‌سازی توربین باد، مقاله میرز و مینوئو [6] می‌باشد. شبیه‌سازی آرایشی از توربین‌های بادی در لایه مرزی توربولانسی جوی با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ (LES)، نیاز به یک مدل ساده برای بررسی تاثیر هر یک از توربین‌های بادی دارد. دلیل این کار جلوگیری از مش‌بندی خیلی ریز در نزدیکی پره‌های توربین باد می‌باشد. بدین منظور از مدل دیسک محرک (Actuator Disk Model; ADM) استفاده شده است. البته این مدل برای ترکیب با روش LES مسائل خاص خود را دارد. از جمله تعیین نقطه سرعت مرجع برای به‌دست آوردن صحیح نیروی القایی توربین باد می‌باشد. یکی از مهم‌ترین نتایج این تحقیق قابل نظر کردن نیروهای مماسی ناشی از

جذب انرژی توسط توربین باد، ناشی از اختلاف فلاکس‌های انرژی جریان بالادست و پایین دست می‌باشد. توربین‌هایی که در داخل لایه مرزی جوی توربین باد (Wind Turbine Atmospheric Boundary Layer; WTABL) قرار گرفته، انرژی جنبشی را از جریان بالای مزرعه باد دریافت می‌کنند. بنابراین ساختار عمودی و فیزیک توربولانس نقش تعیین‌کننده‌ای در بازده توربین در مزارع بادی بزرگ دارند[7].

هدف از این تحقیق، استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ برای حل جریان‌های ABL در حضور زبری زمین می‌باشد. میدان جریان ABL، یک میدان جریان مغشوش تراکم‌ناپذیر سه‌بعدی داخل کانال می‌باشد. به این منظور، از مدل اسم‌گورینسکی برای مدل‌سازی زیر شبکه استفاده شده است.

شبیه‌سازی انجام شده با استفاده از نرم‌افزار کد باز این فوم (Open Foam)، کد نویسی شده است.

جهت این کار، در بخش ۲ معادلات دینامیک سیال، روش حل عددی، نحوه اعمال معادلات زبری، نحوه مدل‌سازی توربین باد و شرایط مرزی مسئله معرفی می‌گردد. در بخش ۳، نحوه اعمال زبری سطح توضیح داده شده است. در بخش‌های ۴ و ۵ نحوه مدل‌سازی لایه مرزی جوی و شبیه‌سازی مزارع بادی بیان شده است. در بخش ۶، نحوه اعتبارسنجی تدوین شده است.

۲- معادلات و روش حل عددی

۲-۱- معادلات حاکم

معادلات حاکم بر جریان مغشوش سیال تراکم‌ناپذیر نیوتنی شامل معادلات پیوستگی، مومنتوم و انتقال است که در سبده نوشتن شده و با استفاده از روش گردابه‌های بزرگ با مدل زیر شبکه از نوع اسم‌گورینسکی (Smagorinsky) حل شده‌اند.

در روش LES، گردابه‌های بزرگ که حاوی انرژی می‌باشد، حل شده و گردابه‌های ریز مدل‌سازی می‌شود. مقیاس‌های بزرگ از طریق فیلتراسیون از مقیاس‌های کوچک جدا سازی می‌شود. بنابراین یک متغیر به دو بخش حل شده و حل نشده (SGS) تجزیه می‌شود[4].

معادلات (۱) و (۲)، معادلات فیلتر شده پیوستگی و ناویر-استوکس تراکم‌ناپذیر می‌باشد:

$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_i} + \tilde{u}_j \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \tilde{p}^*}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + f_i - \delta_{i1} \partial_1 p_\infty / \rho \quad (2)$$

که در این معادلات \tilde{u} سرعت فیلتر شده و \tilde{p}^* فشار فیلتر شده اصلاح شده است که برابر با $\tilde{p} / \rho + \tau_{kk} / 3 - p_\infty / \rho$ می‌باشد. بعلاوه، τ_{ij} ترم تنش زیر مدل می‌باشد. به دلیل اینکه شبیه‌سازی در رینولدزهای خیلی بالا انجام می‌گیرد، از تنش لزج صرف نظر شده است.

در این تحقیق، نیروی f_i برای مدل‌سازی تاثیر توربین‌های بادی به معادله مومنتوم اضافه شده است. برای ایجاد جریان باد، عمود بر دیسک توربین‌های بادی شبیه‌سازی شده، یک گرادیان فشار $\partial_1 p_\infty$ در جهت x به جریان اعمال شده است. برای مدل‌سازی زیر مدل SGS، از مدل اسم‌گورینسکی با ضریب ثابت $C_s = 0.14$ استفاده شده است.

