

مدل سازی و تحلیل عددی عملکرد توربین بادی Vestas-V47 در یک مزرعه بادی نمونه مقیاس کوچک

جاماسب پیرکندی*

مهرداد مشهدی

مهدی هاشم آبادی

دانشیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی هوافضا، ایران

کارشناس ارشد، دانشکده فنی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران غرب، ایران

استاد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی هوافضا، ایران

چکیده

در این مقاله ابتدا هندسه کامل توربین باد وستاس ایجاد گردیده و یک شبکه بی‌سازمان در اطراف پره‌های آن تولید شده است. در ادامه معادلات جریان روی توربین باد با کمک نرم‌افزار تحلیل عددی حل شده است. با در نظر گرفتن توربین باد منفرد در ناحیه محاسباتی مفروض و سرعت ورودی $6/7 \text{ m/s}$ ، پروفیل‌های سرعت در پایین دست جریان استخراج شده و مشخص شد که بیشترین کاهش سرعت باد در عبور از توربین در ارتفاعی تقریباً برابر با ارتفاع پایه توربین اتفاق افتاده است. همچنین بهبود سرعت در فاصله‌ی ۲ تا ۶ برابر قطر روتور به مراتب از فاصله‌ی ۱۰ تا ۲۰ برابر قطر روتور بیشتر است، این کاهش سرعت با رسیدن به فاصله‌ی ۱۰ برابر قطر روتور در پشت توربین ۵۰٪ بهبود یافته و در فاصله‌ی ۲۰ برابر قطر روتور همچنان قابل مشاهده است. مشخص شده است که تاثیر دنباله بر توربین‌های کنار دست حداکثر به اندازه قطر روتور می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که بازده مزرعه بادی در صورتی که فاصله توربین‌ها ۵ برابر قطر روتور از یکدیگر و سرعت ورودی به ناحیه محاسباتی 10 m/s باشد، $62/263\%$ می‌باشد. در نهایت با توجه به پروفیل سرعت و بازده بدست آمده از مزرعه بادی مفروض می‌توان به این نتیجه رسید که فاصله‌ی مطلوب برای جانشینی توربین‌های دیگر، ۵ برابر قطر روتور در پایین دست و $1/5$ برابر قطر روتور از طرفین است. **واژه‌های کلیدی:** توربین باد، مزرعه بادی، دینامیک سیالات محاسباتی، مدل سازی، وستاس.

Modeling and Numerical Analysis of Vestas-V47 Wind Turbine Performance in a Small Scale Wind Farm

J. Pirkandi

Faculty of Aerospace, Malek Ashtar University of Technology, Iran.

M. Mashadi

Faculty of Engineering, Islamic Azad University West Tehran Branch, Tehran, Iran

M. Hashemabadi

Faculty of Aerospace, Malek Ashtar University of Technology, Iran.

Abstract

In this paper, first the complete geometry of the Vestas wind turbine has been created, and an unstructured mesh around the blades is produced. In the following, the flow equations on the wind turbine are solved using numerical analysis software. Velocity profiles have been extracted by assuming a single wind turbine in the assumed computational area and inlet velocity of 6.7 m/s , and it was found that the maximum reduction in velocity has occurred at the nacelle height approximately. Also, velocity recovery at a distance of 2 to 6 times of rotor's diameter (2D to 6D) is far greater than the distance of 10 to 20 times of the rotor's diameter (10D to 20D). The velocity reduction has been recovered in 10D downstream of a wind turbine up to 50% and still exists in 20D downstream. It was shown that the wake effect occurs at a maximum distance of 1D besides the turbine. According to the results, the efficiency of the wind farm is 62.0263% if the distance between the turbines is 5D and the input speed to the computational area is 10 m/s . The calculated velocity profile and efficiency obtained from the assumed wind farm come to the conclusion that the optimal distance for placement of wind turbines is 5D downstream and 1.5D lateral.

Keywords: Wind Turbine, Wind Farm, Computational Fluid Dynamics, Modeling, Vestas.

