



ساختارهای آشفته‌گی جریان در ناحیه دنباله یک توربین باد به روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ

امین الله ویسی^۱، محمد حسین شفیعی میم^{۲*}

^۱دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران
^۲دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه بزرگمهر قانان، قاین، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۰ فروردین ۱۳۹۶
بازنگری: ۳ مرداد ۱۳۹۶
پذیرش: ۱۶ مهر ۱۳۹۶
ارائه آنلاین: ۱۹ مهر ۱۳۹۶

کلمات کلیدی:

توربین باد
شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ
جریان آشفته
ساختارهای آشفته‌گی

چکیده: در کار حاضر جریان حول یک توربین باد محور افقی با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ در سرعت‌های دورانی مختلف مطالعه شده است. نتایج نشان می‌دهند که افزایش سرعت دورانی باعث افت بیشتر سرعت در پایین دست جریان می‌شود. برای مثال در فاصله $1D$ پس از توربین باد در $\lambda_2=6$ سرعت کمینه ۵۲ درصد سرعت اولیه است و پس از طی مسافت $6D$ این مقدار به ۶۷ درصد سرعت اولیه می‌رسد. در $\lambda_3=10$ سرعت کمینه ۲۶ درصد سرعت اولیه است و پس از طی مسافت $6D$ این مقدار به ۶۸ درصد سرعت اولیه می‌رسد. بسامد گردابه‌های جدا شده از پره با افزایش سرعت دورانی افزایش می‌یابند. گردابه‌های جدا شده از پره تمایل به پخش شدن در جهت عمودی دارند و با افزایش سرعت دورانی شدت پخش آن در جهت عمودی بیشتر می‌شود. تقویت گردابه‌ها در ناحیه دنباله دور در سرعت‌های دورانی بالاتر تنها بخاطر افزایش شدت چرخش نیست، بلکه بخاطر برخورد گردابه‌ها به یکدیگر و تشکیل گردابه‌های جدیدتر است. این موضوع در کارهای گذشته گزارش نشده است. همچنین افزایش شدت آشفته‌گی و تنش‌های برشی رینولدز در جهت جریان، بخاطر برش شدید جریان باد و تولید مکانیکی انرژی سینتیکی آشفته‌گی است.

۱- مقدمه

استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر برای تأمین انرژی با توجه به منابع محدود سوخت‌های فسیلی و مشکلات ناشی از گرمایش کره زمین اجتناب ناپذیر است. در بین انرژی‌های تجدید پذیر، انرژی باد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. انرژی باد به طور گسترده در سرتاسر جهان توزیع شده و ظرفیت آن بیشتر از انرژی مصرفی جهان است [۱ و ۲]. از این رو نصب و راه اندازی مزارع بادی در سرتاسر دنیا گسترش یافته است. توربین‌های باد به دو دسته عمده تقسیم می‌شوند: توربین‌های محور عمودی و توربین‌های محور افقی که رایج‌ترین نوع توربین‌های بادی است [۳]. از این رو در مطالعه حاضر جریان حول یک توربین باد محور افقی مطالعه شده است.

درک بهتر گسترش دنباله در پایین دست توربین باد به منظور کمینه کردن برهمکنش دنباله و افزایش بازدهی مزرعه بادی اهمیت زیادی دارد. بیشتر مطالعات به اندازه‌گیری سرعت در راستای جریان و سرعت‌های جانبی محدود شده است. در حالی که توربین‌های باد تحت تاثیر نیروهای برشی پر قدرت و سطح نسبتاً بالایی از آشفته‌گی کار می‌کنند [۴]. ناحیه دنباله تحت تاثیر گردابه‌های جدا شده از پره و غیر همگنی توزیع آشفته‌گی قرار

دارد. اطلاعات محدود درباره توزیع مکانی آشفته‌گی در ناحیه دنباله و تاثیر گردابه‌ها بر عملکرد توربین‌های پایین دست، قابلیت محققان در پیش‌بینی قدرت تولیدی و بارهای ناشی از خستگی را محدود کرده است. از این رو درک بهتر توزیع مکانی ساختارهای آشفته‌گی به منظور پیدا کردن یک الگوی منظم از این ساختارها در ناحیه دنباله اهمیت ویژه‌ای دارد.

ناحیه دنباله به دو قسمت دنباله نزدیک توربین^۱ و دنباله دور از توربین^۲ تقسیم شده است. ناحیه دنباله نزدیک توربین حد فاصل بین ۱ تا ۳ برابر قطر روتور توربین بادی و ناحیه پایین دست این قسمت، ناحیه دنباله دور از توربین بادی تعریف می‌شود [۵].

جریان آشفته در پایین دست توربین باد محور افقی به روش‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی توسط محققان زیادی مطالعه شده است. اوهمو و همکاران [۶] با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ اثرات سرعت دورانی بر ناپایداری دنباله در ناحیه دنباله دور را مطالعه کردند. آن‌ها تعریفی جدید از ناحیه دنباله دور و ناحیه دنباله نزدیک ارائه کردند. مو و همکاران [۷] نشان دادند دو جفت گردابه با جهت چرخش مخالف در ناحیه دنباله دور تشکیل می‌شود که باعث افزایش تدریجی شدت آشفته‌گی در این

¹Near wake

²Far wake

نویسنده عهده‌دار مکاتبات: shafiei@buqaen.ac.ir

افقی را $15D$ پیشنهاد کردند، مقدار مرسوم این فاصله $7D$ بود. بعضی از محققان [۱۷ و ۱۸] اثرات توربین باد بالادست بر توربین باد پایین دست را بررسی کردند، برای حالتی که توربین باد پایین دست به طور کامل خارج از مسیر توربین باد بالادست نبود. مطالعات آن‌ها نشان داد با افزایش فاصله جانبی توربین باد پایین دست، بازدهی مزرعه بادی افزایش می‌یابد.

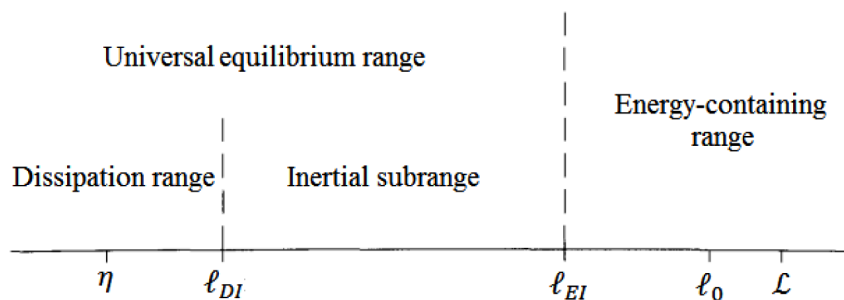
در کار حاضر جریان حول یک توربین باد محور افقی در سرعت‌های دورانی متفاوت به روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ مطالعه شده است. اساس کار به منظور صحت‌سنجی نتایج آزمایشگاهی بلایند تست ۱ [۱۹] است. همان طور که ذکر شد کارهای اندکی گسترش ساختارهای آشفتگی در پایین دست جریان را مطالعه کردند [۱۰]. علاوه بر این، در مطالعات گذشته از ورتیسیت‌ها برای گسترش ساختارهای آشفتگی در پایین دست جریان استفاده شده است. در حالی که ورتیسیت‌ها معیار مناسبی برای بررسی ساختارهای آشفتگی نیست. این موضوع در بخش‌های بعدی به طور کامل تشریح خواهد شد. هدف اصلی مطالعه حاضر فهم بهتر گسترش دنباله در پایین دست جریان است. بدین منظور شکل‌گیری و سیر تکامل گردابه‌های جدا شده از پره بررسی می‌شود. همچنین توزیع مکانی پارامترهای آشفتگی شامل سرعت متوسط، شدت آشفتگی و تنش‌های برشی در پایین دست جریان مطالعه خواهد شد.