عوارض زمین به صورت زبری و با استفاده از اعمال شرط مرزی تنش برشی دیواره مدل‌سازی شده است. در این روش رابطه بین تنش برشی و سرعت در اولین سلول محاسباتی مجاور دیوار برقرار

می‌شود. سرعت در اولین سلول از جریان توسط حل معادلات ناویر-استوکس فیلتر شده به دست آمده و در معادلات (۳) و (۴) قرار داده شده و مقدار تنش برشی معادل زبری سطح به دست می‌آید. این روش بر اساس قانون تشابه لگاریتمی استاندارد (مونین-ابوخو (Monin-Obukhov)) استوار می‌باشد[8].

$$\tau_{w1} = -\left(\frac{k}{\ln z/z_0}\right)^2 \tilde{u}^2 \quad (3)$$

$$\tau_{w2} = -\left(\frac{k}{\ln z/z_0}\right)^2 \tilde{v}^2 \quad (4)$$

در معادلات (۳) و (۴)، پارامتر z نشان‌دهنده ارتفاع اولین سلول محاسباتی، z_0 ارتفاع زبری و k ثابت فون کارمن می‌باشد. پارامترهای τ_{w1} و τ_{w2} تنش برشی معادل زبری سطح در راستای x و y را نشان می‌دهد. پارامترهای \tilde{u}^2 و \tilde{v}^2 نشان‌دهنده سرعت متوسط محلی بوده که با فیلتر کردن سرعت با استفاده از روش LES به دست آمده است[9].

۲-۲- مدل توربین باد

برای مدل‌سازی توربین‌های بادی از روش دیسک محرک (ADM) استفاده می‌شود. شبیه‌سازی هر یک از پره‌های توربین باد نیاز به مش زیادی در اطراف پره دارد که این باعث افزایش زمان شبیه‌سازی شده و منابع محاسباتی زیادی را نیازمند می‌باشد. برای حل این معضل، از تئوری دیسک محرک استفاده شده که بر پایه افت فشار جریان در عبور از توربین باد مبتنی می‌باشد. در مدل دیسک محرک، یک توربین بادی توسط دیسک‌های دایره‌ای نشان داده می‌شود که می‌تواند به اشکال مختلفی شبکه‌بندی گردد [6، 11].

$$F_T = \frac{1}{2} \rho C_T U_\infty^2 A \quad (5)$$

در این معادله، ρ چگالی هوا، C_T ضریب تراست، U_∞ سرعت جریان آزاد بالادست و A مساحت روتور توربین بادی می‌باشد. در این مقاله C_T توسط تئوری مومنتوم یک‌بعدی و به صورت معادله (۶) محاسبه می‌شود[11].

$$C_T = 4a(1-a) \quad (6)$$

$$a = \frac{U_\infty - u_d}{U_\infty} \quad (7)$$

که در این معادلات، a ضریب سرعت القای محوری روتور توربین و u_d سرعت متوسط روی سطح دیسک در جهت جریان است. برای محدودیت بنز[11] ضرایب تراست و ضریب سرعت القای محوری به ترتیب $C_T = 0.88$ و $a = 0.33$ می‌باشد ولی مقادیری که در این مدل‌سازی استفاده شده $C_T = 0.64$ و $a = 0.25$ می‌باشد.

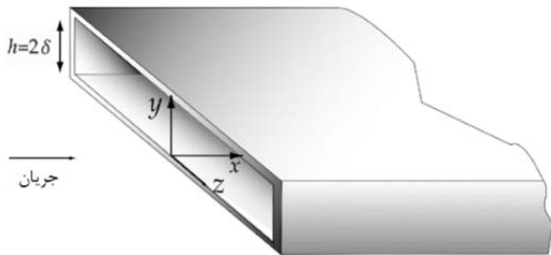
ضریب توان مهم‌ترین پارامتر عملکردی توربین باد می‌باشد. این ضریب نشان دهنده مقدار انرژی بوده که توربین باد از جریان جذب کرده است. بنابر تعریف، نسبت انرژی جذب شده توسط توربین به انرژی موجود در باد می‌باشد. معادله (۸) ضریب توان یک توربین باد افقی را نشان می‌دهد[11]:

$$C_p = 4a(1-a)^2 \quad (8)$$

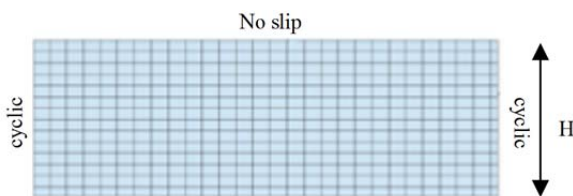
یکی از مهم‌ترین نتایج تحقیق میرز و مینوئو[6] اثبات استفاده از روش دیسک محرک بدون چرخش می‌باشد. در مزارع بادی بزرگ که در ناحیه لایه مرزی جوی قرار دارند، انتقال انرژی به صورت عمودی بوده و انرژی از لایه‌های بالای مزرعه باد به ناحیه‌ای که توربین‌ها در آن قرار دارند، وارد می‌شود. این مسئله تفاوت اصلی مزارع بادی بزرگ و کوچک می‌باشد. همچنین در این تحقیق نشان داده شده که

