

## شبیه‌سازی و تحلیل دنباله یک توربین بادی نمونه در مزرعه بادی با کمک دینامیک

### سیالات محاسباتی

جاماسب پیرکنندی<sup>۱\*</sup>، مهرداد مشهدی<sup>۲</sup>، مهران نصرت‌الهی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> استادیار مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

jamasb\_p@yahoo.com

<sup>۲</sup> کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)، تهران، ایران

mehrdadmashhadi@gmail.com

<sup>۳</sup> 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 مزرعه بادی با کمک نرم‌افزار ANSYS-CFX تعیین شده است. ابتدا هندسه کامل توربین باد ایجاد شده و یک شبکه بی‌سازمان در اطراف پره‌های آن تولید می‌شود. در ادامه، معادلات جریان روی توربین باد با اعمال معادلات اغتشاش و براساس معادله انتقال تنش برشی حل شده است. همچنین، کانتورهای سرعت باد در دنباله و برای مزرعه بادی شامل دو توربین باد متوالی با فواصل مختلف، استخراج شده و به وسیله آن رفتار فیزیکی دنباله توربین باد مشاهده شده است. با در نظر گرفتن 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 پایه توربین و به ترتیب در فواصل ۸ و ۱۲ برابر قطر روتور اتفاق افتاده است. نتایج نشان می‌دهد که بازده بیشینه مزرعه بادی در صورتی که فاصله دو توربین ۵ برابر قطر روتور و سرعت ورودی به ناحیه محاسباتی ۱۰m/s باشد، ۷۹/۰۲ درصد است. زمانی که فاصله دو توربین ۷/۵ برابر قطر روتور و سرعت ورودی به ناحیه محاسباتی ۱۵m/s باشد، مقدار بازدهی ۷۸/۵۲ درصد خواهد شد.

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

## ۱. مقدمه

استفاده شد. در این تحقیق، اثر پایداری دمایی لایه مرزی بررسی شده است و قدرت خروجی توربین و توسعه دنباله توربین در چند لایه دمایی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده دقت بالای این روش را در مقایسه با نتایج تجربی نشان می‌دهند. ویل و همکاران [۱۲] یک توربین نمونه را برای بررسی دنباله توربین مورد بررسی قرار دادند. توربین مورد آزمایش، یک توربین با دو تیغه صفحه 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 شبکه چرخشی روتور<sup>۴</sup> استفاده شده که یک روش غیر ویسکوز و چرخش آزاد<sup>۵</sup> است. ورل [۱۳] مدل دنباله‌ای را ارائه کرد که شامل یک مدل دقیق برای ناحیه غیر لزج دنباله نزدیک<sup>۶</sup>، راه حل پرائتل<sup>۷</sup> برای ناحیه میانی دنباله و یک مدل بر مبنای تجزیه و تحلیل متقارن رابطه پرائتل برای ناحیه دنباله دور بود.

در پژوهش اخیر [۱۴] با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی به تحلیل دنباله 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 فرانسون صورت گرفته است که نتیجه حاصل صحه بر ضعف مدل فرانسون در ارائه پروفیل سرعت پشت توربین باد مذکور می‌گذارد.

در مقاله حاضر، پس از تولید هندسه 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 پایین دست جریان برای انجام مقایسه مناسب استخراج شده است. به علاوه کانتورهای سرعت در مزرعه بادی شامل پنج توربین باد به منظور مشاهده رفتار جریان در فواصل مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین توان تولیدی توربین‌ها و در نتیجه بازده مزرعه بادی مفروض به دست 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 کاهش یافته با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود [۱۵].

توربین باد وسیله‌ای است که انرژی باد را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. این عمل توسط پره‌ها که به یک هاب<sup>۱</sup> 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 شبکه برق انتقال داده می‌شود. مزرعه بادی مجموعه‌ای از توربین‌های بادی است و می‌تواند به عنوان یک نیروگاه تصور شود. یک مزیت مزرعه بادی این است که هزینه‌های ثابت (هزینه‌های مدیریت، هزینه‌های مرتبط به شبکه‌های الکتریکی و هزینه‌های توسعه پروژه) برای نصب چندین توربین بادی پخش شده‌اند [۱].

در یک مزرعه بادی، توربین پایین دست تحت تأثیر پدیده دنباله ناشی از توربین بالادست قرار دارد. دنباله دارای دو اثر است: اول کاهش در سرعت باد که به کاهش توان خروجی مزرعه باد منجر 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 دسته اصلی تقسیم شوند، مدل‌های تحلیلی دنباله و مدل‌های 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 به دست آوردن 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 به منظور ارائه یک مدل ریاضی-فیزیکی برای دنباله پشت توربین باد بود. فرانسون [۹] کلتی از فرضیات لانچستر/بتز را توسعه داد و مجموعه‌ای از مدل‌های دنباله توسعه یافته قبلی را به دست آورد که به خوبی توانست از آن‌ها برای پیشبرد اثر دنباله‌های چندگانه استفاده کند. مدل توسعه یافته فرانسون تنها محدود به به کارگیری مجموعه‌ای از هندسه‌های منظم بود. کراستو و همکاران [۱۰] دنباله یک توربین باد منفرد را با استفاده از تکنیک دینامیک سیالات محاسباتی مدل‌سازی کردند. آن‌ها از حل کننده رنژ<sup>۲</sup> و مدل توربولانسی  $k - \epsilon$  برای این منظور استفاده نمودند. سیدریک و همکاران [۱۱] مدل‌سازی دنباله توربین باد را در لایه مرزی اتمسفری مورد بررسی قرار دادند و از روش مدل‌سازی دیسک پسایی<sup>۳</sup> برای مدل کردن دنباله استفاده کردند. روش  $k - \epsilon$  برای مدل‌سازی توربولانس و نرم‌افزار تجاری فلوئنت برای این منظور