۱- مقدمه

بادی این است که هزینه‌های ثابت برای نصب چندین توربین بادی پخش شده‌اند. در یک مزرعه‌ی بادی، توربین پایین دست تحت تاثیر پدیده دنباله ناشی از توربین بالادست قرار دارد [۱]. دنباله دارای دو اثر است، اول کاهش در سرعت باد که منجر به کاهش توان خروجی مزرعه باد می‌شود و دوم افزایش اغتشاش در باد که باعث افزایش بارگذاری دینامیکی بر توربین‌های پایین دست می‌شود. دنباله توربین‌های باد برای سال‌های زیادی مورد بررسی قرار گرفته‌اند و مدل‌های مختلف توسط محققان توسعه یافته‌اند [۲-۶]. این مدل‌ها می‌توانند به دو دسته‌ی اصلی تقسیم شوند، مدل‌های تحلیلی دنباله و مدل‌های

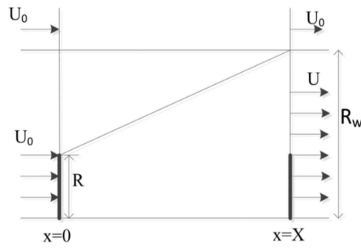
افزایش نگرانی جهانی از آلودگی سوخت‌های فسیلی و اتمام آن‌ها باعث توجه بیشتر به تولید انرژی الکتریکی با استفاده از منابع تجدیدپذیر شده است. در این میان منابع باد، به علت در دسترس و ارزان بودن، بیشترین میزان رشد را دارد. توربین باد وسیله‌ای است که انرژی باد را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. چرخش پره‌ها یک ژنراتور را به حرکت در می‌آورد و بدین گونه الکتریسته تولید و به شبکه برق انتقال داده می‌شود. مزرعه بادی مجموعه‌ای از توربین‌های بادی است و می‌تواند به عنوان یک نیروگاه تصور شود. یک مزیت مزرعه

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: jamasp_p@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۹۸/۱۰/۳۰

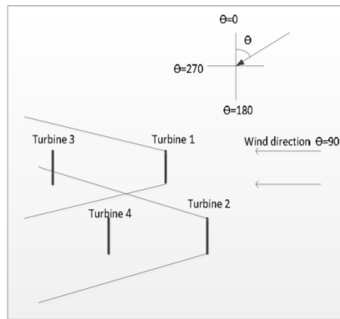
تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۲/۱۹

$$U_{i\theta} = U_0 \left(1 - \sqrt{\sum_{j=1}^N K_{ij\theta} (1 - U_{ij} / U_0)^2} \right) \quad (3)$$



شکل ۱- مدل دنباله جنسن

به طوری که θ بیان‌کننده جهت وزش باد، $U_{i\theta}$ سرعت باد در محل توربین i ام در جهت θ است. $K_{ij\theta}$ نشان دهنده تاثیر توربین j ام در کاهش سرعت توربین i ام در جهت θ است که مقادیر صفر و یک یا عددی بین این دو به خود می‌گیرد.



شکل ۲- مدل یک مزرعه بادی

برای تعیین اینکه کدام توربین‌ها و چه مقدار در دنباله یک توربین قرار می‌گیرند، باید مراحل زیر انجام شود:

۱. با توجه به جدول ۱، دسته‌بندی توربین‌ها انجام می‌شود اگر هر دو شرط موجود در هر سطر جدول با هم برقرار باشد؛ آنگاه توربین j ام می‌تواند در دنباله توربین i ام قرار گیرد.

۲. معادله‌ی خط عبوری از هر توربین، با توجه به جهت وزش باد و مختصات آن توربین طبق رابطه (۴) محاسبه می‌شود:

$$y = m(x - X_i) + Y_i \quad (4)$$

به طوری که X_i و Y_i مختصات توربین و m شیب خط است که با توجه به جهت وزش باد محاسبه می‌شود.