۲-۳- میدان جریان و شرایط مرزی

میدان جریان به صورت کانالی به ابعاد $(\pi, \pi, 2)$ مطابق شکل ۲ می‌باشد. به دلیل تقارن میدان نسبت به صفحه $(x - z)$ در ارتفاع $y = \delta$ (ارتفاع نصف کانال) صرفاً نیمی از کانال در نظر گرفته شده است. شرط مرزی در جهت x و z به صورت پریودیک و در ارتفاع $y = \delta$ به صورت دیواره لغزشی آزاد در نظر گرفته شده است. شرط دیواره پایین که بیانگر زمین می‌باشد به صورت ترکیبی از دیواره لغزشی آزاد همراه با اعمال تنش برشی اثرات زبری (عوارض) زمین می‌باشد که در بخش ۳ به آن پرداخته شده است. شرایط مرزی بیان شده به جریان در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۲ هندسه کلی جریان (کانال سه‌بعدی)



شکل ۳ شمایکی از شرایط مرزی و عددی جریان کانال؛ جهت حرکت جریان از چپ به راست، استفاده از فاصله یکنواخت شبکه‌ها در همه جهت‌ها

۳- اعمال زبری سطح

برای شبیه‌سازی واقعی مزرعه بادی باید زبری سطح نیز مدل‌سازی شود. زبری سطح از مجموعه‌ای از موانع تشکیل شده که نمی‌توان آن را در مدل‌سازی اعمال کرد، اما تاثیر آنها باید در مدل‌سازی مد نظر قرار گیرد. زمینی که مزارع بادی روی آن قرار دارند، زبری‌های متفاوتی دارد که مقیاس زبری هر یک از آنها در جدول ۳ نشان داده شده است.

برای اعمال تاثیر زبری‌های متفاوت از توابع دیوار لگاریتمی روی دیواره ناحیه شبیه‌سازی استفاده می‌شود. رابطه این توابع به صورت معادله (۹) می‌باشد [14]:

$$\frac{U(z)}{u_\tau} = \frac{1}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (9)$$

در این معادله z ارتفاع اولین سلول، z_0 ارتفاع زبری و u_τ سرعت اصطکاکی می‌باشد. این معادله پروفیل سرعت واقعی در حضور زبری را می‌تواند تشریح کند. در این معادله k ثابت کارمن برابر 0.4 می‌باشد. نحوه اعمال این پروفیل بطور شماتیک در شکل ۴ نشان داده شده است.

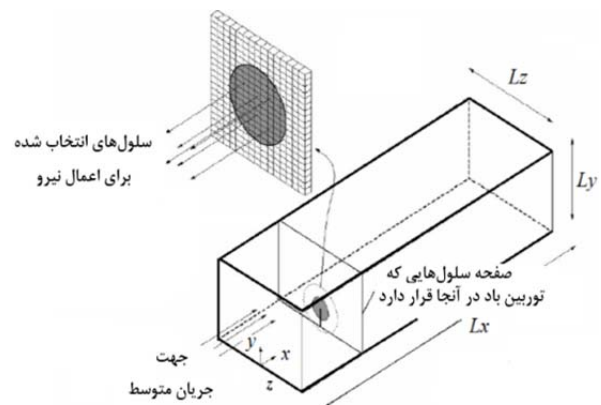
شبیه‌سازی لایه مرزی جوی با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ در رینولدز بی‌نهایت انجام شده است. به دلیل اینکه رینولدز لایه مرزی بالا می‌باشد، از تنش‌های لزج در مقیاسه با تنش‌های توربولانس می‌توان صرف نظر کرد. همچنین به دلیل محدودیت‌های محاسباتی، لایه نزدیک دیواره (The Near-Wall)

اعمال نیروهای مماسی اثر ناچیزی روی جریان اصلی و توان متوسط جذب شده توسط توربین‌های بادی در مزارع بادی بزرگ دارد. لذا این دلیل اصلی استفاده از مدل‌سازی توربین‌های بادی با روش دیسک محرک بدون چرخش می‌باشد. برای مدل‌سازی توربین باد با این روش، نیروی پسا به صورت توزیع غیریکنواخت روی سطح دیسک اعمال شده است. این نیرو با استفاده از پارامترهایی که در جدول ۱ آمده، مدل‌سازی می‌شود.

در این روش فقط لازم است نیرویی که توربین باد (f_i) نیروی اضافه شده به معادله مومنتوم) به جریان اعمال می‌کند، مد نظر قرار بگیرد. ناحیه حل شبکه‌بندی شده و نیروی ناشی از توربین باد با توجه به مساحت آن در سلول‌های محل قرارگیری توربین باد اعمال می‌شود. نحوه اعمال اثر نیروی ناشی از توربین باد روی جریان در شکل ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱ مشخصات توربین‌های بادی داخل مزرعه بادی

نوع توربین	افقی
ارتفاع هاب توربین (y_h)	۱۰۰m
ضریب تراست (C_T)	۰/۷۵
ضریب توان (C_p)	۰/۵
ضریب سرعت القایی (a)	۰/۳۳
قطر توربین (D)	۱۰۰m