۲- شبیه‌سازی عددی

۲-۱- معادلات حاکم

جریان‌های آشفته سه بعدی، وابسته به زمان و تصادفی می‌باشند. مقیاس‌های زمانی و مکانی متفاوتی در جریان‌های آشفته وجود دارد. در مدل‌های رنس تمامی مقیاس‌های جریان متوسط‌گیری زمانی می‌شوند. در روش شبیه‌سازی عددی مستقیم^۴ مقیاس‌های جریان تا کوچکترین مقیاس‌ها که مقیاس‌های کولوموگروف است حل می‌شوند. در روش ال. ای. اس مقیاس‌های شامل انرژی حل می‌شوند و حرکت‌های کوچک‌تر از l_{EI}

ناحیه می‌شود. لی و همکاران [۲] با بررسی جریان حول یک توربین باد محور افقی برتری روش شبیه‌سازی ادی^۱ نسبت به رنس^۲ در نمایش ساختارهای جدا شده از توربین باد را نشان دادند. یک مطالعه آزمایشگاهی توسط ابرون و همکاران [۸] در پایین دست یک مدل غیرچرخان متخلخل و یک توربین باد محور افقی انجام شد. نتایج آن‌ها نشان داد مدل غیر چرخان دنباله را در پایین دست جریان به درستی پیش‌بینی می‌کند. سرلک و همکاران [۹] با استفاده از روش ال. ای. اس جریان اطراف دو توربین باد محور افقی خطی را شبیه‌سازی کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که مدل‌های زیر شبکه اثرات کمی بر میدان جریان دارند. یانگ و همکاران [۱۰] شکل‌گیری و سیر گردابه‌های ماریچی جدا شده از پره‌های یک توربین باد محور افقی را با استفاده از پی. آی. وی مطالعه کردند. آن‌ها نشان دادند گردابه‌های جدا شده از پره خلاف جهت چرخش پره‌های توربین باد می‌چرخد. ژانگ و همکاران [۴] با استفاده از روش پی. آی. وی^۳ به مطالعه جریان حول یک توربین باد محور افقی پرداختند. آن‌ها نشان دادند ناحیه دنباله نزدیک توربین بادی با خصوصیات گردابه‌های ماریچی جدا شده از پره‌های توربین، غیر یکنواختی و ناهمگنی شدید مشخصه‌های جریان آشفته شناخته می‌شود. مائدا و همکاران [۱۱] نشان دادند در شدت آشفتگی بالاتر دنباله در پایین دست توربین باد سریع‌تر بازیابی می‌شود. زان و همکاران [۱۲] نشان دادند که افت سرعت در نزدیکی پره‌های توربین باد ناشی از گردابه‌های جدا شده از نوک پره است. پخته اگل و همکاران [۱۳] نشان دادند ال. ای. اس می‌تواند توزیع مکانی ساختارهای آشفتگی برای افزایش بازدهی و عمر توربین‌های بادی را فراهم کند. جیمز و همکاران [۱۴] با استفاده از ال. ای. اس جریان در پایین دست یک توربین باد را مطالعه کردند. آن‌ها یک روش برای مطالعه ساختارهای آشفتگی منسجم پیشنهاد کردند. اثرات مقیاس‌بندی بر خصوصیات توربین باد نشان داد گشتاور متناسب با مکعب قطر روتور تغییر می‌کند در حالی که نیروهای دینامیکی متناسب با مربع روتور تغییر می‌کنند [۱۵]. میرز و منووا [۱۶] با استفاده از روش ال. ای. اس فاصله بهینه بین دو توربین باد محور



شکل ۱: اندازه گردابه‌ها در اعداد رینولدز بالا با مقیاس‌های طولی مختلف [۲۰]

Fig. 1. The size of vortices with different length scales in high Reynolds numbers [20]

¹Large Eddy Simulation (LES)

²Reynolds Averaged Navier-Stokes

³Particle image velocimetry

⁴Direct Numerical Simulation (DNS)

شدن گردابه دارند دقیق تر و قابل اعتمادتر از مدل‌های تنش رینولدز باشد. محدوده محاسباتی در مطالعه حاضر به طور کلی از دو بخش متحرک و ثابت تشکیل شده است. در بخش ثابت معادلات پیوستگی و مومنتوم فیلترگیری شده برای جریان تراکم ناپذیر به صورت زیر است:

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (۴)$$

$$\frac{\partial \bar{U}_j}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}_i \bar{U}_j}{\partial x_i} = \nu \frac{\partial^2 \bar{U}_j}{\partial x_i \partial x_i} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} \quad (۵)$$

\bar{U}_i در معادله بالا سرعت فیلتر شده و $\bar{p}(x, t)$ میدان فشار فیلتر شده است. تانسور تنش پسماند نیز به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\tau_{ij}^R = \overline{U_i U_j} - \bar{U}_i \bar{U}_j \quad (۶)$$

معادله مومنتوم فیلتر شده به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial \bar{U}_j}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}_i \bar{U}_j}{\partial x_i} = \nu \frac{\partial^2 \bar{U}_j}{\partial x_i \partial x_i} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}^R}{\partial x_i} \quad (۷)$$

تانسور تنش پسماند غیر ایزوتروپیک و انرژی سینتیکی پسماند به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\tau_{ij}^r = \tau_{ij}^R - \frac{2}{3} k_r \delta_{ij} \quad (۸)$$

$$k_r = \frac{2}{3} \tau_{ii}^R \quad (۹)$$

که δ_{ij} کرانکر دلتا است. تانسور تنش ایزوتروپیک در میدان فشار فیلتر شده اصلاح شده ظاهر می‌شود:

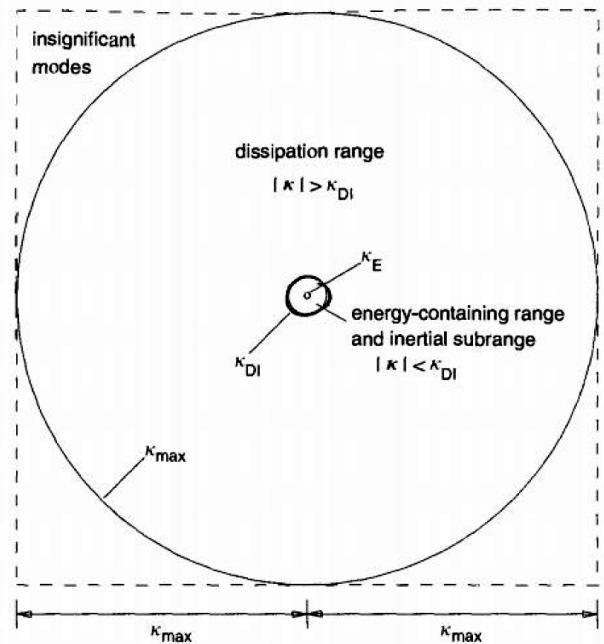
$$\bar{p} = \bar{p} + \frac{2}{3} \rho k_r \quad (۱۰)$$