4. Rotor Vortex Lattice Method (RVOLM)

5. Free Wake

6. Near wake

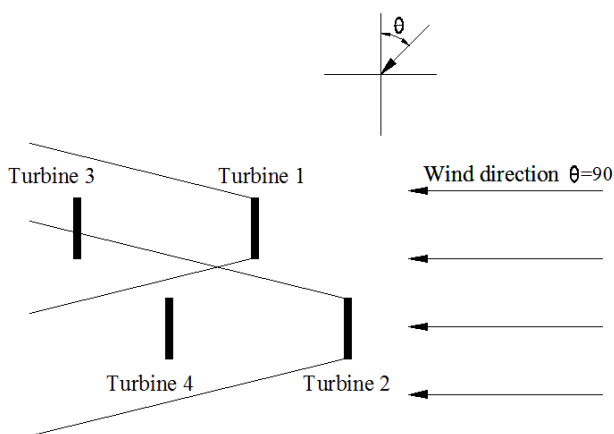
7. Prandtl

1. Hub

2. RANS

3. Drag Disk

جهت  $\theta$  در دنباله توربین زام قرار دارد.



شکل (۲): مدل یک مزرعه بادی

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

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

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

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

۲. معادله 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.

۳. با توجه به شکل (۳)، فاصله عمود توربین‌هایی که شرایط مرحله اول را دارند تا خط گذرنده از توربین نام  $(BT_2)$  محاسبه شده، سپس طبق قضیه فیثاغورث و با توجه به فاصله بین دو توربین  $(D_{T1T2})$ ، فاصله توربین اول تا نقطه  $B$   $(BT_1)$  محاسبه می‌شود. حال با توجه به رابطه (۵)، شعاع دنباله توربین  $T_1$  در نقطه  $B$  محاسبه می‌شود [۱۸].

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

ضریب زاویه نوک مخروط، همان فاصله توربین اول تا نقطه  $B$  است. مقدار  $\tan(\alpha)$  برابر  $0.4$  در نظر گرفته می‌شود [۱۹].

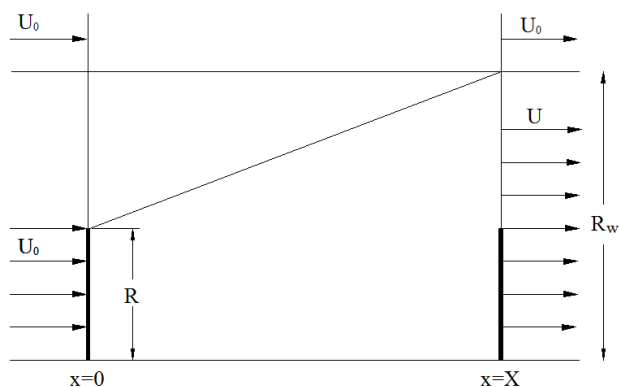
$$U = U_0 \left[ 1 - (1 - \sqrt{1 - CT}) \cdot \left( \frac{r}{r + kx} \right)^2 \right] \quad (1)$$

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

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

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 رابطه (۲) به صورت زیر، سرعت در محل هر توربین برای هر جهت خاص محاسبه می‌شود [۱۷]:

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



شکل (۱): مدل دنباله جنسن

در روابط فوق،  $\theta$  بیان‌کننده جهت وزش باد و  $U_{i\theta}$  سرعت باد در محل توربین  $i$ ام در جهت  $\theta$  است.  $K_{ij\theta}$  نیز نشان‌دهنده تأثیر توربین  $j$ ام در کاهش سرعت توربین  $i$ ام در جهت  $\theta$  بوده که مقادیر صفر و یک یا عددی بین این دو به خود می‌گیرد. اگر  $K_{ij\theta}$  صفر باشد، یعنی توربین  $i$ ام در جهت  $\theta$  در دنباله توربین  $j$ ام قرار ندارد. اگر  $K_{ij\theta}$  یک باشد، یعنی توربین  $i$ ام در جهت  $\theta$  به طور کامل، در دنباله توربین  $j$ ام قرار دارد و اگر  $K_{ij\theta}$  بین صفر و یک باشد، قسمتی از توربین  $i$ ام در

### ۳. معادلات حاکم

یکی از روش‌های عددی برای حل معادلات حاکم به شکل انتگرالی، روش حجم محدود یا حجم کنترل است. در این روش، دامنه 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 معادله بقای انرژی نیز حل می‌شود. همچنین برای شبیه‌سازی آشفته‌گی 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 به صورت (۱۱) نوشته می‌شود:

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

در رابطه (۱۱) چگالی سیال و  $u_i$  مؤلفه‌های متوسط سرعت است.

#### ۲.۳. معادله اندازه حرکت

معادله اندازه حرکت در جهت  $i$  به صورت (۱۲) نوشته می‌شود:

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

در رابطه (۱۲)،  $p$  فشار متوسط استاتیک،  $\tau_{ij}$  تانسور تنش و  $\rho g_i$  نیروی جسمی گرانشی در جهت  $i$  می‌باشد. در این رابطه، تانسور تنش به صورت زیر تعریف می‌شود:

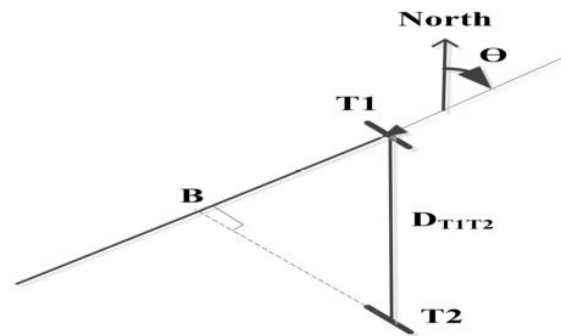
$$\tau_{ij} = \left[ \mu_{eff} \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \delta_{ij} \quad (13)$$

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (14)$$

$\mu$  لزجت گردابه‌ای سیال بوده و  $\mu_t$  که جزء خواص سیال نیست، تحت عنوان لزجت برشی در جریان‌های آشفته تعریف می‌شود.

