نشریه علمی‌پژوهشی مهندسی و مدیریت انرژی
سال پنجم، شمارهٔ چهارم/ زمستان ۱۳۹۴/ صفحه ۵۰ـ۶۱

شبیه‌سازی و تحلیل دنبالهٔ یک توربین بادی نمونه در مزرعهٔ بادی با کمک دینامیک سیالات محاسباتی

جاماسب پیرکندی[۱*]، مهرداد مشهدی[۲]، مهران نصرت‌الهی[۳]

[۱] استادیار مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران
jamasb_p@yahoo.com
[۲] کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)، تهران، ایران
mehrdadmashhadi@gmail.com
[۳] دانشیار مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران
mnosratollahi@gmail.com

چکیده: در این مقاله، مکان مناسب جای‌گذاری توربین باد وستاس در یک مزرعهٔ بادی با کمک نرم‌افزار ANSYS-CFX تعیین شده است. ابتدا هندسه کامل توربین باد ایجاد شده و یک شبکهٔ بی‌سازمان در اطراف پره‌های آن تولید می‌شود. در ادامه، معادلات جریان روی توربین باد با اعمال معادلات اغتشاش و براساس معادلهٔ انتقال تنش برشی حل شده است. همچنین، کانتورهای سرعت باد در دنباله و برای مزرعهٔ بادی شامل دو توربین باد متوالی با فواصل مختلف، استخراج شده و به‌وسیلهٔ آن رفتار فیزیکی دنبالهٔ توربین باد مشاهده شده است. با درنظرگرفتن دو توربین باد در فاصله‌های ۵ و ۷/۵ برابر قطر روتور از یکدیگر، پروفیل‌های سرعت استخراج شده و مشخص گردید که حداکثر کاهش سرعت باد در عبور از توربین در ارتفاعی تقریباً برابر با پایهٔ توربین و به‌ترتیب در فواصل ۸ و ۱۲ برابر قطر روتور اتفاق افتاده است. نتایج نشان می‌دهد که بازده بیشینهٔ مزرعهٔ بادی درصورتی‌که فاصلهٔ دو توربین ۵ برابر قطر روتور و سرعت ورودی به ناحیهٔ محاسباتی ۱۰m/s باشد، ۷۹/۰۲ درصد است. زمانی که فاصلهٔ دو توربین ۷/۵ برابر قطر روتور و سرعت ورودی به ناحیهٔ محاسباتی ۱۵m/s باشد، مقدار بازدهی ۷۸/۵۲ درصد خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: انرژی باد، توربین باد، مزرعهٔ بادی، دینامیک سیالات محاسباتی، وستاس.

* نویسندهٔ مسئول

۱. مقدمه

توربین باد وسیله‌ای است که انرژی باد را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. این عمل توسط پره‌ها که به یک هاب[1] متصل‌اند و در پاسخ به نیروهای آیرودینامیکی وارد بر پره‌های توربین می‌چرخند، حاصل می‌شود. این چرخش یک ژنراتور را به حرکت درمی‌آورد و بدین گونه الکتریسته تولید و به شبکهٔ برق انتقال داده می‌شود. مزرعهٔ بادی مجموعه‌ای از توربین‌های بادی است و می‌تواند به‌عنوان یک نیروگاه تصور شود. یک مزیت مزرعهٔ بادی این است که هزینه‌های ثابت (هزینه‌های مدیریت، هزینه‌های مرتبط به شبکه‌های الکتریکی و هزینه‌های توسعهٔ پروژه) برای نصب چندین توربین بادی پخش شده‌اند [۱].

در یک مزرعهٔ بادی، توربین پایین دست تحت تأثیر پدیدهٔ دنبالهٔ ناشی از توربین بالادست قرار دارد. دنباله دارای دو اثر است: اول کاهش در سرعت باد که به کاهش توان خروجی مزرعهٔ باد منجر می‌شود و دوم افزایش اغتشاش در باد که باعث افزایش بارگذاری دینامیکی بر توربین‌های پایین‌دست می‌شود. دنبالهٔ توربین‌های باد برای سال‌های زیادی مورد بررسی قرارگرفته‌اند و مدل‌های مختلف توسط محققان توسعه یافته‌اند [۲ـ۶]. این مدل‌ها می‌توانند به دو دستهٔ اصلی تقسیم شوند، مدل‌های تحلیلی دنباله و مدل‌های محاسباتی دنباله. مدل تحلیلی، سرعت در دنباله را با مجموعه‌ای از عبارات تحلیلی توصیف می‌کند، درحالی‌که در مدل‌های محاسباتی، معادلات جریان سیال برای به‌دست‌آوردن میدان سرعت دنباله حل می‌شوند.

مدل تحلیلی دنباله در ابتدا توسط لانچستر [۷] و بتز [۸] معرفی شد؛ مبنای تحقیق آن‌ها استفاده از روش حجم کنترل به‌منظور ارائهٔ یک مدل ریاضی- فیزیکی برای دنبالهٔ پشت توربین باد بود. فراندسن [۹] کلیتی از فرضیات لانچستر/ بتز را توسعه داد و مجموعه‌ای از مدل‌های دنبالهٔ توسعه‌یافتهٔ قبلی را به‌دست آورد که به‌خوبی توانست از آن‌ها برای پیشبرد اثر دنباله‌های چندگانه استفاده کند. مدل توسعه‌یافتهٔ فراندسن تنها محدود به به‌کارگیری مجموعه‌ای از هندسه‌های منظم بود. کراستو و همکاران [۱۰] دنبالهٔ یک توربین باد منفرد را با استفاده از تکنیک دینامیک سیالات محاسباتی مدل‌سازی کردند. آن‌ها از حل‌کنندهٔ رَنز[2] و مدل توربولانسی $k-\varepsilon$ برای این منظور استفاده نمودند. سِدریک و همکاران [۱۱] مدل‌سازی دنبالهٔ توربین باد را در لایهٔ مرزی اتمسفری مورد بررسی قرار دادند و از روش مدل‌سازی دیسک پسایی[3] برای مدل‌کردن دنباله استفاده کردند. روش κ-ε برای مدل‌سازی توربولانس و نرم‌افزار تجاری فلوئنت برای این منظور استفاده شد. در این تحقیق، اثر پایداری دمایی لایهٔ مرزی بررسی شده است و قدرت خروجی توربین و توسعهٔ دنبالهٔ توربین در چند لایهٔ دمایی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به‌دست‌آمده دقت بالای این روش را در مقایسه با نتایج تجربی نشان می‌دهند. وِیل و همکاران [۱۲] یک توربینِ نمونه را برای بررسی دنبالهٔ توربین مورد بررسی قرار دادند. توربین مورد آزمایش، یک توربین با دو تیغهٔ صفحهٔ صاف و بدون پیچش است که در آن، نسبت سرعت نوک پره به سرعت آزاد از ۳ تا ۸ متغیر است. برای مدل‌سازی عددی از روش شبکهٔ چرخشی روتور[4] استفاده شده که یک روش غیر ویسکوز و چرخش آزاد[5] است. وِرل [۱۳] مدل دنباله‌ای را ارائه کرد که شامل یک مدل دقیق برای ناحیهٔ غیر لزجِ دنبالهٔ نزدیک[6]، راه حل پرانتل[7] برای ناحیهٔ میانی دنبالهٔ و یک مدل بر مبنای تجزیه و تحلیل متقارن رابطهٔ پرانتل برای ناحیهٔ دنبالهٔ دور بود.

در پژوهش اخیر [۱۴] با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی به تحلیل دنبالهٔ پشت توربین بادی پرداخته شد که در همین راستا پروفیل سرعت باد در دنباله استخراج شده و مقایسه‌ای بین مدل پژوهش مذکور و مدل تحلیلی فراندسن صورت گرفته است که نتیجهٔ حاصل صحه بر ضعف مدل فراندسن در ارائهٔ پروفیل سرعت پشت توربین باد مذکور می‌گذارد.

در مقالهٔ حاضر، پس از تولید هندسهٔ کامل توربین باد وستاس، به کمک نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی (ANSYS-CFX) و با استفاده از مدل توربولانسی انتقال تنش برشی، به تحلیل عملکرد توربین‌ها و تأثیر آن‌ها بر یکدیگر در فواصل مختلف و در سرعت‌های مشخص پرداخته شده که تاکنون کار مشابهی در این زمینه انجام نشده است. پروفیل‌های سرعت در فواصل مختلف در پایین‌دست جریان برای انجام مقایسهٔ مناسب استخراج شده است. به‌علاوه کانتورهای سرعت در مزرعهٔ بادی شامل پنج توربین باد به‌منظور مشاهدهٔ رفتار جریان در فواصل مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین توان تولیدی توربین‌ها و در نتیجه بازده مزرعهٔ بادی مفروض به‌دست آمده‌اند.