در نهایت معادله مومنتوم به صورت زیر نوشته می‌شود [۲۰]:

$$\frac{\partial \bar{U}_j}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}_i \bar{U}_j}{\partial x_i} = \nu \frac{\partial^2 \bar{U}_j}{\partial x_i \partial x_i} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}^r}{\partial x_i} \quad (۱۱)$$

۲-۲- مدل زیر شبکه

مشابه معادلات رینولدز در روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ مسأله محصور وجود دارد. 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. مدل‌های زیادی توسط ژرمانو، لیلی و همکاران و محققان دیگر پیشنهاد شده است. ساده‌ترین مدل توسط اسماگورینسکی [۲۱] پیشنهاد شده است. در این مدل تانسور تنش پسماند به نرخ فیلتر شده کرنش و لزجت گردابه‌ای مرتبط شده است:



شکل ۲: محدوده محاسباتی در محیط طیفی برای روش دی. ان. اس [۲۰]

Fig. 2. Computational domain in the spectral environment for DNS method [20]

(که طبق تعریف کولوموگروف جدا کننده مقیاس‌های بزرگ از مقیاس‌های کوچک است) مدل می‌شوند. محدوده محاسباتی در اعداد رینولدز بالا با مقیاس‌های طولی مختلف در شکل ۱ نشان داده شده است. محدوده شامل انرژی در برگیرنده حرکت‌هایی است که بیش از ۸۰ درصد انرژی جریان را شامل می‌شوند. اکثر هزینه محاسباتی در دی. ان. اس، صرف کوچکترین حرکت‌های اتلافی می‌شود.

شکل ۲ محدوده محاسباتی در فضای عدد موج برای روش دی. ان. اس را نشان می‌دهد. ۹۹/۹۸٪ مودها در عدد موج $|k| < k_{DI}$ و تنها ۰/۰۲٪ مودها در $|k| > k_{DI}$ قرار دارند که این محدوده مشخص کننده بزرگ‌ترین حرکت‌های اتلافی است [۲۰]. از این رو بیشتر هزینه محاسباتی در روش دی. ان. اس صرف کوچک‌ترین مقیاس‌های حرکت می‌شود، در حالی که این مقیاس‌ها کمتر از ۲۰ درصد انرژی جریان را دارند. این موضوع می‌تواند اهمیت استفاده از روش ال. ای. اس را به خوبی نشان دهد. از طرفی در مدل‌های تنش رینولدز فقط میدان سرعت متوسط حل می‌شود و اطلاعات لحظه‌ای سرعت در دسترس نمی‌باشند.

در شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، حرکت‌های آشفته ناپایا سه بعدی بزرگ جریان به طور مستقیم حل می‌شوند، در حالی که اثرات حرکت‌های مقیاس کوچک مدل می‌شوند. استفاده از فیلتر مکانی جهت جدا سازی مقیاس‌های بزرگ از مقیاس‌های کوچک یک روش مرسوم در روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ است. شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ می‌تواند برای جریان‌هایی که حرکت‌های مقیاس بزرگ ناپایدار، جدایی جریان و جدا

بالادست جریان به توربین باد نگاه شود، جهت چرخش پاد ساعتگرد است. شکل ۳ (ب) توربین باد کارگاه بلائیند تست ۱ را نشان می‌دهد.

۲-۴- شرایط مرزی و شبکه محاسباتی

سرعت جریان آزاد باد 10 m/s است. از این رو سرعت 10 m/s در ورودی تونل باد اعمال شد. شرط عدم لغزش و زبری صفر برای پره‌ها، برج و دیواره‌های تونل باد اعمال شده است. ذکر این نکته ضروری است که شرایط مرزی کار حاضر مثل سرعت ورودی و شدت توربولانسی کم در ورودی تونل باد مطابق شرایط آزمایشگاهی مدل بلائیند تست ۱ است. به همین دلیل شدت آشفتگی جریان ورودی به محدوده محاسباتی 0.3% درصد است. شدت آشفتگی به عنوان نسبت انحراف از معیار به مقدار متوسط سرعت تعریف می‌شود.

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

در خروجی تونل باد فشار محیط (فشار صفر) اعمال شده است. در کار حاضر شبیه سازی برای سه سرعت دورانی $\lambda_1=3$ و $\lambda_2=6$ و $\lambda_3=1$ انجام شده است. نسبت سرعت نوک پره به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\lambda = \Omega R / U_{ref} \quad (2)$$

که در اینجا Ω سرعت زاویه‌ای است، R شعاع روتور است و U_{ref} سرعت مرجع است. در مطالعه حاضر دامنه محاسباتی دقیقاً مشابه مدل آزمایشگاهی بلائیند تست ۱ است. تونل باد در مطالعه حاضر به ترتیب طول، عرض و ارتفاع $11/14 \text{ m}$ و $2/7 \text{ m}$ و $1/8 \text{ m}$ دارد. فاصله توربین باد از ورودی تونل باد برای توربین باد برابر با $5D$ است. D قطر روتور توربین

$$\tau_{ij}^r = -2\nu_r \bar{S}_{ij} \quad (12)$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \quad (13)$$

در رابطه بالا، $\nu_r(x,t)$ لزجت گردابه‌ای حرکت‌های پسماند است و \bar{S}_{ij} نرخ فیلتر شده کرنش است. لزجت گردابه‌ای با قیاس از فرضیه طول اختلاطی مدل می‌شود:

$$\nu_r = \ell_s^2 \bar{S} = (C_S \Delta)^2 \bar{S} \quad (14)$$

که در اینجا \bar{S} نرخ کرنش فیلتر شده مشخصه است. ℓ_s مقیاس طولی اسماکورینسکی است. در کار حاضر ثابت اسماکورینسکی $C_S=0.1$ در نظر گرفته شده است. عرض فیلتر برابر اندازه شبکه است و از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۰]:

$$\Delta = (\Delta_x \Delta_y \Delta_z)^{1/3} \quad (15)$$

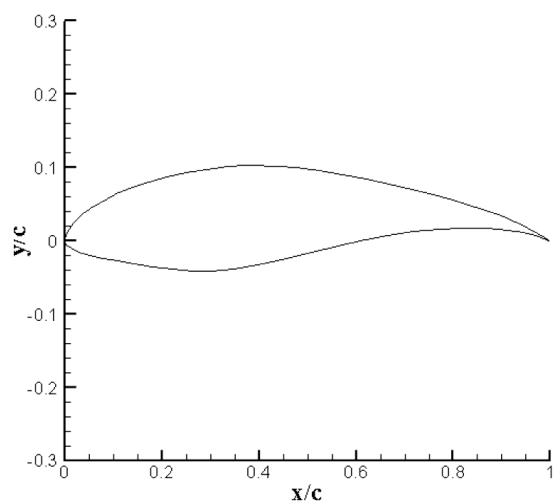
که Δ_x و Δ_y و Δ_z به ترتیب اندازه شبکه در راستای عرضی، عمودی و راستای جریان است.