#### ۳.۳. معادله انرژی

معادله انرژی به صورت (۱۵) نوشته می‌شود:



شکل (۳): تعیین شعاع دنباله در نقطه B

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

$$\text{If } (BT_2) > R_w + r_0 \text{ then } K_{T1T2} = 0 \quad (6)$$

$$\text{If } (R_w - r_0) < BT_2 < (R_w + r_0) \text{ then } 0 < K_{T1T2} < 1 \quad (7)$$

$$\text{If } (BT_2) < R_w - r_0 \text{ then } K_{T1T2} = 1 \quad (8)$$

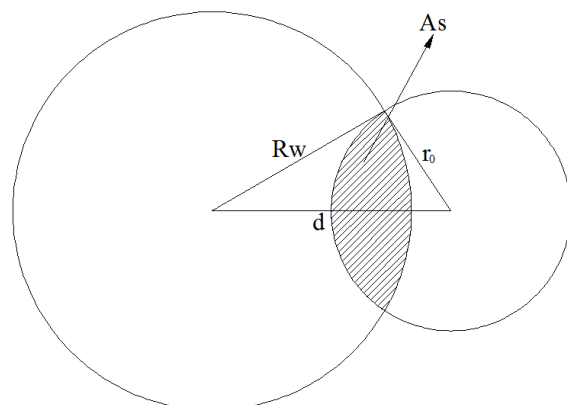
در رابطه فوق،  $r_0$  شعاع روتور توربین و  $R_w$  شعاع دنباله است.

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

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

$K_{T1T2}$  از رابطه (۱۰) نتیجه می‌شود:

$$K_{T1T2} = \frac{A_s}{\pi r_0^2} \quad (10)$$



شکل (۴): ناحیه هم‌پوشانی بین دنباله یک توربین و توربین دیگر

ایدئال مزرعه (توانی که در آن فرض شده تمامی توربین‌ها با سرعت جریان آزاد باد U تولید توان می‌کنند) می‌توان بازده را به دست 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 رابطه (۱۹) به دست می‌آید:

$$P = 478.1 U^3 \quad (19)$$

#### ۵. شبیه‌سازی و تحلیل دنباله توربین باد Vestas-V47

توربین باد ۶۶۰ کیلوواتی تولید شرکت صبا نیرو، تنها سازنده 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- $\omega$  استفاده شده است. این مدل به‌منظور آمیختن فرمول‌بندی دقیق و قدرتمند k- $\omega$  در نواحی نزدیک دیواره با مدل k- $\epsilon$  مستقل از جریان آزاد در نواحی دور از دیواره ارائه شده است. یعنی این مدل به‌طور همزمان توانایی بالای مدل k- $\omega$  در نواحی با عدد رینولدز پایین و توانایی بالای مدل k- $\epsilon$  در نواحی با عدد رینولدز بالا را در اختیار گرفته است. نیرومندی، اقتصادی بودن، دقت مناسب و تحلیل جریان‌های همراه با جدایش لایه مرزی از مهم‌ترین مزایای استفاده از این مدل توربولانسی است [۲۳].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (v(\rho E + p)) = \quad (15)$$

$$\nabla \cdot (k_{eff} - \sum_j h_j j_j + (\tau_{ij} \cdot v)) + s_h$$

$\rho$  چگالی سیال و E با رابطه (۱۶) تعریف می‌شود:

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} \quad (16)$$

#### ۴. محاسبه بازده مزرعه بادی

هر توربین بادی که در پایین دست 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. معادله (۱۷) بازده مزرعه بادی را محاسبه می‌کند [۲۱ و ۲۲].

$$\eta_{farm} = \frac{P_{el}(Farm)}{\sum_i P_{el}(free),i} \quad (17)$$

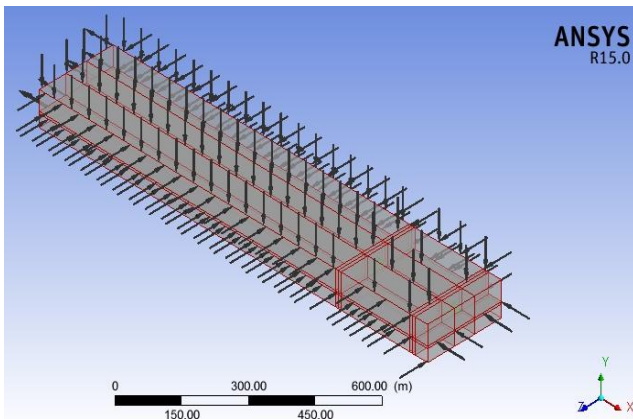
در معادله (۱۷)، صورت کسر توان واقعی مزرعه بادی و مخرج کسر توان در حالت ایدئال است. برای به حداکثر رساندن این بازده نحوه چینش توربین‌های بادی در مزرعه حائز اهمیت است.

با توجه به مشخصات توربین‌ها و سایت، سرعت مقابل هر توربین و بازده هر ردیف مزرعه را می‌توان به دست 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 نامی خود می‌رسد.

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

$$P_w = \frac{1}{2} \rho \pi r^2 U^3 C_p \quad (18)$$

که در آن  $\rho$  چگالی هواست که معادل  $1.225 \text{ Kg/m}^3$ ، شعاع توربین، U سرعت باد و  $C_p$  ضریب توان توربین است که بیان‌کننده 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 به دست آورد. با جمع کردن قدرت خروجی توربین‌ها در کل مزرعه و مقایسه آن با توان



شکل (۷): ناحیه محاسباتی

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

مدل آشفتگی  $SST\ k-\omega$  در نرم‌افزار CFX به‌طور پیش‌فرض از توابع دیواره بهبود یافته استفاده می‌کند و به همین دلیل حساسیت بسیار کمتری نسبت به مدل‌های آشفتگی  $k-\epsilon$  و  $k-\omega$  استاندارد، به مقدار فاصله متوسط بدون بعد اولین گره از دیواره ( $y^+$ ) دارد [۲۳].