۲. طراحی مزرعه

برای توصیف اثر دنباله در مزارع بادی، معمولاً از مدل جنسن استفاده می‌شود. براساس این مدل که در شکل (۱) نشان داده شده است، سرعت کاهش‌یافته با استفاده از رابطهٔ (۱) محاسبه می‌شود [۱۵].

1. Hub
2. RANS
3. Drag Disk
4. Rotor Vortex Lattice Method (RVOLM)
5. Free Wake
6. Near wake
7. Prandtl

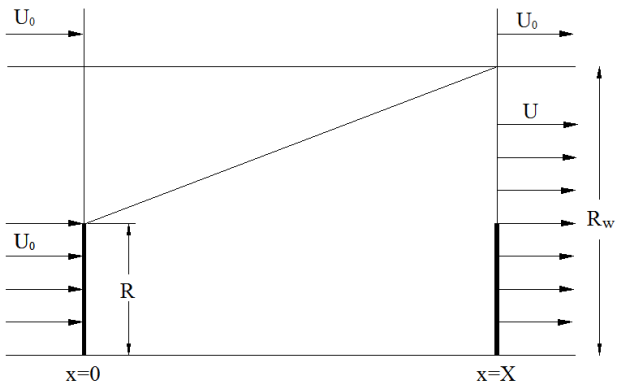
$$U = U_0\left[1-(1-\sqrt{(1-C_T)}).(\frac{r}{r+kx})^2\right] \quad (۱)$$

در رابطهٔ فوق، U_0 سرعت اولیه، x فاصلهٔ بین دو توربین، r شعاع روتور توربین بالادست، C_T ضریب گشتاور و k ثابت گسترش دنباله است. گاهی اوقات ممکن است یک توربین در دنبالهٔ چند توربین دیگر قرار گیرد. بر طبق نظریهٔ تعادل انرژی جنبشی، سرعت در محل این توربین از رابطهٔ (۲) محاسبه می‌شود [۱۶].

$$U_i = U_0\left[1-\sqrt{\sum_{j=1}^{N}(1-\frac{U_{ij}}{U_0})^2}\right] \quad (۲)$$

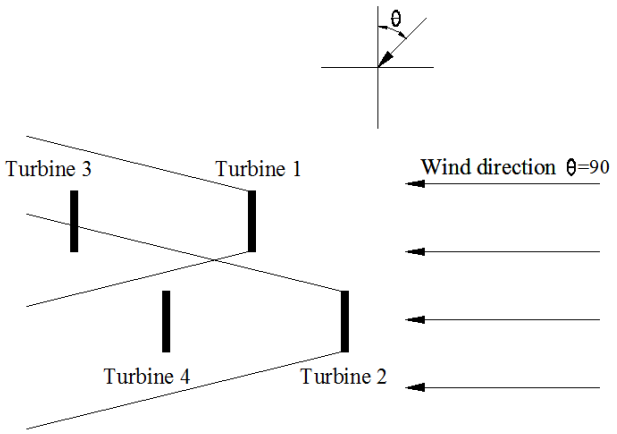
در رابطهٔ فوق، N تعداد توربین‌ها و U_{ij} سرعت در محل توربین iام ناشی از دنبالهٔ توربین jام است. شکل (۲) چهار توربین موجود در یک مزرعه را نشان می‌دهد. وقتی باد در جهت مشخص می‌وزد، توربین‌های ۳ و ۴ به‌ترتیب و به‌طور کامل، در دنبالهٔ توربین‌های ۱ و ۲ قرار دارند. قسمتی از توربین ۳ در دنبالهٔ توربین ۴ قرار دارد و توربین‌های ۱ و ۲ در دنبالهٔ یکدیگر قرار ندارند. با تغییر جهت وزش باد در یک مزرعه، توربین‌های متفاوتی در دنبالهٔ یک توربین قرار می‌گیرند. با تعمیم رابطهٔ (۲) به‌صورت زیر، سرعت در محل هر توربین برای هر جهت خاص محاسبه می‌شود [۱۷]:

$$U_{i\theta} = U_0\left[1-\sqrt{\sum_{j=1}^{N}K_{ij\theta}(1-\frac{U_{ij}}{U_0})^2}\right] \quad (۳)$$



شکل (۱): مدل دنبالهٔ جنسن

در روابط فوق، θ بیان‌کنندهٔ جهت وزش باد و $U_{i\theta}$ سرعت باد در محل توربین iام در جهت θ است. $K_{ij\theta}$ نیز نشان‌دهندهٔ تأثیر توربین jام در کاهش سرعت توربین iام در جهت θ بوده که مقادیر صفر و یک یا عددی بین این دو به خود می‌گیرد. اگر $K_{ij\theta}$ صفر باشد، یعنی توربین iام در جهت θ در دنبالهٔ توربین jام قرار ندارد. اگر $K_{ij\theta}$ یک باشد، یعنی توربین iام در جهت θ به‌طور کامل، در دنبالهٔ توربین jام قرار دارد و اگر $K_{ij\theta}$ بین صفر و یک باشد، قسمتی از توربین iام در جهت θ در دنبالهٔ توربین jام قرار دارد.



شکل (۲): مدل یک مزرعهٔ بادی

برای تعیین اینکه کدام توربین‌ها و چه مقدار از آن‌ها در دنبالهٔ 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 jام می‌تواند در دنبالهٔ توربین iام قرار گیرد.

جدول (۱): تقسیم بندی جهت باد و مختصات توربین‌ها

X , Y	θ
Xj < Yi	π/4 ≤ θ <3π/4
Yj < Yi	3π/4 ≤ θ <5π/4
Xj > Xi	5π/4 ≤ θ <7π/4
Yj > Yi	7π/4 ≤ θ <9π/4

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

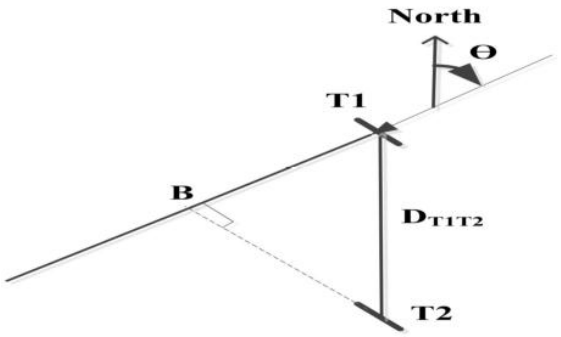
$$y = m(x - X_i) + Y_i \quad (۴)$$

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

۳. با توجه به شکل (۳)، فاصلهٔ عمود توربین‌هایی که شرایط مرحله اول را دارند تا خط گذرنده از توربین iام (BT_2) محاسبه شده، سپس طبق قضیهٔ فیثاغورث و با توجه به فاصلهٔ بین دو توربین (D_{T1T2})، فاصلهٔ توربین اول تا نقطهٔ B (BT_1) محاسبه می‌شود. حال با توجه به رابطهٔ (۵)، شعاع دنبالهٔ توربین T_1 در نقطهٔ B محاسبه می‌شود [۱۸].

$$R_w = r + x\tan(\alpha) \quad (۵)$$

ضریب زاویهٔ نوک مخروط، همان فاصلهٔ توربین اول تا نقطهٔ B است. مقدار $\tan(\alpha)$ برابر ۰/۰۴ در نظر گرفته می‌شود [۱۹].



شکل (۳): تعیین شعاع دنباله در نقطهٔ B

۴. مقدار K_{T1T2} بنا بر رابطه‌های (۶)، (۷) و (۸) محاسبه می‌شود:

$$\text{If } (BT_2) > R_w + r_0 \text{ then } \quad K_{T1T2=0} \qquad (۶)$$

$$\text{If } (R_w - r_0) < BT_2 < (R_w + r_0) \text{ then } 0 < K_{T1T2} < 1 \qquad (۷)$$

$$\text{If } (BT_2) < Rw - r_0 \text{ then } \quad K_{T1T2} = 1 \qquad (۸)$$

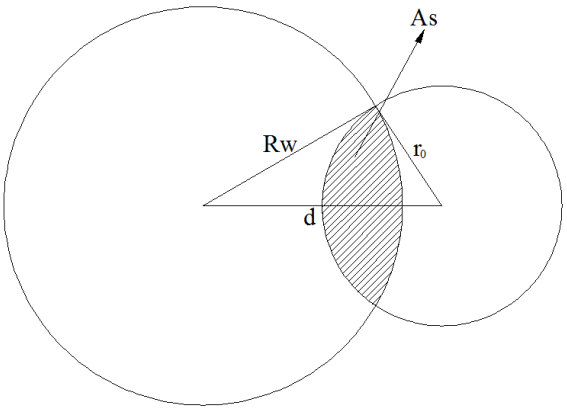
در رابطهٔ فوق، r_0 شعاع روتور توربین و R_w شعاع دنباله است.