جدول ۱- تقسیم‌بندی جهت باد و مختصات توربین‌ها

θ	X, Y
$\pi/4 \leq \theta < 3\pi/4$	$X_j < X_i$
$3\pi/4 \leq \theta < 5\pi/4$	$Y_j < Y_i$
$5\pi/4 \leq \theta < 7\pi/4$	$X_j > X_i$
$7\pi/4 \leq \theta < 9\pi/4$	$Y_j > Y_i$

۳. با توجه به شکل ۳ فاصله عمود توربین‌هایی که شرایط مرحله اول را دارند تا خط گذرنده از توربین i ام (BT2) محاسبه کرده، سپس طبق قضیه‌ی فیثاغورث و با توجه به فاصله‌ی بین دو توربین (D_{T1T2} ،

محاسباتی دنباله. مدل تحلیلی، سرعت در دنباله را با مجموعه‌ای از عبارات تحلیلی توصیف می‌کند، در حالی که در مدل‌های محاسباتی، معادلات جریان سیال برای بدست‌آوردن میدان سرعت دنباله حل می‌شوند. مدل تحلیلی دنباله در ابتدا توسط لانجستر [۷] و بتز [۸] معرفی شد، مبنای تحقیق آن‌ها استفاده از روش حجم کنترل به منظور ارائه‌ی یک مدل ریاضی- فیزیکی برای دنباله‌ی پشت توربین باد بود. فراندسن [۹] کلیتی از فرضیات لانجستر/بتز را توسعه داد و مجموعه‌ای از مدل‌های دنباله توسعه‌یافته قبلی را بدست آورد که به خوبی توانست از آن‌ها برای پیشبرد اثر دنباله‌های چندگانه استفاده کند. کرامتو و همکاران [۱۰] دنباله‌ی یک توربین باد را با استفاده از حل عددی تحلیل کردند. آنها از مدل توربولانس $k-\epsilon$ برای این منظور استفاده کردند. ویل و همکاران [۱۱] یک توربین نمونه با دو تیغه صفحه صاف و بدون پیچش را برای بررسی دنباله‌ی توربین مورد بررسی قرار دادند. برای مدل‌سازی عددی از روش شبکه چرخشی روتور استفاده شده که یک روش غیر لزج با چرخش آزاد است. ورل [۱۲] مدل دنباله‌ی را ارائه کرد که شامل یک مدل دقیق برای ناحیه‌ی غیرلزج دنباله‌ی نزدیک، راه حل پرانتل برای ناحیه‌ی میانی دنباله و یک مدل بر مبنای تجزیه و تحلیل متقارن رابطه‌ی پرانتل برای ناحیه‌ی دنباله‌ی دور بود. مشهدی و قاسمی [۱۳] با استفاده از حل عددی به تحلیل دنباله پشت توربین بادی پرداختند و نتایج را با مدل تحلیلی فراندسن مقایسه کردند که نتیجه آن اثبات ضعف مدل فراندسن در ارائه پروفیل سرعت پشت توربین باد بود. همچنین توان تولیدی و بازده توربین‌ها آرایه شد.

۲- طراحی مزرعه

برای توصیف اثر دنباله در مزارع بادی، معمولاً از مدل جنسن استفاده می‌شود. بر اساس این مدل که در شکل ۱ نشان داده شده است، سرعت کاهش یافته با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود [۱۴].

$$U = U_0 \left[1 - \left(1 - \sqrt{1 - C_T} \right) \left(\frac{r}{r + kx} \right)^2 \right] \quad (1)$$

در رابطه فوق U_0 سرعت اولیه، x فاصله بین دو توربین، r شعاع روتور توربین بالادست، C_T ضریب گشتاور و k ثابت گسترش دنباله می‌باشد. گاهی اوقات ممکن است یک توربین در دنباله‌ی چند توربین دیگر قرار گیرد. بر طبق نظریه تعادل انرژی جنبشی، سرعت در محل این توربین از رابطه‌ی (۲) محاسبه می‌شود [۱۵].

$$U_i = U_0 \left[1 - \sqrt{\sum_{j=1}^N \left(1 - \frac{U_{ij}}{U_0} \right)^2} \right] \quad (2)$$

در رابطه فوق N تعداد توربین‌ها و U_{ij} سرعت در محل توربین i ام ناشی از دنباله توربین j ام است. شکل ۲ چهار توربین موجود در یک مزرعه را نشان می‌دهد. وقتی باد در جهت مشخص می‌وزد، توربین‌های ۳ و ۴ به ترتیب و به طور کامل، در دنباله توربین‌های ۱ و ۲ قرار دارند. قسمتی از توربین ۳ در دنباله توربین ۴ قرار دارد و توربین‌های ۱ و ۲ در دنباله یکدیگر قرار ندارند. با تغییر جهت وزش باد در یک مزرعه، توربین‌های متفاوتی در دنباله یک توربین قرار می‌گیرند.

