



بررسی تأثیر جهت چرخش توربین برای دو توربین باد پشت سرهم به روش شبیه سازی گردابه های بزرگ

امین الله ویسی¹، محمد حسین شفیعی میم^{2*}

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بزرگمهر قائنات، قاین

* قاین، کد پستی 9761986844، shafiei@buqaen.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 23 شهریور 1395
پذیرش: 12 آبان 1395
ارائه در سایت: 28 آذر 1395
کلید واژگان:

توربین باد
شبیه سازی گردابه های بزرگ
جریان آشفته
مدل زیر شبکه اسمالگورینسکی

چکیده

در این مطالعه از روش شبیه سازی گردابه های بزرگ به منظور بررسی اثرات جهت چرخش توربین باد پایین دست در دو پیکربندی جهت چرخش موافق و جهت چرخش مخالف استفاده شده است. نتایج به دست آمده با نتایج تجربی گزارش شده در کارهای گذشته تطابق خوبی دارد. پیکربندی جهت چرخش مخالف به منظور بررسی اثر آن بر بازدهی توربین باد پایین دست استفاده شده است. نتایج نشان می دهد بازدهی توربین باد پایین دست در پیکربندی جهت چرخش مخالف بدون هیچ تغییری در نوع توربین باد و آرایش مزرعه بادی حدود 4 درصد افزایش می یابد. توربین باد بالادست مقداری از انرژی باد را دریافت می کند. از این رو سرعت در راستای جریان کاهش و در راستاهای جانبی افزایش می یابد. جهت چرخش جریان در پشت توربین باد بالادست موافق جهت چرخش توربین باد پایین دست در پیکربندی جهت چرخش مخالف می باشد. این موضوع دلیل افزایش بازدهی توربین باد پایین دست در یک پیکربندی جهت چرخش مخالف است. نتایج مطالعه حاضر نشان می دهد پروفیل سرعت در راستای جریان در ناحیه دنباله برای هر دو پیکربندی جهت چرخش موافق و جهت چرخش مخالف تقریباً یکسان است، در حالی که سرعت جانبی تغییرات زیادی دارد. به عبارت دیگر بازدهی بهتر مزرعه بادی می تواند به خاطر سرعت جانبی باشد. از این رو با کاهش فاصله بین دو توربین باد در پیکربندی جهت چرخش مخالف بازدهی توربین باد پایین دست افزایش می یابد.

Investigation of blade rotation direction in two in line turbines using large eddy simulation

Amin Allah Veisi¹, Mohammad Hossein Shafiei Mayam^{2*}

1- Department of Mechanical Engineering, Sistan and Baluchestan University, Zahedan, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Bozorgmehr-University of Qaenat, Qaen, Iran

* P.O.B. 9761986844 Qaen, Iran, shafiei@buqaen.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 13 September 2016
Accepted 02 November 2016
Available Online 18 December 2016

Keywords:
Wind turbine
large eddy simulation
turbulence flow
Smagorinsky subgrid-scale model

ABSTRACT

In this study Large Eddy Simulation method has been employed in order to investigate the effects of blade rotation direction of the downstream turbine in two co-rotating and counter-rotating configurations. The acquired results are in good agreement with presenting experimental data in literatures. Counter-rotating configuration is used in order to investigate the effect of blade rotation on the efficiency of downstream wind turbine. The results show that the efficiency of downstream wind turbine has increased about 4 percent without any change in wind farm layout and type of wind turbines. The upstream wind turbine absorbed a portion of wind energy. Hence the streamwise velocity is decreased and lateral velocities are increased in downstream direction. The flow behind the upstream turbine is rotated in the same direction with downstream turbine in a counter-rotating configuration. This is why the efficiency of downstream turbine is increased in a counter-rotating configuration. The results of the present study show that streamwise velocity profile is almost identical in both configurations, while lateral velocities are changed considerably. In other words, the better efficiency of wind farm could be due to the lateral velocities. Hence, the efficiency of wind farm could be increased by decreasing the distance between two consecutive wind turbines in a counter-rotating configuration.

1- مقدمه

انرژی های تجدیدپذیر انرژی باد از اهمیت ویژه ای برخوردار است. این نوع از انرژی آلودگی زیست محیطی ندارد و به طور گسترده در سرتاسر جهان توزیع شده است [1]. ظرفیت انرژی باد قابل استفاده در سرتاسر دنیا خیلی بیشتر از انرژی مصرفی جهان است [2]. از این رو به علت افزایش تقاضای انرژی در سال های اخیر، توسعه سریع توربین های باد و مزارع بادی¹ در سرتاسر دنیا

تقاضای رو به رشد انرژی در سال های اخیر مصرف انرژی را افزایش داده است. سوخت های فسیلی منابع سنتی انرژی می باشند. این سوخت ها بزرگترین منبع گسیل دی اکسید کربن و عامل اصلی گرمایش کره زمین می باشند. سوخت های فسیلی منابع محدودی دارند و روزی تمام می شوند. انرژی های تجدیدپذیر جایگزینی برای سوخت های فسیلی می باشند. در بین

¹ Wind farms

با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ اثرات هم‌راستایی و طول مزرعه بادی را مورد مطالعه قرار داده و نشان دادند که برای دستیابی به حداکثر قدرت تولیدی لزوماً نیاز به استفاده از پیکربندی شطرنجی در مزارع بادی نمی‌باشد. لی و همکاران [2] جریان حول یک توربین باد محور افقی با سرعت‌های متفاوت جریان باد ورودی با دو رویکرد RANS و شبیه‌سازی گردابه‌های جدا شده⁵ را مطالعه کردند. مطالعات آن‌ها نشان می‌دهد که در سرعت‌های بالای جریان باد، شبیه‌سازی گردابه‌های جدا شده در نمایش گردابه‌های جدا شده از پره‌های توربین باد نسبت به RANS برتری دارد. ابرون و همکاران [10] در یک مطالعه آزمایشگاهی مشخصه‌های دنباله یک مدل ساده شده توربین باد غیر چرخان متخلخل و یک توربین باد چرخان سه پره را با دو شدت آشفتگی مختلف مطالعه کردند. آن‌ها نشان دادند مدل ساده شده غیر چرخان متخلخل دنباله را در پایین‌دست توربین باد به درستی پیش بینی می‌کند. یانگ و همکاران [11] یک مطالعه آزمایشگاهی برای مشخص کردن، شکل‌گیری و سیر گردابه‌های مارپیچی جدا شده از پره‌های توربین⁶ انجام دادند. ژانگ و همکاران [6] یک توربین باد محور افقی را با استفاده از روش آزمایشگاهی PIV مطالعه کردند. آن‌ها نشان دادند ناحیه دنباله نزدیک توربین بادی با خصوصیات گردابه‌های مارپیچی جدا شده از پره‌های توربین، غیر یکنواختی و ناهمگنی شدید مشخصه‌های جریان آشفتخته شناخته می‌شود. مائدا و همکاران [12] شدت آشفتگی جریان باد ورودی به تونل باد بر پروفیل دنباله در پایین‌دست توربین باد را مورد مطالعه قرار داده و نشان دادند که در شدت آشفتگی بالا، ناحیه دنباله سریع‌تر بازیابی می‌شود.

همان‌طور که ذکر شد مطالعات فراوانی به منظور فهم بهتر ناحیه دنباله، فاصله بین توربین‌های باد و آرایش مزارع بادی انجام شده است. با افزایش فاصله بین دو توربین باد بازدهی مزرعه باد افزایش می‌یابد. این چیدمان مزرعه بادی احتیاج به فضای بیشتری دارد، در حالی که در مناطق زیادی محدودیت فضا وجود دارد. از این‌رو حل این مشکل اهمیت بسزایی در طراحی مزارع بادی دارد. یک روش برای حل این مشکل پیکربندی جهت چرخش مخالف است. بر اساس بقای مومنتم زاویه‌ای، جریان پشت توربین باد خلاف جهت چرخش پره می‌چرخد [11,6]. از این‌رو توربین باد پایین‌دست می‌تواند انرژی بیشتری از باد دریافت کند اگر خلاف جهت توربین باد بالادست بچرخد.

مطالعه حاضر بر اساس نتایج آزمایشگاهی بلایند تست 1 و بلایند تست 2 می‌باشد [14,13]. ابتدا جریان حول یک توربین باد تنها که در جهت پادساعتگرد می‌چرخد (اگر از بالادست به توربین نگاه شود) در سرعت‌های دورانی متفاوت به روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ مطالعه می‌شود. همچنین یک توربین باد تنها که در جهت ساعتگرد می‌چرخد نیز در سرعت‌های دورانی مختلف بررسی می‌شود. پره‌های این توربین باد با آینه کردن پره‌های توربین باد پادساعتگرد ایجاد شده‌اند. سپس جریان حول دو توربین باد پشت سر هم با دو پیکربندی جهت چرخش موافق و جهت چرخش مخالف شبیه‌سازی می‌شوند (شکل 1). علاوه بر این اثرات کاهش فاصله بین دو توربین باد نیز مطالعه می‌شود. یکی از فاکتورهای مهم در طراحی مزارع بادی، فضای مورد نیاز برای نصب توربین‌های باد می‌باشد. در پیکربندی جهت چرخش موافق کاهش فاصله جدایش منجر به کاهش بازدهی مزارع بادی می‌شود، در حالی که در پیکربندی جهت چرخش مخالف کاهش فاصله منجر به افزایش بازدهی می‌شود. نتایج کار حاضر می‌تواند در اصلاح و چیدمان