در حالتی که K_{T1T2} بین صفر و یک باشد، بین دو توربین هم‌پوشانی ایجاد می‌شود. به عبارت دیگر، دنبالهٔ توربین اول مقداری از مساحتی را که پره‌های توربین دوم جارو می‌کند، در بر می‌گیرد. در شکل (۴)، مساحت ناحیهٔ هاشورخورده، ناحیهٔ هم‌پوشانی بین دنبالهٔ یک توربین و توربین دیگر را نشان می‌دهد که به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned} A_S = & Cos^{-1}\left(\frac{R_w^2 + d^2 - r_0^2}{2 R_w d}\right).R_w^2 \\ & + Cos^{-1}\left(\frac{d^2 + r_0^2 - R_w^2}{2 r_0 d}\right).r_0^2 \\ & - Sin\left(Cos^{-1}\left(\frac{R_w^2 + d^2 - r_0^2}{2 R_w d}\right)\right).R_w d \end{aligned} \qquad (۹)$$

K_{T1T2} از رابطهٔ (۱۰) نتیجه می‌شود:

$$K_{T1T2} = \frac{A_S}{\pi r_0^2} \qquad (۱۰)$$



شکل (۴): ناحیهٔ هم‌پوشانی بین دنبالهٔ یک توربین و توربین دیگر

۳. معادلات حاکم

یکی از روش‌های عددی برای حل معادلات حاکم به شکل انتگرالی، روش حجم محدود یا حجم کنترل است. در این روش، دامنهٔ فیزیکی به تعدادی حجم کوچک تقسیم می‌شود و متغیرهای وابسته یا در مراکز حجم‌ها و یا در گوشه‌های آن‌ها محاسبه می‌شود.

در حل شکل انتگرالی معادلات به روش حجم محدود معادلات بقای جرم و مومنتوم حل می‌شوند. برای جریان‌های تراکم‌پذیر معادلهٔ بقای انرژی نیز حل می‌شود. همچنین برای شبیه‌سازی آشفتگی جریان، معادلات انتقال نیز برای متغیرهای جریان آشفته حل می‌شود. در این قسمت به اختصار این معادلات بررسی می‌شوند [۲۰].

۱.۳. معادله بقای جرم

معادله بقای جرم یا پیوستگی به‌صورت (۱۱) نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \qquad (۱۱)$$

در رابطهٔ (۱۱) ρ چگالی سیال و u_i مؤلفه‌های متوسط سرعت است.

۲.۳. معادلهٔ اندازهٔ حرکت

معادلهٔ اندازهٔ حرکت در جهت i به‌صورت (۱۲) نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} + \rho g_i \qquad (۱۲)$$

در رابطهٔ (۱۲)، p فشار متوسط استاتیک، τ_{ij} تانسور[1] تنش و ρg_i نیروی جسمی گرانشی در جهت i می‌باشد. در این رابطه، تانسور تنش به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\tau_{ij} = \left[\mu_{eff}\left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right)\right] - \frac{2}{3}\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\delta_{ij} \qquad (۱۳)$$

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \qquad (۱۴)$$

μ لزجت گردابه‌ای سیال بوده و μ_t که جزء خواص سیال نیست، تحت عنوان لزجت برشی در جریان‌های آشفته تعریف می‌شود.

۳.۳. معادلهٔ انرژی

معادلهٔ انرژی به‌صورت (۱۵) نوشته می‌شود:

1. Tensor

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E)+\nabla.(\upsilon(\rho E+p))= \quad (۱۵)$$
$$\nabla.\left(k_{eff}-\sum_j h_j j_j+(\tau_{ij}.v)\right)+s_h$$

ρ چگالی سیال و E با رابطهٔ (۱۶) تعریف می‌شود:

$$E=h-\frac{p}{\rho}+\frac{\upsilon^2}{2} \quad (۱۶)$$

۴. محاسبهٔ بازده مزرعهٔ بادی

هر توربین بادی که در پایین‌دست توربین دیگری قرار می‌گیرد، تحت تأثیر 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. این کاهش بازده با فاصله از توربین‌های بالادست نسبت عکس دارد. اگر توربین بادی در مکانی قرار گیرد که سرعت جریان نزدیک‌تر به سرعت جریان آزاد باشد، بازده بیشتری خواهد داشت. حالت ایدئال این است که سرعت رسیده به توربین، برابر سرعت جریان آزاد شود. معادلهٔ (۱۷) بازده مزرعهٔ بادی را محاسبه می‌کند [۲۱ و ۲۲].

$$\eta_{farm}=\frac{P_{el}(Farm)}{\sum_i P_{el}(free),i} \quad (۱۷)$$

در معادلهٔ (۱۷)، صورت کسر توان واقعی مزرعهٔ بادی و مخرج کسر توان در حالت ایدئال است. برای به حداکثر رساندن این بازده نحوهٔ چینش توربین‌های بادی در مزرعه حائز اهمیت است.

با توجه به مشخصات توربین‌ها و سایت، سرعت مقابل هر توربین و بازده هر ردیف مزرعه را می‌توان به‌دست آورد. توربینی که اطلاعات آن برای انجام محاسبات وارد شده، توربین وستاس با توان ۶۶۰ کیلووات است. توربین وستاس دارای قطر روتور ۴۷ متر و ارتفاع هاب برابر ۴۰ متر است. این توربین در سرعت ۱۵ متر بر ثانیه به توان نامی‌خود می‌رسد.

بر طبق رابطه‌ای که اولین بار توسط بتز ارائه شد، توان آئرودینامیکی یک توربین بادی توسط رابطهٔ (۱۸) بیان می‌شود [۸]:

$$P_w=\frac{1}{2}\rho\pi r^2U^3C_p \quad (۱۸)$$

که در آن ρ چگالی هواست که معادل $1.225\ Kg/m^3$، r شعاع توربین، U سرعت باد و C_P ضریب توان توربین است که بیان‌کنندهٔ بازده تبدیل توان در آن است. حال با توجه به مشخصات توربین V47 که در جدول (۲) آمده است، می‌توان قدرت خروجی هر توربین را برحسب سرعت باد رسیده به همان توربین به‌دست آورد. با جمع کردن قدرت خروجی توربین‌ها در کل مزرعه و مقایسهٔ آن با توان ایدئال مزرعه (توانی که در آن فرض شده تمامی توربین‌ها با سرعت جریان آزاد بادU تولید توان می‌کنند) می‌توان بازده را به‌دست آورد.

جدول (۲): مشخصات توربین باد وستاس

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

حال با توجه به سرعت مقابل هر توربین (U) در یک ردیف مشخص، توان تولیدی توربین از رابطهٔ (۱۹) به‌دست می‌آید:

$$P=478.1\ U^3 \quad (۱۹)$$

۵. شبیه‌سازی و تحلیل دنبالهٔ توربین باد Vestas-V47

توربین باد ۶۶۰ کیلوواتی تولید شرکت صبانیرو، تنها سازندهٔ توربین بادی در ایران و خاورمیانه است که تکنولوژی آن از شرکت دانمارکی وستاس انتقال داده شده است. این توربین بخش اعظمی از نیروگاه‌های بادی کشور را شامل می‌شود. مقاطع پره از بالواره‌های سری NACA-63- و FAA-W3 تشکیل شده است.

برای شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان حول توربین بادی، باید معادلات ناویر- استوکس حاکم بر جریان در آن حل شوند. در روش‌های تحلیل سه‌بعدی که از روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی استفاده می‌کنند، عموماً هیچ نوع ساده‌سازی در معادلات صورت نمی‌گیرد و معادلات به‌طور کامل گسسته‌سازی و حل می‌شوند. برای انجام این نوع تحلیل از ابزار تحلیل سه‌بعدی ANSYS-CFX استفاده شده است.

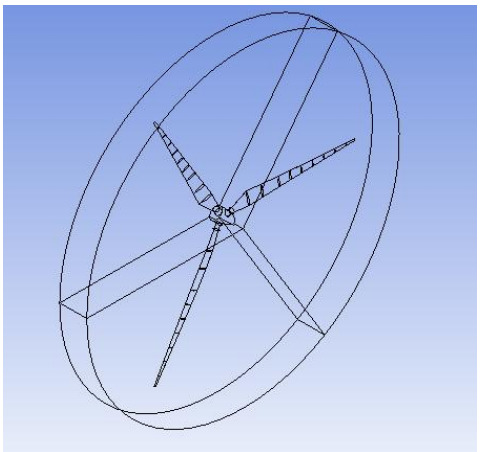
به‌منظور شبیه‌سازی آشفتگی جریان از مدل SST k-ω[1] استفاده شده است. این مدل به‌منظور آمیختن فرمول‌بندی دقیق و قدرتمند k-ω در نواحی نزدیک دیواره با مدل k-ε مستقل از جریان آزاد در نواحی دور از دیواره ارائه شده است. یعنی این مدل به‌طور همزمان توانایی بالای مدل k-ω در نواحی با عدد رینولدز پایین و توانایی بالای مدل k-ε در نواحی با عدد رینولدز بالا را در اختیار گرفته است. نیرومندی، اقتصادی بودن، دقت مناسب و تحلیل جریان‌های همراه با جدایش لایهٔ مرزی از مهم‌ترین مزایای استفاده از این مدل توربولانسی است [۲۳].