با تعمیم رابطه‌ی (۲) به صورت زیر، سرعت در محل هر توربین برای هر جهت خاص محاسبه می‌شود [۱۶].

در رابطه فوق ρ چگالی سیال، u_i مؤلفه‌های متوسط سرعت، τ_{ij} تانسور تنش، p فشار استاتیک و T دما هستند.

۴- محاسبه بازده مزرعه بادی

هر توربین بادی که در پایین‌دست توربین دیگری قرار می‌گیرد، تحت تاثیر جریان پشت روتور آن قرار می‌گیرد و سرعتی که به روتور آن می‌رسد کمتر از حالتی است که به تنهایی در آن مکان قرار می‌گیرد و در نتیجه تولید انرژی و بازده آن کاهش می‌یابد. حالت ایده‌آل این است که سرعت رسیده به توربین، برابر سرعت جریان آزاد شود. رابطه (۱۴) بازده مزرعه بادی را محاسبه می‌کند [۱۹]:

$$\eta_{fam} = P_{el}(\text{Farm}) / \sum_i P_{el}(\text{free}), i \quad (14)$$

در رابطه (۱۴)، صورت کسر، توان واقعی مزرعه بادی و مخرج کسر، توان در حالت ایده‌آل می‌باشد. توربینی که اطلاعات آن برای انجام محاسبات وارد شده، توربین وستاس با توان ۶۶۰ کیلووات است. این توربین در سرعت ۱۵ متر بر ثانیه به توان نامی خود می‌رسد. بر طبق رابطه بتز، توان آیرودینامیکی با رابطه (۱۵) محاسبه می‌شود [۸]:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho \pi r^2 U^3 C_p \quad (15)$$

که در آن ρ چگالی هواست که معادل $\frac{1,225 \text{ kg}}{\text{m}^3}$ ، شعاع توربین، U سرعت باد و C_p ضریب توان توربین است که بیان کننده بازده تبدیل توان در آن می‌باشد. حال با توجه به مشخصات توربین V47 که در جدول ۲ آمده است، می‌توان قدرت خروجی هر توربین را بر حسب سرعت باد رسیده به همان توربین بدست آورد. با جمع کردن قدرت خروجی توربین‌ها در کل مزرعه و مقایسه آن با توان ایده‌آل مزرعه می‌توان بازده را بدست آورد. حال با توجه به سرعت مقابل هر توربین توان تولیدی توربین بدست می‌آید:

$$P = 478.1U^3 \quad (16)$$

جدول ۲- مشخصات توربین باد وستاس

نوع توربین	VESTAS-V47
قدرت نامی	۶۶۰ (kW)
قطر روتور و ارتفاع هاب	۴۰ (m) و ۴۷ (m)
ضریب رانش (C_T)	۰/۸۸
ضریب توان (C_p)	۰/۴۵
ولتاژ خروجی	۶۹۰ (v)

پارامترهای نسبت سرعت نوک پره، ضریب توان، عدد رینولدز و ضریب گشتاور در رابطه زیر تعریف شده‌اند [۲۰]:

$$\lambda = \frac{u}{V} = \frac{\omega D}{2V}, C_p = \frac{2T\omega}{\rho V^3 h D}, Re = \frac{VD}{\nu}, C_M = \frac{C_p}{\lambda} \quad (17)$$

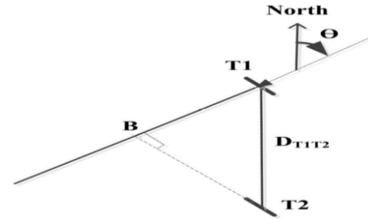
۵- شبیه‌سازی دنباله توربین باد Vestas-V47

توربین باد ۶۶۰ کیلوواتی تولید شرکت صابنرو مدنظر قرار گرفته است. مقاطع پره از ایرفویل‌های سری NACA-63 و FAA-W3 هستند. جهت شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان حول توربین بادی، از نرم‌افزار CFX-ANSYS و مدل $k-\omega$ SST استفاده شده است. هندسه توربین باد و ناحیه محاسباتی شامل پنج توربین باد شکل ۵ نشان داده شده است.