مورد توجه قرار گرفته است. توربین‌های باد به دو دسته عمده تقسیم می‌شوند. توربین‌های محور افقی که حول یک محور افقی می‌چرخند و رایج‌ترین نوع توربین‌های بادی می‌باشند [3]. توربین‌های محور عمودی که روتور اصلی به صورت عمودی نصب می‌شوند، این توربین‌ها نیازی به تنظیم جهت چرخش نسبت به جریان باد ندارند. جریان حول پره‌های توربین باد محور افقی اختلاف فشاری بین دو طرف پره ایجاد می‌کند، که نتیجه آن یک نیروی برا بر روی پره است. این نیرو گشتاوری حول محور توربین باد ایجاد می‌کند و باعث چرخش آن می‌شود. ناحیه دنباله به دو قسمت دنباله نزدیک توربین¹ و دنباله دور از توربین² تقسیم شده است [4]. ناحیه دنباله نزدیک حد فاصل بین 1 تا 3 برابر قطر روتور توربین باد است. در این ناحیه اثرات هندسه پره و گردابه‌های جدا شده از پره شدت بیشتری دارند. یک ویژگی مهم توربین‌های باد محور افقی گردابه‌های جدا شده از لبه پره می‌باشد. مسیر حرکت این گردابه‌ها مارپیچی است و به وسیله چرخش پره ایجاد شده است. گردابه‌های جدا شده از پره عامل تولید نویز و ارتعاش پره می‌باشند [5]. اطلاعات کافی در مورد رفتار گردابه‌ها و تأثیر آن‌ها بر توربین‌های پایین‌دست به منظور تخمین بهتر بارهای وارد بر آن‌ها موجود نیست. مزارع بادی را می‌توان با بررسی ساختارهای آشفتگی بهینه‌سازی کرد. به عبارت دیگر اثرات جریان سیال بر توربین‌های بادی از طریق ساختارهای آشفتگی به منظور افزایش بازدهی مزارع بادی می‌تواند مطالعه شود. ناحیه پایین‌دست این قسمت، ناحیه دنباله دور از توربین بادی تعریف می‌شود. در ناحیه دنباله دور اثرات هندسه توربین اهمیت کمتری دارد. توربین باد پایین‌دست تحت تأثیر دنباله توربین باد بالادست می‌باشد. در حقیقت توربین باد پایین‌دست شرایط متفاوتی نسبت به یک توربین باد تک دارد. مقداری از انرژی باد توسط توربین باد بالادست جذب می‌شود، از این‌رو توربین باد پایین‌دست در معرض انرژی باد کمتر و شدت آشفتگی³ بیشتری قرار دارد. انرژی قابل برداشت توسط یک توربین باد متناسب با مکعب سرعت است. بنابراین انرژی تولیدی توربین پایین‌دست کمتر از توربین بالادست است. با توجه به دلایل ذکر شده مطالعه گسترش دنباله در پایین‌دست توربین باد به منظور کاهش اثرات برهمکنش دنباله و افزایش بازدهی عملکرد مزارع بادی اهمیت بسیاری دارد [6].

مطالعات عددی و آزمایشگاهی بسیاری به منظور فهم بهتر میدان جریان در پایین‌دست یک توربین باد محور افقی صورت گرفته است. بسیاری از تحقیقات از روش RANS استفاده کرده‌اند که نتیجه آن میدان سرعت متوسط‌گیری شده زمانی است. میدان سرعت لحظه‌ای به منظور فهم بهتر میدان جریان نیاز است، از این‌رو روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ⁴ توسط محققان بسیاری برای حل این مشکل پیشنهاد شده است. اوهمو و همکاران [7] به بررسی تغییرات سرعت باد بر ناپایداری و گسترش دنباله با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ و مدل مش لغزان پرداختند. آن‌ها مشاهده کردند که در ناحیه دنباله نزدیک توربین باد گردابه‌های مارپیچی پایداری، توسط پره‌های توربین ایجاد می‌شود که این ساختارهای آشفتگی در ناحیه دنباله ناپایدار می‌شوند و در ناحیه دنباله دور از توربین به گردابه‌های کوچک‌تری تفکیک می‌شوند. پخته اگل و همکاران [8] با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ لایه مرزی اتمسفری گذرنده از مزرعه بادی را مطالعه کردند. نتایج آن‌ها می‌تواند برای افزایش بازدهی توربین‌های باد و افزایش عمر توربین‌های بادی مورد استفاده قرار گیرد. استیون و همکاران [9]

¹ Near wake² Far wake³ Turbulence intensity⁴ LES⁵ DES⁶ Helical tip vortices

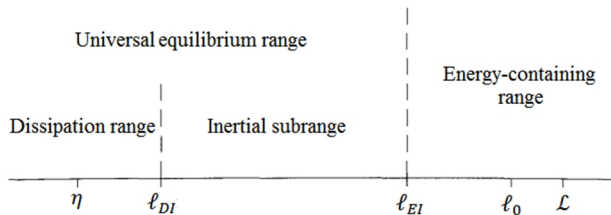


Fig. 2 Eddy sizes at very high Reynolds number, with various lengthscales [15]

شکل 2 اندازه گردابه‌ها در اعداد رینولدز بالا با مقیاس‌های طولی مختلف [15]

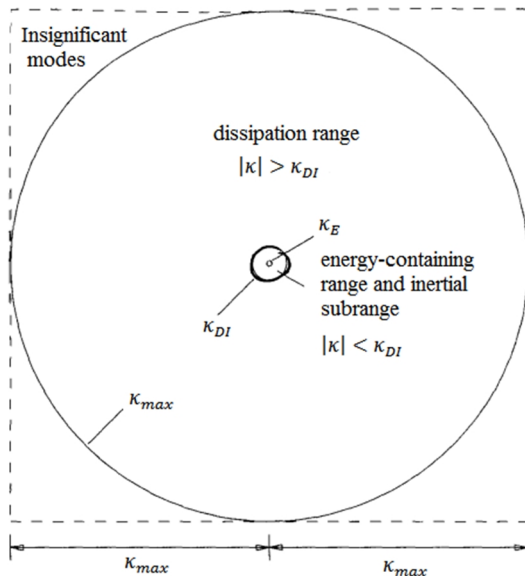


Fig 3 The solution domain in wavenumber space for DNS method [15]

شکل 3 محدوده محاسباتی در محیط طیفی برای روش DNS [15]

RANS معادلات رینولدز برای میدان سرعت متوسط حل می‌شوند و اطلاعات لحظه‌ای سرعت در دسترس نمی‌باشند، ولی در روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ حرکت‌های مقیاس بزرگ ناپایدار به طور صریح ارائه می‌شوند. این روش می‌تواند برای جریان‌هایی که حرکت‌های مقیاس بزرگ ناپایدار، جدایی جریان و جدا شدن گردابه دارند دقیق‌تر و قابل اعتمادتر از مدل‌های تنش رینولدز باشد [15]. محدوده محاسباتی در مطالعه حاضر به طور کلی از دو بخش محرک و ثابت تشکیل شده است. در بخش ثابت معادلات پیوستگی و مومنتم فیلترگیری شده برای جریان تراکم ناپذیر به صورت روابط (2,1) است:

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{U}_j}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}_i \bar{U}_j}{\partial x_i} = \nu \frac{\partial^2 \bar{U}_j}{\partial x_i \partial x_i} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_j} \quad (2)$$

در معادله (2)، \bar{P} میدان فشار فیلتر شده است. تجزیه میدان سرعت در روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ و متوسط‌گیری زمانی میدان سرعت به ترتیب در معادلات (3) و (4) نشان داده شده است:

$$U = \bar{U} + u' \quad (3)$$

$$U = \langle U \rangle + u \quad (4)$$

U میدان سرعت لحظه‌ای، \bar{U} میدان سرعت فیلترگیری شده مکانی، u' میدان سرعت پسماند² و u میدان سرعت نوسانی می‌باشد.

توربین‌ها در یک مزرعه بادی و همچنین افزایش عملکرد این مزارع مورد استفاده قرار گیرد. لذا با عنایت به توضیحات ارائه شده و اهمیت موضوع انرژی‌های نو، کار حاضر یک مطالعه کاربردی و مفید خواهد بود.

2- شبیه‌سازی عددی

1-1- معادلات حاکم

در روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، گردابه‌های سه بعدی ناپایدار بزرگ‌تر به طور مستقیم حل می‌شوند و اثرات گردابه‌های مقیاس کوچک مدل می‌شوند. در این روش مقیاس‌های شامل انرژی حل می‌شوند و گردابه‌های کوچک‌تر از ℓ_{EI} طبق تعریف کولومگروف جدا کننده مقیاس‌های بزرگ از مقیاس‌های کوچک است) مدل می‌شوند. محدوده محاسباتی در اعداد رینولدز بالا با مقیاس‌های طولی مختلف در شکل 2 نشان داده شده است. محدوده شامل انرژی در برگرفته گردابه‌هایی است که بیش از 80 درصد انرژی جریان را شامل می‌شوند.

در روش عددی مستقیم تمامی ساختارهای آشفتگی تا مقیاس کولومگروف، حل می‌شوند. از نظر هزینه محاسباتی، شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ بین مدل تنش‌های رینولدز¹ و روش شبیه‌سازی عددی مستقیم قرار می‌گیرد و دلیل به وجود آمدن روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ محدودیت‌های این دو روش می‌باشد. برای مثال هزینه محاسباتی روش عددی مستقیم با مکعب عدد رینولدز افزایش می‌یابد، اکثر هزینه محاسباتی در DNS، صرف کوچکترین حرکت‌های اتلافی می‌شود [15]. شکل 3 محدوده محاسباتی در فضای عدد موج برای روش DNS را نشان می‌دهد. 99.98% مودها در عدد موج $|\kappa| < \kappa_{DI}$ و تنها 0.02 مودها در $|\kappa| > \kappa_{DI}$ قرار دارند که این محدوده مشخص کننده بزرگ‌ترین حرکت‌های اتلافی است. یعنی بیشتر هزینه محاسباتی در روش DNS صرف کوچک‌ترین مقیاس‌های حرکت می‌شود، این مقیاس‌ها کمتر از 20 درصد انرژی را شامل می‌شوند.