۲-۳- مشخصات توربین باد محور افقی

نتایج مطالعه حاضر بر اساس نتایج آزمایشگاهی بلائیند تست ۱ [۱۹] است. برای ساخت پره‌ها از بال‌واره NREL S826 استفاده شده است (شکل ۳ الف). پروفیل این بال‌واره به گونه‌ای طراحی شده است که ضریب برا بالا باشد و حساسیت کمی به زبری داشته باشد [۲۲]. جزئیات بیشتر این بال‌واره توسط سامر [۲۳] ارایه شده است. قطر توپی 0.944 m است. اگر از



(ب)

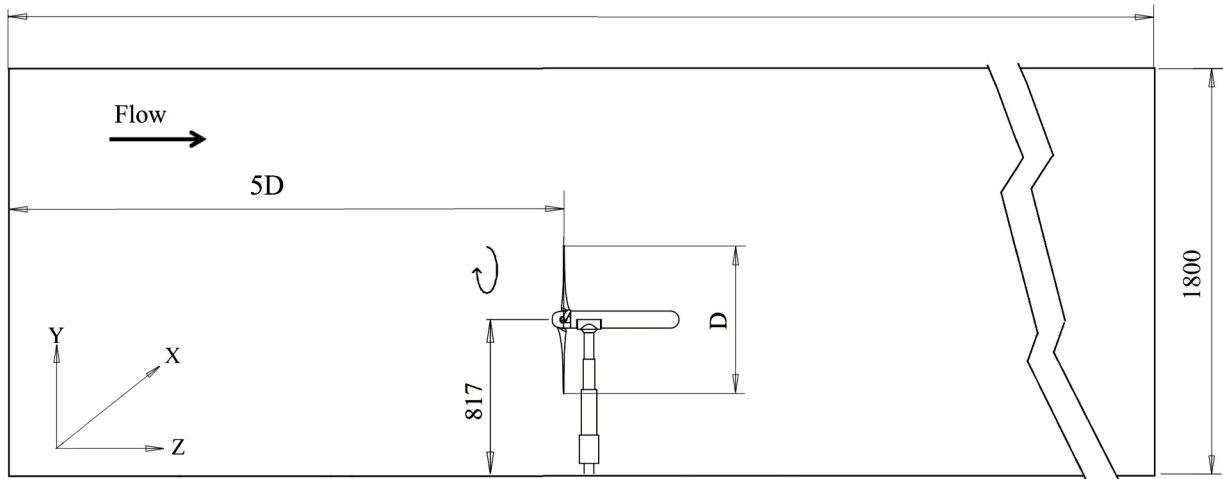


(الف)

شکل ۳: (الف) بال‌واره NRELS826. (ب) توربین باد کارگاه بلائیند تست ۱ [۱۹]

Fig. 3. (a) NRELS826 Airfoil, (b) Wind turbine of blind test 1 workshop [19]

11140



شکل ۴: محل قرار گیری توربین باد در تونل باد

Fig. 4. Wind turbine position in the wind tunnel

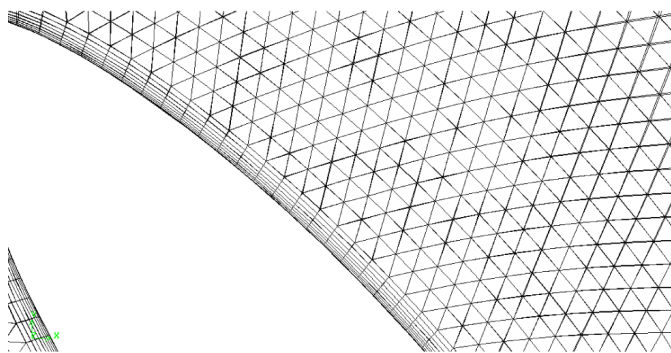
حرکت و ثابت است. در واقع در این مدل محورهای مختصات در ناحیه متحرک حرکت می‌کنند. تکنیک مش لغزان دقیق‌ترین روش شبیه‌سازی جریان برای بخش‌های متحرک چندگانه است، اما استفاده از این روش هزینه محاسباتی را بالا می‌برد [۷]. به منظور حل گردآبان‌های شدید سرعت در مجاورت روتور توربین باد، شبکه‌بندی در نواحی نزدیک پره، توبی و برج نگهدارنده بسیار ریز در نظر گرفته شده است (شکل ۵). در نزدیکی پره‌های توربین باد حداکثر مقدار y^+ برابر ۵ است که مقدار قابل قبولی برای این روش شبیه‌سازی است.

در حالتی که $\lambda = 6$ است، عدد رینولدز محلی بر اساس وتر پره برابر است با $Re_c^{tip} \approx 10^5$. در مقایسه با یک توربین باد واقعی این عدد رینولدز حداقل

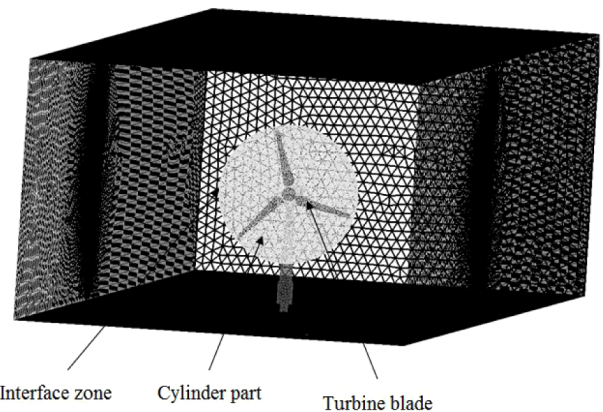
است. ارتفاع مرکز توبی توربین باد از سطح زمین $0.817 m$ است (شکل ۴). محدوده محاسباتی در مطالعه حاضر به طور کلی از دو بخش متحرک و ثابت تشکیل شده است. بخش متحرک شامل یک استوانه باریک است که تراکم شبکه محاسباتی در این ناحیه زیاد است، پره‌های توربین باد درون استوانه قرار گرفته‌اند و امکان چرخش پره‌ها در این بخش فراهم شده است. بخش ثابت مابقی فضای تونل باد را شامل می‌شود (شکل ۵ (الف)). به دلیل استفاده از تکنیک مش لغزان^۱ برای بخش متحرک بر خلاف مدل ام. آر. اف یک وجه مشترک دو لایه‌ای انتخاب شده است. در روش ام. آر. اف قسمت‌های متحرک ناحیه محاسباتی نسبت به سلول‌های مجاور بدون