فاصله‌ی توربین اول تا نقطه B (BT1) محاسبه می‌شود. حال با توجه به رابطه‌ی (۵)، شعاع دنباله توربین T_1 در نقطه B محاسبه می‌شود [۱۷]:

$$R_w = r + x \tan(\alpha) \quad (5)$$

به طوری که α ضریب زاویه نوک مخروط و همان فاصله توربین اول تا نقطه‌ی B است. مقدار $\tan(\alpha)$ برابر ۰/۰۴ لحاظ شده است [۱۸].



شکل ۳- تعیین شعاع دنباله در نقطه B

۴. مقدار K_{TIT2} بنا بر رابطه‌های (۶)، (۷) و (۸) محاسبه می‌گردد:

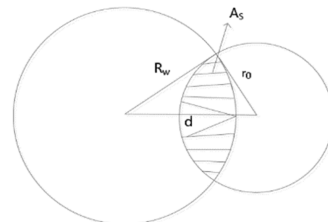
$$\text{if } (BT_2) > (R_w + r_0) \text{ then } K_{TIT2} = 0 \quad (6)$$

$$\text{if } (R_w - r_0) < (BT_2) < (R_w + r_0) \text{ then } 0 < K_{TIT2} < 1 \quad (7)$$

$$\text{if } (BT_2) < (R_w - r_0) \text{ then } K_{TIT2} = 1 \quad (8)$$

در رابطه فوق r_0 شعاع روتور توربین و R_w شعاع دنباله است. در حالتی که K_{TIT2} بین صفر و یک باشد، بین دو توربین هم‌پوشانی ایجاد می‌شود. در شکل ۴، مساحت ناحیه‌ی هاشور خورده، ناحیه‌ی هم‌پوشانی بین دنباله دو توربین را نشان می‌دهد، جایی که:

$$A_s = \cos^{-1} \left(\frac{R_w^2 + d^2 - r_0^2}{2R_w d} \right) \cdot R_w^2 + \cos^{-1} \left(\frac{d^2 + r_0^2 - R_w^2}{2r_0 d} \right) \cdot r_0^2 - \sin \left(\cos^{-1} \left(\frac{R_w^2 + d^2 - r_0^2}{2R_w d} \right) \right) \cdot R_w d \quad (9)$$



شکل ۴- ناحیه هم‌پوشانی بین دنباله دو توربین

K_{TIT2} از رابطه (۱۰) نتیجه می‌شود:

$$K_{TIT2} = \frac{A_s}{\pi r_0^2} \quad (10)$$

۳- معادلات حاکم

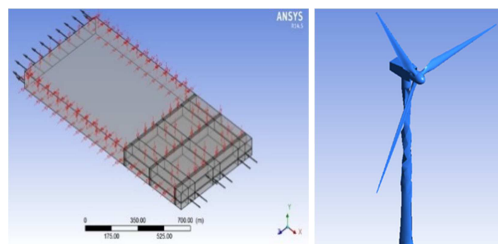
فرم کلی معادله بقای جرم، اندازه حرکت و انرژی بصورت زیر هستند:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_j) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_j) = - \frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_j \quad (12)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i (\rho E + p)) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i \tau_{ij} \right] \quad (13)$$

شبكة دارای لایه مرزی با ضخامت اولین لایه ۱ سانتی‌متر است. در شکل ۶ برشی از یک مقطع شبکه تولید شده نشان داده شده است.

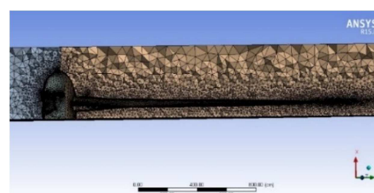


شکل ۵- هندسه توربین و ناحیه محاسباتی شامل پنج توربین باد

شبكة تولید شده پس از بررسی استقلال از شبکه، برای ناحیه محاسباتی شامل توربین باد منفرد در ناحیه‌ی دوار و ثابت به ترتیب دارای ۳۹۶۸۰۵۶ و در ۲۶۲۴۰۳ المان است؛ همچنین شبکه تولید شده برای ناحیه محاسباتی شامل ۵ توربین باد با فاصله پنج برابر قطر روتور از همدیگر، در ناحیه‌ی دوار و ثابت به ترتیب دارای ۱۷۱۳۸۰۱۵ و ۱۹۸۷۱۹۸ المان است. مقدار y^+ در این تحلیل حدود ۰/۷ بدست آمده است که نشان از دقت شبکه دارد. مقدار شرایط مرزی در جدول ۳ ارایه شده است.

