مجله مهندسی مکانیک مدرس، آذر 1396، دوره 17، شماره 9، ص‌ص 75-85

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

شبیه‌سازی عددی توربین بادی محور افقی در مزرعه بادی منجیل همراه با تحلیل رژیم بادی

محمد رضا قاسمی بوسجین[1]، علی جعفری[2*]، سید سعید محتسبی[2]، کبری قرئلی[3]

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تهران، کرج
2- استاد، مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج
3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران
*کرج، صندوق‌پستی 3158777871، jafarya@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 30 خرداد 1396
پذیرش: 03 مرداد 1396
ارائه در سایت: 10 شهریور 1396

کلید واژگان:
پسباد
دینامیک سیالات محاسباتی
مزرعه بادی
زمین های ناهموار
رژیم بادی

چکیده

تحلیل جریان لایه مرزی، برای بهینه سازی طراحی مزارع بادی، حساسیت بالایی دارد. به ویژه اثر جریان باد، در توربین‌های بادی نصب شده در زمین‌های ناهموار و کوهستانی پیچیده می‌باشد. در این تحقیق، پسباد توربین بادی و جریان باد در زمین ناهموار با دینامیک سیالات محاسباتی و با استفاده از نرم افزار اوپن‌فوم مورد مطالعه قرار گرفته است. یک مدل دیسک عملگر، که نیروهای وارد شده به توربین را بر روی کل دیسک اعمال می‌کنند، بر پایه تئوری اجزای پره به کار گرفته شده‌اند. برای شبیه سازی جریان اتمسفری و پسباد توربین بادی محور افقی در مزرعه بادی منجیل، معادلات ناویر-استوکس با رینولدز میانگین حل شده و مدل آشفتگی کی-اپسیون به کار گرفته شده است. در شبیه‌سازی از شبکه بندی منظم استفاده گردید. همچنین جهت باد غالب، با رسم گلباد منطقه، از شمال به جنوب به دست آمد. بررسی جزئیات توربین بادی با اطلاعات میدانی انجام شده است و نتایج عددی، تاثیرات پسباد تا پنج برابر قطر روتور بعد از توربین را نشان می‌دهد. کاهش سرعت باد در این فاصله 26% بوده است. توان به دست آمده از مدل برای توربین نمونه با اطلاعات میدانی تطبیق دارد. همچنین رژیم بادی مزرعه برای فصول مختلف سال تحلیل شده و نتایج نشان می‌دهد که زمان‌های وزش باد مناسب در سه ماه نوامبر، دسامبر و ژانویه زیر 50% بوده که در طراحی مزرعه بادی و بازده نیروگاه مورد توجه می‌باشد.

Numerical simulation of wind turbine in Manjil wind farm considering wind regime study

Mohammad Reza Ghasemi Bousejin[1], Ali Jafari [2*], Seyed Saeid Mohtasebi[2], Kobra Gharali[3]

1- Department of Mechanic of Biosystems Engineering, University of Tehran,Tehran, Iran
2- Department of Mechanical Engineering of Agricultural Machinery, University of Tehran, Tehran, Iran
3- Department of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
* P.O.B. 3158777871, Karaj, Iran, jafarya@ut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 20 June 2017
Accepted 25 July 2017
Available Online 01 September 2017

Keywords:
Wake
CFD
wind farm
Complex terrain
Wind regime

ABSTRACT

Research on atmospheric boundary layers in wind farms is an important task. Particularly, wind effect on wind turbines installed in mountainous area with complex terrain is complicated. In this research, the wake of a wind turbine and wind flow in complex terrain have been studied with computational fluid dynamic (CFD) method in OpenFOAM software. Actuator-disk model with introducing forces, based on Blade Element Momentum Theory, on the disk are used. For simulation of wind turbine in wind farm, Reynolds averaged Navier Stokes equation with k-ε turbulence model has been used. Structured mesh was used for simulation domain. Also, main wind direction has been determined from the north toward the south considering wind rose of the area. One of the wind turbines is studied in detail. The numerical results show an extended wake effect around 5*d* (five times the rotor diameter). Wind speed deficit is 26% at this distance. Captured wind power from the simulation is close to real data. Also, wind regime has been studied and analyzed for different seasons. For November, December and January, the time period that wind blows in effective speed, is decreased less than 50%, which is important in wind farm design and operation.

1- مقدمه

امروزه با توجه به گرمایش جهانی و نیاز روزافزون کشورها به انرژی، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در سراسر جهان ضروری می‌باشد. انرژی بادی در بین سایر انرژی‌های تجدیدپذیر از مزایای بسیاری برخوردار است. با توجه به شرایط اقلیمی ایران، پیش‌بینی می‌شود که انرژی بادی در آینده کشور نقش مهم‌تری داشته باشد. صنعت انرژی بادی همچنان در حال پیشرفت و توسعه

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. R. Ghasemi Bousejin, A. Jafari, S. S. Mohtasebi, K. Gharali, Numerical simulation of wind turbine in Manjil wind farm considering wind regime study, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 9, pp. 75-85, 2017 (in Persian)

بوده و هر سال توربین‌های بادی جدیدی برای استحصال انرژی بادی در ایران و سایر نقاط جهان نصب می‌گردد. امروزه توربین‌های بادی در مکان‌های مختلفی مانند سواحل، محیط‌های شهری[1] و مناطق کوهستانی نصب می‌گردند.

به مجموعه‌ای از توربین‌های بادی که در یک مکان برای استحصال انرژی از نیروی باد نصب می‌گردند، مزرعه بادی[1] گفته می‌شود. با توجه به این‌که نقاط بادخیز در بسیاری از مناطق دنیا و به‌طور ویژه در ایران در نقاط کوهستانی با توپوگرافی پیچیده[2] واقع شده است، مسئولین ناگزیر از احداث مزارع بادی در این نقاط می‌باشند. در صنعت بادی، محاسبه فاصله بین توربین‌های بادی و تعیین چیدمان بهینه آن‌ها در مزارع بادی، دارای اهمیت خاصی بوده و تاثیر قابل توجهی بر انرژی به دست آمده از آن‌ها دارد. اهمیت این موضوع در مزارع بادی با توپوگرافی پیچیده بیشتر می‌باشد که دلیل این امر نیز وجود نقاط با تلاطم[3] بالا و پسباد[4] بیشتر به دلیل ناهمواری‌ها و نقاط جدایش جریان[5] است. این موارد بیشتر بر عملکرد توربین‌های واقع در ردیف‌های عقب‌تر مزرعه بادی تاثیر دارد. اثر پسباد بر ردیف عقب به صورت کاهش انرژی حاصله بوده و همچنین تلاطم بالا باعث افزایش بار دینامیکی بر توربین‌های ردیف عقب شده و بازده مفید آن‌ها را کاهش می‌دهد. یک مطالعه کامل برای پروژه های انرژی بادی شامل گردآوری اطلاعات میدانی، شبیه‌سازی عددی و آزمایشات در تونل باد می‌باشد. شبیه‌سازی عددی و کار آزمایشگاهی تکمیل کننده روش‌های میدانی می‌باشد [2]. برای مدل‌سازی آزمایشگاهی مزرعه بادی، باید نمونه‌ی از توپوگرافی به همراه توربین‌ها ساخته شده و همان میدان جریان بر روی نمونه ایجاد شود. این روش دقیق‌ترین و البته گرانترین روش می‌باشد.

در سال‌های اخیر، تحقیقات زیادی در زمینه شبیه‌سازی عددی توربین‌های بادی و جریان هوا در مزارع بادی و پسباد توربین‌ها انجام گرفته است. بوجاری و همکاران [3] در محیط نرم‌افزار اوپن فوم[6] به مطالعه در مورد توربین بادی با نظریه خط عملگر[7] پرداخته‌اند. عبدالسلام و همکاران [4] مشخصات پسباد توربین بادی را با هر دو روش عددی و تجربی مورد مطالعه قرار داده‌اند. اندازه‌گیری جریان بالادست پروفیل سرعت باد با استفاده از روش صوتی[8] و جریان پسباد با استفاده از روش نوری[9] انجام گرفته است. نک جون چویی و همکاران [5] مطالعه مزرعه بادی با دو توربین باد را با روش دینامیک سیالات محاسباتی[10] در انسیس[11] براساس تئوری تکانه اجزا پره[12] انجام دادند. نتایج شبیه‌سازی اجزای کامل توربین توسط ایشان، تغییرات توان خروجی از توربین پایین دست با توجه به فاصله بین دو توربین را نشان می‌دهد. جنگ اوه-مو و همکاران [6] با روش شبیه‌سازی گردابه های بزرگ[13]، توربین بادی را در یک تونل مجازی با نرم‌افزار انسیس (فلوئنت)[14] برای مطالعه شاخصه‌های پسباد توربین شبیه‌سازی کرده‌اند. فاصله پنج برابری قطر روتور در جریان پایین دست توربین که گردابه‌ها در آن ناپایدار شده و می‌شکند مرز بین پسباد نزدیک و دور تعریف شده است. همچنین