^۱Sliding mesh technique

^۲Multiple Reference Frame



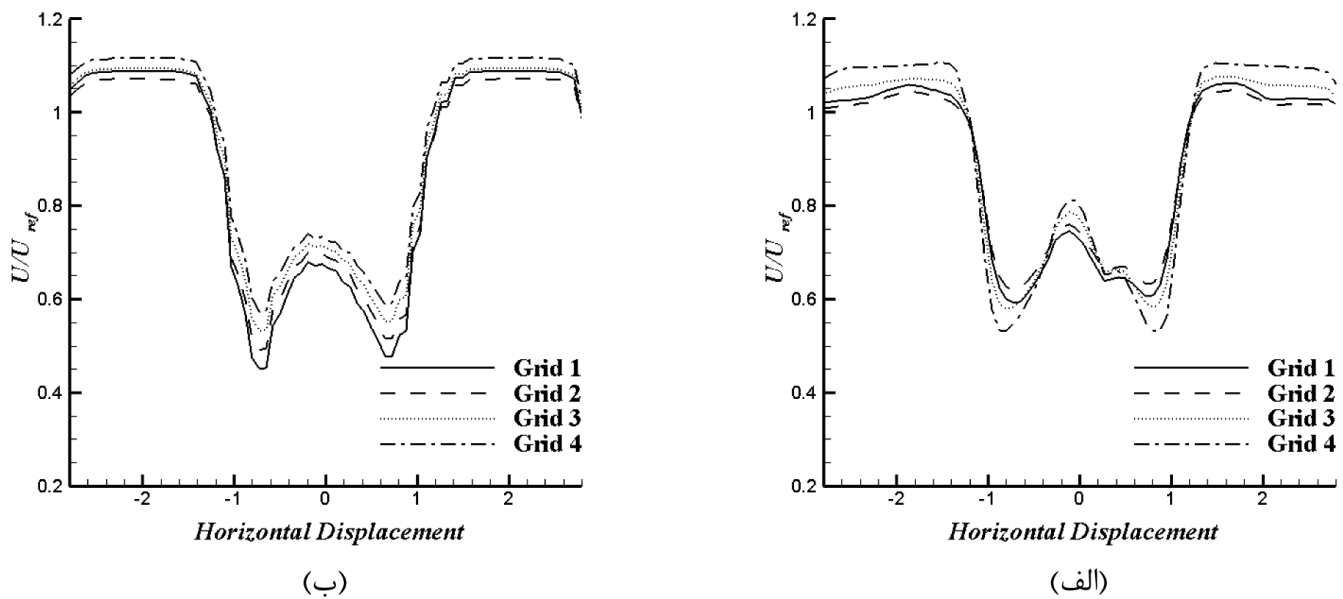
(ب)



(الف)

شکل ۵: (الف) شبکه محاسباتی برای یک توربین باد (ب) نمونه شبکه بندی حول سطح پره

Fig. 5. (a) Computational grid for a wind turbine, (b) Sample of mesh around the blade surface



شکل ۶: مقایسه سرعت متوسط‌گیری شده زمانی برای چهار شبکه محاسباتی در راستای جریان در امتداد خط افقی گذرنده از مرکز تونل باد در فواصل (الف) ۱D (ب) ۴D

Fig. 6. Comparison of time average of velocity for four computational grids along the flow direction in a horizontal line passing the center of wind tunnel at intervals of (a) 1D, (b) 4D

شده است. حل گر استفاده شده از روش حجم محدود استفاده می‌کند. ترم فشار از طریق الگوریتم سیمپل^۱ به دست می‌آید، در روش سیمپل ابتدا فشار پیش‌بینی و در مرحله بعدی اصلاح می‌شود. گسسته‌سازی مکانی معادله مومنتوم بر مبنای تفاضل مرکزی محدود^۲ و معادله فشار بر مبنای استاندارد است. گسسته‌سازی زمانی معادلات از مرتبه دوم ضمنی است. شبکه‌بندی بی سازمان 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 دی. ان. اس) داشته باشد. فاصله شبکه محاسباتی با عرض فیلتر متناسب است. از این رو 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 شبکه‌های محاسباتی مختلف بررسی شده است (جدول ۱). مقایسه بین نتایج نشان می‌دهد تغییر چندانی در ضریب C_p و سرعت در راستای جریان در دو فاصله ۱D و ۴D برای شبکه محاسباتی ریزتر از ۲/۷ میلیون وجود ندارد (شکل ۶). از این رو شبکه محاسباتی ۲/۷ میلیون برای مطالعه حاضر انتخاب شده است. در یک رایانه هشت هسته‌ای با یک سی‌پی‌یو و با قدرت پردازش ۲/۱ گیگا هرتز زمان محاسباتی برای هر

یک مرتبه کوچکتر است. این عدد رینولدز برای مشخصه‌های عملکردی توربین باد اثرات قابل توجهی دارد. برای مثال ضریب توان یک توربین باد واقعی خیلی بزرگتر از یک توربین باد مدل است [۲۴]. با این حال مدیسی و آلفردسون [۲۵] پیشنهاد کردند که گردابه‌های ناپایدار و ساختارهای جریان آشفته در ناحیه دنباله توربین تقریباً باید مستقل از عدد رینولدز Re_c^{tip} باشند. بر اساس قانون بقای مومنتوم 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 جریان باد به کل انرژی باد است. این ضریب عبارت است از:

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

برای ایجاد هندسه مورد نظر در نرم افزار گمبیت ابتدا یک بال‌واره مطابق شکل ۳ ایجاد می‌شود. سپس با استفاده از داده‌های موجود، تغییر ابعاد، زاویه و فاصله بال‌واره از نقطه مبدا اعمال گردیده تا یک بال ایجاد شود. بعد از ایجاد بال مورد نظر دو بال دیگر در زوایای ۱۲۰ و ۲۴۰ درجه با همین ابعاد ایجاد می‌گردد. در مرحله بعدی توپی ایجاد شده و به بال اضافه می‌شود. در انتها هندسه مورد نظر درون یک استوانه کوچک قرار می‌گیرد تا ناحیه متحرک ساخته شود. با ایجاد ستون نگه دارنده توربین باد و ایجاد دیواره‌های تونل باد هندسه مورد نظر برای یک توربین باد به دست می‌آید. در کار حاضر برای حل معادلات گسسته از نرم افزار انسیس فلونت استفاده

¹SIMPLE

²Bounded central differencing

مقایسه با مطالعات قبلی نتایج تحلیل و تفسیر می‌شوند.

جدول ۱: استقلال از شبکه

Table 1. Mesh independence

اندازه شبکه محاسباتی	ضریب توان	سرعت متوسط‌گیری شده در راستای جریان در مرکز تونل باد، $1D$ پس از توربین باد (m/s)
۱۱۰۰۰۰۰	۰/۳۹۲۴	۷/۳۴
۱۸۰۰۰۰۰	۰/۳۹۶۵	۷/۵۹
۲۷۰۰۰۰۰	۰/۴۰۹۵	۷/۷۶
۳۴۰۰۰۰۰	۰/۴۱۰۲	۷/۸۰