جدول ۳- شرایط مرزی اعمال شده در ورودی ناحیه محاسباتی

مقدار	نوع شرط مرزی
۱۰ (m/s) ، ۶/۷ (m/s)	سرعت ورودی
۱۷/۶ (°C)	دمای هوا در ورودی
۰/۹۷۶ (bar)	فشار خروجی

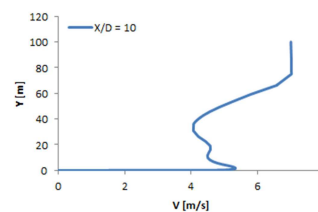


شکل ۶- برشی از یک مقطع تولید شده

۱-۵- تحلیل نتایج در ناحیه محاسباتی شامل یک

توربین باد

در این بخش نتایج حاصل از حل عددی توربین باد منفرد با فرض سرعت اولیه ۶/۷ m/s ارائه شده است. توربین باد در ناحیه‌ی محاسباتی به عنوان مبدأ مختصات در نظر گرفته شده است. منحنی سرعت باد بر روی خطوط عمودی واقع در مرکز ناحیه محاسباتی و در یک فواصل مشخص در پشت توربین بدست آمده و در شکل ۷ ارایه شده است.



شکل ۷- نمودار سرعت سیال در راستای y و در فواصل $x/D = 10$

با استخراج پروفیل سرعت مشاهده می‌شود که حداکثر به اندازه‌ی قطر پره توربین بادی جریان از اطراف تحت تاثیر قرار می‌گیرد. در شکل ۸ پروفیل سرعت در فاصله $x/D = 0/5$ و در راستای Z و سه ارتفاع $y = 20$ m ، $y = 40$ m و $y = 60$ m آورده شده است.

۲-۵- تحلیل نتایج در مزرعه بادی شامل پنج توربین

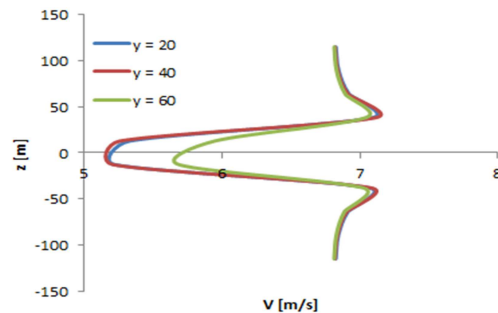
باد

در این بخش نتایج حاصل از حل عددی مزرعه بادی با فرض سرعت باد ۱۰ m/s ارائه شده است. توربین وسط در ناحیه محاسباتی به عنوان مبدأ مختصات در نظر گرفته شده است. در شکل ۹ کانتورهای سرعت در راستای x برای یک صفحه در فاصله مشخص نسبت به توربین مرکزی نشان داده شده است. با توجه به این کانتورها می‌توان گسترش گردابه توربین در جریان باد و از بین رفتن آن را مشاهده نمود. جدول ۴ بیان کننده سرعت جریان ورودی به هر توربین و بازده مزرعه بادی است. در ادامه به منظور ارزیابی رفتار پروفیل سرعت، مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از تحلیل توربین باد منفرد مورد پژوهش و یک پژوهش تجربی مشابه [۲۱]، صورت گرفته است. در شکل ۱۰ پروفیل سرعت حاصل از نتایج تجربی و عددی را در فواصل مشخص مقایسه شده‌اند. نتایج پژوهش حاضر نسبت به سرعت جریان آزاد و قطر روتور بی‌بعد شده است. نتایج نشان می‌دهد تطابق خوبی بین نتایج آزمایشگاهی و عددی برقرار است. اختلاف ۹٪ حاصل نیز به دلیل مدل توربولانسی انتخاب شده در شبیه‌سازی جریان می‌باشد.