1. Shear Stress Transport

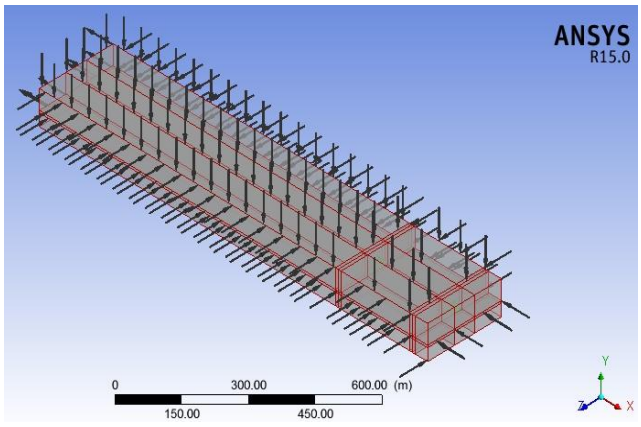
هندسهٔ توربین باد همان‌طور که در شکل (۵) مشخص است، به‌صورت کامل ایجاد و به‌منظور استفادهٔ حداکثر از شبکه‌های باسازمان ناحیهٔ محاسباتی بلوک‌بندی شده است.

شکل (۵): هندسهٔ توربین باد

بدین منظور با توجه به دوار بودن پره‌های توربین بادی از نواحی دوار[1] نرم‌افزار CFX استفاده شده است. در همین راستا همان‌طور که در شکل (۶) مشخص است، یک استوانه به قطر ۵۵ متر و ضخامت ۶ متر در اطراف سه پره توربین باد در نظر گرفته شده است. ناحیهٔ محاسباتی شامل دو توربین باد است که یک بار در فاصلهٔ پنج برابر قطر روتور و بار دیگر در فاصلهٔ هفت و نیم برابر قطر روتور از یکدیگر قرار دارند. همچنین در ناحیهٔ مذکور راستای x هم امتداد با محور چرخش، راستای y ارتفاع از سطح زمین، راستای z امتداد عرضی توربین باد و D قطر روتور را نشان می‌دهد. شکل (۷) ناحیهٔ محاسباتی و نحوهٔ بلوک‌بندی آن را نمایش می‌دهد.



شکل (۶): ناحیهٔ دوار در اطراف پره‌های توربین باد



شکل (۷): ناحیهٔ محاسباتی

بعد از بلوک‌بندی هندسه، قدم بعدی تولید شبکهٔ محاسباتی است. در ناحیهٔ دوار، شبکهٔ تولید شده بی‌سازمان و همراه با شبکهٔ لایهٔ مرزی در اطراف پره‌هاست که در شکل (۸) نشان داده شده است. همچنین برای درنظرگرفتن گرادیان‌های سرعت زیاد ناشی از دیواره، لایهٔ مرزی در اطراف دیواره‌های جامد (پایه و اتاقک موتور توربین بادی) از شبکهٔ لایه مرزی استفاده شده است. در شکل (۹) برشی از یک مقطع شبکهٔ تولیدشده نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ضخامت اولین لایهٔ در نظر گرفته‌شده ۱ سانتی‌متر است. همچنین تعداد ۷ لایه با ضریب رشد ۱/۱ برای ایجاد شبکهٔ لایه مرزی تعریف شده است.

مدل آشفتگی *SST k-ω* در نرم‌افزارCFX به‌طور پیش‌فرض از توابع دیواره بهبودیافته استفاده می‌کند و به همین دلیل حساسیت بسیار کمتری نسبت به مدل‌های آشفتگی *k-ε* و *k-ω* استاندارد، به مقدار فاصلهٔ متوسط بدون بعد اولین گره از دیواره (y^+) دارد [۲۳].

مقدار y^+ در این مدل باید با استفاده از مطالعهٔ استقلال از شبکه به‌دست آید. همان‌طور که مشاهده می‌شود، شبکه در نزدیکی پره به‌دلیل مهم بودن گرادیان‌های سرعت در این ناحیه ریز شده و مقدار y^+ برای شبکهٔ مورد استفاده در شبیه‌سازی برابر ۰/۷ است. شبکهٔ تولیدشده با در نظرگرفتن استقلال از شبکه و برای ناحیهٔ محاسباتی شامل ۲ توربین باد با فاصلهٔ پنج برابر قطر روتور، در جدول (۳) نمایش داده شده است. در ناحیهٔ دوار دارای ۱۸۶۸۰۱۶گره و ۷۹۳۶۱۱۲ المان و در ناحیهٔ ثابت دارای ۱۰۰۴۴۴۷ گره و ۱۲۸۹۷۵۰ المان است؛ همچنین شبکهٔ تولید شده برای ناحیهٔ محاسباتی شامل ۲ توربین باد که هفت و نیم برابر قطر روتور از یکدیگر فاصله دارند، در ناحیهٔ دوار دارای ۱۸۶۸۰۱۶ گره و ۷۹۳۶۱۱۲ المان و در ناحیهٔ ثابت دارای ۹۱۶۴۴۶ گره و ۱۱۵۱۵۰۳ المان است.

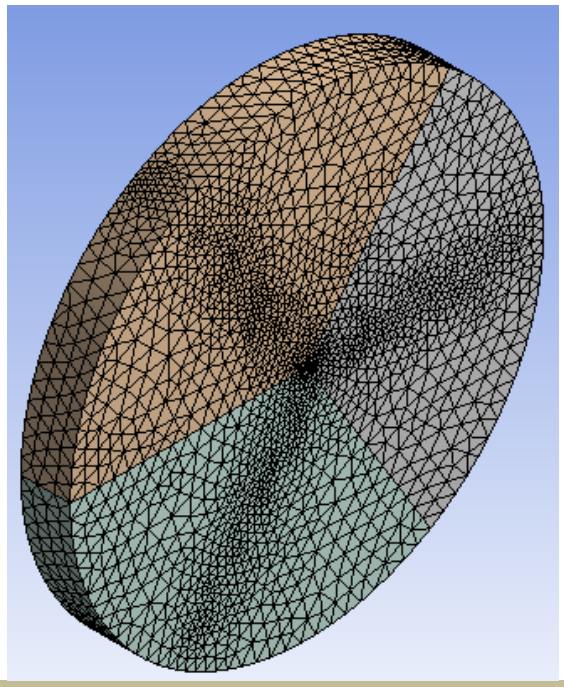
1. Domain Rotating

جدول (۳): نحوهٔ انتخاب المان‌ها با درنظرگرفتن استقلال از شبکه

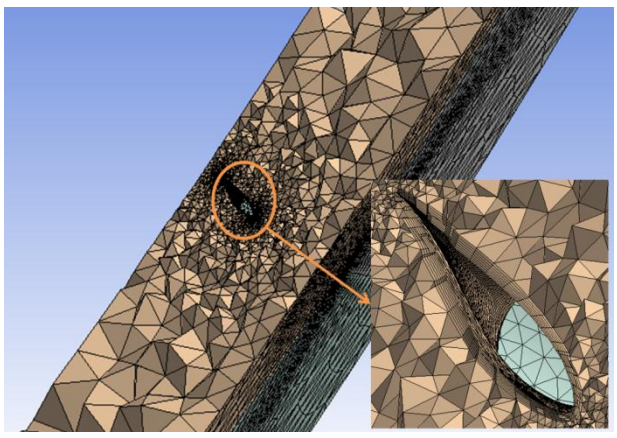
فاصله	تعداد المان در مرحله اول	تعداد المان در مرحله دوم	تعداد المان در مرحله سوم	تعداد المان در مرحله چهارم
5D	۸۱۲۵۲۲۱	۸۹۰۰۱۴۵	۹۲۲۵۸۶۲	۹۶۵۶۲۳۶
7.5D	۷۹۵۶۱۵۶	۸۶۵۶۱۲۳	۹۰۸۷۶۱۵	۹۴۸۷۶۱۵

با توجه به جدول (۳)، اختلاف نتایج مرحلهٔ سوم و چهارم بسیار ناچیز است، بنابراین تعداد المان‌ها در مرحلهٔ سوم برای ایجاد شبکه مناسب انتخاب شده است. (همچنین شایان ذکر است که ناحیهٔ محاسباتی در فاصلهٔ ۷/۵ برابر قطر روتور کوچک‌تر در نظر گرفته شده است.)