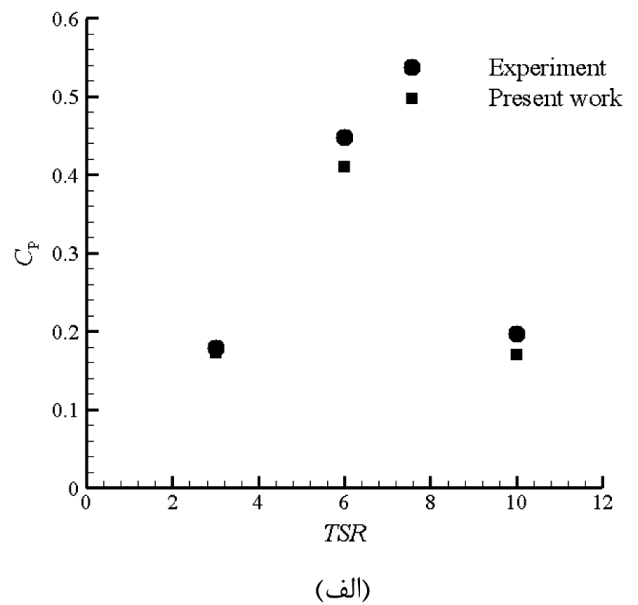
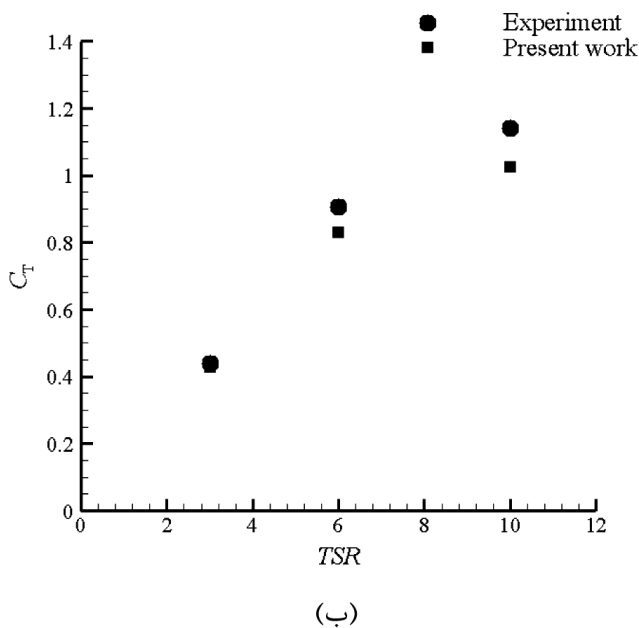
۳-۱- اعتبار سنجی حل
در این بخش نتایج ال.ای. اس برای یک توربین باد تنها در سرعت‌های دورانی متفاوت با نتایج تجربی و دو مطالعه عددی دیگر مقایسه می‌شوند. در شکل ۷ ضریب C_p و ضریب C_T در سرعت‌های دورانی مختلف مقایسه شده است. پروفیل سرعت متوسط‌گیری شده بی‌بعد در راستای جریان و در امتداد خط افقی گذشته از مرکز تونل باد در فاصله $1D$ و $5D$ پس از توربین باد مقایسه شده است (شکل ۸). همانطور که مشاهده می‌شود نتایج کار حاضر با نتایج تجربی تطابق خوبی دارد. اختلاف متوسط بین نتایج تجربی و مطالعه حاضر حدود ۳ درصد است بجز در فاصله $5D$ که این اختلاف به حدود ۸ درصد می‌رسد. این اختلاف در نتایج هنس و کونو [۱۹] نیز دیده می‌شود.

جریان آشفته تحت تاثیر لرزش دستگاه، شرایط مرزی و خصوصیات مواد است و حساسیت شدیدی به این اغتشاشات نشان می‌دهد. در مطالعات آزمایشگاهی، اغتشاشات جریان آشفته می‌تواند باعث پدیده جدایش در طرف مکنده پره شود که باعث کاهش نیروی برا می‌شود. بخشی از این نوسانات در ال.ای. اس و یورنس مدل می‌شوند. در واقع مطالعه همه نوسانات در میدان جریان امکان پذیر نیست. از این رو امکان جدایش در سطح مکنده، کاهش برا و شرایط مرزی ناکامل می‌تواند دلیل تخمین کم ضریب C_p باشد [۲۲]. علاوه بر این تخمین کمتر ضریب C_p در دیگر کارهای عددی می‌تواند این

شبیه‌سازی حدوداً ۱۶۰ ساعت است. گام زمانی معادل است. در طول شبیه سازی حداکثر مقدار عدد کورانت ۰/۵ است. از این رو گام زمانی ۰/۰۰۰۹۶۹ ثانیه که تقریباً معادل ۷ درجه چرخش پره‌های توربین است، عدد مناسبی است. معیار همگرایی برای تمامی باقیمانده‌ها 10^{-5} است.

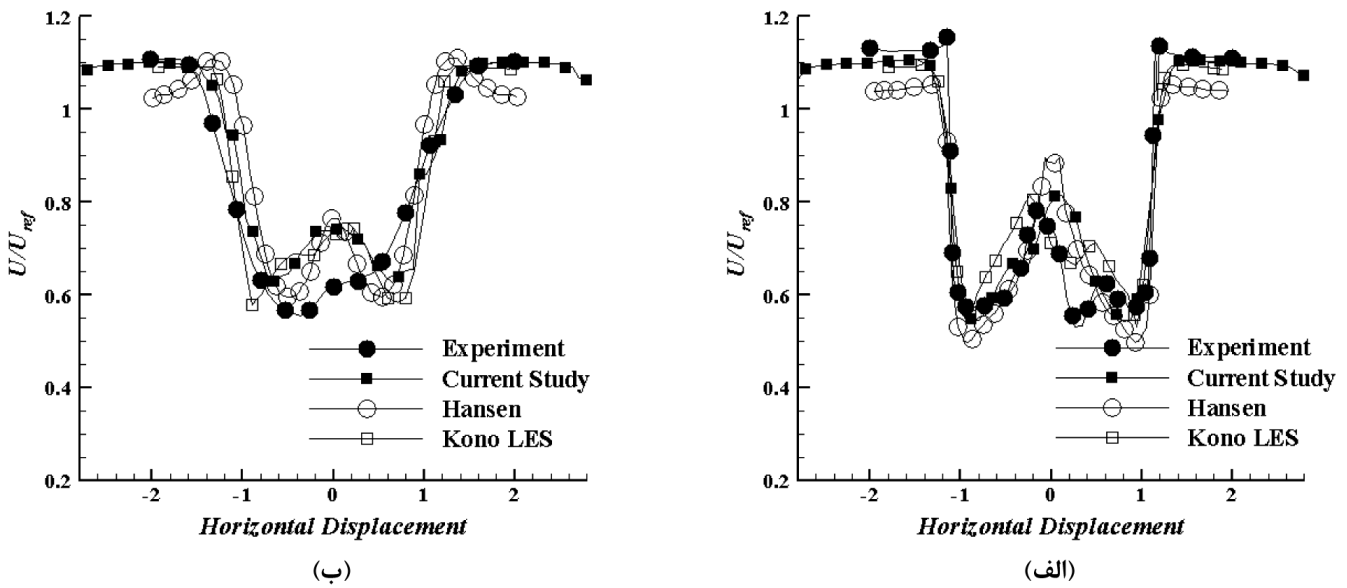
۳- بحث و آنالیز نتایج

در این بخش صحت سنجی کار حاضر بررسی می‌شود. سپس ضمن



شکل ۷: مقایسه (الف) ضریب C_p (ب) ضریب C_T با نتایج تجربی در سرعت‌های دورانی متفاوت