این موضوع اهمیت استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ را به خوبی نشان می‌دهد. تنش‌های رینولدز ظاهر شده در معادلات RANS مجهول می‌باشند. تنش‌های رینولدز از طریق لزجت آشفتگی یا به صورت مستقیم یا از طریق معادلات انتقالی تنش رینولدز حل می‌شوند. در مدل‌های

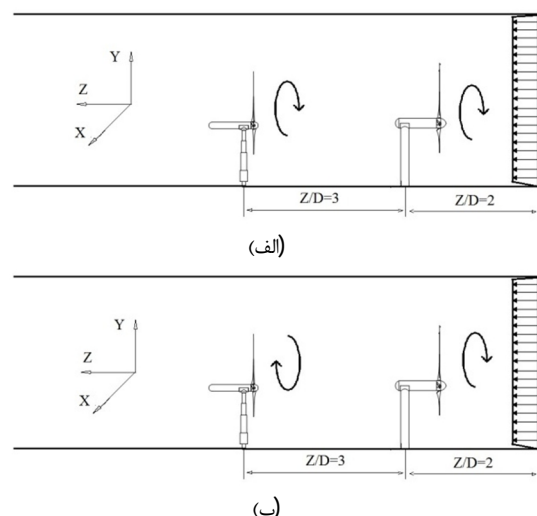


Fig 1 (a) Co-rotating configuration. (b) counter-rotating configuration
شکل 1 (الف) پیکربندی جهت چرخش موافق (ب) پیکربندی جهت چرخش مخالف

² Residual (SGS) velocity field

¹ Reynolds Stress Models

به نرخ فیلتر شده کرنش مرتبط می‌شود.

$$\tau_{ij}^r = -2\nu_r \bar{S}_{ij} \quad (15)$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \quad (16)$$

ضریب تناسب ν_r در رابطه بالا لزجت گردابه‌ای حرکت‌های پسماند است و \bar{S}_{ij} تانسور نرخ کرنش فیلتر شده است. لزجت گردابه‌ای با قیاس از فرضیه طول اختلاطی³ به صورت رابطه (17) مدل می‌شود:

$$\nu_r = \ell_s^2 \bar{S} = (C_s \Delta)^2 \bar{S} \quad (17)$$

که در اینجا \bar{S} نرخ کرنش فیلتر شده مشخصه می‌باشد، ℓ_s مقیاس طولی اسماغورینسکی است که از طریق ثابت اسماغورینسکی C_s متناسب با عرض فیلتر Δ می‌شود. مدل‌های دیگری نیز برای حل مسأله محصور در روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ پیشنهاد شده است. ژرمانو و همکاران [17] مدل دینامیکی را ارائه کردند که با استفاده از دو تابع فیلتر یک مقدار محلی مناسب از C_s ارائه می‌کرد. مدتی بعد اصلاحاتی بر روی این مدل توسط لیلی [18] و منوو و همکاران [19] صورت گرفت. مدل‌های دیگری نیز توسط بردینا و همکاران [20] و کلارک و همکاران [21] پیشنهاد شد، این مدل‌ها ترکیبی از مدل اسماغورینسکی با مدل‌های دیگر است که اصطلاحاً به آن‌ها مدل‌های ترکیبی⁴ گفته می‌شود. مدل اسماغورینسکی علاوه بر سادگی هزینه محاسباتی کمتری دارد و برای بسیاری از جریان‌های آشفته نتایج خوبی داشته است. در این مطالعه از مدل اسماغورینسکی به خاطر سادگی و کمتر بودن هزینه محاسباتی استفاده شده است. ثابت اسماغورینسکی یک ثابت تجربی است که با توجه به شرایط مسأله و موارد تجربه شده‌ی قبلی انتخاب می‌شود. در این مطالعه مقدار این ثابت برابر $C_s=0.1$ انتخاب شده که مطابقت خوبی با نتایج تجربی دارد. عرض فیلتر برابر اندازه شبکه است و با رابطه (18) محاسبه می‌شود:

$$\Delta = (\Delta_x \Delta_y \Delta_z)^{1/3} \quad (18)$$

3-2- مشخصات توربین باد محور افقی

این مطالعه بر اساس نتایج آزمایشگاهی بلایند تست 1 و بلایند تست 2 می‌باشد [13] و [14]. کارگاه بلایند تست 1 یک توربین باد تنها و کارگاه بلایند تست 2 دو توربین باد با هندسه مشابه است که آرایش خطی دارند فقط اندکی قطر توبی‌ها متفاوت می‌باشد که باعث می‌شود قطر روتورها مقداری متفاوت شود، $D_2=0.894\text{m}$ و $D_1=0.944\text{m}$. توربین باد کارگاه بلایند تست 1 هندسه کاملاً یکسانی با توربین باد پایین‌دست در کارگاه بلایند تست 2 دارد. اگر از بالادست به توربین باد نگاه شود توربین‌ها در جهت پاد ساعتگرد می‌چرخند. بال‌واره استفاده شده در پره‌های توربین باد از نوع NRELS826 می‌باشد. این پروفیل به گونه‌ای طراحی شده است که ضریب برا بالا باشد و حساسیت کمی به زبری داشته باشد، و همچنین برای پره با نوکی که سختی کمی دارد متناسب باشد [22]. توصیف کاملی از بال‌واره همراه با ضرایب برا و پسا برای جریان‌هایی با اعداد رینولدز بالا توسط سامر [23] ارائه شده است. در شکل 4 مقطع بال‌واره نمایش داده شده است.

4-2- شرایط مرزی و شبکه محاسباتی

تونل باد شبیه‌سازی شده در این مطالعه به ترتیب طول، عرض و ارتفاع $11.14\text{m} \times 2.7\text{m} \times 1.8\text{m}$ دارد. توربین‌های باد در مرکز تونل باد نصب شده

از آنجا که ضرب فیلتر شده $\bar{U}_i \bar{U}_j$ با ضرب سرعت‌های فیلتر شده $\bar{U}_i \bar{U}_j$ تفاوت دارد، رابطه (2) با معادلات ناویر استوکس تفاوت دارد. اختلاف بین این دو، تانسور تنش پسماند است که به صورت رابطه (5) تعریف می‌شود:

$$\tau_{ij}^R = \bar{U}_i \bar{U}_j - \bar{U}_i \bar{U}_j \quad (5)$$

این تانسور با تانسور تنش رینولدز قابل قیاس است:

$$\langle u_i u_j \rangle = \langle U_i U_j \rangle - \langle U_i \rangle \langle U_j \rangle \quad (6)$$

با جایگذاری رابطه (5) در رابطه (2) به دست می‌آید:

$$\frac{\partial \bar{U}_j}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}_i \bar{U}_j}{\partial x_i} = \nu \frac{\partial^2 \bar{U}_j}{\partial x_i \partial x_i} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}^R}{\partial x_i} \quad (7)$$

تانسور تنش پسماند غیر ایزوتروپیک¹ به صورت رابطه (8) تعریف می‌شود:

$$\tau_{ij}^R = \tau_{ij}^R - \frac{2}{3} k_r \delta_{ij} \quad (8)$$

تنش پسماند ایزوتروپیک در فشار فیلتر شده اصلاح شده ظاهر می‌شود:

$$\bar{P} = \bar{P} + \frac{2}{3} \rho k_r \quad (9)$$

و معادله مومنتم به صورت رابطه (10) در می‌آید:

$$\frac{\partial \bar{U}_j}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}_i \bar{U}_j}{\partial x_i} = \nu \frac{\partial^2 \bar{U}_j}{\partial x_i \partial x_i} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}^R}{\partial x_i} \quad (10)$$

در سیستم مختصات متحرک، پره‌ها سرعت زاویه‌ای ثابت $\vec{\omega}$ را نسبت به محیط ساکن دارند. مرکز سیستم محرک با یک بردار مکان \vec{r}_0 مشخص شده است. محور چرخش در جهت بردار \vec{z} است، پس می‌توان رابطه (11) را نوشت:

$$\vec{\omega} = \omega \vec{z} \quad (11)$$

و موقعیت پره نسبت به مرکز محیط محرک با بردار مکان \vec{r} مشخص می‌شود. سرعت سیال با رابطه (12) از محیط ساکن به محیط محرک تبدیل می‌شود:

$$\vec{v}_r = \vec{v} - \vec{\omega} \times \vec{r} \quad (12)$$

در رابطه بالا \vec{v}_r ، سرعت نسبی (سرعت در محیط محرک) است، \vec{v} سرعت مطلق (سرعت در محیط ساکن) و $\vec{\omega}$ سرعت زاویه‌ای است. معادلات پیوستگی و مومنتم در سیستم مختصات محرک به صورت روابط (13)، (14) بازنویسی می‌شود:

$$\nabla \cdot \vec{v}_r = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v}_r \vec{v}) \vec{\omega} \times \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \vec{v} \quad (14)$$

2-2- مدل زیر شبکه

در روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ نیز مشابه روش معادلات رینولدز مسأله محصور² وجود دارد. در روش معادلات رینولدز برای یک جریان سه‌بعدی، چهار معادله حاکم مستقل وجود دارد؛ سه مؤلفه معادله مومنتم و معادله پیوستگی، در حالی که تعداد مجهولات این چهار معادله علاوه بر سه مؤلفه سرعت و فشار (4 مجهول) شامل تنش‌های رینولدز نیز می‌شود. این موضوع در مکانیک سیالات تحت عنوان مسأله محصور شناخته می‌شود. برای حل این مشکل تانسور تنش‌های رینولدز با استفاده از مدل‌های لزجت آشفتگی یا از طریق معادلات تنش رینولدز به دست می‌آید. مسأله محصور در روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ با مدل کردن تانسور تنش پسماند همسانگرد حل می‌شود. ساده‌ترین مدل توسط اسماغورینسکی [16] پیشنهاد شده است. در این مدل ابتدا با استفاده از مدل لزجت گردابه ای خطی تانسور تنش پسماند

³ Mixing-length hypothesis

⁴ Mixed models

¹ Anisotropic residual-stress

² Closure problem

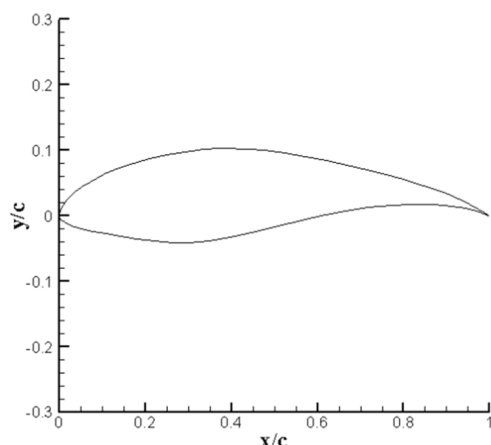


Fig 4 NREL S826 airfoil.

شکل 4 بالواره NREL S826.

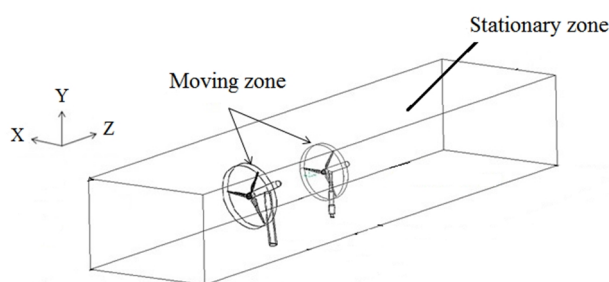


Fig 5 Wind tunnel placement of two in line turbines.

شکل 5 محل قرار گیری دو توربین باد پشت سر هم.