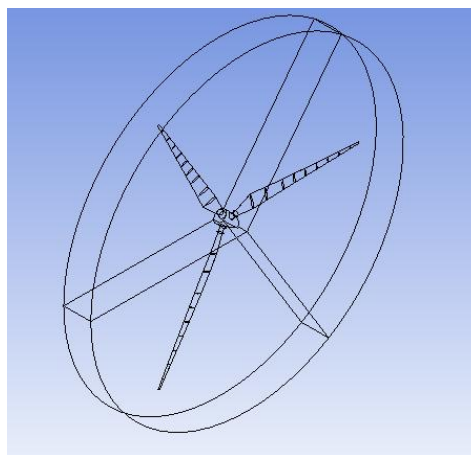
مقدار  $y^+$  در این مدل باید با استفاده از مطالعه استقلال از شبکه به دست آید. همان‌طور که مشاهده می‌شود، شبکه در نزدیکی پره به دلیل مهم بودن گرادیان‌های سرعت در این ناحیه ریز شده و مقدار  $y^+$  برای شبکه مورد استفاده در شبیه‌سازی برابر ۰/۷ است. شبکه تولید شده با در نظر گرفتن استقلال از شبکه و برای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

هندسه توربین باد همان‌طور که در شکل (۵) مشخص است، به صورت کامل ایجاد و به منظور استفاده حداکثر از شبکه‌های با سازمان ناحیه محاسباتی بلوک‌بندی شده است.



شکل (۵): هندسه توربین باد

بدین منظور با توجه به دوار بودن پره‌های توربین بادی از نواحی دوار<sup>۱</sup> 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. ناحیه محاسباتی شامل دو توربین باد است که یک بار در فاصله پنج برابر قطر روتور و بار دیگر در فاصله هفت و نیم برابر قطر روتور از یکدیگر قرار دارند. همچنین در ناحیه 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) ناحیه محاسباتی و نحوه بلوک‌بندی آن را نمایش می‌دهد.



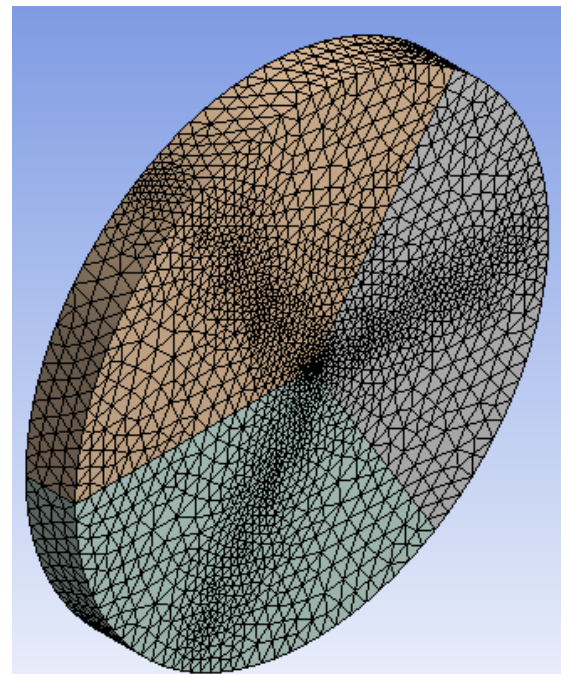
شکل (۶): ناحیه دوار در اطراف پره‌های توربین باد

جدول (۳): نحوه انتخاب المان‌ها با در نظر گرفتن استقلال از شبکه

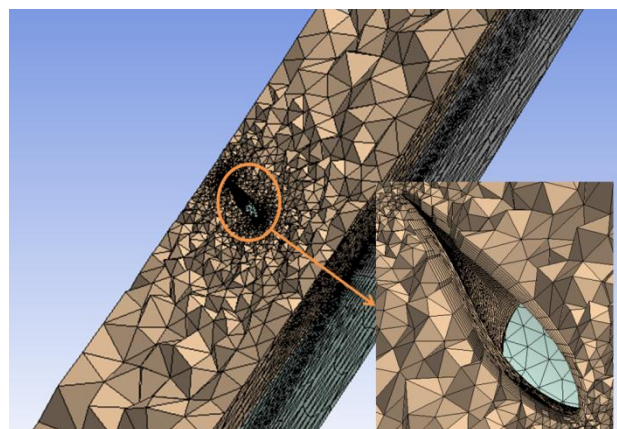
فاصله	تعداد المان در مرحله اول	تعداد المان در مرحله دوم	تعداد المان در مرحله سوم	تعداد المان در مرحله چهارم
5D	۸۱۲۵۲۲۱	۸۹۰۰۱۴۵	۹۲۲۵۸۶۲	۹۶۵۶۲۳۶
7.5D	۷۹۵۶۱۵۶	۸۶۵۶۱۲۳	۹۰۸۷۶۱۵	۹۴۸۷۶۱۵

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

با توجه به فیزیک مسئله و همچنین شرایط جغرافیایی مزرعه 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 ناحیه محاسباتی را نمایش می‌دهد.