[1] Wind farm
[2] Complex terrain
[3] Turbulence
[4] Wake
[5] Separation point
[6] OpenFOAM
[7] Actuator-Line Model (ALM)
[8] SODAR
[9] LIDAR
[10] Computational Fluid Dynamics (CFD)
[11] Ansys
[12] Blade Element Momentum (BEM)
[13] Large-Eddy Simulation (LES)
[14] ANSYS-Fluent

پیش‌بینی صحیح از جریان لایه مرزی جوی[15] و تاثیر آن بر توربین‌ها و مزارع بادی برای طراحی بهینه پروژه‌های بادی اهمیت دارد. فرناندو پورت آگل و همکاران [7] نیروهای اعمالی به توربین را توسط دو نوع مدل، دیسک عملگر[16] که نیروها را بر روی کل دیسک اعمال کرده و خط عملگر که نیروها در امتداد خط پره‌ها اعمال می‌شود، شبیه‌سازی کرده و نتایج با اندازه-گیری‌های آزمایشگاهی در داخل تونل باد مقایسه شده‌اند. در پایان چارچوب شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ برای جریان لایه مرزی جوی سراسر یک مزرعه بادی واقعی به‌کار گرفته شده است. ماتولا و همکاران [3] روش تلفیقی عددی و آزمایشگاهی برای مطالعه لایه مرزی در توپوگرافی‌های پیچیده را انجام دادند. ایشان مدلی را در تونل باد مورد آزمایش قرار داده‌اند. مارکینز و چیک پسباد توربین و لایه مرزی را به روش عددی و با استفاده از نرم‌افزار انسیس در توپوگرافی های پیچیده انجام داده‌اند [8]. آن‌ها از روش مدل‌سازی دیسک عملگر و نظریه تکانه اجزا پره برای مدل‌سازی کامل روتور استفاده کرده اند. کاستلانی و همکاران در دو تحقیق [10,9] با استفاده از کد فونیکس[17] و با روش دیسک عملگر به دو مدل‌سازی برای مزرعه بادی، یکی در زمین هموار و دیگری در زمین با محیط پیچیده، پرداخته‌اند. کوزمار و همکاران [11] نیز اثرات پسباد حاصل از چهار نوع کوهستان با ارتفاعات مختلف را برجریان هوا در یک مزرعه بادی نمونه مورد مطالعه قرار داده‌اند.

در ایران نیز با توجه به قرارگیری مکان‌های مستعد احداث مزارع بادی در توپوگرافی‌های پیچیده، ضرورت تحقیق در این مکان‌ها را ایجاب می‌کند. برای استحصال انرژی بهینه و پرداخت مقرون به صرفه هزینه‌های تملک زمین و همچنین اتصال توربین‌ها به شبکه برق، فاصله توربین‌ها از یکدیگر باید بهینه در نظر گرفته شوند. در مزارع بادی واقع در زمین های هموار[18] فاصله بین توربین‌ها به کمک نرم‌افزارهای مرسوم در زمینه انرژی بادی محاسبه می‌گردد. با مدنظر قرار دادن شرایط توپوگرافی منطقه، حل مسئله پیچیده‌تر می‌شود و جریان هوای عبوری از هر توربین بادی شرایط خاص خود را پیدا می‌کند که بر روی پروفیل باد توربین‌های قرار گرفته در پایین دست خود نیز تاثیر گذار است. برای رفع این مشکل، با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی می‌توان به بررسی این مدل‌های پیچیده پرداخت که نتایج واقعی‌تری را دربرخواهدداشت. مزرعه بادی منجیل در ایران نمونه‌ای از مزارع بادی در این شرایط است که با توجه به زمان احداث آن، مطالعات با روش دینامیک سیالات محاسباتی را نداشته است.

2- مشخصات مزرعه بادی

مزرعه بادی منجیل که در "شکل 1" نشان داده شده، از اولین نمونه‌های احداث شده در دهه 70 خورشیدی در ایران می‌باشد. شرایط توپوگرافی پیچیده در بین رشته کوه‌های البرز، همچنین رژیم بادی موجود در این مزرعه بادی به دلیل قرار گرفتن در بین دو ناحیه متفاوت آب و هوایی، سبب خاص بودن این مزرعه بادی است که بررسی آن را با جزیئات حائز اهمیت می‌نماید. در این پژوهش به کمک دینامیک سیالات محاسباتی به آنالیز میدان جریان در مزرعه بادی منجیل پرداخته می شود و اثرات ناهمواری‌ها و توپوگرافی زمین مزرعه بادی بر عملکرد و چیدمان توربین‌ها بررسی می‌گردد. مزرعه بادی منجیل شامل 52 توربین محور افقی از مدل‌های مختلف است که به تحلیل توربین با شماره T5 در ردیف ابتدایی توربین‌ها پرداخته شده

[15] Atmospheric Boundary Layer (ABL)
[16] Actuator-Disk Model (ADM)
[17] PHOENICS
[18] Flat terrain

Fig. 1 Wind farm position

شکل 1 موقعیت مزرعه بادی منجیل

است. روش این تحقیق می‌تواند در مزارع بادی با شرایط مشابه استفاده شده و نتایج در بهینه‌سازی چینش توربین‌های بادی موثر واقع گردد.

2-1- مشخصات زمین منطقه

در این مرحله، اطلاعات مربوط به زمین مزرعه بادی ارائه می‌گردد. برای شبکه‌بندی[1] نمونه، نیاز به مختصات کامل آن به همراه توپوگرافی زمین می‌باشد که از وب سایت ارس اکسپلورر[2] حاصل شده است. همچنین مختصات توربین‌ها در مزرعه بادی اعمال شده است. برای استفاده از این فایل در نرم افزار شبکه‌بندی، اطلاعات به فایل با پسوند ویژه اس-تی-ال[3] تبدیل شده‌اند. فایل اس-تی-ال با ابعاد 1.3×2.6 کیلومتر بوده که در برگیرنده مختصات شش توربین در ردیف اول مزرعه بادی منجیل می‌باشد.

مشخصات و مفروضات شبیه‌سازی مزرعه بادی و توربین T5 موجود مطابق جدول 1 می‌باشد.

3- الگوی باد منطقه

گلباد[4] مزرعه بادی منجیل، با استفاده از کد تدوین شده در نرم‌افزار مطلب[5]، برای اطلاعات اخذ شده از اداره هواشناسی منجیل طبق "شکل 2" ترسیم گردید.

گلباد، جهت وزش باد غالب از شمال به جنوب را نشان می‌دهد. در سایر جهات وزش باد بسیار ناچیز است که دلیل آن محل قرار گیری مزرعه بادی منجیل در دره سفید رود (که راستای شمالی-جنوبی دارد) می‌باشد. در اکثر

جدول 1 پارامترهای مرجع در شبیه‌سازی توربین باد و مزرعه بادی

Table 1 Reference parameter in wind farm and wind turbine simulation

پارامتر	مقدار
ارتفاع هاب توربین	40m
قطر توربین	47m
توان نامی	550kW
طول جغرافیایی مکان نصب توربین	357385m
عرض جغرافیایی مکان نصب توربین	4066826m
حداکثر ارتفاع دامنه شبکه بندی	2299.1m
حداقل ارتفاع دامنه شبکه بندی	299.1m
دمای هوای مرجع	293K
جرم حجمی هوای مرجع	1.2 kg/m^3
کلاس زبری سطح	0.05

[1] Meshing
[2] Erath Explorer (USGS)
[3] stl
[4] Wind Rose
[5] MATLAB

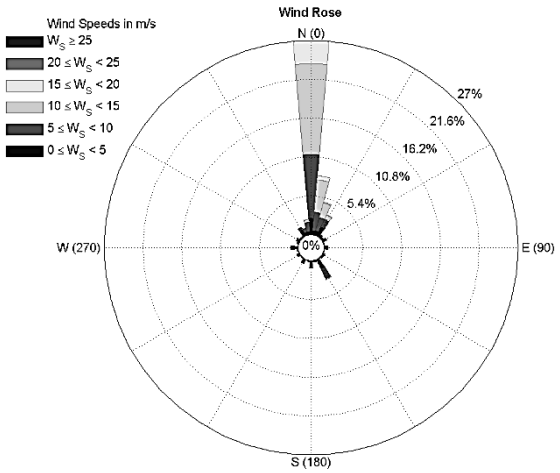


Fig. 2 Wind rose in height of 10 m

شکل 2 گلباد منجیل با در نظر گرفتن سرعت باد در ارتفاع 10 متری مرجع

مواقع بادی (27%)، باد از مناطق شمالی کوهستان البرز به مناطق جنوبی می‌وزد و در 40% مواقع باد قابل توجهی نمی‌وزد.