Fig. 7. Comparison of (a) C_p coefficient, (b) C_T coefficient with experimental data at different rotating speeds



شکل ۸: مقایسه سرعت متوسط گیری شده زمانی در راستای جریان در امتداد خط افقی گذرنده از مرکز تونل باد در فواصل (الف) ۱D (ب) ۵D
 Fig. 8. Comparison of the time average velocity in the flow direction along the horizontal line passing the center of wind tunnel at intervals (a) 1D, (b) 5D

$$u(r + \delta r) = u(r) + D\delta r + O\|\delta r\|^2 \quad (16)$$

که در اینجا تانسور گرادیان سرعت $(\nabla \mathbf{u})$ است. معادله مشخصه آن با رابطه زیر مشخص می‌شود:

$$\lambda^3 + P\lambda^2 + Q\lambda + R = 0 \quad (17)$$

که در اینجا:

$$P = -\text{trace}(D) = -\text{div}(\mathbf{u}) \quad (18)$$

$$Q = \frac{1}{2} [P^2 - \text{trace}(DD)] \quad (19)$$

$$R = \frac{1}{3} [P^3 + 3PQ - \text{trace}(DDD)] \quad (20)$$

P و Q و R متغیرهای تانسور گرادیان سرعت می‌باشند. دلتا برای این معادله مشخصه به صورت زیر است:

$$\Delta \equiv \left(\frac{1}{2}\tilde{R}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\tilde{Q}\right)^3 \quad (21)$$

که در اینجا $\tilde{Q} \equiv Q - \frac{1}{3}P^2$ و $\tilde{R} \equiv R + \frac{2}{27}P^3 - \frac{1}{3}PQ$ اگر Δ مثبت باشد، تانسور گرادیان سرعت یک مقدار ویژه حقیقی و دو مقدار ویژه مختلط دارد. زو و همکاران تجزیه تانسور گرادیان سرعت D در مختصات کارتزین به صورت زیر ارائه کردند.

موضوع را تأیید کند.

۳-۲- ساختارهای آشفته

در این بخش ابتدا رفتار سه بعدی میدان جریان در اطراف و پایین دست توربین باد بررسی شده است. گردابه‌هایی با ابعاد مختلف در جریان‌های آشفته وجود دارد. با اینکه گردابه‌های ایجاد شده نقش مهمی در جریان‌های آشفته دارند اما تاکنون تعریف دقیقی از این ساختارها که به طور گسترده پذیرفته شده باشد، ارائه نشده است. بعضی از محققان با روش‌های تشخیص گردابه به ویژه روش λ_{ci} به آشکارسازی و مطالعه گردابه‌ها پرداخته‌اند. بررسی ساختارهای آشفته به جهت درک بهتر اثر این ساختارها بر عملکرد توربین‌های پایین دست اهمیت زیادی دارد. برای رسیدن به این هدف آشنایی با روش‌های آشکارسازی گردابه‌ها حایز اهمیت است. در گذشته برای نشان دادن گردابه از ورتیسیت استفاده می‌شده است. اما امروزه بسیاری از محققان تاکید کرده‌اند که ورتیسیت برای مشخص کردن گردابه مناسب نیست چون که قادر به تمایز بین حرکت‌های برشی مطلق و حرکت‌های چرخشی یک گردابه واقعی نیست. روش‌ها و الگوریتم‌های زیادی برای مشخص کردن گردابه‌ها توسط محققان پیشنهاد و استفاده شده است [۲۶-۳۶].

در مطالعه حاضر روش λ_{ci} برای برش‌های دو بعدی از میدان سرعت که توسط زو و همکاران [۳۰] ارائه شده است، برای آشکارسازی گردابه‌ها استفاده خواهد شد. تعریف عددی و مفهوم فیزیکی روش λ_{ci} توسط زو و همکاران ارائه شده است. در ابتدا میدان سرعت حول یک نقطه با بردار مکان r از مرتبه خطی ارائه می‌شود.

جدا شده از پره که به دنبال یکدیگر قرار دارند در شکل ۹ دیده می‌شود. گردابه‌های جدا شده از لبه پره شدت بیشتری نسبت به گردابه‌های ته پره دارند، زیرا سرعت دورانی لبه پره بیشتر از سرعت دورانی ته پره است. این موضوع باعث اضمحلال سریع‌تر گردابه‌های جدا شده از ته پره می‌شود. در $\lambda_1=3$ اثرات گردابه‌ها در ناحیه دنباله دور دیده نمی‌شود. گردابه‌های جدا شده از نوک پره بردارهای سرعتی در راستای جریان دارند (لکه‌های قرمز). بردارهای سرعت حول گردابه‌های جدا شده از ته پره در خلاف جهت جریان باد است (لکه‌های آبی دارند).

همچنین گردابه‌های جدا شده از نوک و ته پره در نیمه بالایی و پایینی تونل باد علامتی مخالف یکدیگر دارند. شکل ۹ بردارهای سرعت (سرعت در مرکز گردابه از سرعت متوسط کم شده است) در نزدیکی این گردابه‌ها را نشان می‌دهند. این موضوع در کار شری و همکاران و هو و همکاران نیز دیده شده است [۳۷ و ۳۸]. با افزایش سرعت دورانی گردابه‌های جدا شده از لبه پره به یکدیگر نزدیک می‌شوند (شکل‌های ۱۰ و ۱۱). این موضوع به دلیل افزایش فرکانس گردابه‌های جدا شده از پره است. گردابه‌های جدا شده از لبه پره تمایل به پخش شدن در جهت محور عمودی دارند. پخش گردابه‌ها با افزایش سرعت دورانی شدت بیشتری پیدا می‌کند. سه مرحله اصلی در مورد گردابه‌ها وجود دارد که شامل تشکیل گردابه، جدا شدن از پره و اضمحلال رفتن است. مرحله تشکیل گردابه در ۶۰ درجه چرخش پره‌های توربین باد در سرعت دورانی $\lambda_1=3$ دیده نمی‌شود، ولی با افزایش سرعت دورانی در ۱۰ و $\lambda_{2,3}=6$ مرحله تشکیل گردابه در طی ۶۰ درجه چرخش پره‌های توربین باد به وضوح دیده می‌شود. در تمامی سرعت‌های دورانی گردابه‌های تشکیل شده بر روی برج نگهدارنده علامتی عکس گردابه‌های جدا شده از ته پره دارند. در سرعت دورانی ۶ و $\lambda_{1,2}=3$ گردابه‌های جدا شده از ته پره و برج نگهدارنده به صورت یک در میان قرار گرفته‌اند، در حالی که در سرعت دورانی $\lambda_3=10$ این گردابه‌ها از برج نگهدارنده دور می‌شوند. افزایش سرعت دورانی باعث افزایش قدرت چرخش می‌شود. همچنین در یک فاصله مشخص تعداد بیشتری از گردابه‌ها قرار می‌گیرند. به عبارت دیگر فاصله بین گردابه‌ها تابعی از سرعت دورانی است [۱۰]. در سرعت دورانی $\lambda_3=10$ بجای تعداد مشخصی گردابه یک مسیر از گردابه‌های به هم پیوسته وجود دارد و گردابه‌های جدا شده از پره پس از زمان کوتاهی به این مسیر پیوسته وصل می‌شوند (شکل ۱۱). یک مسیر پیوسته از گردابه‌های جدا شده از لبه پره نشان دهنده برخورد گردابه‌ها به یکدیگر است. این موضوع اخیراً توسط اریکسون و کروگستد [۳۹] نیز گزارش شده است. با افزایش سرعت دورانی اثرات گردابه‌های جدا شده از پره در ناحیه دنباله دور نیز دیده می‌شود. در $\lambda_2=6$ تنها اثرات گردابه‌های جدا شده از لبه پره ولی در $\lambda_3=10$ اثرات گردابه‌های جدا شده از ته پره نیز دیده می‌شوند. در $\lambda_3=10$ گردابه‌های جدا شده از پره لکه‌های بزرگتری در ناحیه دنباله دور تشکیل می‌دهند. نویسندگان معتقدند تقویت اثرات گردابه‌ها در ناحیه دنباله دور تنها ناشی از افزایش شدت گردابه‌ها به خاطر افزایش سرعت دورانی نیست بلکه برخورد گردابه‌ها به یکدیگر و تشکیل گردابه‌های