شکل (۸): شبکه اطراف ناحیه دوار



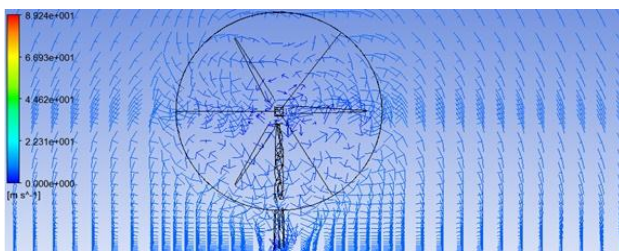
شکل (۹): برشی از یک مقطع شبکه تولید شده

جدول (۴): شرایط مرزی اعمال شده در ورودی ناحیه محاسباتی

مقدار	نوع شرط مرزی
۱۰ m/s	سرعت ورودی
۱۲/۵ m/s	
۱۵ m/s	
۱۷/۶ °C	دمای هوا در ورودی

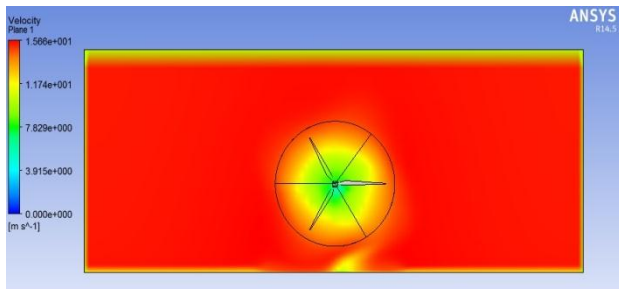
### ۱.۵. تحلیل نتایج در فاصله پنج برابر قطر روتور

در شکل (۱۰)، بردار سرعت در صفحه‌ای عمود بر جریان باد و در فاصله  $x/D = 0.5$  در پشت توربین نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، جریان باد در پشت توربین دارای چرخش ساعتگرد است که به علت 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<sup>۱</sup> با چرخش در مقایسه با روش دیسک عامل بدون چرخش، القای چرخش جریان به علت چرخش توربین در روش دیسک عامل با چرخش است. این روش همچنین، نیروهای روی صفحه را به صورت شعاعی تقسیم می‌کند. این نیروها شامل نیروهای پسایی و چرخشی هستند.



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

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



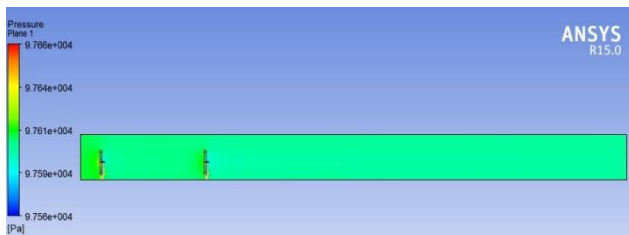
(ج)

شکل (۱۲): کانتورهای سرعت در  $x/D=7$  و در سرعت‌های الف.

۱۰ m/s، ب. ۱۲/۵ m/s، ج. ۱۵ m/s

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

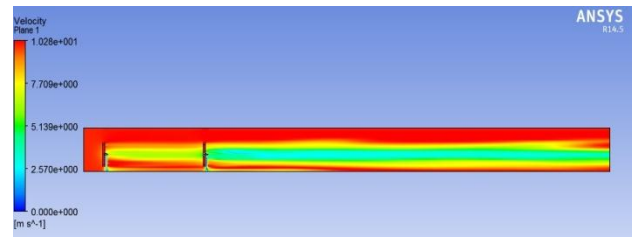
کانتور فشار استاتیک در صفحه  $z = 0$  در شکل (۱۳) نشان داده شده است. افزایش فشار قبل از توربین و افت فشار بعد از توربین قابل مشاهده است. همچنین فرض یکسان بودن فشار در فواصل دور از توربین در شکل دیده می‌شود.



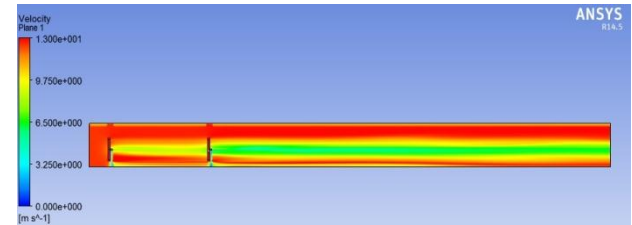
شکل (۱۳): کانتور فشار استاتیک در صفحه  $z = 0$

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

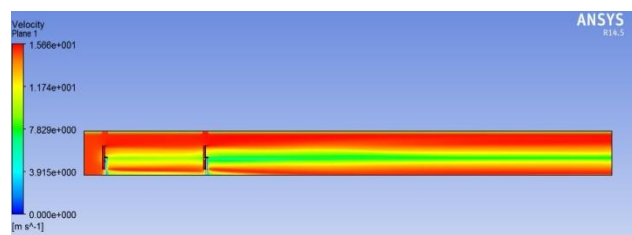
مقایسه نتایج در فاصله پنج برابر قطر روتور برای هر سرعت ورودی به ناحیه محاسباتی با توجه به رویکرد ذکر شده صورت گرفته است. در شکل (۱۴)، نتایج مذکور با در نظر گرفتن فاصله بین دو توربین ۵ برابر قطر روتور و سرعت‌های ورودی (۱۰، ۱۲/۵ و ۱۵ متر بر ثانیه) در فواصل مختلف پشت توربین نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

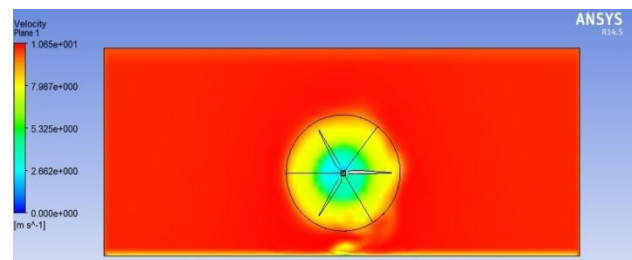


(ج)

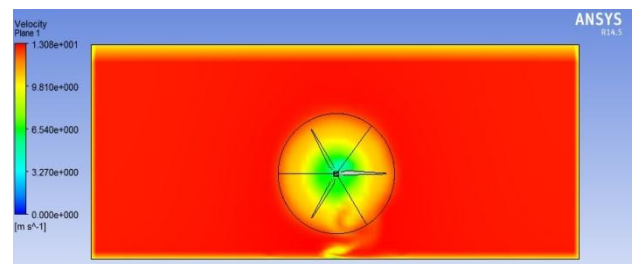
شکل (۱۱): کانتور سرعت در راستای  $x$  و برای سرعت‌های الف. m/s

۱۰، ب. ۱۲/۵ m/s، ج. ۱۵ m/s

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



(الف)



(ب)



در این قسمت با توجه به مطالب ارائه شده در بخش ۴، به محاسبه توان تولیدی و در نتیجه بازده مزرعه بادی در سرعت های مختلف خواهیم پرداخت. جدول (۵) بیان کننده سرعت جریان ورودی به هر توربین (در ارتفاع هاب)، توان و بازده مزرعه بادی است.