گلباد، با توجه به ارتفاع سنجش اداره هواشناسی، برای سرعت باد در ارتفاع 10 متری ترسیم شده است. سرعت غالب در سه محدوده تقسیم‌بندی شده است که میانگین سرعت بادی برای این محدوده‌ها 7، 12 و 17 متر بر ثانیه است. با لحاظ کلاس زبری 0.05، سرعت باد در ارتفاع 40 متری هاب توربین‌ها، با پروفیل باد تولید شده در اوپن فوم، طبق جدول 2 حاصل می‌شود.

در جدول 3 درصد وقوع باد در بازه سرعت کاری یک سال تدوین شده است. این جدول براساس اطلاعات سامانه کنترل و گردآوری داده[6] (اسکادا) نصب شده بر T5 جمع آوری شده است. سرعت مناسب برای کارکرد

جدول 2 سرعت باد در ارتفاع هاب توربین

Table 2 Wind speed in hub height

بازه سرعت گلباد	[5-10)	[10-15)	[15-20)
میانگین بازه سرعت گلباد	7m/s	12m/s	17m/s
سرعت باد در ارتفاع 40 متری	8m/s	15m/s	21m/s

جدول 3 درصد وقوع سرعت های مختلف باد در ماه های سال 2013

Table 3 Monthly wind speed occurrence in 2013

بازه سرعت (متر بر ثانیه)	0-4	4-25	>25
ژانویه	61.3	38.6	0
فوریه	46.4	53.5	0
مارچ	45.9	53.6	0.4
آپریل	28.2	71.2	0.5
می	37.5	62.1	0.3
جون	13.5	86.4	0
جولای	8.2	89.6	2.1
آگوست	9.9	89.3	0.7
سپتامبر	24.4	75.2	0.3
اکتبر	35.5	63.9	0.5
نوامبر	66.7	19.9	0.3
دسامبر	72.2	27.7	0

[6] Supervisory Control And Data Acquisition(SCADA)

توربین‌های باد این مزرعه بادی بین 4 تا 25 متر بر ثانیه می‌باشد. طبق جدول در سه ماه ژانویه، نوامبر و دسامبر درصد وقوع باد با سرعت مناسب، کمتر از 50% است. در این سه ماه توربین بادی در اغلب اوقات متوقف است. در سه ماه جون،جولای و آگوست بهترین وضعیت وزش باد وجود دارد.

4- روش عددی

توربین باد محور افقی، در مزرعه بادی، در نرم‌افزار اوپن‌فوم و با لحاظ تئوری تکانه اجزا پره شبیه‌سازی شده است.

4-1- معادلات حاکم

برای حل عددی معادلات حاکم بر سیال، معادلات متوسط‌گیری شده ناویر-استوکس رینولدز[1] (معادلات 1 و 2)، به کار گرفته شده‌اند.

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\rho\left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \overline{u_j}\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j}\right) = \overline{B_i} - \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} - \rho\overline{\acute{u_i}\acute{u_j}}\right) \tag{2}$$

که برای حل تنش رینولدز، از مدل اغتشاشی دو معادله‌ای (کی-اپسلون[2]) استفاده می‌گردد.

در شبیه‌سازی جریان باد در مزرعه بادی از مدل دیسک عملگر برای توربین بادی استفاده شده است. در مدل دیسک عملگر نیروی حجمی $\overline{B_i}$ در معادله (2)، با استفاده از نیروهای وارد بر هر جزئ در سه راستای محور مختصات، به صورت معادلات زیر جایگزین می‌گردد [12].

$$f_x = -\frac{\rho}{4\pi rt} w^2 bc(C_l \sin\emptyset - C_d \cos\emptyset)\sin\theta \tag{3}$$

$$f_y = -\frac{\rho}{4\pi rt} w^2 bc(C_l \sin\emptyset - C_d \cos\emptyset)\cos\theta \tag{4}$$

$$f_z = -\frac{\rho}{4\pi rt} w^2 bc(C_l \cos\emptyset + C_d \sin\emptyset) \tag{5}$$

که در این معادلات ρ چگالی هوا، w سرعت جریان نسبی ورودی، b تعداد پره‌های توربین، c پهنای پره، C_d و C_l به ترتیب ضرایب پسا و برا و Θ زاویه گام و $\emptyset$ زاویه جریان است که برابر زاویه حمله به اضافه زاویه گام می‌باشد.

4-2- شبکه‌بندی

ایجاد شبکه‌بندی منظم[3] بر روی فایل اس-تی-ال با استفاده از کدهای ترین-مشر[4] (که در موسسه فرانهافر[5] آلمان تدوین شده است) انجام گرفته و شبکه منظمی بر روی این فایل که در برگیرنده عوارض سطحی مزرعه بادی می‌باشد، تولید گردیده است که در "شکل 3" مشاهده می‌شود. ابعاد دامنه شبکه‌بندی شده به ترتیب در سه راستای مختصات عبارتند از: $4600\times5300\times2000\ m^3$.

وضوح شبکه‌بندی[6] ایجاد شده مزرعه بادی در نقاط دوردست از توربین 15 متر می‌باشد. وضوح شبکه‌بندی در مرکز با ضریب 1.15 افزایش یافته است. مقدار غیرتعامد[7] مش‌ها حداکثر 75.4 و به‌طور میانگین 4.72 می‌باشد و تنها چهار مش غیرمتعامد با زاویه بیش از 70 درجه[8] وجود دارند. همچنین در اطراف هر توربین در سه مرحله عملیات ریز کردن شبکه‌بندی انجام شد.

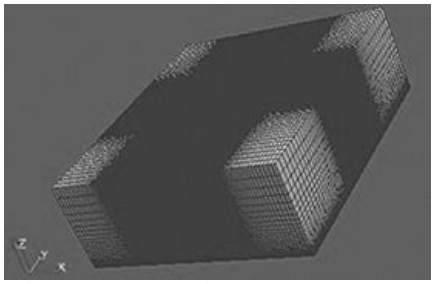
[1] Reynolds Averaged Navier-Stokes(RANS)
[2] K-ε
[3] Structured mesh
[4] terrainMesher
[5] Fraunhofer IWES
[6] Mesh Resolution
[7] non-ortagonality
[8] Number of severely non-ortagonality (>70degree)

این کار برای داشتن وضوح بهتر در اطراف توربین باد انجام می‌گیرد که مهم‌تر از سایر نقاط می‌باشد. تعداد سلول‌های شبکه‌بندی با مورد ذکر شده حدود دو میلیون (1997100) می‌باشد.

در ابتدا شبکه‌بندی با وضوح‌های 20، 15 و 12 انجام گردید. برای بررسی استقلال شبکه، سرعت جریان هوا بررسی گردیده است. در اکثر نقاط تفاوت بسیار کم می‌باشند. نقاط نصب توربین ها در شبکه‌های مختلف بررسی گردید که تفاوت در حد 5% در آن‌ها وجود دارند و برای محل نصب یک توربین، میانگین سرعت باد در جدول 4 بیان شده است. با توجه به تفاوت کم در نتایج اولیه و با در نظر گرفتن حجم محاسبات و زمان موردنیاز برای شبیه‌سازی، در نهایت شبکه‌بندی با وضوح 15 متر انتخاب گردید.

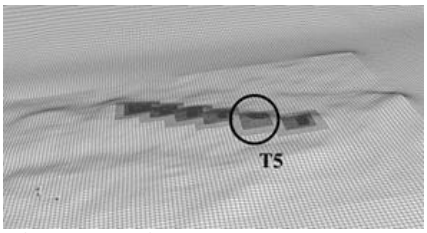
موقعیت T5 در "شکل 3" نشان داده شده است. ارتفاع هاب این توربین از سطح دریا 394.85 متر می‌باشد که بلندترین ارتفاع را در ردیف اول توربین‌ها در مزرعه بادی منجیل دارد. شبکه‌بندی توربین بادی نیز به صورت منظم است (شکل4). تعداد مش مربعی یک لایه به کار رفته برای توربین T5 برابر 142 عدد است. استفاده از مش مربعی و یکنواخت برای توربین، با توجه به شبکه‌بندی منظم مزرعه بادی، شرایط هندسی و حل را آسان می‌کند [9].