۶- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر مدل متداول توربین بادی مورد استفاده در کشورمان انتخاب و رفتار جریان در مزرعه بادی مفروض با حل عددی بررسی شد. با توجه به نمودارهای پروفیل سرعت به خوبی مشخص شده است که حداکثر کاهش سرعت باد در عبور از توربین در ارتفاعی تقریباً برابر با پایه توربین اتفاق می‌افتد، همچنین پروفیل سرعت در پایین دست جریان و با فاصله گرفتن از توربین به پروفیل جریان آزاد نزدیک می‌شود، این نقصان سرعت با رسیدن به فاصله‌ی ۱۰ برابر قطر روتور در پشت توربین ۵۰٪ بهبود یافته و در فاصله‌ی ۲۰ برابر قطر روتور همچنان قابل مشاهده است و بهبود نقصان سرعت در فاصله‌ی ۲ تا ۶ برابری قطر روتور به مراتب از فاصله‌ی ۱۰ تا ۲۰ برابری قطر روتور بیشتر است. با توجه به کانتور سرعت در پایین دست جریان مشخص شد بیشترین کاهش سرعت بلافاصله در پشت توربین، پایه و اتاقک موتور توربین باد صورت گرفته است. با در نظر گرفتن فاصله ۵ برابر قطر روتور توربین‌های بادی از یکدیگر در مزرعه بادی، سرعت در صفحه‌ی ورودی به توربین‌ها با اعمال سرعت اولیه معین (۱۰ متر بر ثانیه) استخراج و مشخص شده است که بازده مزرعه بادی مقدار ۶۲/۲۶۳٪ است. همچنین نتایج حل عددی با پژوهش‌های تجربی مورد بررسی قرار گرفت که در این بخش نیز نتایج تطابق مطلوب را از خود نشان می‌دهد. در نهایت با توجه به بازده بدست آمده از مزرعه بادی مفروض می‌توان به این نتیجه رسید که بهترین فاصله برای جانمایی توربین‌های دیگر، ۵ برابر قطر روتور از پشت و ۱/۵ برابر قطر روتور از طرفین است.