با توجه به فیزیک مسئله و همچنین شرایط جغرافیایی مزرعهٔ بادی منجیل شرط مرزی مناسب تعیین و در آخر به کمک نرم‌افزار فوق معادلات جریان حول توربین باد حل شده است. جدول (۴) شرایط مرزی اعمال شده در ورودی ناحیهٔ محاسباتی را نمایش می‌دهد.



شکل (۸): شبکهٔ اطراف ناحیهٔ دوار



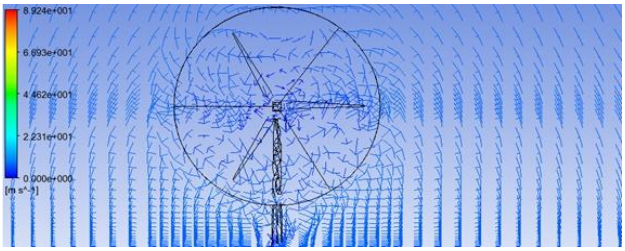
شکل (۹): برشی از یک مقطع شبکهٔ تولیدشده

جدول (۴): شرایط مرزی اعمال‌شده در ورودی ناحیهٔ محاسباتی

مقدار	نوع شرط مرزی
۱۰ m/s ۱۲/۵ m/s ۱۵ m/s	سرعت ورودی
۱۷/۶ ^{0}C	دمای هوا در ورودی

۱.۵. تحلیل نتایج در فاصلهٔ پنج برابر قطر روتور

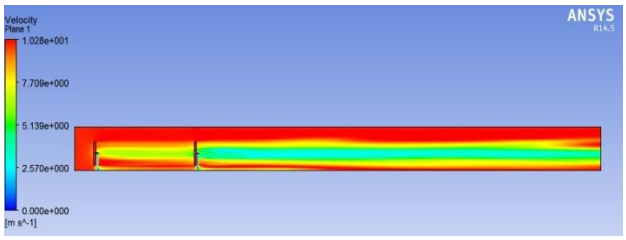
در شکل (۱۰)، بردار سرعت در صفحه‌ای عمود بر جریان باد و در فاصلهٔ x/D = 0.5 در پشت توربین نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، جریان باد در پشت توربین دارای چرخش ساعتگرد است که به‌علت چرخش توربین در باد القا می‌شود. این چرخش جریان در پشت توربین و با فاصله گرفتن از توربین از بین می‌رود. یکی از تفاوت‌های روش مدل‌سازی دیسک عامل[1] با چرخش در مقایسه با روش دیسک عامل بدون چرخش، القای چرخش جریان به‌علت چرخش توربین در روش دیسک عامل با چرخش است. این روش همچنین، نیروهای روی صفحه را به‌صورت شعاعی تقسیم می‌کند. این نیروها شامل نیروهای پسایی و چرخشی هستند.



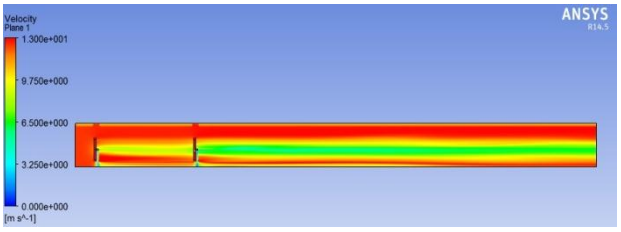
شکل (۱۰): بردار سرعت در صفحه‌ای عمود بر جریان باد و در فاصلهٔ x/D = 0.5

در شکل (۱۱) کانتور سرعت باد برای یک صفحهٔ عمودی گذرنده از مرکز کانال (صفحه z = 0) برای سرعت‌های مشخص (۱۰ ، ۱۲/۵و ۱۵ متر بر ثانیه) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشترین کاهش سرعت در پشت توربین و در سرعت ورودی ۱۰m/s صورت گرفته است.

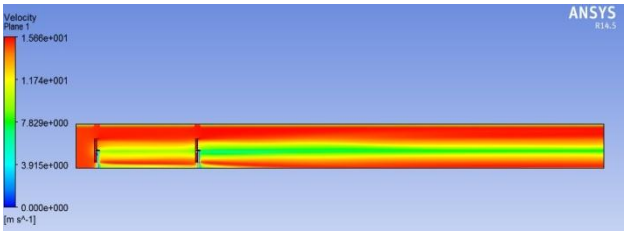
1. Actuator Disk



(الف)



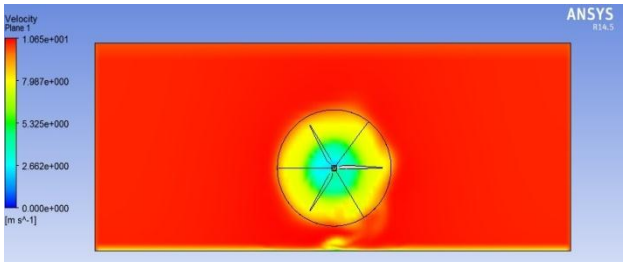
(ب)



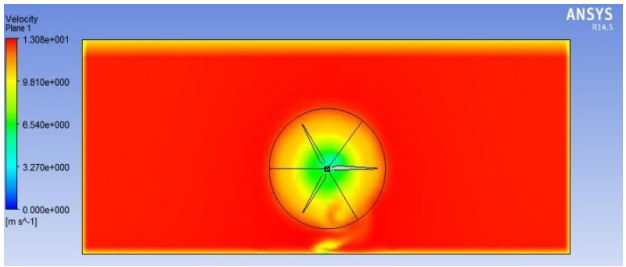
(ج)

شکل (۱۱): کانتور سرعت در راستای x و برای سرعت‌های الف. m/s ۱۰، ب. ۱۲/۵m/s، ج. ۱۵m/s

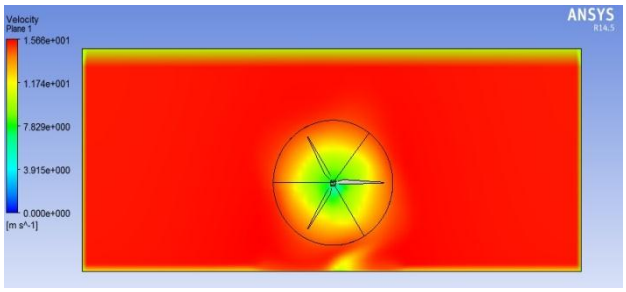
در شکل (۱۲)، کانتورهای سرعت در راستای x و برای صفحه‌ای عمود بر جریان در فاصلهٔ ۷ برابر قطر روتور نسبت به توربین اول و برای سرعت‌های مشخص (۱۰، ۱۲/۵و ۱۵ متر بر ثانیه) نشان داده شده است. با توجه به این کانتورها علاوه بر نحوهٔ گسترش گردابه توربین در جریان باد و از بین رفتن آن، امکان مقایسهٔ آن در سرعت‌های ورودی مختلف را می‌توان مشاهده کرد.



(الف)



(ب)

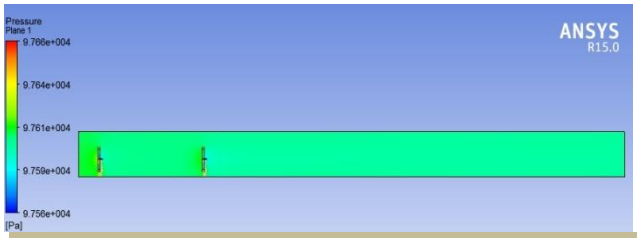


(ج)

شکل (۱۲): کانتورهای سرعت در x/D=7 و در سرعت‌های الف. ۱۰m/s، ب. ۱۲/۵m/s، ج. ۱۵m/s

همچنین با توجه به کانتورهای سرعت در شکل (۱۲) کاملاً قابل مشاهده است که جریان حداکثر به اندازهٔ قطر پرهٔ توربین بادی از اطراف تحت تأثیر قرار می‌گیرد.

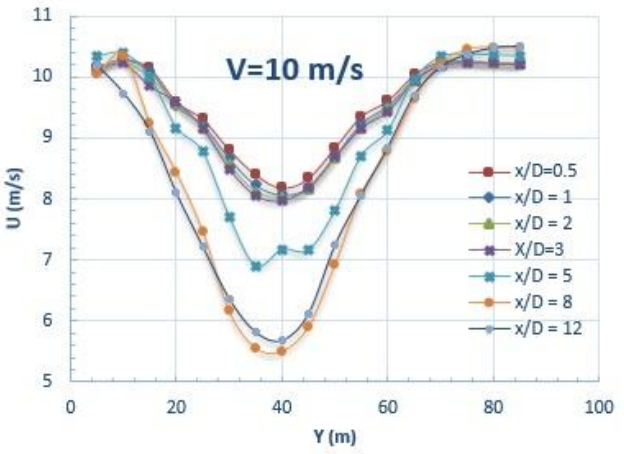
کانتور فشار استاتیک در صفحهٔ z = 0 در شکل (۱۳) نشان داده شده است. افزایش فشار قبل از توربین و افت فشار بعد از توربین قابل مشاهده است. همچنین فرض یکسان بودن فشار در فواصل دور از توربین در شکل دیده می‌شود.