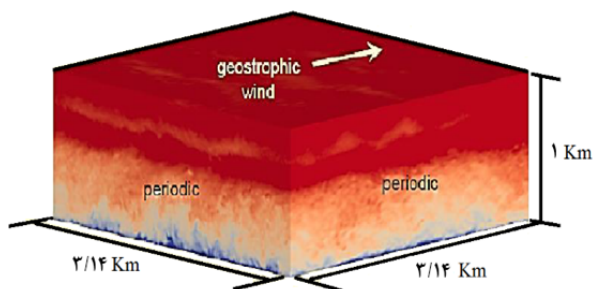


شکل ۱ نحوه اعمال اثر نیروی توربین بادی با روش دیسک محرک [12]

با توجه به اندازه و شبکه‌بندی ناحیه حل (جدول ۲) و مساحت روتور توربین بادی، تعداد سلول لازم برای شبکه‌بندی هر یک از توربین‌ها حدود ۴۸ سلول می‌باشد. حداقل سلول لازم برای مدل‌سازی دقیق دنباله‌های توربین باد، استفاده از ۸ سلول (در جهت عمودی توربین باد) روی ناحیه‌ای است که توربین باد در آن قرار دارد [13].

جدول ۲ مشخصات مزرعه باد

مشخصات	اندازه
تعداد توربین	۲۴
تعداد ستون × تعداد ردیف	۴×۶
فاصله طولی مزرعه (L_x)	π (Km)
فاصله عرضی (L_z)	π (Km)
نسبت فاصله طولی به فاصله عرضی توربین‌ها (S_x/S_z)	۱/۵
فاصله طولی توربین‌ها (S_x)	۷/۸۵ برابر قطر توربین
ارتفاع لایه مرزی ($L_y = H$)	۱(km)
سرعت باد (U_G)	۱۰(m/s)
تعداد نقاط شبکه	۱۲۸×۱۲۸×۱۲۸



شکل ۵) جریان لایه مرزی جوی توربولانسی ایجاد شده در کانال قبل از حضور توربین‌های بادی

۵- شبیه‌سازی مزرعه باد

جریان مزارع بادی در لایه مرزی جوی به صورت مغشوش و با رینولدز بی‌نهایت می‌باشد. در اغلب شبیه‌سازی‌ها از روش حل شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ استفاده می‌شود. این بدین دلیل بوده که مزرعه باد در داخل لایه مرزی جوی قرار داشته و فقط نیاز است که مقدار انرژی جذب شده از گردابه‌های بزرگ به داخل ناحیه‌ای که توربین‌های بادی در آن قرار دارد، محاسبه شود. در این مقاله، برای مدل‌سازی لایه مرزی جوی و مزرعه بادی داخل آن از جریان مغشوش درون کانال استفاده شده است. شرایط کانال متناسب با شرایط فیزیکی واقعی و به صورت کاملاً توسعه‌یافته و همگن می‌باشد. البته با توجه به اندازه مدل شبیه‌سازی و توربین‌های بادی قرارگرفته داخل آن، این مدل به خودی خود کاملاً توسعه یافته نمی‌شود. در این حالت با ترکیب شرایط مرزی پریودیک در جهات افقی و عرضی و مدت زمان اجرای طولانی، شرایط به حالت توسعه‌یافتگی کامل میل می‌کند. در این شبیه‌سازی ترم گردادیان فشار در معادله مومنوم به عنوان عامل حرکت سیال در نظر گرفته شده است.

پس از تولید جریان لایه مرزی جوی، باید توربین‌های بادی داخل کانال قرار داده شود. در شکل ۶، شماتیک کلی از نحوه قرارگیری توربین‌های بادی داخل کانال نشان داده شده است. در این مزرعه بادی، محور x جهت طولی (S_x) و محور z جهت عرضی (S_z) و محور y جهت ارتفاع لایه‌مرزی جوی که برابر با ارتفاع نصف کانال (H) می‌باشد را نشان می‌دهد.

در جدول ۲ مشخصات مزرعه بادی مذکور تعیین شده است. سرعت باد متوسط ۱۰ متر بر ثانیه می‌باشد. ابعاد کانال در راستای x ، y و z بر حسب کیلومتر به ترتیب $2T$ ، $2T$ ، 2 بوده و تعداد نقاط شبکه برای هرکدام از محورها به ترتیب 128 ، 128 ، 128 می‌باشد. تعداد 24 توربین که در 6 ستون و 4 ردیف و به صورت چیدمان کاملاً منظم، کنار هم قرار گرفته است. در شکل ۷ مشخصات چیدمانی توربین‌های بادی در مزرعه باد را نشان می‌دهد. این شکل نمای مزرعه باد را از بالا نشان می‌دهد.

همان طور که در بخش ۳ بیان شد، در ابتدا جریان لایه مرزی جوی را در داخل کانال ایجاد کرده و سپس با قراردادن توربین‌های بادی در داخل آن شبیه‌سازی انجام شده است. شکل ۸ کانتور سرعت لحظه‌ای در جهت جریان و در صفحه $x-z$ را نشان می‌دهد. مکان دیسک‌های توربین بادی نیز به صورت خط سیاه نشان داده شده است. همان طور که در شکل ۸ نشان داده شده، دنباله پشت توربین‌ها به خوبی مدل‌سازی شده و اثرات آن روی توربین‌های بعدی قابل مشاهده است.