شرایط مرزی[9] شامل دیواره[10] برای سطح زمین و پچ[11] در پنج سطح دیگر می‌باشد. در "شکل 5" موقعیت شماتیک قرارگیری توربین بادی شبیه‌سازی شده در مزرعه بادی منجیل نمایش داده شده است.



a) Meshing of all domain in wind farm

الف) شبکه بندی کل میدان



b) Meshing of land in wind farm with T5 position

ب) شبکه بندی زمین به همراه موقعیت توربین T5

Fig. 3 Mesh domain of wind farm

شکل 3 شبکه بندی ایجاد شده بر روی مزرعه بادی

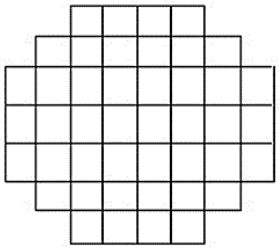


Fig. 4 Schematic of rotor discretization

شکل 4 شماتیک شبکه‌بندی توربین

[9] ablBoundary
[10] wall
[11] patch

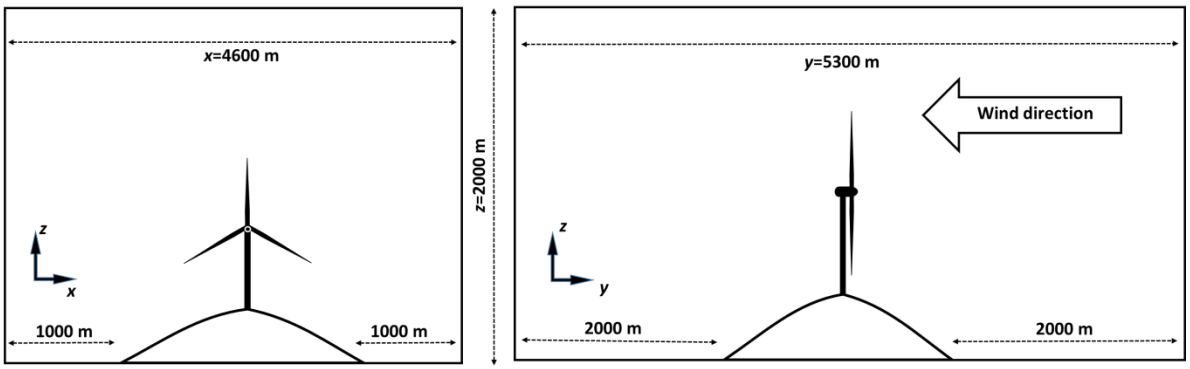


Fig. 5 Schematic of wind turbine in simulated domain. Front view (left) and Side view (right)

شکل 5 شماتیک توربین بادی در دامنه شبیه‌سازی شده. نمای روبرو (شکل سمت چپ) و نمای کناری (شکل سمت راست)

جدول 4 استقلال از شبکه

Table 4 Mesh independency

وضوح	مقدار سرعت باد در پایه توربین (متر بر ثانیه)
12	5.19
15	5.14
20	4.8

3-4- مراحل حل عددی

پس از شبکه‌بندی، حل اولیه با حلگر ای-بی-ال‌سیمپل‌فوم[1] برای سرعت باد با متوسط 12 متر بر ثانیه (که مطابق جدول 1، سرعت باد حدود 15 متر برثانیه در ارتفاع هاب توربین را نتیجه می‌دهد) انجام گرفته است. این محدوده، سرعت بهینه عملکرد توربین باد را شامل می‌شود. ابتدا حل اولیه بدون حضور توربین باد، برای اعمال شرایط اولیه مزرعه بادی مطابق جدول 1، انجام شده و سپس توربین بادی به مزرعه بادی اضافه شده است. طبق نظریه دیسک عملگر، توربین بادی به صورت یک دیسک متخلخل[2] است که اجازه عبور جریان باد را می‌دهد. در این مرحله مشخصات توربین بادی مانند ارتفاع و قطر و ضرایب عملکرد آن اعمال می‌گردد. پس از قرار دادن توربین بادی در مزرعه بادی، حل نهایی با همان حلگر مذکور خاتمه یافته است. جهت وزش باد از شمال می‌باشد که در شکل‌های موجود در این مقاله در راستای منفی محور y (شکل 5) می‌باشد. این مرحله در ابر کامپیوتر دانشگاه الدنبرگ آلمان و با 12 پردازنده انجام گرفته است.

5- نتایج و بحث

شاخص مهم در این شبیه‌سازی، سرعت جریان باد در فواصل مختلف از توربین بادی می‌باشد.

1-5- سرعت پسباد

پس از عبور جریان هوا از توربین، کاهش سرعت را در پشت توربین داریم که پسباد نامیده می‌شود. پسباد توربین T5 در "شکل 6"، در برش طول جغرافیایی (محور x در شکل) 357385 متر نمایش داده شده است. مطابق جدول 1 این برش از مرکز T5 می‌گذرد. این تصویر پسباد تا حدود $15d$ پس از T5 را نشان می‌دهد.

در "شکل7"، پسباد توربین T5 در جهت وزش باد (راستای y) نمایش داده شده است. اولین تصویر از سمت چپ، در فاصله برابر قطر روتور (d) قبل از توربین رسم گردیده است. در این فاصله هنوز پسباد توربین وجود ندارد و این شکل قسمتی از پروفیل باد ورودی را نمایش می‌دهد. سرعت باد در مرکز روتور (قبل از رسیدن باد به توربین) برابر 17.25 متر بر ثانیه است. در مابقی شکل ها پسباد به ترتیب در چند برابر قطر روتور عقب تر از T5 نمایش داده شده است. فواصل عقب تر از توربین با علامت منفی مشخص شده است. در تصویر دوم که فاصله $1d$ روتور عقب تر از توربین را نمایش می‌دهد، سرعت در مرکز روتور به 7.7 متر بر ثانیه افت پیدا کرده که به‌دلیل گرفته شدن انرژی باد در توربین می‌باشد. از تصویر سوم به تدریج سرعت باد افزایش یافته و بازیافت[3] شده است. در فاصله 10 برابر قطر روتور عقب تر از توربین سرعت باد به 14.55 متر بر ثانیه می‌رسد.

افت سرعت رخ داده درپسباد مرکز توربین T5 در فواصل 1، 2، 3، 5، 10 برابر d نسبت به سرعت ورودی به ترتیب عبارتند از: 54%، 52%، 42%، 26%، 16%. فاصله $5d$ پس از قطر روتور به عنوان معیار پسباد دور[4] در نظر گرفته شده است [7] که در این تحقیق کاهش سرعت پسباد در آن در حدود 26% حاصل شده است.

در "شکل 8" پسباد در راستای ارتفاع (از سطح زمین تا پنج برابر قطر روتور ($5d$) بالاتر از هاب توربین T5) در فواصل مختلف از توربین نمایش داده شده است. تصویر اول که قبل از رسیدن باد به توربین T5 است، نمایانگر پروفیل باد ورودی است.

در تصویر دوم "شکل 8"، که به اندازه یک قطر روتور بعد از توربین است، پروفیل باد دارای یک منحنی کاهش سرعت شدید است که مرکز این منحنی تقریبا منطبق با ارتفاع هاب می‌باشد. در تصاویر بعدی و به تدریج با دور شدن از توربین، کاهش سرعت باد جبران شده و پروفیل باد به حالت