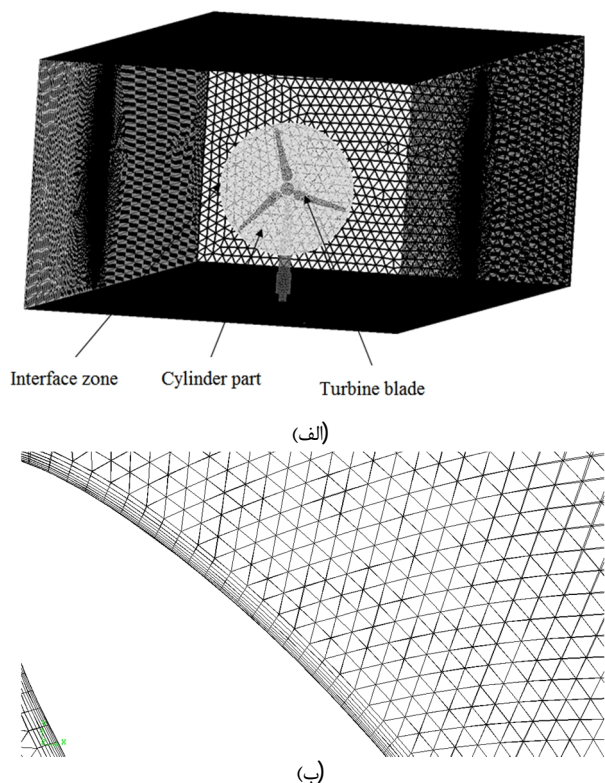


Fig 6 (a) computational mesh for a single wind turbine (b) typical mesh around the blade surface.

شکل 6 (الف) شبکه محاسباتی برای یک توربین باد (ب) نمونه شبکه بندی حول سطح پره

است. فاصله توربین باد از ورودی تونل باد برای یک توربین باد تنها برابر با 5D است. قطر روتور توربین است. و برای دو توربین باد پشت سر هم این فاصله برابر 2D است. فاصله بین دو توربین برابر 3D است. ارتفاع مرکز تویی از سطح زمین برای تمامی توربین ها 0.817m است (شکل 5).

در این مطالعه هندسه توربین باد دقیقاً مشابه مدل آزمایشگاهی اجرا شده است. محدوده محاسباتی در مطالعه حاضر به طور کلی از دو بخش محرک و ثابت تشکیل شده است. بخش محرک شامل یک استوانه باریک است که تراکم شبکه محاسباتی در این ناحیه زیاد است، پره های توربین باد درون استوانه قرار گرفته اند و امکان چرخش پرها در این بخش فراهم شده است. بخش ثابت مابقی فضای تونل باد را شامل می شود. به دلیل استفاده از تکنیک مش لغزان¹ برای بخش متحرک بر خلاف مدل MRF یک وجه مشترک دو لایه ای انتخاب شده است. تکنیک مش لغزان دقیق ترین روش شبیه سازی جریان برای بخش های محرک چندگانه می باشد، اما استفاده از این روش هزینه محاسباتی را بالا می برد. به منظور حل گردابه های شدید سرعت در مجاورت روتور توربین باد، شبکه بندی در نواحی نزدیک پره، تویی و برج نگهدارنده بسیار ریز در نظر گرفته شده است. در نزدیکی پره های توربین باد حداکثر مقدار Δy^+ برابر 5 است که مقدار قابل قبولی برای این روش شبیه سازی است (شکل 6). سرعت باد در ورودی تونل باد 10 m/s است. در این سرعت ورودی شدت آشفتگی $TI = 0.3\%$ است. شدت آشفتگی به صورت نسبت انحراف معیار به سرعت مرجع با رابطه (19) تعریف می شود:

$$TI = \frac{\langle u^2 \rangle^{1/2}}{U_{ref}} \quad (19)$$

در سطوح پره، برج و دیوارهای تونل باد نیز دیواره با شرط عدم لغزش اعمال شده است. نسبت سرعت نوک پره در رابطه (20) ارائه شده است:

$$TSR = \omega R / U_{ref} \quad (20)$$

که در اینجا ω سرعت دورانی، R شعاع روتور و U_{ref} سرعت مرجع است. در کار حاضر سرعت دورانی برای یک توربین باد تنها $TSR=6$ و برای پیکربندی با دو توربین باد پشت سر هم سرعت دورانی توربین باد بالادست $TSR=6$ و برای توربین باد پایین دست $TSR=4$ است. سرعت های دورانی به گونه ای انتخاب شده اند که بالاترین بازدهی را داشته باشند [14].

در صورتی که جریانی شرایط آشفته شدن را داشته باشد، با کوچک ترین اغتشاشی، آن اغتشاش تشدید شده و جریان کاملاً آشفته می شود. لذا در صورتی که عدد رینولدز به اندازه کافی بزرگ باشد و اغتشاشات محیطی و جریانی نیز وجود داشته باشند، جریان آشفته می شود. زمانی که برای اولین بار اغتشاشات شکل گرفته و تشدید شوند، به لحاظ ماهیت این گونه جریان ها ساختارهای آشفته گی به طور مرتب تکرار می شوند. به عبارت دیگر بخشی از ساختارها باعث تولید انرژی آشفته گی و بخش دیگری باعث اتلاف انرژی آشفته گی می شوند. ساختارهای اتلافی با تبدیل انرژی جنبشی به انرژی درونی باعث اتلاف می شوند. لذا وقتی که تعادلی بین تولید و اتلاف انرژی جنبشی آشفته گی برقرار شد، یک جریان پایدار از نظر پدیده های آشفته گی رخ می دهد. در این صورت هیچ لزومی برای میرا شدن اغتشاشات جریان آشفته و تبدیل آن به جریان آرام وجود ندارد.

عدد رینولدز محلی بر اساس وتر پره برای $TSR=6$ برابر $Re_c^{tip} = 10^5$ است، البته در مقایسه با یک توربین باد مقیاس واقعی این عدد رینولدز یک مرتبه کوچک تر است. عدد رینولدز بر اساس وتر پره اثرات قابل توجهی بر مشخصه های عملکردی توربین باد دارد. برای مثال بیشینه قدرت تولیدی

¹ Sliding mesh technique

سرهم مقایسه شده است (شکل 7-ب). پروفیل سرعت بی‌بعد شده در راستای جریان و در امتداد خط افقی گذرنده از مرکز چرخش توربین باد برای دو توربین باد پشت سرهم در فاصله 1D و 4D پس از توربین باد با نتایج تجربی دو مطالعه عددی دیگر مقایسه شده است (شکل 8). بین نتایج به‌دست آمده و نتایج آزمایشگاهی تطابق خوبی وجود دارد. اختلاف متوسط بین کار حاضر و نتایج تجربی حدود 2 درصد است و بیشینه خطا در بعضی نقاط حدود 6 درصد است.

4- بحث و آنالیز نتایج

در این قسمت نتایج کار حاضر ارایه شده و ضمن مقایسه با کارهای گذشته، تحلیل و تفسیر آن‌ها نیز به اختصار گزارش شده است.

4-1- مقایسه ضریب توان

همان‌طور که ذکر شد، پره‌های ساعتگرد با آینه کردن پره‌های پاد ساعتگرد ساخته می‌شوند. از این‌رو انتظار می‌رود یک توربین باد ساعتگرد با یک توربین باد پاد ساعتگرد تحت شرایط مشابه ضریب توان یکسانی داشته باشد. شکل 9 ضریب توان در سرعت‌های دورانی مختلف برای یک توربین باد ساعتگرد و پادساعتگرد را نشان می‌دهد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد ضریب توان در تمامی سرعت‌های دورانی برای هر دو نوع توربین باد تقریباً یکسان است. در ادامه ضریب توان برای دو توربین باد پشت سرهم با دو پیکربندی جهت چرخش موافق و جهت چرخش مخالف محاسبه می‌شود. نتایج نشان می‌دهد ضریب توان حدود 4 درصد در توربین پایین‌دست برای پیکربندی جهت چرخش مخالف افزایش می‌یابد. در ادامه فاصله بین توربین باد پایین‌دست و بالادست در پیکربندی جهت چرخش مخالف به منظور افزایش بازدهی کاهش داده می‌شود. کاهش فاصله بین دو توربین باد باعث افزایش بازدهی پیکربندی جهت چرخش مخالف می‌شود (شکل 10).

4-2- گردابه‌های جدا شده از توربین باد

توربین باد پایین‌دست تحت تأثیر دنباله توربین باد بالادست است. در حقیقت ساختارهای آشفتگی بارهای دینامیکی و ارتعاشات قابل توجهی بر توربین باد پایین‌دست وارد می‌کنند. از این‌رو فهم بهتر ساختارهای آشفتگی در ناحیه دنباله توربین باد به منظور کمینه کردن بارهای دینامیکی حاصل از جریان باد بر توربین‌های پایین‌دست و همچنین بهینه سازی طراحی مزارع بادی از اهمیت بسیاری برخوردار است. این موضوع احتیاج به دانش گسترده‌ای درباره توزیع مکانی ساختارهای آشفتگی در ناحیه دنباله دارد. گردابه‌های مارپیچی جدا شده از پره ویژگی اصلی توربین‌های باد محور افقی می‌باشند و نقش مهمی در ناحیه دنباله بازی می‌کنند. امروزه بسیاری از محققان تاکید کرده‌اند که ورثیسیته برای مشخص کردن گردابه مناسب نمی‌باشد چون که قادر به تمایز بین حرکت‌های برشی مطلق و حرکت‌های چرخشی یک گردابه واقعی نمی‌باشد. در واقع این موضوع اهمیت استفاده از یک روش استخراج گردابه برای مشخص کردن و دنبال کردن ساختار گردابه‌ها را نشان می‌دهد. روش‌ها و الگوریتم‌های زیادی برای مشخص کردن گردابه‌ها توسط محققان پیشنهاد شده است. معروف‌ترین این روش‌ها بر اساس استخراج گردابه‌ها بر اساس تانسور گرادین سرعت، ∇u ، می‌باشند. بسته به روش استفاده شده معیارهای محلی می‌تواند بر اساس متغیرهای λ_2 [26]، Δ [27]، Q [28] و λ_{ci} [29] باشند. در مطالعه حاضر روش λ_{ci} برای برش‌های دو بعدی از میدان سرعت که توسط زو و همکاران [29] ارایه شده است، برای آشکارسازی