جدول (۵): مقادیر محاسبه شده سرعت در مقابل هر ردیف توربین، توان و

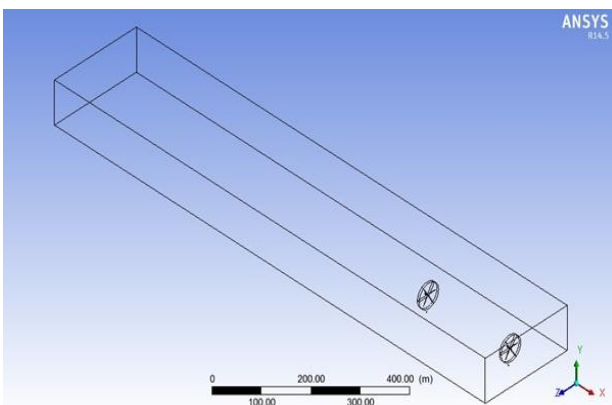
بازده مزرعه

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 می افتد که فاصله بین توربین ها پنج برابر قطر روتور است و سرعت ورودی به ناحیه 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.

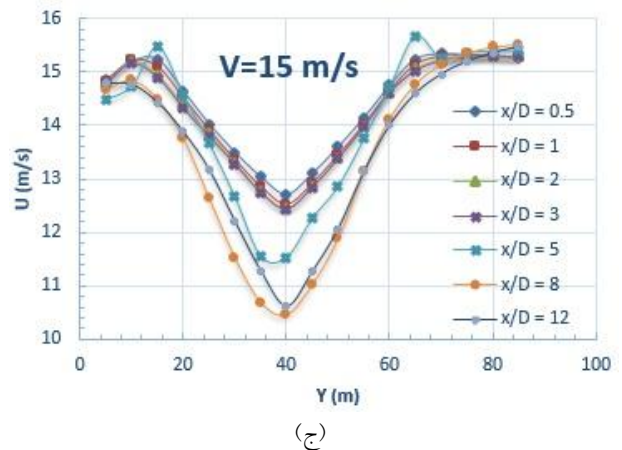
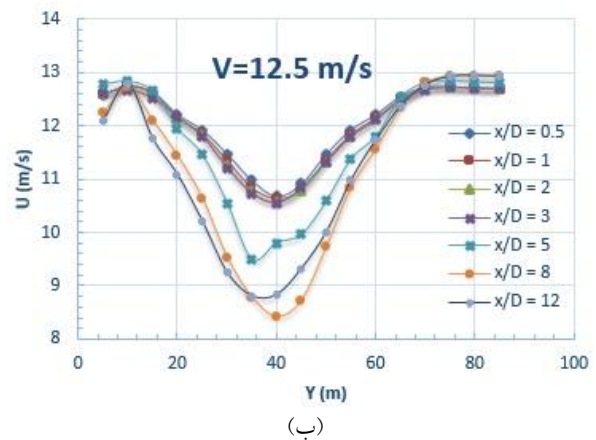
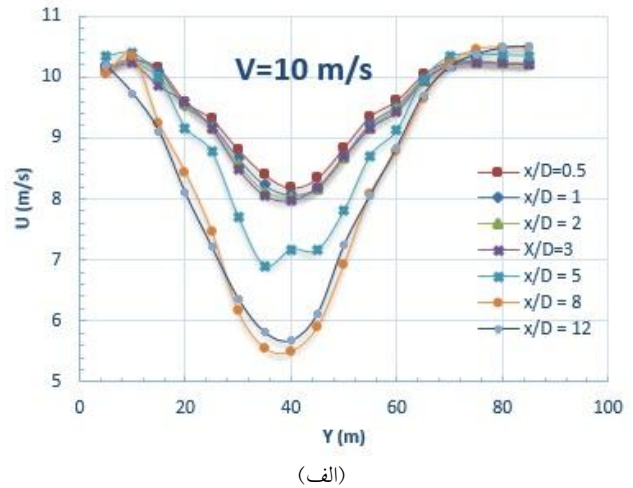
۲.۵. تحلیل نتایج در فاصله هفت و نیم برابر قطر روتور

در این بخش، تأثیر دو توربین که در فاصله ۷/۵ برابر قطر روتور از همدیگر قرار دارند، بررسی می شود. توربین باد اول در ناحیه محاسباتی به عنوان مبدأ مختصات در نظر گرفته شده است. در شکل (۱۵) نمای کلی از ناحیه محاسباتی مفروض نشان داده شده است.



شکل (۱۵): نمای کلی از ناحیه محاسباتی

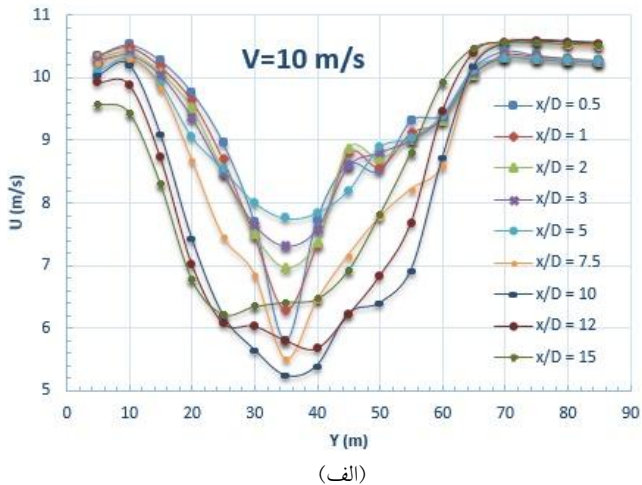
در شکل (۱۶)، کانتور سرعت باد برای یک صفحه عمودی گذرنده از مرکز کانال (صفحه  $z = 0$ ) برای سرعت های مشخص (۱۰، ۱۲/۵، ۱۵ متر بر ثانیه) نشان داده شده است.