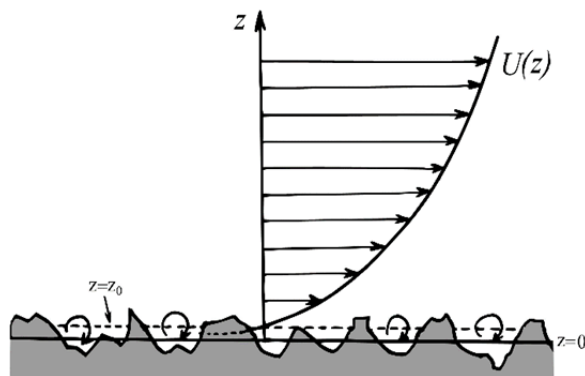
Layer نمی‌تواند حل شود. در نتیجه به شرایط مرزی با عدد رینولدز بسیار بالا نیاز است. در سطح دیواره (Bottom surface) از شرط مرزی تنش دیواره استفاده شده است. در این روش تنش دیواره متناسب با سرعت لگاریتمی که هر زیری می‌تواند ایجاد کند (سرعت لگاریتمی استاندارد روش مونین-ابوخو) در سلول اول شبکه نزدیک دیواره اعمال می‌شود^[8]. رابطه این تنش به صورت رابطه (۱۰) می‌باشد:

$$\tau_w = - \left(\frac{k}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \right)^2 U(z)^2 \quad (10)$$

در این رابطه $U(z)$ سرعت متوسط فیلترشده و z_0 ارتفاع زیری سطح می‌باشد.

جدول ۳) مقیاس ارتفاع زیری سطوح مختلف^[2]

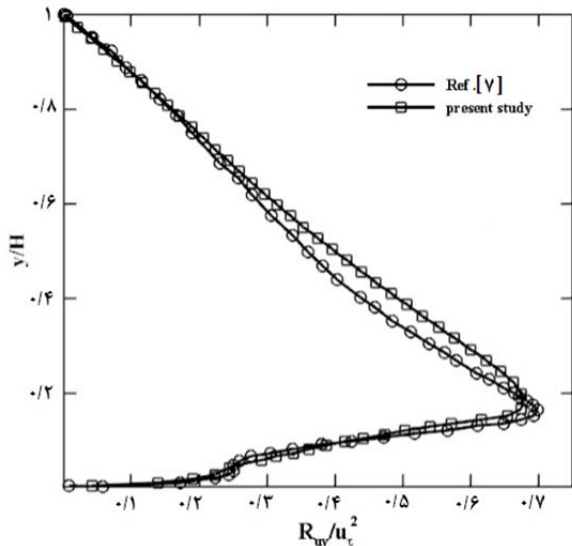
ارتفاع زیری $z_0(m)$	نوع سطح
$10^{-2} - 10^{-1}$	سطوح صاف (آب یا یخ)
$10^{-1} - 10^0$	چمن
0.5	پوشش گیاهی
0.2	حومه شهر
$1 - 5$	جنگل‌ها و شهرها



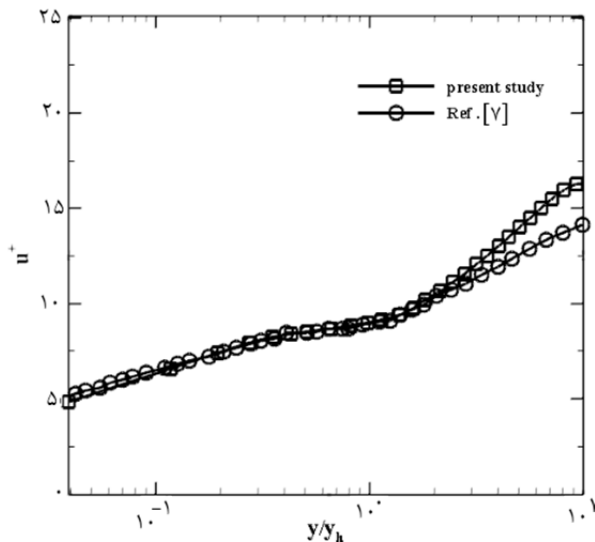
شکل ۴) پروفیل سرعت در نزدیک دیواره زیر^[15]