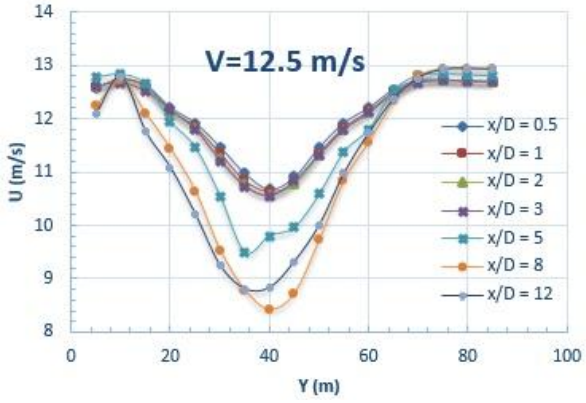
شکل (۱۳): کانتور فشار استاتیک در صفحهٔ z = 0

برای امکان مقایسهٔ نتایج سه‌بعدی تحلیل عددی باید نتایج حاصل از دینامیک سیالات محاسباتی را به‌صورت دوبعدی بیان کرد. برای این کار، مقادیر سرعت در راستای z میانگین‌گیری شده است. بدین صورت که در هر (x,y) ثابت، خطوطی به‌صورت افقی و در راستای z در ناحیه محاسباتی در نظر گرفته شده و سپس مقادیر سرعت بر روی این خطوط میانگین‌گیری شده است.

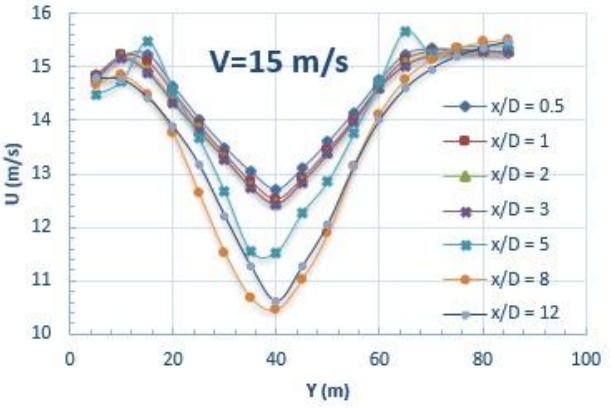
مقایسهٔ نتایج در فاصلهٔ پنج برابر قطر روتور برای هر سرعت ورودی به ناحیه محاسباتی با توجه به رویکرد ذکرشده صورت گرفته است. در شکل (۱۴)، نتایج مذکور با درنظرگرفتن فاصلهٔ بین دو توربین ۵ برابر قطر روتور و سرعت‌های ورودی (۱۰، ۱۲/۵ و ۱۵ متر بر ثانیه) در فواصل مختلف پشت توربین نشان داده شده است.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۱۴): پروفیل سرعت در فواصل مشخص و در سرعت‌های الف. ۱۰ m/s، ب. ۱۲/۵m/s، ج. ۱۵m/s

همان‌طور که از نمودارهای فوق پیداست، بیشترین افت سرعت در فاصله x/D=8 و در ارتفاع ۴۰ متری مشاهده می‌شود و همچنین سرعت در فاصلهٔ x/D=12 بهبود یافته و به سرعت جریان آزاد نزدیک می‌شود. سرعت در فاصلهٔ ۸ تا ۱۲ برابر قطر روتور رشد چشمگیری نداشته است.

در این قسمت با توجه به مطالب ارائه‌شده در بخش ۴، به محاسبهٔ توان تولیدی و در نتیجه بازده مزرعهٔ بادی در سرعت‌های مختلف خواهیم پرداخت. جدول (۵) بیان‌کنندهٔ سرعت جریان ورودی به هر توربین (در ارتفاع هاب)، توان و بازده مزرعهٔ بادی است.

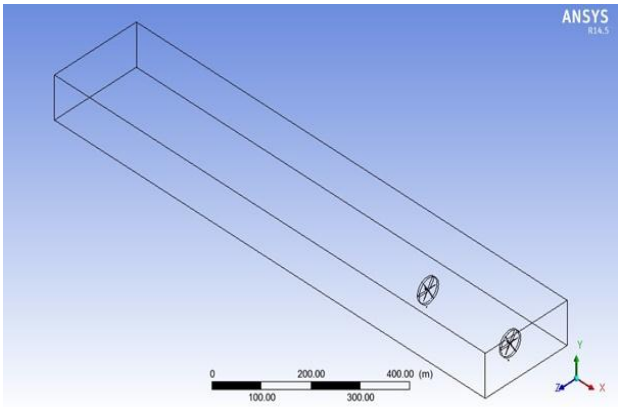
جدول (۵): مقادیر محاسبه‌شدهٔ سرعت در مقابل هر ردیف توربین، توان و بازده مزرعه

V (m/s)	U1 (m/s)	U2 (m/s)	P1 (kw)	P2 (kw)	Efficiency (%)
۱۰	۹/۶۱	۸/۱۷	۴۲۵/۱۰	۲۶۰/۸۲	۷۱/۷۳
۱۲/۵	۱۲/۱۳	۱۰/۹۱	۸۵۴/۵۲	۶۲۱/۴	۷۹/۰۲
۱۵	۱۴/۵۲	۱۳/۱۲	۱۴۶۴/۴	۱۰۸۱/۶۹	۷۸/۸۹

از جدول (۴) کاملاً واضح است که بیشترین بازده در صورتی اتفاق می‌افتد که فاصلهٔ بین توربین‌ها پنج برابر قطر روتور است و سرعت ورودی به ناحیهٔ محاسباتی ۱۲/۵ m/s باشد. همچنین با افزایش سرعت به میزان ۲۰٪ و رسیدن به سرعت نامی توربین باد، تغییر چندانی در بازده کل ایجاد نشده است.

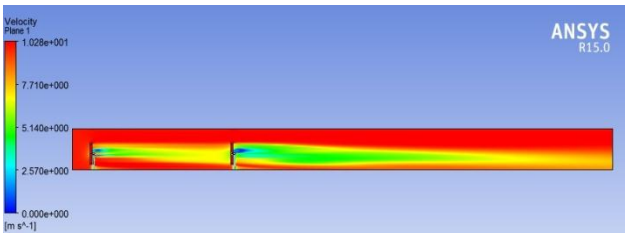
۲.۵. تحلیل نتایج در فاصلهٔ هفت‌ونیم برابر قطر روتور

در این بخش، تأثیر دو توربین که در فاصلهٔ ۷/۵ برابر قطر روتور از همدیگر قرار دارند، بررسی می‌شود. توربین باد اول در ناحیهٔ محاسباتی به‌عنوان مبدأ مختصات در نظر گرفته شده است. در شکل (۱۵) نمای کلی از ناحیهٔ محاسباتی مفروض نشان داده شده است.

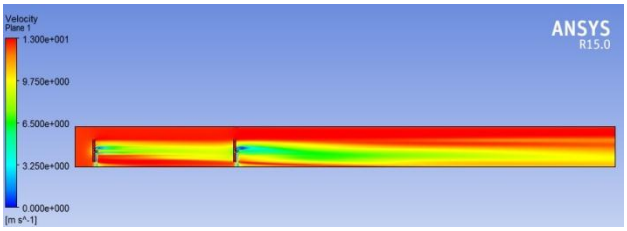


شکل (۱۵): نمای کلی از ناحیهٔ محاسباتی

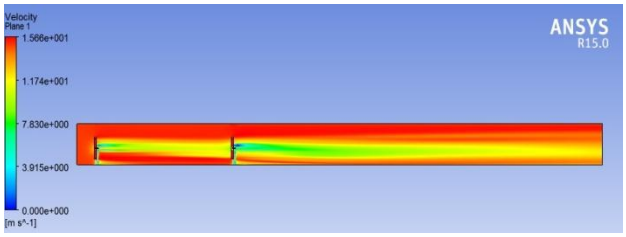
در شکل (۱۶)، کانتور سرعت باد برای یک صفحهٔ عمودی گذرنده از مرکز کانال (صفحه z = 0) برای سرعت‌های مشخص (۱۰ ، ۱۲/۵ و ۱۵ متر بر ثانیه) نشان داده شده است.