برای توربین بادی که در عدد رینولدز کمتری کار می‌کند خیلی کمتر از توربین باد با عدد رینولدز بالا است [24]. با این‌حال مدیسی و آلفردسون [25] پیشنهاد کردند که گردابه‌های ناپایدار و ساختارهای جریان آشفتگی در ناحیه دنباله توربین تقریباً باید مستقل از عدد رینولدز Re_c^{tip} باشند. بر اساس قانون بقای مومنتم و انرژی، قدرت خروجی توربین متناسب با مکعب اختلاف سرعت است. از این رو یکی از عوامل تأثیرگذار بر طراحی توربین‌های باد ضریب C_p است، که نسبت انرژی سینتیکی دریافت شده از باد به کل انرژی باد است. این ضریب عبارت است از:

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho U_0^3 A} \quad (21)$$

5-2- روش حل

در این پژوهش برای گسسته‌سازی معادلات از نرم افزار انسیس فلوئنت استفاده شده است. حل‌گر استفاده شده از روش حجم محدود استفاده می‌کند. ترم فشار از طریق الگوریتم سیمپل¹ به‌دست می‌آید، در روش سیمپل ابتدا فشار پیش‌بینی و در مرحله بعدی اصلاح می‌شود. گسسته‌سازی مکانی معادله مومنتم بر مبنای تفاضل مرکزی محدود² و معادله فشار بر مبنای استاندارد است و گسسته‌سازی زمانی معادلات از مرتبه دوم ضمنی می‌باشد. شبکه‌بندی ساختار نیافته برای هندسه مورد نظر استفاده شده است. شبکه‌بندی به‌حدی ریز شده است که جواب‌ها مستقل از شبکه شوند. در روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ شبکه محاسباتی باید به شیوه‌ای انتخاب شود که میدان سرعت فیلتر شده $\bar{U}(x,t)$ شبکه نسبتاً درشتی (نسبت به DNS) داشته باشد. فاصله شبکه محاسباتی با عرض فیلتر متناسب است. از این‌رو هر چقدر شبکه محاسباتی ریزتر باشد حرکت‌های شامل انرژی بیشتری حل می‌شوند. با انتخاب شبکه درشت‌تر کسر قابل توجهی از انرژی در حرکت‌های پسماند باقی می‌ماند که باعث می‌شود شبیه‌سازی به‌شدت به مدل‌سازی وابسته شود. ضریب C_p برای یک توربین باد تنها در شبکه‌های محاسباتی مختلف بررسی شده است (جدول 1). مقایسه بین نتایج نشان می‌دهد تغییر چندانی در ضریب C_p برای شبکه محاسباتی ریزتر از 2.7 میلیون وجود ندارد. از این رو شبکه محاسباتی 2.7 میلیون برای یک توربین باد تک در مطالعه حاضر انتخاب شده است. تعداد کل سلول‌های شبکه محاسباتی برای دو توربین باد پشت سر هم حدود 4.6 میلیون است. گام زمانی معادل 0.000969 ثانیه است.

3- صحت‌سنجی و استقلال از شبکه حل عددی

در این بخش، نتایج شبیه‌سازی جریان حول یک توربین باد تک و دو توربین باد پشت سرهم (جهت چرخش موافق) با نتایج آزمایشگاهی و دو شبیه‌سازی دیگر به منظور اطمینان از درستی حل عددی مقایسه شده است. ضریب C_p با نتایج تجربی برای یک توربین باد تک (شکل 7-الف) و دو توربین باد پشت

جدول 1 استقلال از شبکه

سرعت متوسط‌گیری شده در راستای جریان در مرکز تونل باد، 1D پس از توربین باد (ms^{-1})	ضریب C_p	اندازه شبکه محاسباتی
7.34	0.3924	1100000
7.59	0.3965	1800000
7.76	0.4095	2700000
7.80	0.4102	3400000

¹ SIMPLE

² Bounded central differencing

انرژی گردابه ها در فاصله جدایش کمتر باشد. اثرات گردابه های جدا شده از ته پره در ناحیه دنباله دور در هیچ کدام از پیکربندی های مورد نظر مشاهده نمی شود.

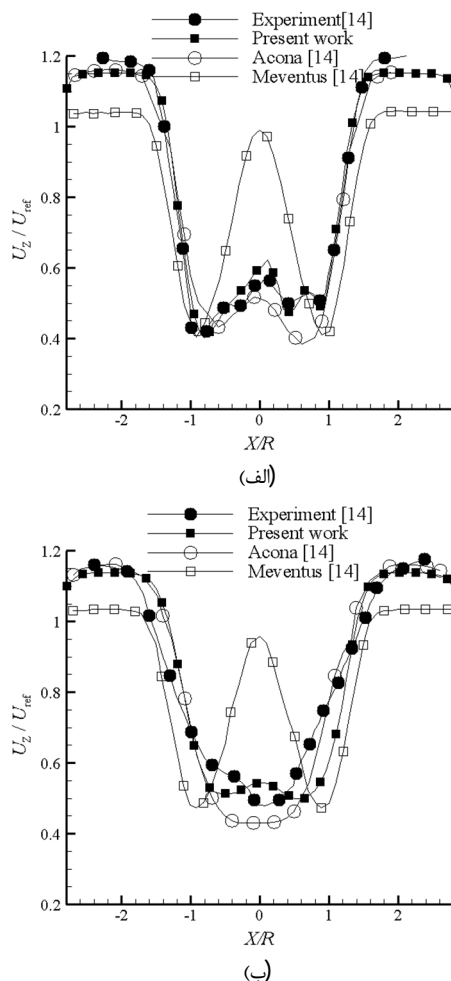


Fig. 8 Comparison of time averaged velocity profile along the horizontal lines centered at 1D (a) and 4D (b) in downstream of a two in line turbines

شکل 8 مقایسه سرعت متوسط گیری شده زمانی در امتداد خط افقی در پایین دست توربین باد در پیکربندی با دو توربین باد پشت سرهم (الف) 1D (ب) 4D

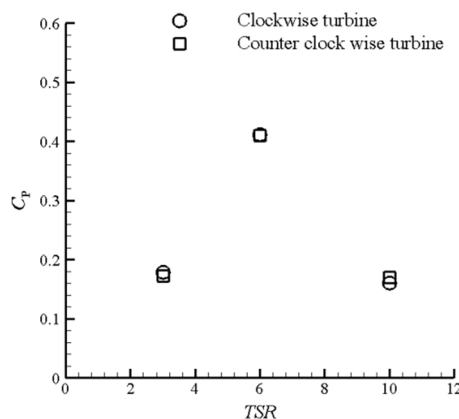


Fig 9 Power coefficient comparison in a clockwise and counter clockwise turbine

شکل 9 مقایسه ضریب توان در یک توربین باد ساعتگرد و پاد ساعتگرد

گردابه ها استفاده خواهد شد. تعریف عددی و مفهوم فیزیکی روش λ_{ci} توسط زو و همکاران ارائه شده است. شکل 11 گردابه های جدا شده از توربین باد در میدان سرعت لحظه ای برای یک پیکربندی جهت چرخش موافق و دو پیکربندی جهت چرخش مخالف با فاصله جدایش متفاوت را نشان می دهد. گردابه های پشت توربین باد پایین دست نسبت به گردابه های توربین باد بالادست بیشتر پخش شده اند (شکل های 11- الف و ب). این موضوع می تواند به خاطر اثرات گردابه های جدا شده از توربین باد بالادست باشد که اثرات گردابه های جدا شده از توربین باد پایین دست را تقویت کرده است. در ناحیه دنباله دور اثرات گردابه های جدا شده از لبه پره برای پیکربندی جهت چرخش موافق در نیمه بالایی و پایینی تونل باد مشابه است ولی در پیکربندی جهت چرخش مخالف اثرات این گردابه ها در ناحیه پایینی تونل باد نسبت به ناحیه بالایی تشدید شده است. با کاهش فاصله جدایش پیکربندی جهت چرخش مخالف (شکل 11- ج) در فاصله بین $z=0.4-0.8$ اثرات گردابه های جدا شده از پره دیده نمی شود. این موضوع می تواند بخاطر جذب انرژی این گردابه ها توسط توربین باد پایین دست باشد. همچنین در ناحیه دنباله دور اثرات گردابه ها در فاصله جدایش 1D نسبت به فاصله جدایش 3D کمتر شده است. این موضوع می تواند بخاطر برداشت بیشتر

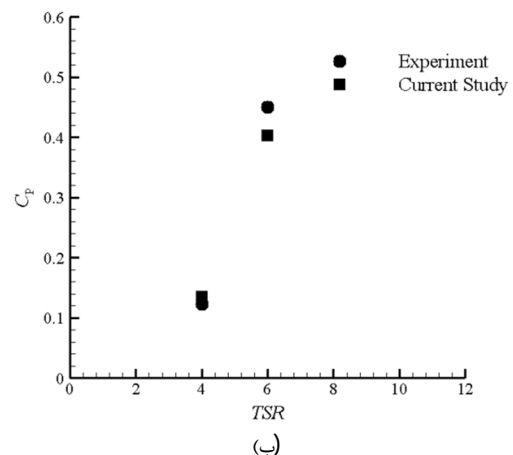
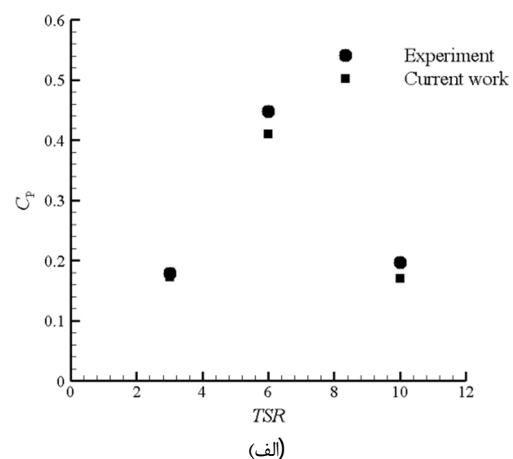


Fig 7 C_p comparison (a) single turbine, (b) two in line turbines. $TSR = 6$ for upstream wind turbine and $TSR = 4$ for downstream wind turbine

شکل 7 مقایسه ضریب C_p (الف) یک توربین باد (ب) دو توربین باد پشت سر هم. $TSR=6$ برای توربین باد بالا دست و $TSR=4$ برای توربین باد پایین دست است

توربین باد بالادست است که نواحی مثبت و منفی را کنار یکدیگر ایجاد می‌کند. این الگوی توزیع سرعت با حرکت به سمت پایین‌دست تونل باد هموارتر شده و سرعت عمودی اضمحلال می‌رود. مقایسه شکل‌های 13-الف و ب نشان می‌دهند که سرعت عمودی در پیکربندی جهت چرخش مخالف نسبت به پیکربندی جهت چرخش موافق کاهش قابل توجهی داشته است. از این‌رو می‌توان چنین نتیجه گرفت افزایش بازدهی توربین باد پایین‌دست در پیکربندی جهت چرخش مخالف بخاطر سرعت‌های جانبی می‌باشد. مقایسه شکل‌های 13-ب و ج نشان می‌دهد که کاهش فاصله جدایش بین دو توربین باد باعث افت بیشتر میدان سرعت عمودی شده است که فرضیه بالا را تایید می‌کند.