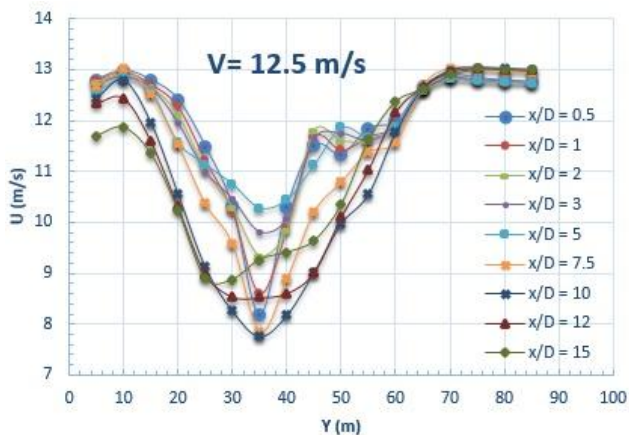
شکل (۱۶): پروفیل سرعت در فواصل مشخص و در سرعت های

الف. ۱۰ m/s، ب. ۱۲/۵ m/s، ج. ۱۵ m/s

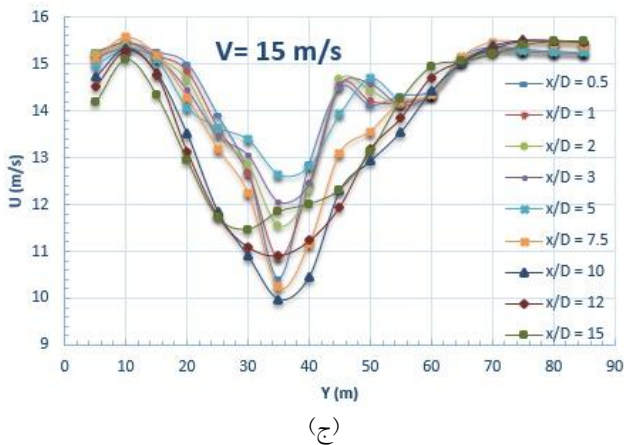
همان طور که از نمودارهای فوق پیداست، بیشترین افت سرعت در فاصله  $x/D=8$  و در ارتفاع ۴۰ متری مشاهده می شود و همچنین سرعت در فاصله  $x/D=12$  بهبود یافته و به سرعت جریان آزاد نزدیک می شود. سرعت در فاصله ۸ تا ۱۲ برابر قطر روتور رشد چشمگیری نداشته است.



(الف)



(ب)

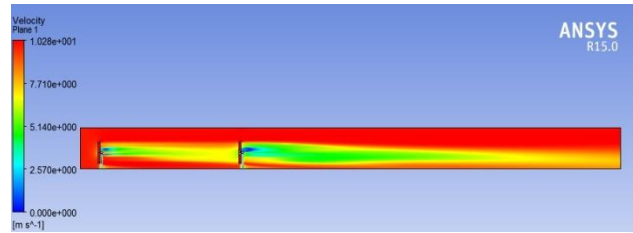


(ج)

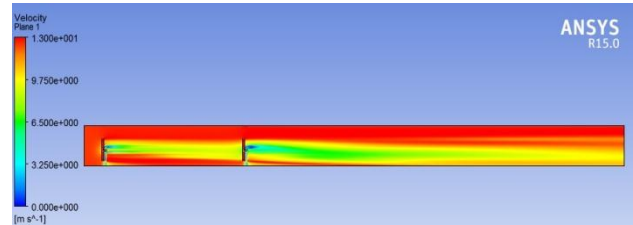
شکل (۱۷): پروفیل سرعت در فواصل مشخص و در سرعت‌های الف.

۱۰ m/s، ب. ۱۲/۵ m/s، ج. ۱۵ m/s

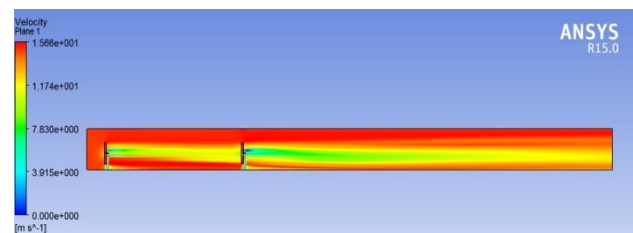
در این قسمت مانند مطالب ارائه شده در قسمت پیشین، به محاسبه توان تولیدی و در نتیجه، بازده مزرعه بادی در سرعت‌های مختلف پرداخت می‌شود. جدول (۶) بیان کننده سرعت جریان ورودی هر توربین (در ارتفاع هاب)، توان و بازده مزرعه بادی است. از جدول فوق کاملاً واضح است که بیشترین بازده در صورتی اتفاق می‌افتد که



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۱۶): کانتور سرعت در راستای X و برای سرعت‌های الف.

۱۰، ب. ۱۲/۵ m/s، ج. ۱۵ m/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 به صورت دوبعدی، امکان مقایسه نتایج در فواصل مختلف پشت توربین فراهم می‌شود. در شکل (۱۷)، مقایسه نتایج دوبعدی با در نظر گرفتن فاصله بین دو توربین ۷/۵ برابر قطر روتور و سرعت‌های ورودی ۱۰ m/s، ۱۲/۵ m/s و ۱۵ m/s در فواصل مختلف پشت توربین نشان داده شده است.