(الف)



(ب)



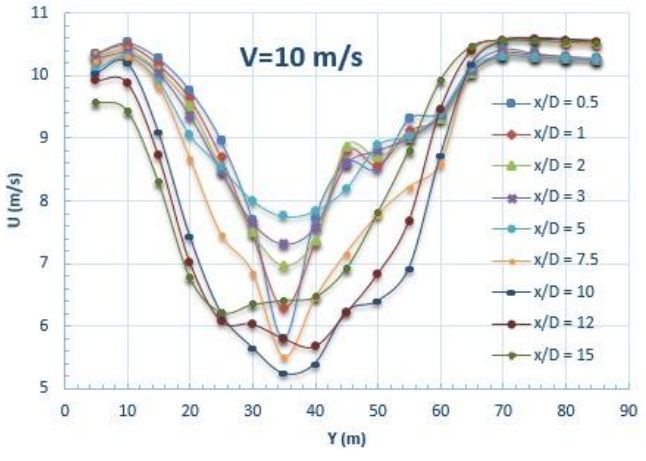
(ج)

شکل (۱۶): کانتور سرعت در راستای x و برای سرعت‌های الف. m/s ۱۰، ب. ۱۲/۵m/s، ج. ۱۵m/s

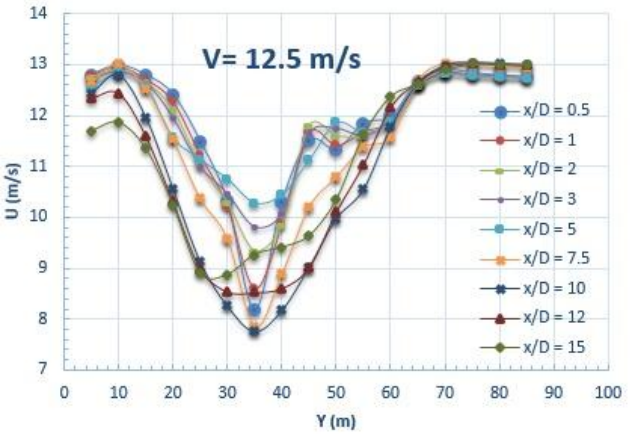
همان‌طور که در شکل (۱۶) مشاهده می‌شود، بیشترین کاهش سرعت در پشت توربین و در سرعت ورودی ۱۰ m/s صورت گرفته است. همچنین کاهش اثر دنباله با فاصله گرفتن از توربین و یکنواخت‌تر شدن پروفیل سرعت نیز کاملاً قابل مشاهده است.

در ادامه همانند قسمت پیشین، پس از میانگیری سرعت در راستای z و بیان نتایج به‌صورت دوبعدی، امکان مقایسهٔ نتایج در فواصل مختلف پشت توربین فراهم می‌شود. در شکل (۱۷)، مقایسهٔ نتایج دوبعدی با درنظرگرفتن فاصلهٔ بین دو توربین ۷/۵ برابر قطر روتور و سرعت‌های ورودی ۱۰m/s، ۱۲/۵m/s و ۱۵ m/s در فواصل مختلف پشت توربین نشان داده شده است.

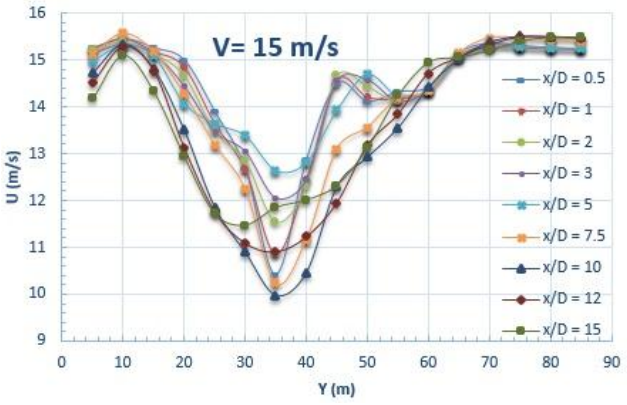
همان‌طور که از نمودارهای پروفیل سرعت در شکل (۱۷) پیداست، بیشترین افت سرعت در فاصلهٔ x/D=10 و در ارتفاعی نزدیک به مرکز هاب توربین مشاهده می‌شود و همچنین سرعت در فاصلهٔ x/D=12 بهبود یافته و به سرعت جریان آزاد نزدیک می‌شود. سرعت در فاصلهٔ ۱۲ تا ۱۵ برابر قطر روتور به مراتب رشد بیشتری داشته است.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۱۷): پروفیل سرعت در فواصل مشخص و در سرعت‌های الف. ۱۰m/s، ب. ۱۲/۵m/s، ج. ۱۵m/s

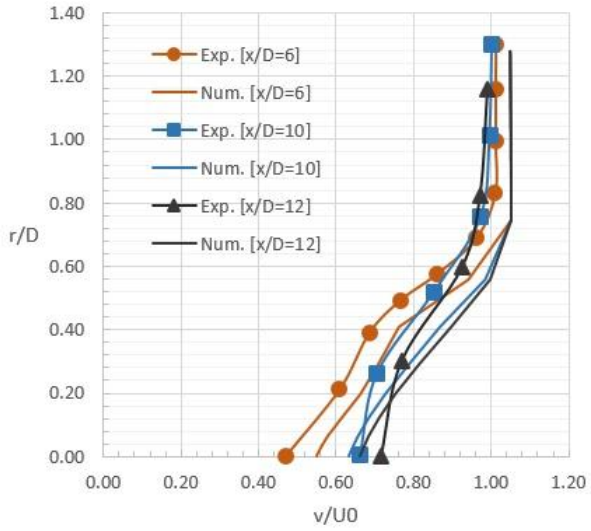
در این قسمت مانند مطالب ارائه‌شده در قسمت پیشین، به محاسبهٔ توان تولیدی و در نتیجه، بازده مزرعهٔ بادی در سرعت‌های مختلف پرداخت می‌شود. جدول (۶) بیان کنندهٔ سرعت جریان ورودی هر توربین (در ارتفاع هاب)، توان و بازده مزرعهٔ بادی است. از جدول فوق کاملاً واضح است که بیشترین بازده در صورتی اتفاق می‌افتد که

فاصلهٔ بین توربین‌ها ۷/۵ برابر قطر روتور باشد و سرعت ورودی به ناحیهٔ محاسباتی ۱۵ m/s باشد.

جدول (۶): مقادیر محاسبه‌شدهٔ سرعت در مقابل هر ردیف توربین، توان و بازده مزرعه

V (m/s)	U1 (m/s)	U2 (m/s)	P1 (kW)	P2 (kW)	Efficiency (%)
۱۰	۹/۴۳	۷/۷۷	۴۰۱/۷۱	۲۲۴/۶۱	۶۵/۵۰
۱۲/۵	۱۱/۹۶	۱۰/۵۱	۸۱۹/۷۵	۵۵۶/۱	۷۳/۶۷
۱۵	۱۴/۴۷	۱۳/۱۳	۱۴۵۰/۳۲	۱۰۸۳/۸۲	۷۸/۵۲

در ادامه به‌منظور ارزیابی رفتار پروفیل سرعت، مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از تحلیل توربین باد منفرد موردِ پژوهش و یک پژوهش تجربی مشابه، صورت گرفته است. نتایج پژوهش تجربی از تست تونل باد حاصل شده است [۲۲]. شکل (۱۶) امکان مقایسهٔ پروفیل سرعت حاصل از نتایج تجربی و عددی را در فواصل مشخص (6D- 10D-12D) در پایین‌دست جریان نشان می‌دهد. بدین منظور نتایج پژوهش حاضر نسبت به سرعت جریان آزاد و قطر روتور بی‌بعد شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تطابق خوبی بین نتایج آزمایشگاهی و عددی برقرار است. اختلاف ۹٪ حاصل نیز به‌دلیل مدل توربولانسی انتخاب‌شده در شبیه‌سازی جریان است.



شکل (۱۶): پروفیل سرعت در فواصل x/D= 6 , 10 , 12 در پایین‌دست جریان [۲۲]

۶. بحث و نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر مدل متداول توربین بادی مورد استفاده در کشورمان انتخاب و رفتار جریان در مزرعهٔ بادی مفروض بررسی شد. بدین منظور هندسهٔ کامل توربین باد مدل‌سازی شده و در ادامه در ناحیهٔ محاسباتی مفروض، مورد حل عددی قرار گرفت. نتایج حاصل از تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی با درنظرگرفتن استقلال از شبکه به شرح زیر است:

با در نظرگرفتن فاصلهٔ ۵ برابر قطر روتور توربین‌های بادی از یکدیگر در ناحیهٔ محاسباتی، سرعت در صفحهٔ ورودی به توربین‌های بادی با اعمال سرعت‌های اولیه معین (۱۰، ۱۲/۵ و ۱۵ متر بر ثانیه) استخراج و مشخص شده است که بازده بیشینه مزرعهٔ بادی درصورتی‌که سرعت ورودی به ناحیهٔ محاسباتی ۱۲/۵ m/s باشد، مقدار ۷۹/۰۲۹۰درصد است.