4-4- شدت آشفتگی

شدت آشفتگی به عنوان معیاری برای بارهای ناشی از خستگی بر بخش‌های مختلف یک توربین باد استفاده می‌شود. در شکل 14 متوسط زمانی شدت آشفتگی در فواصل مختلف برای یک پیکربندی جهت چرخش موافق و دو پیکربندی جهت چرخش مخالف نمایش داده شده است. شدت آشفتگی در ابتدای تونل باد نسبت به شدت آشفتگی پس از توربین باد بسیار ناچیز است. از این رو مطالعه شدت آشفتگی پس از توربین باد به منظور نصب توربین‌های باد پایین‌دست در یک مزرعه بادی از اهمیت بسیاری برخوردار است. در شکل 14 دو نقطه بیشینه محلی در محل قرارگیری لبه‌های پره و یک نقطه کمینه در ناحیه ته پره و توبی برای تمامی پیکربندی‌ها دیده می‌شود. با افزایش فاصله پایین‌دست پروفیل توزیع شدت آشفتگی هموارتر می‌شود. نقاط بیشینه محلی نشان دهنده گردابه‌های جدا شده از لبه پره می‌باشد. با افزایش فاصله پایین‌دست برای تمامی پیکربندی‌های مورد مطالعه شدت آشفتگی افزایش می‌یابد. در شکل 14 توزیع شدت آشفتگی برای تمامی پیکربندی‌ها در فواصل پایین‌دست مختلف تقریباً مشابه است بجز شکل 14-ج در این پیکربندی افزایش شدت آشفتگی تا فاصله 5D بسیار آهسته است ولی از فاصله 5D تا 7D افزایش ناگهانی شدت آشفتگی مشاهده می‌شود. با این حال در فاصله 7D نیز شدت آشفتگی در پیکربندی جهت چرخش مخالف با فاصله جدایش 1D از دو پیکربندی دیگر کمتر است.

5- نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر بر اثرات چرخش پره‌های توربین باد پایین‌دست در پیکربندی با دو توربین باد پشت سر هم متمرکز است. برای مطالعه جریان حول توربین باد از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ استفاده شده است. میدان جریان در یک پیکربندی جهت چرخش موافق و دو پیکربندی جهت چرخش مخاف با فاصله جدایش متفاوت بررسی شده است. نتایج مطالعه حاضر با نتایج تجربی گزارش شده در کارهای گذشته تطابق خوبی دارد. پره‌های ساعتگرد با آینه کردن پره‌های پاد ساعتگرد ساخته شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود در یک توربین باد تنها با جهت چرخش ساعتگرد و پاد ساعتگرد در سرعت‌های دورانی متفاوت ضریب توان تقریباً مشابه است، در حالی که در یک پیکربندی با جهت چرخش مخالف با فاصله جدایش 3D نسبت به پیکربندی جهت چرخش موافق ضریب توان توربین باد پایین‌دست حدود 4 درصد بیشتر است. با کاهش فاصله جدایش ضریب توان افزایش بیشتری دارد.

در مطالعه حاضر از روش λ_{ci} به منظور استخراج گردابه‌های جدا شده از پره استفاده شده است. گردابه‌های جدا شده از توربین باد بالادست اثرات گردابه‌های جدا شده از توربین باد پایین‌دست را تشدید می‌کنند. کاهش

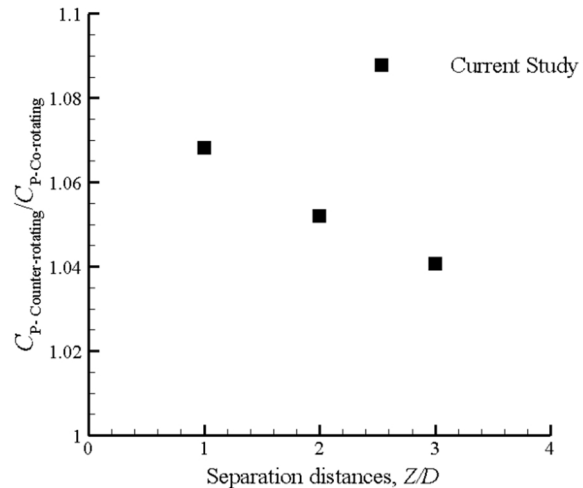


Fig 10 Power coefficient at different separation distances in counter-rotating configuration

شکل 10 ضریب توان در فواصل جدایش مختلف در پیکربندی جهت چرخش مخالف

4-3- پروفیل سرعت

نتایج متوسط‌گیری شده پروفیل بی‌بعد سرعت در راستای جریان در شکل 12 برای یک پیکربندی جهت چرخش موافق و دو پیکربندی جهت چرخش مخالف با فواصل جدایش متفاوت نمایش داده شده است. با افزایش فاصله پایین‌دست سرعت در راستای جریان افزایش پیدا می‌کند و دنباله بازیابی می‌شود. در تمامی پیکربندی‌ها دو نقطه کمینه محلی در محل قرارگیری لبه پره و یک نقطه کمینه در انتهای پره یا محل قرارگیری توبی دیده می‌شود. کاهش سرعت در لبه پره می‌تواند بخاطر گردابه‌های جدا شده از لبه پره باشد که در بخش قبل مشاهده شد. به عبارت دیگر ساختارهای آشفتگی ایجاد شده در ناحیه دنباله توربین به‌نحوی تشکیل می‌گردد که این نواحی کم سرعت را ایجاد می‌کنند. دلیل دیگر کاهش سرعت در این نواحی می‌تواند به‌این خاطر باشد که انرژی بیشتری در ناحیه لبه پره نسبت به ته پره از جریان باد دریافت می‌شود که به‌خاطر بیشتر بودن سرعت در لبه پره نسبت به ته پره است. توزیع سرعت در ناحیه دنباله نزدیک در دو پیکربندی جهت چرخش مخالف نسبت به پیکربندی جهت چرخش موافق تقارن بیشتری دارد. در کل پروفیل سرعت در شکل 12 برای هر سه پیکربندی تفاوت عمده‌ای با یکدیگر ندارد. از این‌رو می‌توان نتیجه گرفت سرعت در راستای جریان نمی‌تواند عامل افزایش بازدهی در پیکربندی جهت چرخش مخالف باشد.

شکل 13 نتایج متوسط‌گیری شده پروفیل بی‌بعد سرعت عمودی برای یک پیکربندی جهت چرخش موافق و دو پیکربندی جهت چرخش مخالف با فواصل جدایش متفاوت را نشان می‌دهد. بر اساس قانون بقای مومنتم کاهش سرعت در راستای جریان باعث افزایش سرعت‌های جانبی می‌شود. از این‌رو با افزایش فاصله پایین‌دست سرعت در راستای جریان افزایش ولی سرعت‌های جانبی کاهش می‌یابند. یک ناحیه مثبت و یک ناحیه منفی در پروفیل سرعت عمودی در پیکربندی جهت چرخش موافق دیده می‌شود. در پیکربندی جهت چرخش مخالف (شکل‌های 13-ب و ج) دو ناحیه منفی و دو ناحیه مثبت دیده می‌شود که به صورت متناوب در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند. همان‌طور که قبلاً اشاره شد دنباله خلاف جهت چرخش پره می‌چرخد از این‌رو در پیکربندی جهت چرخش مخالف دنباله توربین باد پایین‌دست خلاف جهت دنباله توربین باد بالادست می‌چرخد. در نتیجه الگوی توزیع سرعت عمودی در شکل‌های 13-ب و ج بخاطر نفوذ دنباله توربین باد پایین‌دست در دنباله

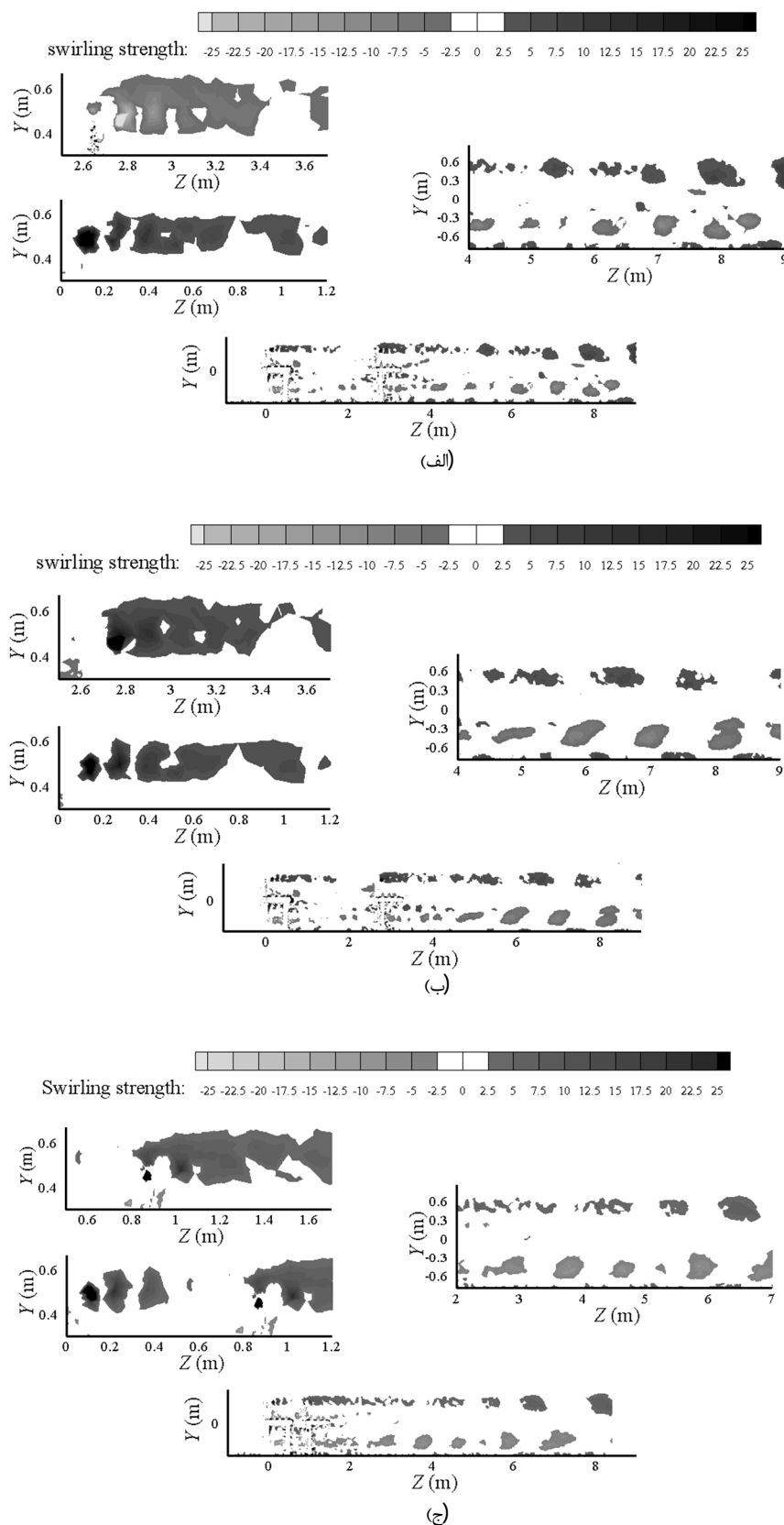


Fig. 11 Swirling strength in the instantaneous velocity field (a) co-rotating configuration (b) counter-rotating configuration (c) counter-rotating configuration by separation distance of 1D