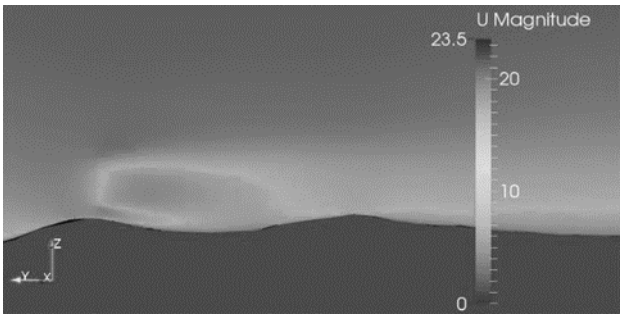


Fig. 6 Wind speed (m/s) of T5 wake in the Manjil wind farm

شکل 6 سرعت پسباد((متر بر ثانیه) توربین T5 در مزرعه بادی منجیل

[1] ablSimpleFoam
[2] porous
[3] recovery
[4] Far wake

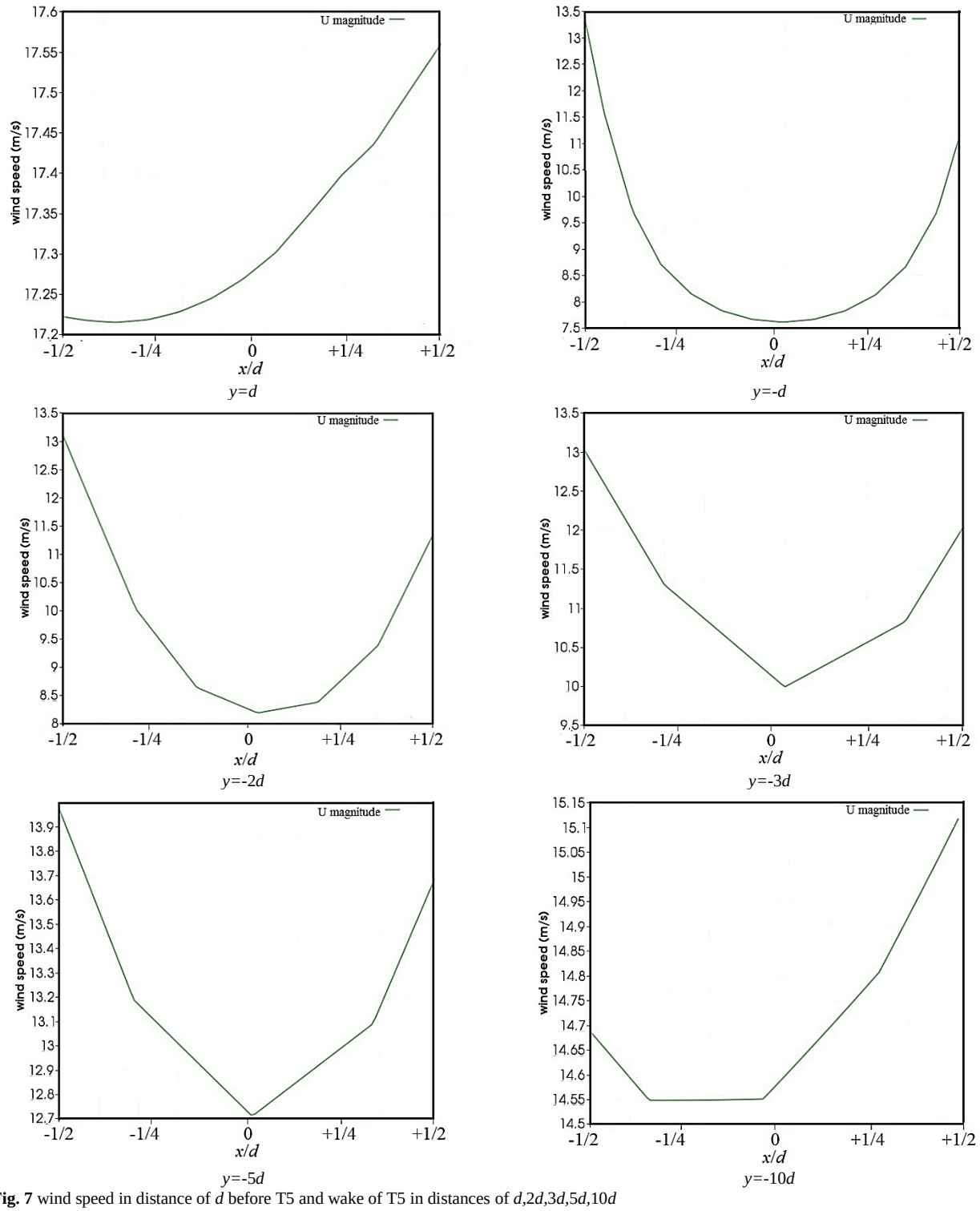


Fig. 7 wind speed in distance of *d* before T5 and wake of T5 in distances of *d*,2*d*,3*d*,5*d*,10*d*

شکل 7 سرعت باد به فاصله یک برابر قطر روتور(*d*) قبل از T5 و پسباد آن در فواصل *d*,2*d*,3*d*,5*d*,10*d* عقب تر از توربین

اولیه آن بر می‌گردد. مطابق "شکل 8" پسباد T5 تا فاصله 5*d* به طور واضح قابل مشاهده است. پس از این فاصله به‌صورت تدریجی اثرات پسباد از بین می‌رود.

تغییرات سرعت باد در راستای جریان باد (*y*) در خط سیری از مرکز T5 در "شکل 9" نمایش داده شده است. این نمودار منطبق با مدل دیسک عملگر می باشد [13].

5-2- سایر مشخصات توربین بادی

سایر پارامترهای توربین بادی از جمله سرعت باد، شدت آشفتگی[1]، ضریب توان روتور (c_p)، ضریب نیروی محوری روتور (c_t)، شاخص محوری (a)[2]، مطابق جدول 5 برای سرعت باد 12 متر برثانیه (در ارتفاع 10 متری از زمین) است.

[1] Turbulence Intensity
[2] Induction

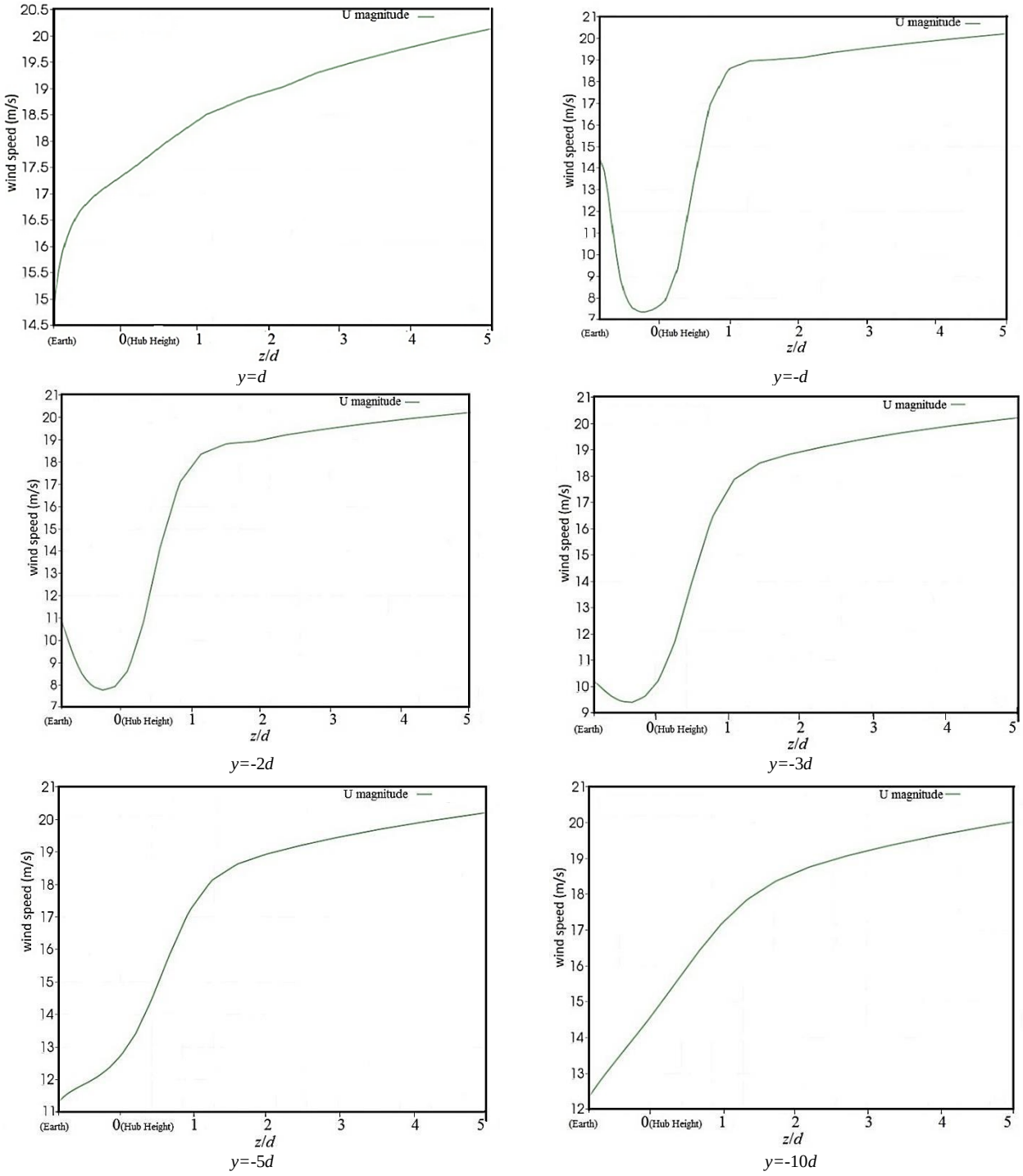


Fig. 8 wind profile in distance of *d* before T5 and wake of T5 in distances of *d*,2*d*,3*d*,5*d*,10*d*

شکل 8 پروفیل سرعت باد در فاصله یک برابر قطر روتور(*d*) قبل از T5 و پسباد آن در فواصل *d*,2*d*,3*d*,5*d*,10*d* عقب تر از توربین

جدول 5 مشخصات جریان برای توربین T5در سرعت باد 12 متر بر ثانیه

Table 5 Wind flow characteristic for T5

پارامتر	مقدار
سرعت باد	17.1 m/s
شدت آشفتگی	0.1008
ضریب توان	0.1028
ضریب نیروی محوری	0.2667
شاخص محوری	0.6144

5-3- اعتبارسنجی

برای سرعت باد در ارتفاع هاب توربین بادی (مطابق جدول 5)، میانگین توان حاصله در ماه‌های مختلف برای توربین T5 (براساس اطلاعات گرفته شده از مزرعه بادی) با توان به‌دست آمده از شبیه‌سازی در "شکل 10" مقایسه گردید. نمودار خط چین نمایانگر نتایج شبیه‌سازی در دمای مرجع بوده و نمودار خط ممتد مربوط به نتایج میدانی در ماه‌های مختلف یک سال می‌باشند.