۴- مدل‌سازی لایه مرزی جوی

به دلیل قرار گرفتن مزارع بادی بزرگ داخل لایه مرزی جوی، باید ابتدا جریان لایه مرزی جوی را ایجاد کرد. لایه مرزی جوی ایجاد شده روی مزارع بادی بزرگ (طول مزرعه باد یک مرتبه از طول لایه مرزی جوی بزرگتر است) می‌تواند به صورت کاملاً توسعه‌یافته در نظر گرفته شود^[7]. برای مدل‌سازی لایه مرزی جوی، از جریان توربولانسی توسعه‌یافته داخل کانال استفاده می‌شود. در نتیجه میدان حل جریان در نظر گرفته شده برای شبیه‌سازی، یک کانال سه‌بعدی بوده که شرایط مرزی اعمال شده روی آن در شکل ۳ نشان داده شده است. برای شبیه‌سازی مزارع بادی، باید قبل از قراردادن توربین‌ها، جریان مغشوش (لایه مرزی جوی توربولانسی) متناسب با سرعتی که برای جریان باد در نظر گرفته شده را تولید کرد. در این مرحله برای ایجاد جریان توربولانسی لازم است تا ابتدا شرایط اولیه توربولانسی به جریان اعمال کرد و سپس با شرایط مرزی ذکر شده، جریان کاملاً توسعه‌یافته را در کانال ایجاد کرد. نمونه جریان لایه مرزی جوی توربولانسی ایجاد شده در کانال قبل از حضور توربین‌های بادی در شکل ۵ نشان داده شده است.



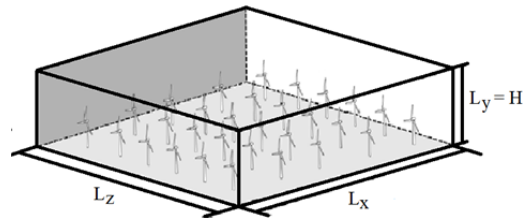
نمودار (۱) نمودار اعتبارسنجی پروفیل نرمال شده تنش عمودی رینولدز



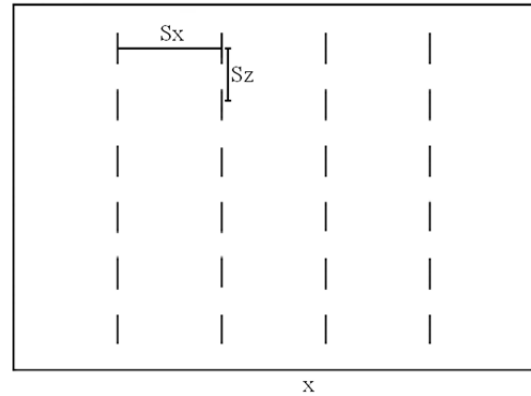
نمودار (۲) نمودار اعتبارسنجی پروفیل سرعت متوسط مزرعه بادی

۷- نتایج

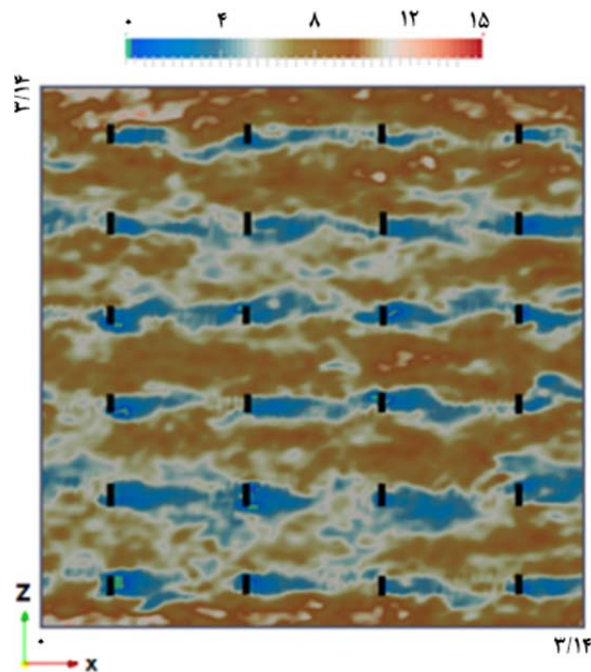
در این بخش نتایج حاصل از مدل‌سازی زبری که در بخش ۲ توضیح داده شد، روی مزرعه بادی مذکور ارائه شده است. در نمودار ۳ نمودار توان تولیدشده نسبت به زبری‌های مختلف نشان داده شده است. در این نمودار نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای زبری‌های بین ۰ تا ۲ متر ارائه شده است. در نمودار ۳ دو موضوع زبری و اثر دنباله‌های توربین باد بر یکدیگر مورد بررسی قرار گرفته است. در این نمودار دو حالت توربین بادی و مزرعه بادی مقایسه شده است. در حالت توربین بادی، فرض شده توربین‌ها متاثر از دنباله‌های یکدیگر نیستند ولی در حالت مزرعه بادی دنباله‌های ناشی از توربین‌های بادی بالادست روی توربین‌های بادی پایین‌دست تأثیر داشته و نشان‌دهنده مزرعه باد واقعی می‌باشد. این مقایسه بدین دلیل بوده تا اثر دنباله‌های ایجادشده روی بازده مزارع بادی دیده شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود افت توان مزارع بادی به دلیل دنباله‌های ایجادشده بین ۳۰ تا ۴۰ درصد می‌باشد. در نمودار ۳ اثر زبری نیز بررسی شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش زبری سطح توان مزرعه بادی نیز کاهش می‌یابد.