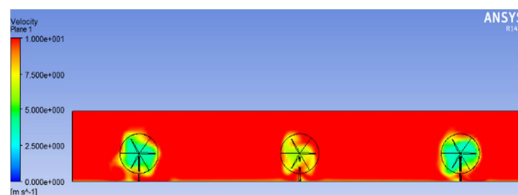
- [4] Dörenkämper, M., Witha, B., Steinfeld, G., Heinemann, D., Kühn, M., The impact of stable atmospheric boundary layers on wind-turbine wakes within offshore wind farms. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 144, pp. 146-153, (2015).
- [5] Qian, G. W., Ishihara, T., Numerical study of wind turbine wakes over escarpments by a modified delayed detached eddy simulation. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 191, pp. 41-53, 2019.
- [6] Sedaghatzadeh, N., Arjomandi, M., Kelso, R., Cazzolato, B., Ghayesh, M. H., Modelling of wind turbine wake using large eddy simulation. *Renewable Energy*, Vol. 115, pp. 1166-1176, 2018.
- [7] Lanchester F. W., A contribution to the theory of propulsion and the screw propeller. *Journal of the American Society for Naval Engineers*, Vol. 27, No. 2, pp. 509-510, 1915.
- [8] Betz A., Der Maximum der theoretisch mölichen Ausnützung des Windes durch Windmotoren. *Zeitschrift für das Gesamte Turbinenwesen*, No. 20, 1990.
- [9] Frandsen S., Barthelme R., Pryor S., Rathmann O., Larsen S., Højstrup J., and Thøgersen M., Analytical modelling of wind speed deficit in large offshore wind farms. *Wind Energy: An International Journal for Progress and Applications in Wind Power Conversion Technology*, Vol. 9, Issue 1-2, pp. 39-53, 2006.
- [10] Crasto G., Gravdahl A. R., CFD wake modeling using a porous disc. *European Wind Energy Conference and Exhibition*, Brussels, Belgium, 2008.
- [11] Whale J., Anderson C. G., Bareiss R., and Wagner S., An experimental and numerical study of the vortex structure in the wake of a wind turbine. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 84, No. 1, pp. 1-21, 2000.
- [12] Bastankhah M. and Porté-Agel F., A new analytical model for wind-turbine wakes. *Renewable Energy*, Vol. 70, pp. 116-123, 2014.
- [13] مشهدی م. و قاسمی‌اصل ر.، شبیه‌سازی و تحلیل دنباله توربین بادی Vestas-V47 با کمک دینامیک سیالات محاسباتی، دومین کنفرانس انرژی بادی، تهران، ایران، ۱۳۹۳.
- [14] Emami A. and Noghreh P., New Approach on Optimization in Placement of Wind Turbines with in Wind Farm by Genetic Algorithm. *Renewable Energy*, Vol. 35, No. 7, pp. 59-64, 2010.
- [15] Kim H., Singh C. and Sprintson A., A Simulation and Estimation of Reliability in a Wind Farm Considering the Wake Effect. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol. 3, No. 2, pp. 274-282, 2012.
- [16] شیخ حسینی ش. و فدائی نژاد م.، تعیین آرایش بهینه توربین‌ها برای مزرعه بادی در منطقه‌ی میل‌نادر، نشریه‌ی علمی پژوهشی مهندسی و مدیریت انرژی، سال سوم، شماره چهارم، ص ۱۴-۲۳، ۱۳۹۲.
- [17] Han X., Guo J., Wang P. and Ji Y., Adequacy Study of Wind Farms Considering Reliability and Wake Effect of WTGs, *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, Detroit, MI, USA, 2011.
- [18] González J. S., Payán M. B. and Santos J. R., A new and efficient method for optimal design of large offshore wind power plants. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 28, No. 3, pp. 3075-3084, 2013.
- [19] عاطفی ز.، بهینه‌سازی محل استقرار توربین‌های بادی در یک مزرعه. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۸۷.
- [20] Akwa J. V., Vielmo H. A. and Petry A. P., A review on the performance of Savonius wind turbines. *Renewable and sustainable energy reviews*, Vol. 16, No. 5, pp. 3054-3064, 2012.
- [21] Alfredsson P. H. and Dahlberg J.A., A preliminary wind tunnel study of windmill wake dispersion in various flow conditions, *Technical Note of the Aeronautical Research Institute of Sweden (FFA) UA-1499*, Part 7, 1979.



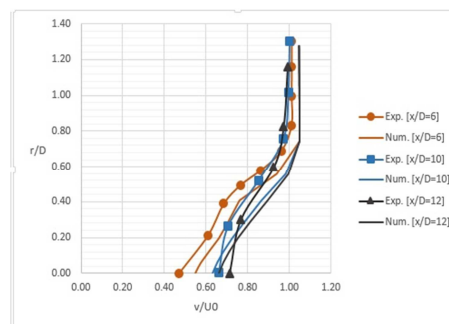
شکل ۸- پروفیل سرعت در فاصله $\frac{x}{D} = 0.5$ و در راستای z و سه ارتفاع مختلف

جدول ۴- مقادیر محاسبه شده سرعت در مقابل هر ردیف توربین و بازده مزرعه

Efficiency (%)	U5 (m/s)	U4 (m/s)	U3 (m/s)	U2 (m/s)	U1 (m/s)
۶۲/۲۶۳	۶/۹۷۱	۶/۹۷۲	۹/۱۵۵	۹/۴۱۲	۹/۴۱۳



شکل ۹- کانطور سرعت در راستای x در فاصله $\frac{x}{D} = 1.0$



شکل ۱۰- پروفیل سرعت در فواصل ۶، ۱۰، ۱۲ در پایین دست

۷- مراجع

- [1] Koch F, Gresch M, Shewarega F, Erlich I, Bachmann U., Consideration of wind farm wake effect in power system dynamic simulation. *IEEE Russia Power Tech Conference*, St. Petersburg, Russia, 2005.
- [2] Wu, Y.T., Porté-Agel, F., Modeling turbine wakes and power losses within a wind farm using LES: An application to the Horns Rev offshore wind farm. *Renewable Energy*, Vol. 75, pp.945-955, 2015.
- [3] Xie, S., Archer, C.L. A Numerical Study of Wind-Turbine Wakes for Three Atmospheric Stability Conditions. *Boundary-Layer Meteorol*, Vol. 165, pp. 87-112, 2017.