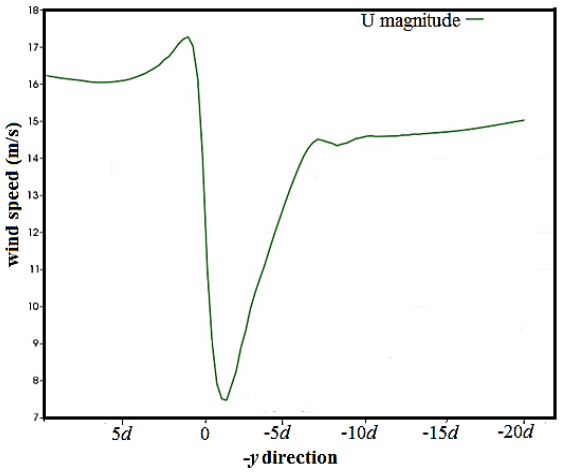


Fig. 9 Wind speed in hub height of T5, with free wind speed of 15 m/s

شکل 9 سرعت باد در ارتفاع هاب T5 با سرعت باد آزاد در حدود 15متر بر ثانیه

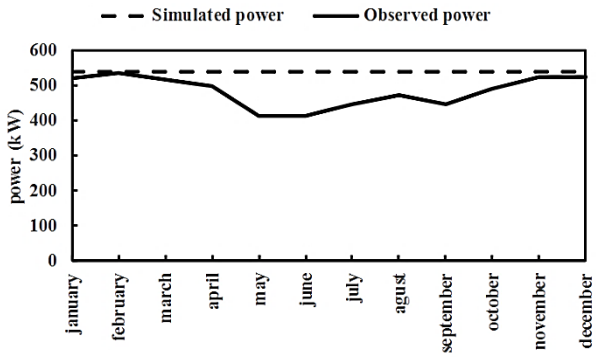


Fig. 10 wind power of T5 compared with simulation result for 2013

شکل 10 مقایسه توان حاصله از شبیه‌سازی و نتایج میدانی در سال 2013

توان حاصل از شبیه‌سازی (در چگالی هوا مطابق جدول 1) برابر 538.8 کیلووات می‌باشد. اطلاعات میدانی در ماه‌های مختلف در مقابل نمودار شبیه‌سازی ترسیم شده که بسیار نزدیک به نتایج شبیه‌سازی است. در ماه‌های مختلف سال نتایج شبیه سازی اندکی بیشتر از اطلاعات میدانی را به دست می‌دهد. حداکثر همبستگی در ماه‌های سرد سال است که در ماه فوریه اختلاف بین مقدار شبیه‌سازی و اطلاعات میدانی کمتر از 1% می‌باشد. بیشترین اختلاف در ماه‌های گرم سال می‌باشد. در ماه‌های می و جون این اختلاف در حدود 23% می‌باشد.

دمای 20 درجه سانتی‌گراد به‌عنوان دمای مرجع (مطابق جدول1) در شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است. همبستگی بیشتر نتایج شبیه‌سازی در زمستان، به علت شباهت دمای این ماه‌ها با دمای مرجع مدل می‌باشد. با توجه به اختلاف اندک مقدار شبیه‌سازی و اطلاعات میدانی، نتایج برای همه ماه‌های سال معتبر می‌باشد. البته در ماه‌های گرم سال باید توجه داشت که پیش‌بینی‌های واقع بینانه اندکی کمتر از مقادیر شبیه‌سازی شده تحقق خواهد یافت. ولی در ماه‌های سرد سال دقت شبیه‌سازی بسیار مناسب می‌باشد.

4-5- پسباد گروه توربین ها

در "شکل‌های 11"، پسباد شش توربین بادی موجود در ردیف ابتدایی مزرعه بادی منجیل در جهت وزش باد (راستای y) نمایش داده شده است. عرض فایل مزرعه بادی در راستای x برابر 2600 متر است که محور افقی شکل می‌باشد. مکان نصب توربین‌ها در "شکل 3" مشخص می‌باشند. اولین تصویر "شکل 11"، در فاصله برابر قطر روتور (d) قبل از توربین T5 رسم گردیده است. در این تصویر، پسباد توربین‌های T1,T2,T3,T4 مشاهده می‌شوند. پسباد دو توربین T5,T6 هنوز تشکیل نشده‌اند. در تصویر دوم پسباد توربین T5 نیز تشکیل شده و از این تصویر به بعد، به تدریج پسباد توربین‌ها کم اثرتر می‌شوند.

سرعت پسباد در "شکل‌های 11"، اثرات اندک هم‌پوشانی پسبادها را نمایش می‌دهند. فاصله توربین‌ها در جهت x در حدود $3d$ می‌باشند و هم‌پوشانی اندک در پسباد توربین‌ها با توجه به تفاوت در مکان نصب آن‌ها در راستای y حاصل شده است. در تصویر آخر که به فاصله $10d$ از توربین T5 می‌باشد، فقط پسباد این توربین و توربین T6 اندکی مشخص است و پسباد سایر توربین‌ها که در فاصله بیشتر نصب شده‌اند قابل تشخیص نمی‌باشد.

6- تحلیل اطلاعات میدانی

با توجه به تفاوت عمده روزهای با وزش باد مناسب در فصول تابستان و زمستان، دو ماه جولای و ژانویه به‌عنوان نمونه‌ای از ماه‌های تابستانی و زمستانی انتخاب شده‌اند تا روند تغییرات سرعت باد در آن‌ها بررسی گردد. در "شکل 12" روند تغییرات سرعت باد براساس اطلاعات اسکادا برای توربین T5 در سال 2013 نمایش داده شده است. ثبت اطلاعات اسکادا، در بازه زمانی هر 10 دقیقه می‌باشد. هر 144 پالس ثبت شده، شامل یک روز کاری بوده و البته پالس‌های مخدوش حذف گردیده است. طبق جدول 3 در ماه ژانویه، در 38.6 درصد مواقع وزش باد مناسب وجود دارد. اما در ماه جولای، در 89.6 مواقع وزش باد مناسب است. علاوه بر درصد وزش باد مناسب، "شکل 12"، تغییرات کمتر سرعت باد را در ماه جولای نشان می‌دهد.

در "شکل‌های 13 و 14" روند سرعت تغییرات باد برای روز اول و پنج روز ابتدایی از هر کدام از ماه‌های ژانویه و جولای به همراه تغییرات توان تولیدی توربین T5 نمایش داده شده است.

مطابق "شکل 13"، توربین T5 در پنج روز اولیه ماه جولای روند کاری مناسبی داشته و فقط در دو مقطع کوتاه توان خروجی نداشته است. اولین بازه بدون تولید توان، در پالس حدود 100 شروع شده و تا 150 ادامه دارد. در این بازه زمانی سرعت باد بسیار ناچیز است و در نتیجه توربین حرکتی نداشته است. اما دومین بازه بدون تولید توان، در حدود پالس‌های بین 180 تا 200 در نمودار توان می‌باشد. با توجه به نمودار سرعت در این بازه زمانی، مشخص می‌باشد که به‌علت وزش باد با سرعت بالاتر از 25 متر بر ثانیه توربین وارد فاز ترمزی شده است. در خارج از این دو بازه زمانی، توربین T5 توان متوسطی در حدود 450 کیلو وات را در سرعت باد بین 15 تا 20 متر بر ثانیه تولید کرده است.

در "شکل 14" در پنج روز اول کاری ماه ژانویه، توربین T5 فقط در چند بازه زمانی کوتاه توان خروجی داشته است که به‌دلیل سرعت کم باد در این ماه زمستانی است. البه توان در بازه کوتاه تولید زمستانی برای بازه سرعت بین 15 تا 20 متر بر ثانیه، بالاتر از 500 کیلووات برای توربین T5 می‌باشد. این تولید توان بیشتر در سرعت باد برابر با فصل تابستان به‌دست آمده است. دلیل این توان تولیدی بالاتر در فصل زمستان، چگالی هوای بالاتر می‌باشد. افزایش تاثیر چگالی هوا در زمستان در مورد این مزرعه بادی (با توجه به روزهای بادی تابستانی) ناچیز است.