شکل (۶) شماتیک کلی مزرعه باد بزرگ



شکل (۷) شماتیک آرایش توربین‌های بادی؛ فواصل طولی و عرضی توربین‌ها از یکدیگر به ترتیب با S_x و S_z نشان داده شده است.



شکل (۸) نتایج حل روش LES برای کانتور سرعت لحظه‌ای مزرعه بادی کاملاً توسعه‌یافته در لایه مرزی جوی در جهت جریان در صفحه x-z.

۶- اعتبارسنجی

در این پژوهش، جهت شبیه‌سازی مزرعه باد بزرگ با شرایط مرزی ذکرشده و شرایط هندسی مشخص، کدنویسی در نرم‌افزار اپن فوم توسعه داده شد. در این مرحله برای اعتبار بخشی به شبیه‌سازی از مرجع [7] استفاده شده است. نتایج اعتبارسنجی اولیه برای مقادیر پروفیل تنش رینولدز و پروفیل سرعت متوسط به ترتیب در نمودار ۱ و نمودار ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که نشان داده شده، نتایج اعتبارسنجی نشان می‌دهد مدل تطابق بسیار خوبی با مدل مرجع [7] دارد.

شده به صورت کاملاً منظم در نظر گرفته شد. نتایج به دست آمده از پروفیل سرعت متوسط و تنش رینولدز با نتایج مرجع [7] مقایسه و اعتبارسنجی شد. نتایج حاصل از حل عددی با روش LES نشان داد که زبری سطح می‌تواند اثرات قابل توجهی روی افت توان مزارع بادی داشته باشد.

۹- فهرست علائم

ضریب سرعت القای محوری روتور توربین	a
مساحت روتور توربین بادی (m^2)	A
ضریب توان توربین باد	C_p
ضریب ثابت مدل اسماگورینسکی	C_s
ضریب تراست	C_T
قطر روتور توربین باد (m)	D
نیروی اضافه شده به معادله مومنتوم	f_i
ارتفاع نصف کانال (m)	H
ثابت فون کارمن	k
فاصله طولی مزرعه باد (km)	L_x
ارتفاع لایه مرزی جوی (km)	L_y
فاصله عرضی مزرعه باد (km)	L_z
فشار ($kgm^{-1}s^{-2}$)	P
فشار فیلترشده ($kgm^{-1}s^{-2}$)	\tilde{p}
عدد رینولدز	Re
فاصله طولی توربین‌ها (km)	S_x
فاصله عرضی توربین‌ها (km)	S_z
سرعت متوسط دیسک روتور توربین باد (ms^{-1})	u_d
سرعت (ms^{-1})	u_j
سرعت اصطکاکی (ms^{-1})	u_τ
سرعت فیلترشده (ms^{-1})	\tilde{u}
سرعت متوسط بدون بعد نسبت به سرعت اصطکاکی	u^+
سرعت باد در مزرعه بادی (ms^{-1})	U_G
سرعت جریان آزاد بالادست (ms^{-1})	U_∞
ارتفاع‌های توربین (m)	y_h
ارتفاع (m)	z
ارتفاع زبری ν	z_0

علائم یونانی

ارتفاع نصف کانال (m)	δ
چگالی (kgm^{-3})	ρ
تنش ($kgm^{-1}s^{-2}$)	τ
تنش دیواره ($kgm^{-1}s^{-2}$)	τ_w

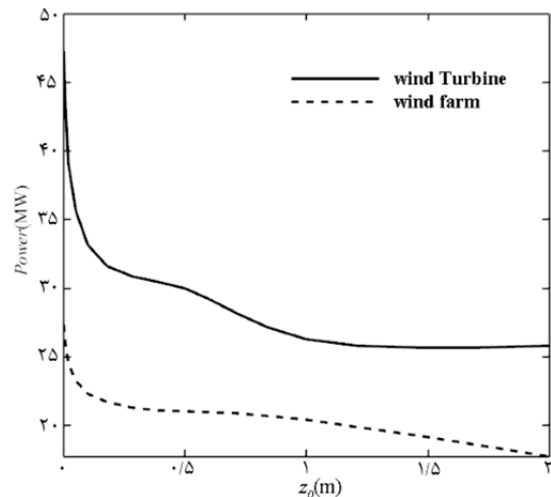
منابع

- 1- Calaf M, Parlange MB, Meneveau C. Large eddy simulation study of scalar transport in fully developed wind-turbine array boundary layers. *Physics of Fluids*. 2011;23(12):126603.
- 2- Troen I, Lundtang Petersen E. European wind atlas. Roskilde: Risø National Laboratory. 1989. p. 26-34.
- 3- Spalart PR, Coleman GN, Johnstone R. Direct numerical simulation of the Ekman layer: A step in Reynolds number, and cautious support for a log law with a shifted origin. *Physics of Fluids*. 2008;20(10):101507.
- 4- Pope SB. *Turbulent flows*. Bristol; IOP Publishing; 2001.
- 5- Bokharaie VS, Bauweraerts P, Meyers J. Wind-farm layout optimisation using a hybrid Jensen-LES approach. *Wind Energy Science*. 2016;1(2):311-325.
- 6- Meyers J, Meneveau C. Large eddy simulations of large wind-turbine arrays in the atmospheric boundary layer. 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New