شکل 11 قدرت چرخش در میدان سرعت لحظه‌ای (الف) پیکربندی جهت چرخش موافق (ب) پیکربندی جهت چرخش مخالف (ج) پیکربندی جهت چرخش مخالف با فاصله جدایش 1D

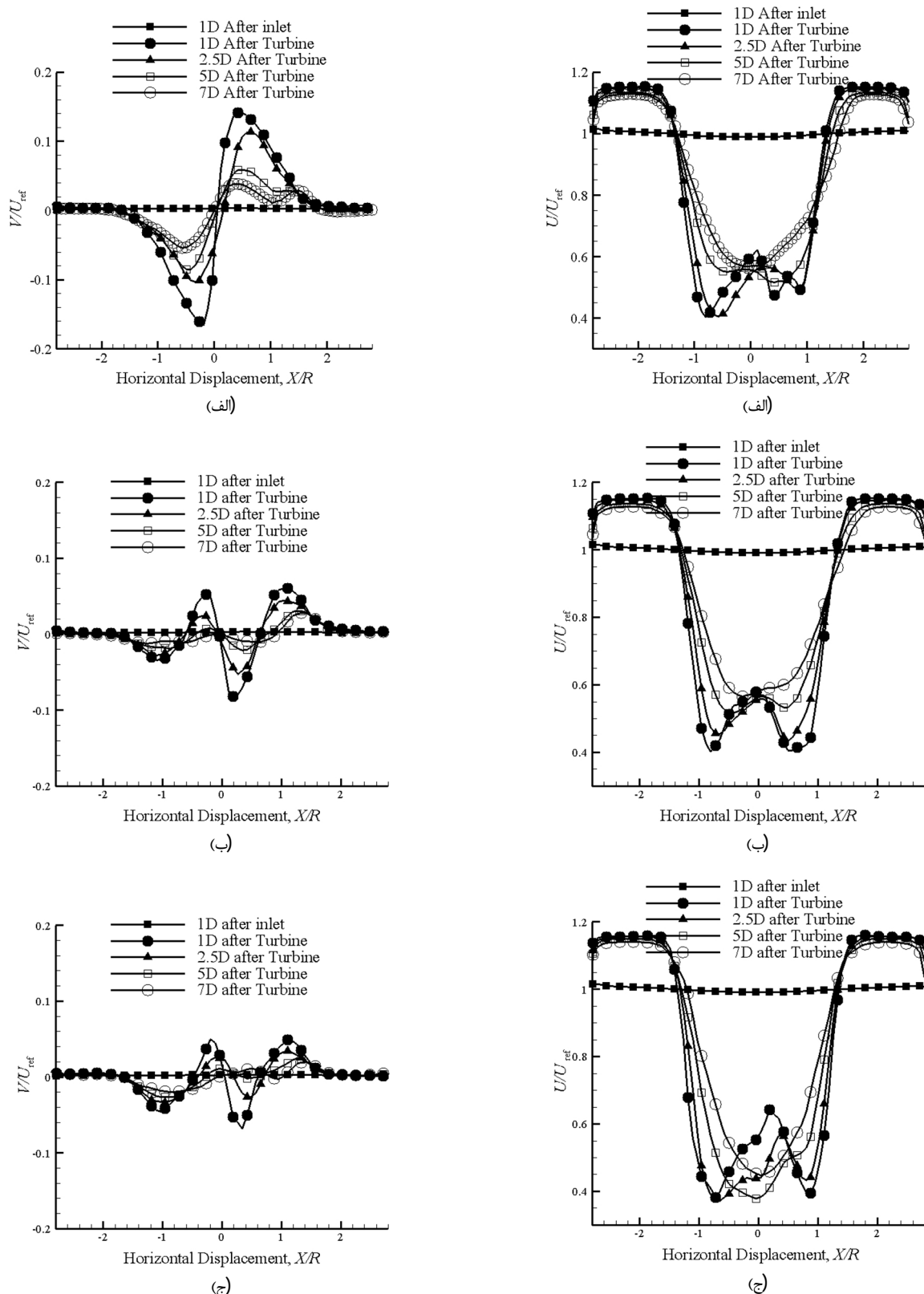


Fig 13 Comparison of time averaged cross stream velocity profile (a) co-rotating configuration (b) counter-rotating configuration (c) counter-rotating configuration by separation distance of 1D

شکل 13 مقایسه پروفیل متوسط‌گیری شده زمانی سرعت عمودی (الف) پیکربندی جهت چرخش موافق (ب) پیکربندی جهت چرخش مخالف (ج) پیکربندی جهت چرخش مخالف با فاصله جدایش 1D

Fig 12 Comparison of time averaged streamwise velocity profile (a) co-rotating configuration (b) counter-rotating configuration (c) counter-rotating configuration by separation distance of 1D

شکل 12 مقایسه پروفیل متوسط‌گیری شده زمانی سرعت در راستای جریان (الف) پیکربندی جهت چرخش موافق (ب) پیکربندی جهت چرخش مخالف (ج) پیکربندی جهت چرخش مخالف با فاصله جدایش 1D

فاصله جدایش بین دو توربین باد باعث می‌شود اثرات گردابه‌ها در فاصله $z=0.4-0.8$ دیده نشود. این موضوع حذف و از بین بردن گردابه‌های جدا شده از توربین باد بالادست توسط توربین باد پایین‌دست را تأیید می‌کند. همچنین کاهش فاصله جدایش بین دو توربین باد باعث کاهش اثرات گردابه‌ها در ناحیه دنباله دور می‌شود. مطالعه میدان سرعت نشان می‌دهد در ناحیه پشت توربین باد در تمامی پیکربندی‌ها سرعت در راستای جریان کاهش و در راستای عمودی افزایش می‌یابد. با حرکت به سمت پایین‌دست سرعت در راستای جریان افزایش و دنباله بازیابی می‌شود ولی سرعت عمودی کاهش می‌یابد و اضمحلال می‌رود. نقاط کمینه محلی در محل قرارگیری نوک پره در میدان سرعت در راستای جریان می‌تواند بخاطر گردابه‌های جدا شده از پره یا برداشت بیشتر انرژی در لبه پره باشد. پروفیل سرعت در راستای جریان برای تمامی پیکربندی‌ها تفاوت اندکی دارد. این موضوع نشان می‌دهد که در پیکربندی جهت چرخش مخالف سرعت در راستای جریان تأثیری در افزایش بازدهی توربین باد پایین‌دست ندارد. در پیکربندی جهت چرخش موافق میدان سرعت عمودی یک ناحیه مثبت و یک ناحیه منفی دارد ولی در پیکربندی جهت چرخش مخالف دو ناحیه مثبت و دو ناحیه منفی دارد. دلیل به وجود آمدن چنین الگویی در پیکربندی جهت چرخش مخالف نفوذ دنباله توربین باد پایین‌دست در دنباله ایجاد شده توسط توربین باد بالادست است. میدان سرعت عمودی در پیکربندی جهت چرخش مخالف نسبت به پیکربندی جهت چرخش موافق افت شدیدی دارد و با کاهش فاصله جدایش این افت سرعت بیشتر می‌شود. از این‌رو می‌توان نتیجه گرفت سرعت‌های جانبی در پیکربندی جهت چرخش مخالف باعث افزایش بازدهی توربین باد پایین‌دست می‌شوند.

بررسی شدت آشفتگی نشان می‌دهد دو نقطه بیشینه محلی در محل قرارگیری لبه‌های پره و یک نقطه کمینه در ناحیه ته پره و تویی برای تمامی پیکربندی‌ها وجود دارد. نقاط بیشینه محلی می‌تواند بخاطر وجود گردابه‌های جدا شده از لبه پره باشد و نقطه کمینه محلی به خاطر گردابه‌های جدا شده از برج نگهدارنده توربین باد است. در تمام پیکربندی‌ها با افزایش فاصله پایین‌دست شدت آشفتگی افزایش می‌یابد. پیکربندی جهت چرخش موافق و جهت چرخش مخالف با فاصله جدایش یکسان الگوی مشابهی از شدت آشفتگی را نمایش می‌دهند. با این حال کاهش فاصله جدایش بین دو توربین باد باعث می‌شود شدت آشفتگی کاهش یابد.