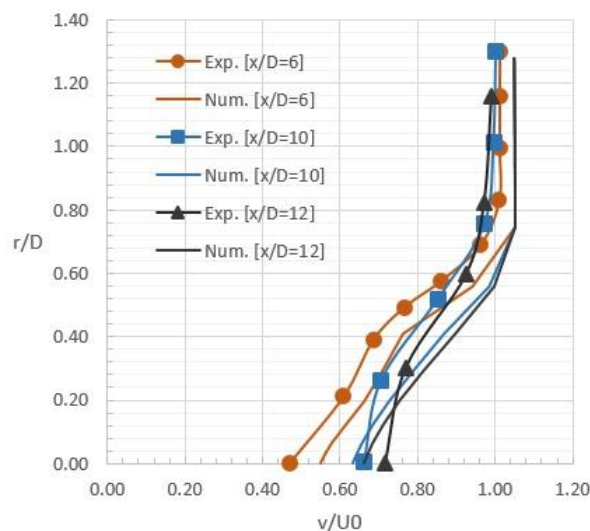
همان‌طور که از نمودارهای پروفیل سرعت در شکل (۱۷) پیداست، بیشترین افت سرعت در فاصله  $x/D=10$  و در ارتفاعی نزدیک به مرکز هاب توربین مشاهده می‌شود و همچنین سرعت در فاصله  $x/D=12$  بهبود یافته و به سرعت جریان آزاد نزدیک می‌شود. سرعت در فاصله ۱۲ تا ۱۵ برابر قطر روتور به مراتب رشد بیشتری داشته است.

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

جدول (۶): مقادیر محاسبه شده 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 به منظور ارزیابی رفتار پروفیل سرعت، مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از تحلیل توربین باد منفرد مورد پژوهش و یک پژوهش تجربی مشابه، صورت گرفته است. نتایج پژوهش تجربی از تست تونل باد حاصل شده است [۲۲]. شکل (۱۶) امکان مقایسه پروفیل سرعت حاصل از نتایج تجربی و عددی را در فواصل مشخص (6D-10D-12D) در پایین دست 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 به دلیل مدل توربولانسی انتخاب شده در شبیه‌سازی جریان است.



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

## ۶. بحث و نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر مدل متداول توربین بادی مورد استفاده در کشورمان انتخاب و رفتار جریان در مزرعه بادی مفروض بررسی شد. بدین

منظور هندسه کامل توربین باد مدل‌سازی شده و در ادامه در ناحیه محاسباتی مفروض، مورد حل عددی قرار گرفت. نتایج حاصل از تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی با در نظر گرفتن استقلال از شبکه به شرح زیر است:

با در نظر گرفتن فاصله ۵ برابر قطر روتور توربین‌های بادی از یکدیگر در ناحیه محاسباتی، سرعت در صفحه 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 مزرعه بادی در صورتی که سرعت ورودی به ناحیه محاسباتی ۱۲/۵ m/s باشد، مقدار ۷۹/۰۲۹۰ درصد است.

کانتور سرعت در پایین دست جریان (در راستای x) به دست آمده و به وسیله آن رفتار فیزیکی دنباله 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 فاصله ۵ برابر قطر روتور در ناحیه محاسباتی، در فاصله‌های مشخص از پشت توربین‌ها و در ارتفاع‌ها و سرعت‌های معین به دست آمده است. با توجه به این نمودارها به خوبی مشخص است که حداکثر کاهش سرعت باد در عبور از توربین در ارتفاعی تقریباً برابر با پایه توربین و در فاصله ۸ برابر قطر روتور اتفاق می‌افتد. در ادامه این نقصان سرعت با رسیدن به فاصله ۱۲ برابر قطر روتور در پشت توربین بهبود یافته و به سرعت جریان آزاد نزدیک می‌شود.

با توجه در نظر گرفتن فاصله ۷/۵ برابر قطر روتور توربین‌های بادی از یکدیگر در ناحیه محاسباتی، سرعت در صفحه 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 مزرعه بادی در صورتی که سرعت ورودی به ناحیه محاسباتی ۱۵ m/s باشد، مقدار ۷۸/۵۲ درصد است.

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

توربین‌های دیگر، ۵ برابر قطر روتور از پشت است.

در نهایت با توجه به بازده به‌دست‌آمده از مزرعه بادی‌های مفروض می‌توان به این نتیجه رسید که بهترین فاصله برای جانمایی

## مراجع

- [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] Vermeulen 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 Turbinwesen; Vol. 90, Thesis, 26: 307-309K. Elissa, 1920.
- [9] Frandsen S, Barthelmie R, Pryor S, Rathmann O, Larsen S, Højstrup J, Thøgersen M, "Analytical Modelling of Wind Speed Deficit in Large Offshore Wind Farms". Wind Energy. Vol. 9, pp. 39-53, April 2006.
- [10] Crasto G, Gravidahl AR, "CFD Wake Modeling Using a Porous Disc", European Wind Energy Conference and Exhibition, Brussels, Belgium, Vol. 15, pp. 656-538, 2008.
- [11] Alinot, Cedric, Masson, Christian, "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 دنباله 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.
- [۱۷] شیخ حسینی موسی، فدائی‌نژاد روح الله، «تعیین آرایش بهینه توربین‌ها برای مزرعه بادی در منطقه میل‌نادر»، نشریه علمی پژوهشی مهندسی و مدیریت انرژی، سال سوم، شماره چهارم، صفحه ۱۴-۲۳، ایران، کاشان، زمستان ۱۳۹۲.
- [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-González J., Burgos-Payan M., Riquelme-Santos, J., "A New and Efficient Method for Optimal Design of Large Offshore Wind Power Plants". IEEE Transactions on Power System, pp. 75 - 84, 2013.
- [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.
- [22] Erich H. "Wind Turbines" 3<sup>rd</sup> 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.
- [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.