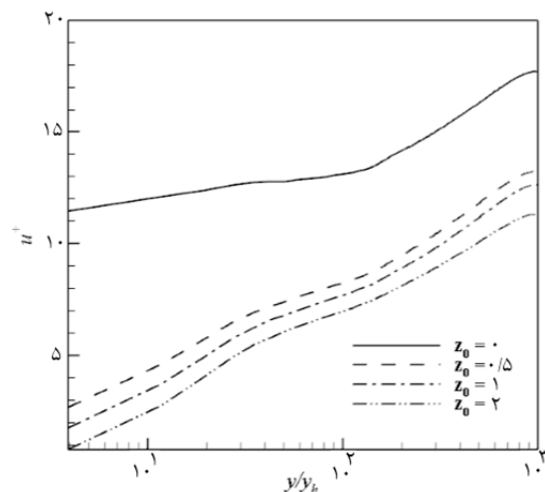
در نمودار ۴ نمودار پروفیل سرعت متوسط مزرعه باد برای ۴ زبری ۰، ۰/۵، ۱ و ۲ به دست آمده است. محور عمودی این نمودار پارامتر u^+ بوده که به صورت معادله (۱۱) بیان شده است:

$$u^+ = \frac{u}{u_\tau} \quad (11)$$

نمودار ۴ همچنین نمایانگر افت توان مزارع بادی با افزایش زبری سطح می‌باشد. در ناحیه‌ای که توربین‌های بادی قرار دارد (در ارتفاع ۵۰ تا ۱۵۰ متر)، نمودار سرعت متوسط با افزایش زبری به سمت پایین منتقل می‌شود. همچنان که در نمودار ۴ مشاهده می‌شود میزان افت سرعت ایجادشده در این نمودار با افت توان در نمودار ۳ متناسب است.



نمودار ۳) نمودار توان متوسط جذب شده توسط مزرعه باد از لایه مرزی جوی



نمودار ۴) نمودار پروفیل سرعت متوسط برای زبری‌های مختلف

۸- نتیجه گیری و بحث

در مطالعه حاضر به بررسی نحوه مدل‌سازی زبری و اثرات آن روی توان مزارع بادی بزرگ پرداخته شد. برای حل معادلات ناویر-استوکس از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ استفاده گردید. در ابتدا نحوه اعمال زبری سطح با استفاده از توابع دیوار لگاریتمی روی دیواره کانال بیان شد. سپس شبیه‌سازی جریان لایه مرزی جوی داخل کانال با ارتفاع ۱۰۰۰ متر انجام شد و این جریان بعنوان جریان اولیه وارد ناحیه‌ای شد که مزرعه باد در آن قرار دارد. برای شبیه‌سازی لایه مرزی جوی، از جریان داخل کانال با استفاده از شرایط مرزی پریودیک استفاده شد. چیدمان مزرعه باد مدل‌سازی

- 11- Burton T, Sharpe D, Jenkins N, Bossanyi E. Wind energy handbook. Chichester: John Wiley & Sons; 2001.
 - 12- Jimenez A, Crespo A, Migoya E, Garcia J. Advances in large-eddy simulation of a wind turbine wake. Journal of Physics Conference Series. 2007;75(75):012041.
 - 13- Wu YT, Porté-Agel F. Large-eddy simulation of wind-turbine wakes: Evaluation of turbine parametrisations. Boundary Layer Meteorology. 2011;138(3):345-366.
 - 14- Baklanov A, Mahura A, Grimmond CSB, Athanassiadou M, editors. Meteorological and air quality models for urban areas. Berlin/Heidelberg: Springer Science & Business Media; 2009.
 - 15- Cushman-Roisin B, Beckers JM. Introduction to geophysical fluid dynamics: Physical and numerical aspects. Waltham MA: Academic Press; 2011.
- Horizons Forum and Aerospace Exposition, 4-7 January 2010, Orlando, Florida. Reston VA: AIAA; 2010.
 - 7- Calaf M, Meneveau C, Meyers J. Large eddy simulation study of fully developed wind-turbine array boundary layers. Physics of Fluids. 2010;22(1):015110.
 - 8- Moeng CH. A large-eddy-simulation model for the study of planetary boundary-layer turbulence. Journal of the Atmospheric Sciences. 1984;41(13):2052-2062.
 - 9- Bou-Zeid E, Meneveau C, Parlange M. A scale-dependent Lagrangian dynamic model for large eddy simulation of complex turbulent flows. Physics of Fluids. 2005;17(2):025105.
 - 10- Sørensen JN, Kock CW. A model for unsteady rotor aerodynamics. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 1995;58(3):259-275.