6- فهرست علائم

A	مساحت (m^2)
C_p	ضریب توان
C_s	ثابت اسمانگورینسکی
k_r	انرژی سینتیکی ایزوتروپیک ($s^2 m^2$)
\bar{p}	میدان فشار فیلتر شده ($kg m^{-1} s^{-2}$)
P	انرژی سینتیکی باد ($kg m s^{-3}$)
R	شعاع روتور (m)
Re_c^{tip}	عدد رینولدز بر اساس نوک پره
\bar{S}	نرخ کرنش فیلتر شده مشخصه (s^{-1})
\bar{S}_{ij}	تانسور نرخ کرنش فیلتر شده (s^{-1})
TI	شدت آشفتگی
U_{ref}	سرعت مرجع (ms^{-1})

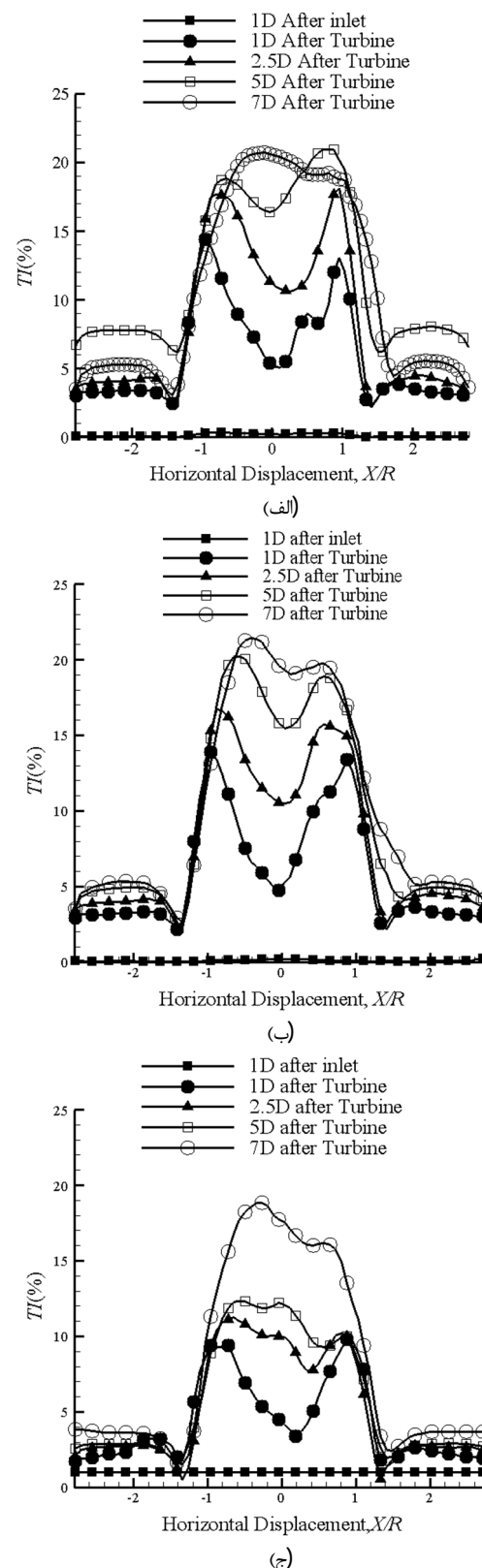


Fig. 14 Comparison of time averaged turbulence intensity profile (a) co-rotating configuration (b) counter-rotating configuration (c) counter-rotating configuration by separation distance of 1D

شکل 14 مقایسه پروفیل متوسط‌گیری شده زمانی شدت آشفتگی (الف) پیکربندی جهت چرخش موافق (ب) پیکربندی جهت چرخش مخالف (ج) پیکربندی جهت چرخش مخالف با فاصله جدایش 1D

- simulation studies of the effects of alignment and wind farm length, *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, Vol. 6, No. 2, pp. 1–14, 2014.
- [10] S. Aubrun, S. Loyer, P.E. Hancock, P. Hayden, Wind turbine wake properties: Comparison between a non-rotating simplified wind turbine model and a rotating model, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 120, No. 1, pp. 1–8, 2013.
- [11] H. Hu, Z. Yang, P. Sarkar, Dynamic wind loads and wake characteristics of a wind turbine model in an atmospheric boundary layer wind, *Experiments in Fluids*, Vol. 52, No. 5, pp. 1277–1294, 2012.
- [12] T. Maeda, Y. Kamada, J. Murata, S. Yonekura, T. Ito, A. Oawa, T. Kogaki, Wind tunnel study on wind and turbulence intensity profiles in wind turbine wake, *Journal of Thermal Science*, Vol. 20, No. 2, pp. 127–132, 2011.
- [13] P. Å. Krogstad, P. E. Eriksen, 'Blind test' calculations of the performance and wake development for a model wind turbine, *Renewable Energy*, Vol. 50, No.1, pp. 325–333, 2013.
- [14] F. Pierella, E. Eriksen, L. Sætran, Invitation to the 2012 'Blind test 2' Workshop Calculations for two wind turbines in line, No. October, pp. 1–11, 2012.
- [15] S. B. Pope, *Turbulent Flows*, pp. 351–558, Cambridge University Press, 2000.
- [16] J. Smagorinsky, General Circulation Experiments With the Primitive Equations, *Monthly Weather Review*, Vol. 91, No. 3, pp. 99–164, 1963.
- [17] M. Germano, U. Piomelli, P. Moin, W. H. Cabot, A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model, *Phys. Fluids A Fluid Dyn.*, Vol. 3, No. 7, p. 1760, 1991.
- [18] D. K. Lilly, A Proposed Modification of the Germano-Subgrid-Scale Closure Method, *Physics of Fluids A*, Vol. 4, No. 3, pp. 633–635, 1992.
- [19] C. Meneveau, T. S. Lund, W. H. Cabot, A Lagrangian dynamic subgrid-scale model of turbulence, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 319, No. 1, pp. 353–385, 1996.
- [20] J. Bardina, J. H. Ferziger, W. C. Reynolds, Improved subgrid models for large eddy simulation, *13th Fluid and Plasma Dynamics Conference*, Stanford University, CA, United States, July 14–16, 1980.
- [21] R. A. Clark, J. H. Ferziger, W. C. Reynolds, Evaluation of subgrid-scale models using an accurately simulated turbulent flow, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 91, No. 1, pp. 1–16, 1979.
- [22] J. L. Tangler, D. M. Somers, NREL airfoil families for HAWTs, *Proceedings of the American Wind Energy Association Wind power Conference*, Washington, National Renewable Energy Laboratory; January 1995.
- [23] D. Somers, *Design and experimental results for the S825 Airfoil*, Technical Report NREL/SR-500-36344, National Renewable Energy Laboratory, 1999.
- [24] P. H. Alfredsson, J. A. Dahlberg, P. E. J. Vermeulen, A comparison between predicted and measured data from wind turbine wakes, *Wind Engineering*, Vol. 6, No. 3, pp. 149–155, 1982.
- [25] D. Medici, P. H. Alfredsson, Measurements on a wind turbine wake: 3D Effects and bluff body vortex shedding, *Wing Energy*, Vol. 9, No. 3, pp. 219–236, 2006.
- [26] J. Jeong, F. Hussain, On the identification of a vortex, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 285, No. 1, pp. 69–94, 1995.
- [27] A. E. Perry, M. E. Chong, B. J. Cantwell, A general classification of three-dimensional flow fields, *Physics of Fluids A*, Vol. 2, No. 5, pp. 765–777, 1990.
- [28] J. C. R. Hunt, A. A. Wray, P. Moin, *Eddies, stream, and convergence zones in turbulent flows*, report ctr-s88. Center for Turbulence Research, pp. 193–208, 1988.
- [29] J. Zhou, R. J. Adrian, S. Balachandar, T. M. Kendall, Mechanism for generating coherent packets of hairpin vortices in channel flow, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 387, No. 1, pp. 353–396, 1999.

U	میدان سرعت لحظه‌ای (ms^{-1})
U_z	سرعت در راستای جریان (ms^{-1})
U_y	سرعت عمودی (ms^{-1})
\bar{U}	میدان سرعت فیلتر شده مکانی (ms^{-1})
$\langle U \rangle$	میدان سرعت متوسط‌گیری شده زمانی (ms^{-1})
u'	میدان سرعت پسماند (ms^{-1})
u	میدان سرعت نوسانی (ms^{-1})
$\bar{U}_i \bar{U}_j$	ضرب سرعت‌های فیلتر شده ($\text{m}^2 \text{s}^{-2}$)
$\overline{U_i U_j}$	ضرب فیلتر شده سرعت ($\text{m}^2 \text{s}^{-2}$)
$\langle u_i u_j \rangle$	تانسور تنش رینولدز ($\text{m}^2 \text{s}^{-2}$)
\vec{v}_r	سرعت نسبی (ms^{-1})
TSR	نسبت سرعت نوک پره

علائم یونانی

δ_{ij}	تابع کرانکر دلتا
Δ	عرض فیلتر (m)
λ_{ci}	قدرت چرخش
ν_r	ویسکوزیته گردابه‌ای ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)
ℓ_s	مقیاس طولی اسماغورینسکی (m)
ρ	چگالی (kgm^{-3})
τ_{ij}^r	تانسور تنش پسماند ایزوتروپیک ($\text{m}^2 \text{s}^{-2}$)
τ_{ij}^R	تانسور تنش پسماند غیر ایزوتروپیک ($\text{m}^2 \text{s}^{-2}$)
ω	سرعت دورانی (s^{-1})

7- مراجع

- [1] D. Chen, W. Zhang, Exploitation and research on wind energy, *Energy Conservation Technology*, Vol. 4, No. 1, pp. 339–343, 2007.
- [2] Y. Li, K. J. Paik, T. Xing, P. M. Carrica, Dynamic overset CFD simulations of wind turbine aerodynamics, *Renewable Energy*, Vol. 37, No. 1, pp. 285–298, 2012.
- [3] I. Grant, P. Parkin, X. Wang, Optical vortex tracking studies of a horizontal axis wind turbine in yaw using laser-sheet, flow visualisation, *Experiments in Fluids*, Vol. 23, No. 6, pp. 513–519, 1997.
- [4] L. J. Vermeer, J. N. Sørensen, A. Crespo, Wind turbine wake aerodynamics, *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 39, No. 6–7, pp. 467–510, 2003.
- [5] F. Massouh I. Dobrev, Exploration of the vortex wake behind of wind turbine rotor, *J Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 75, p. 012036, 2007.
- [6] W. Zhang, C. D. Markfort, F. Porté-Agel, Near-wake flow structure downwind of a wind turbine in a turbulent boundary layer, *Experiments in Fluids*, Vol. 52, No. 5, pp. 1219–1235, 2012.
- [7] J. O. Mo, A. Choudhry, M. Arjomandi, R. Kelso, Y. H. Lee, Effects of wind speed changes on wake instability of a wind turbine in a virtual wind tunnel using large eddy simulation, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 117, pp. 38–56, 2013.
- [8] F. Porté-Agel, Y.-T. Wu, H. Lu, R. J. Conzemius, Large-eddy simulation of atmospheric boundary layer flow through wind turbines and wind farms, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 99, No. 4, pp. 154–168, 2011.
- [9] R. J. A. M. Stevens, D. F. Gayme, C. Meneveau, Large eddy