کانتور سرعت در پایین‌دست جریان (در راستای x) به‌دست آمده و به‌وسیلهٔ آن رفتار فیزیکی دنبالهٔ توربین مشاهده شده است. این امر همچنین بیانگر این مسئله است که بیشترین کاهش سرعت بلافاصله در پشت توربین، پایه و اتاقک موتور صورت گرفته است.

نمودارهای پروفیل سرعت برای فاصلهٔ ۵ برابر قطر روتور در ناحیهٔ محاسباتی، در فاصله‌های مشخص از پشت توربین‌ها و در ارتفاع‌ها و سرعت‌های معین به‌دست آمده است. با توجه به این نمودارها به‌خوبی مشخص است که حداکثر کاهش سرعت باد در عبور از توربین در ارتفاعی تقریباً برابر با پایهٔ توربین و در فاصلهٔ ۸ برابر قطر روتور اتفاق می‌افتد. در ادامهٔ این نقصان سرعت با رسیدن به فاصلهٔ ۱۲ برابر قطر روتور در پشت توربین بهبود یافته و به سرعت جریان آزاد نزدیک می‌شود.

با توجه درنظرگرفتن فاصله ۷/۵ برابر قطر روتور توربین‌های بادی از یکدیگر در ناحیهٔ محاسباتی، سرعت در صفحهٔ ورودی به توربین‌های بادی با اعمال سرعت‌های اولیه معین (۱۰، ۱۲/۵ و ۱۵ متر بر ثانیه) استخراج و مشخص شده است که بازده بیشینه مزرعهٔ بادی درصورتی‌که سرعت ورودی به ناحیهٔ محاسباتی ۱۵m/s باشد، مقدار ۷۸/۵۲ درصد است.

در ادامه، نمودارهای پروفیل سرعت برای فاصلهٔ ۷/۵ برابر قطر روتور در ناحیهٔ محاسباتی، در فاصله‌های مشخص از پشت توربین‌های بادی و در ارتفاع‌ها و سرعت‌های معین به‌دست آمده است. با توجه به این نمودارها به‌خوبی مشخص است که حداکثر کاهش سرعت باد در عبور از توربین در ارتفاعی تقریباً برابر با پایهٔ توربین و در فاصلهٔ ۱۰ برابر قطر روتور اتفاق می‌افتد. این نقصان سرعت با رسیدن به فاصلهٔ ۱۵ برابر قطر روتور در پشت توربین بهبود یافته و به سرعت جریان آزاد نزدیک می‌شود.

در نهایت با توجه به بازده به‌دست‌آمده از مزرعهٔ بادی‌های مفروض می‌توان به این نتیجه رسید که بهترین فاصله برای جانشینی توربین‌های دیگر، ۵ برابر قطر روتور از پشت است.

مراجع

[۱۷] شیخ حسینی موسی، فدائی‌نژاد روح الله، «**تعیین آرایش بهینه توربین‌ها برای مزرعهٔ بادی در منطقهٔ میل‌نادر**»، نشریهٔ علمی پژوهشی مهندسی و مدیریت انرژی، سال سوم، شماره چهارم، صفحه ۱۴-۲۳، ایران، کاشان، زمستان ۱۳۹۲.

[۲۰] پوررجبیان ابوالفضل، **بهینه‌سازی چیدمان توربین‌های بادی به کمک ژنتیک الگوریتم**، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی هوا و فضا، ایران، تهران، ۱۱۰ صفحه، شهریور ۱۳۸۸.

[۲۱] فرداد عباسعلی، جمیل مجید، **بهینه‌سازی محل استقرار توربین‌های بادی در یک مزرعه**، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ۹۵ صفحه، ۱۳۸۷.

[۲۴] امیری مریم، کهرم محسن، کیانی فرعلی، «**بررسی عددی و تجربی اثر میزان هم‌پوشانی اولیه و ثانویه بر عملکرد توربین بادی**»، مجله مهندسی مکانیک مدرس، دوره ۱۵، شماره ۶، ۱۲۳-۱۳۱، ایران، تهران، شهریور ۱۳۹۴.

[1] Koch F, Gresch M, Shewarega F, Erlich I, Bachmann U. "*Consideration of Wind Farm Wake Effect in Power System Dynamic Simulation*", In: Power tech, IEEE Russia; Vol. 16, pp. 1e7, 2005.

[2] Lissaman PBS. "*Energy Efficiencies of Arbitrary of Wind Turbines*", Journal of Energy, Vol. 9, pp. 101-210, May 1979.

[3] Vermenulen PEJ., *An Experimental Investigation of Wind-Turbines Wakes*, in: 3rd International Symposium on Wind Energy Systems, Copenhagen. Denmark, Vol. 28 pp. 214e23, 1980.

[4] Milborrow DJ. "*The Performance of Arrays of Wind Turbines*", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 25, pp. 212-254, September 1980.

[5] Katic I, Højstrup J, Jensen NO. "*A Simple Model for Cluster Efficiency*", In: European Wind Energy Conference and Exhibition, Rome, Vol. 10, pp. 407e10, 1986.

[6] Voutsinas S, Rados K, Zervos A., "*On the Analysis of Wake Effects in Wind Parks"*, Wind Engineering, Vol. 29, pp. 444-0578, 1990.

[7] Lanchester FW., "*Contribution to the Theory of Propulsion and the Screw Propeller*", Transactions of the Institution of Naval Architects, Vol. 18, pp. LVII: 98–116, 2015.

[8] Betz A., *Der Maximum der Theoretisch Mölichen Ausnützung des Windes durch Windmotoren*, Zeitschrift für das Gesamte Turbinenwesen; Vol. 90, Thesis,26: 307–309K. Elissa, 1920.

[9] Frandsen S, Barthelmie R, Pryor S, Rathmann O, Larsen S, Hojstrup J, Thogersen M, "*Analytical Modelling of Wind Speed Deficit in Large Offshore Wind Farms*". Wind Energy. Vol. 9, pp. 39-53, April 2006.

[10] Crasto G, Gravdahl AR, "*CFD Wake Modeling Using a Porous Disc*", European Wind Energy Conference and Exhibition, Brusssels, Belgium, Vol. 15, pp. 656-538, 2008.

[11] Alinot, Cedric, Masson, Chiristian, "Aerodynamic Simulation of Wind Turbine Operating in Atmospheric Boundary Layer with Various Thermal Stratifications", A Collection of the 2002 ASME Wind energy Symposium Technical Paper, Vol. 95, pp. 206, August 2002.

[12] Whale, J, et al. *"An Experimental and Numerical Study of Vortex Structure in the Wake of a Wind Turbine"*. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. Vol. 84, pp. 1-21. 2000.

[13] Werle MJ, *A New Analytical Model for Wind Turbine Wakes*, FloDesign Inc., Wilbraham, Vol. 180, May 2008.

[۱۴] مشهدی مهرداد، قاسمی اصل رامین، «**شبیه‌سازی و تحلیل دنبالهٔ توربین بادی Vestas-V47 با کمک دینامیک سیالات محاسباتی**»، دومین کنفرانس انرژی بادی ایران، ۷ صفحه، ایران، تهران، ۱۱ اردیبهشت ۱۳۹۳.

[15] Emami, A., Noghreh P., "*New Approach on Optimization in Placement of Wind Turbines with in Wind Farm by Genetic Algorithm*" Renewable Energy, Vol. 14 pp. 59 – 64, 2010.

[16] Kim, H., Singh, C., Sprintson, A, "*Simulation and Estimation of Reliability in a Wind Farm Considering the Wake Effect*", Sustainable Energy, IEEE Transactions on, Vol. 3, pp. 274-282, September 2012.

[18] Han, X., Guo, J., Wang, P., Ji, Y., "*Adequacy Study of Wind Farms Considering Reliability and Wake Effect of WTGs*", In Power and Energy Society General Meeting, IEEE, Vol. 15, pp. 1-7, 2011.

[19] Serrano-GonzálezJ., Burgos-Payan M., Riquelme- Santos, J., "*A New and Effi Cient Method for Optimal Design of Large Offshore Wind Power Plants*". IEEE Transactions on Power System, pp. 75 – 84, 2013.

[22] Erich H. "Wind Turbines" 3nd edition, Springer, ISBN 978-3-642-27150-2, April 2013.

[23] Alfredson P-H, Dahlberg J-A. Technical Note AI-1499, *a preliminary Wind Tunnel Study of Windmill Wake Dispersion in Various Flow Conditions*, Part 7, FFA, Stockholm, Sweden, Vol.17, pp. 88-457, September 1999.