7- نتیجه‌گیری

نتایج شبیه‌سازی انجام شده در اوپن فوم برای توربین بادی، در مزرعه بادی با

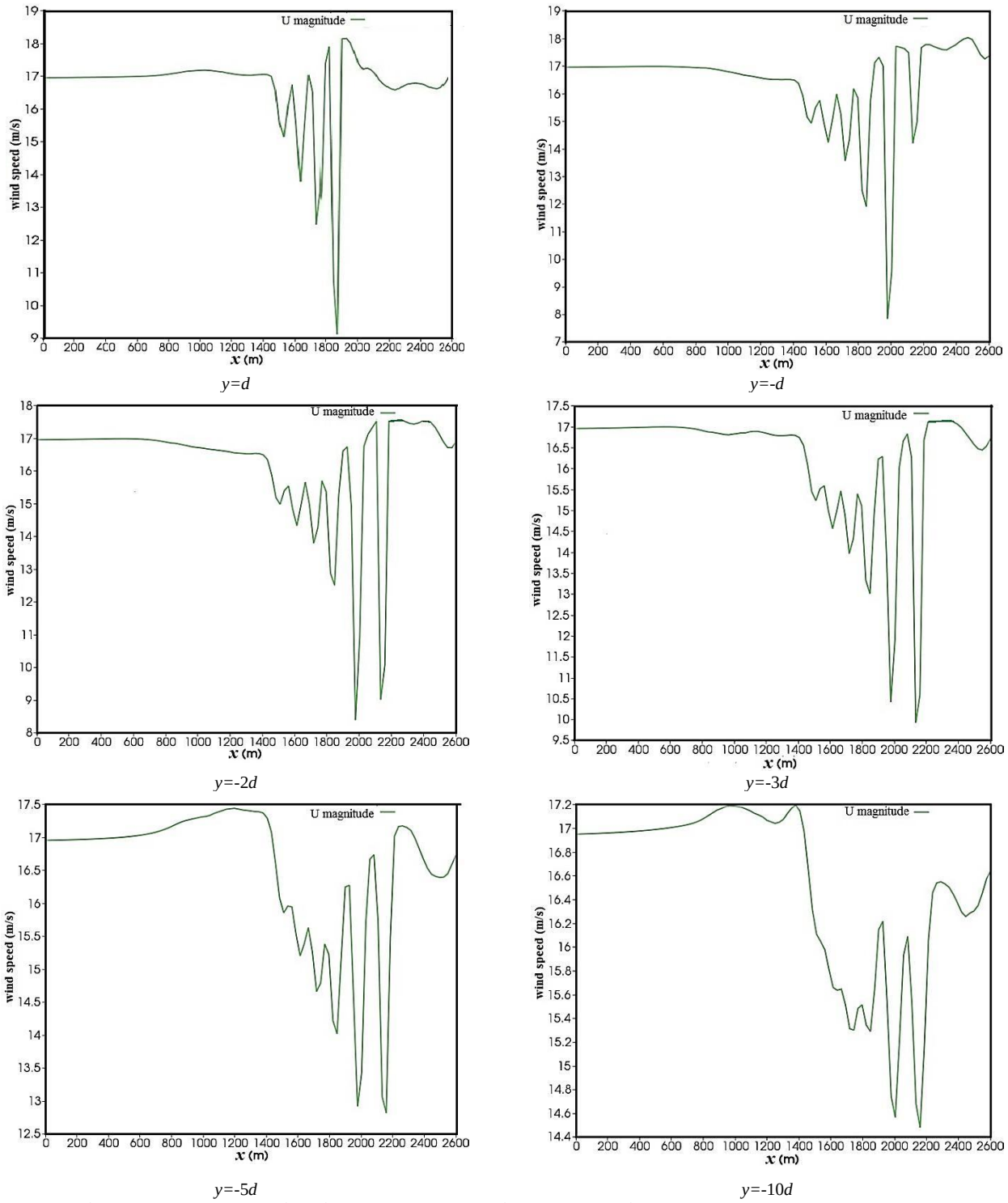


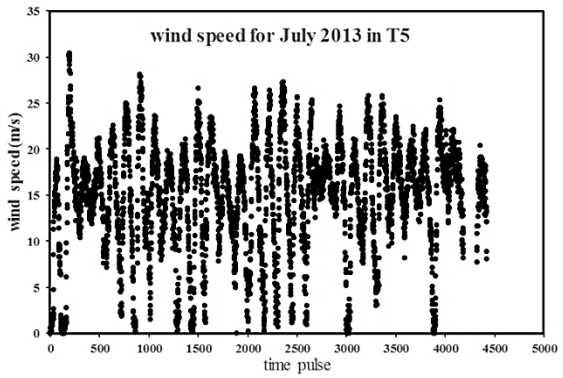
Fig. 11 wake of wind turbines in distance of *d* before T5 and in distances of *d*,2*d*,3*d*,5*d*,10*d* after T5

شکل 11 سرعت پسباد مجموعه شش توربین در فواصل مختلف از توربین T5 و در ارتفاع هاب توربین

محیط ناهموار، دارای دقت مناسب می‌باشد. پسباد توربین بادی کاملا آشکارسازی شده است که برای نصب توربین‌های ردیف بعدی می‌بایست مدنظر قرار گیرد. الگوی تغییرات پسباد منطبق با مدل دیسک عملگر می‌باشد. پسباد توربین T5 تا فاصله حدود 5*d* شدید بوده و افت سرعت در این فاصله 26% است که بعد از آن کم اثر می‌گردد.

حداکثر همبستگی در توان حاصل از شبیه‌سازی و اطلاعات میدانی در ماه فوریه (کمتر از 1%) و بیشترین اختلاف در ماه‌های تابستانی می و جون (حدود 23%) می‌باشند.

مزرعه بادی منجیل به‌علت قرار گرفتن در شرایط خاص توپوگرافی دارای رژیم باد ویژه بوده که در 27% مواقع، جهت وزش باد از شمال به جنوب بوده و در 40% بادی نمی‌وزد. به‌علت وزش بادهای با سرعت مناسب، توربین بادی در چند ماه تابستانی سال بازده مناسب داشته و در مابقی ایام سال کارکرد مناسب ندارد که از نظر برگشت سرمایه مطلوب نیست. در سه ماه ژانویه، نوامبر و دسامبر درصد وقوع باد با سرعت مناسب کمتر از 50% است. در این



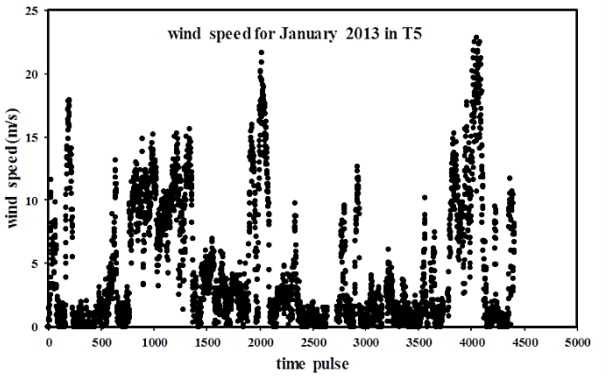
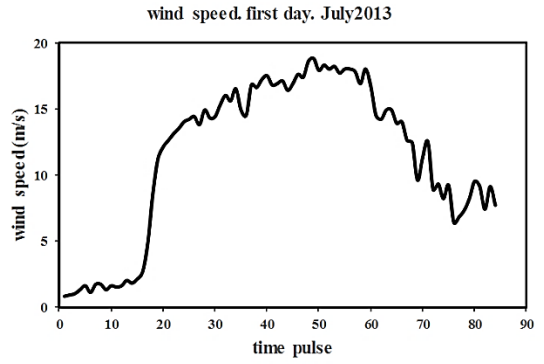
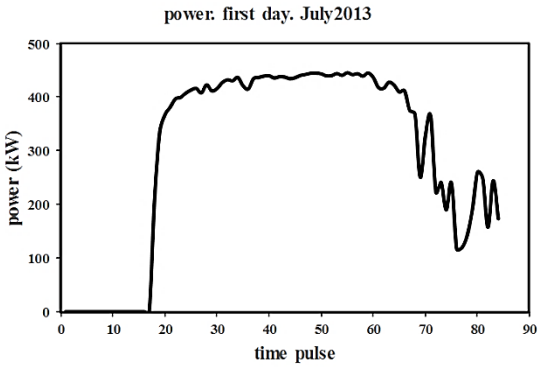
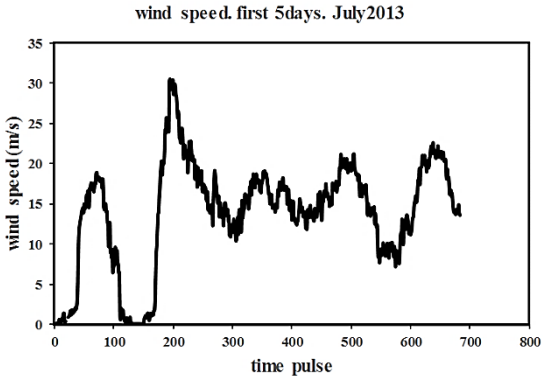


Fig. 12 wind speed trend in January and July 2013

شکل 12 روند تغییرات سرعت باد در دو ماه ژانویه و جولای سال 2013







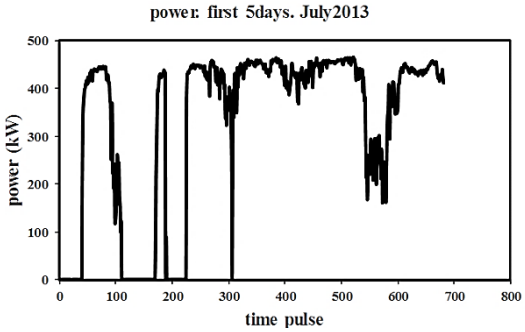
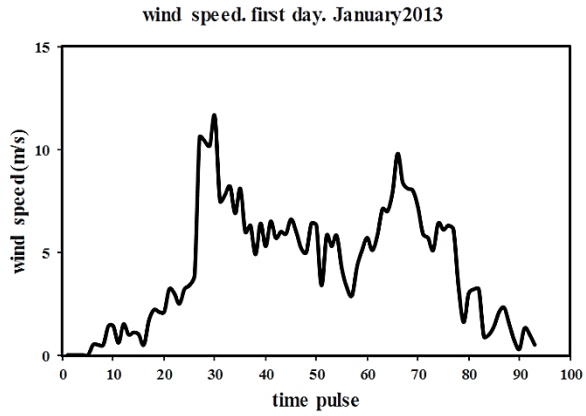
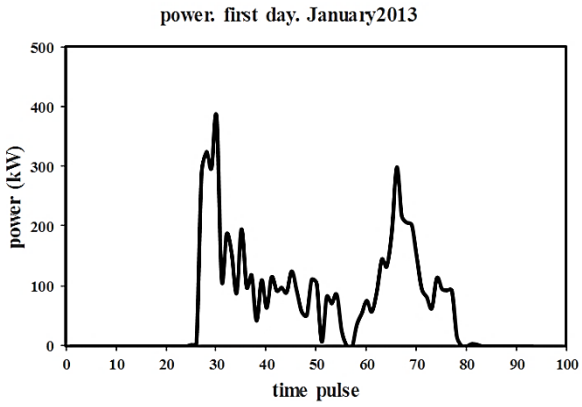
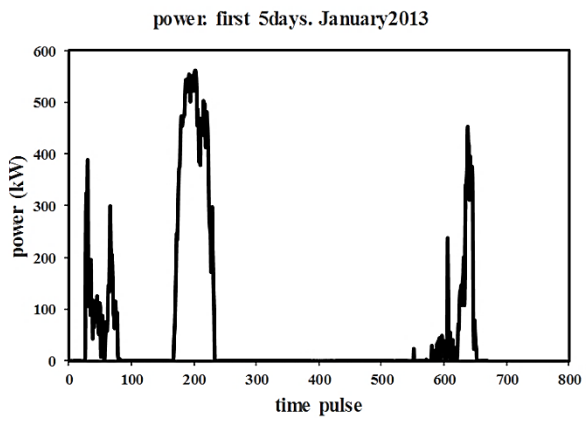


Fig. 13 wind speed and wind power trends in July 2013

شکل13 روند تغییرات سرعت باد و توان حاصله در بازه های زمانی ماه جولای سال 2013







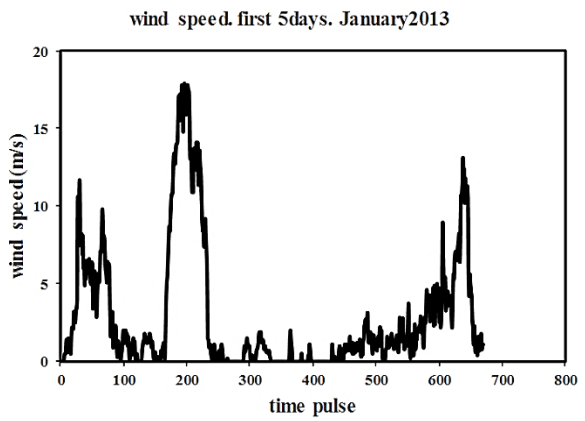


Fig. 14 wind speed and wind power trends in January 2013

شکل 14 روند تغییرات سرعت باد و توان حاصله در بازه های زمانی ماه ژانویه سال 2013

سه ماه توربین بادی در اغلب اوقات قادر به تولید توان نیست.

در ماه‌های تابستانی (و به‌طور نمونه ماه جولای) روند تغییرات سرعت باد مناسب می‌باشد و توان تولیدی در توربین نمونه T5 تداوم لازم را دارد. در ماه‌های زمستانی (و به‌طور نمونه ژانویه) علاوه بر سرعت باد کم، روند تغییرات سرعت و توان بادی به‌دست آمده در T5 نیز نامناسب می‌باشد. پیشنهاد می‌گردد در سه ماه زمستانی توربین‌های بادی متوقف شده و موارد تعمیراتی، یا سایر کنترل‌های مشابه که نیاز به توقف توربین‌ها دارد، به این بازه زمانی موکول گردد.

8- تقدیر و تشکر

در پایان لازم است از شرکت تولید نیروی برق سبز منجیل که همکاری با این تحقیق داشته‌اند و همچنین شرکت سانا و موسسه فرانهافر آلمان تشکر و قدردانی نماییم.

9- مراجع

[1] A. Bashirzadeh Tabrizi, J. Whale, T. Lyons, T. Urmee, Performance and safety of rooftop wind turbines: Use of CFD to gain insight into inflow conditions, *Renewable Energy*, Vol. 67, pp. 242-251, 2014.

[2] J. M. L. Mattuella, A. M. Loredo-Souza, M. G. K. Oliveira, A. P. Petry, Wind tunnel experimental analysis of a complex terrain micrositing, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 54, No. C, pp. 110-119, 2016.

[3] M. Boojari, E. Mahmoodi, A. Abbas Nejad, S. Sarmat, Modeling the wake of mexico experiment's wind turbine using elliptic force distribution in actuator-line method in openfoam, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 9, pp. 77-86, 2016. (in Persian فارسی)

[4] A. M. Abdelsalam, K. Boopathi, S. Gomathinayagam, S. S. H. K. Kumar, V. Ramalingam, Experimental and numerical studies on the wake behavior of a horizontal axis windturbine, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 128, pp. 54–65, 2014.

[5] N. J. Choi, S. H. Nam, J. H. Jeong, K. C. Kim, Numerical study on the horizontal axis turbines arrangement in a wind farm: Effect of separation distance on the turbine aerodynamic power output, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 117, pp. 11–17, 2013.

[6] J. O. Mo, A. Choudhry, M. Arjomandi, Y. H. Lee, Large eddy simulation of the wind turbine wake characteristics in the numerical wind tunnel model, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 112, pp. 11–24, 2013.

[7] F. Porte´ -Agel, Y. T. Wu, H. Lu, R. J. Conzemius, Large-eddy simulation of atmospheric boundary layer flow through wind turbines and wind farms, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 99, No. 4, pp. 154-168, 2011.

[8] A. Makridis, J. Chick, Validation of a CFD model of wind turbine wakes with terrain effects, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 123, No. A, pp. 12–29, 2013.

[9] F. Castellani, A. Vignaroli, An application of the actuator disc model for wind turbine wakes calculations, *Applied Energy*, Vol. 101, pp. 432-440, 2013.

[10] F. Castellani, D. Astolfi, M. Burlando, L. Terzi, Numerical modelling for wind farm operational assessment in complex terrain, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 147, pp. 320-329, 2015.

[11] H. Kozmar, D. Allori, G. Bartoli, C. Borri, Complex terrain effects on wake characteristics of a parked wind turbine, *Engineering Structures*, Vol. 110, pp. 363-374, 2016.

[12] E. Mahmoodi, A. Jafari, A. R. Keyhani, Wind turbine rotor simulation via CFD based actuator disk technique compared to detailed measurement, *International Journal of Renewable Energy Development*, Vol. 4, No.3 , pp. 205-210, 2015.

[13] T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins, E. Bossanyi, *Handbook of Wind Energy*, pp. 41-43, London, John Wiley & Sons, 2001.