$$D \equiv [d_{ij}] = [\delta_r \quad \delta_{cr} \quad \delta_{ci}]$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_r & & \\ & \lambda_{cr} & \lambda_{ci} \\ & -\lambda_{ci} & \lambda_{cr} \end{bmatrix} [\delta_r \quad \delta_{cr} \quad \delta_{ci}]^{-1} \quad (22)$$

که در اینجا λ_r مقدار ویژه حقیقی مطابق با بردار ویژه v_r است و $\lambda_{cr} \pm \lambda_{ci}$ مقادیر ویژه اعداد مختلط با بردار ویژه‌های $v_{cr} \pm v_{ci}$ است. در یک سیستم مختصات منحنی الشكل (\mathcal{Y}_1 و \mathcal{Y}_2 و \mathcal{Y}_3) که با سه بردار v_r و v_{cr} و v_{ci} تعریف می‌شود، خطوط جریان محلی می‌تواند به صورت زیر بیان شود:

$$\begin{cases} y_1(t) = C_r \exp \lambda_r t \\ y_2(t) = \exp \lambda_{cr} t [C_c^1 \cos(\lambda_{ci} t) + C_c^2 \sin(\lambda_{ci} t)] \\ y_3(t) = \exp \lambda_{cr} t [C_c^2 \cos(\lambda_{ci} t) - C_c^1 \sin(\lambda_{ci} t)] \end{cases} \quad (23)$$

که C_r و C_c^1 و C_c^2 ثابت‌های رابطه بالا می‌باشند. نرخ چرخش توسط λ_{ci} مشخص می‌شود، از این‌رو زو و همکاران [۳۰] از قسمت موهومی مقدار ویژه مختلط به عنوان قدرت چرخش موضعی گردابه‌ها استفاده کردند. اگر مقدار λ_{ci} صفر باشد هیچ گونه حرکت چرخشی یا خطوط جریان دایره ای موضعی وجود نخواهد داشت. صورت دو بعدی تانسور گرادیان سرعت می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$\nabla \mathbf{u} = \begin{bmatrix} \partial u / \partial x & \partial u / \partial y \\ \partial v / \partial x & \partial v / \partial y \end{bmatrix} \quad (24)$$

دلتا برای این معادله مشخصه به صورت زیر است:

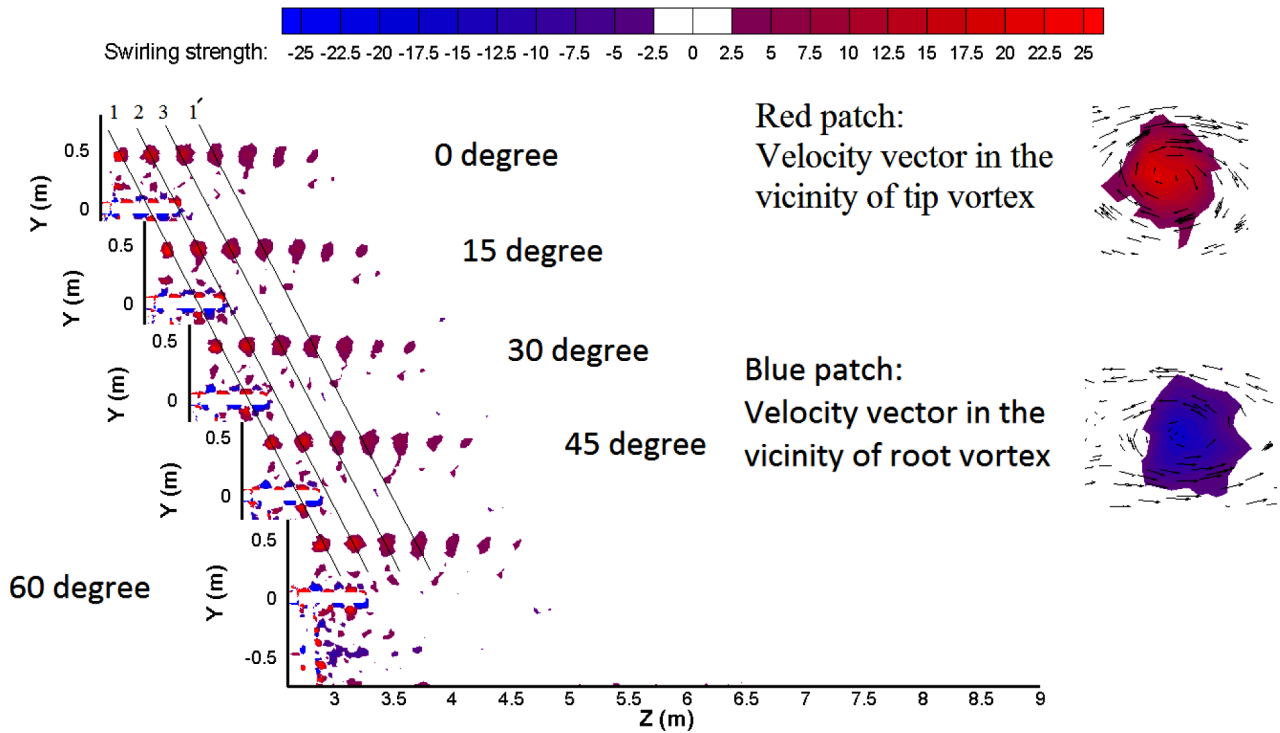
$$\Delta = \text{trace}(\nabla \mathbf{u})^2 - 4 \det(\nabla \mathbf{u}) \quad (25)$$

λ_{ci} قسمت موهومی مقادیر ویژه مختلط تانسور گرادیان سرعت $\nabla \mathbf{u}$ است و مقدار آن مخالف صفر است وقتی که $\Delta > 0$ باشد. قدرت چرخش بخش موهومی مقدار ویژه تانسور گرادیان سرعت است. بنابراین علامت قدرت چرخش را نمی‌تواند مشخص کند. علامت قدرت چرخش با علامت ورتیسیته عرضی به صورت زیر مشخص می‌شود:

$$\lambda_{ci} = \frac{\omega_x}{|\omega_x|} \lambda_{ci} \quad (26)$$

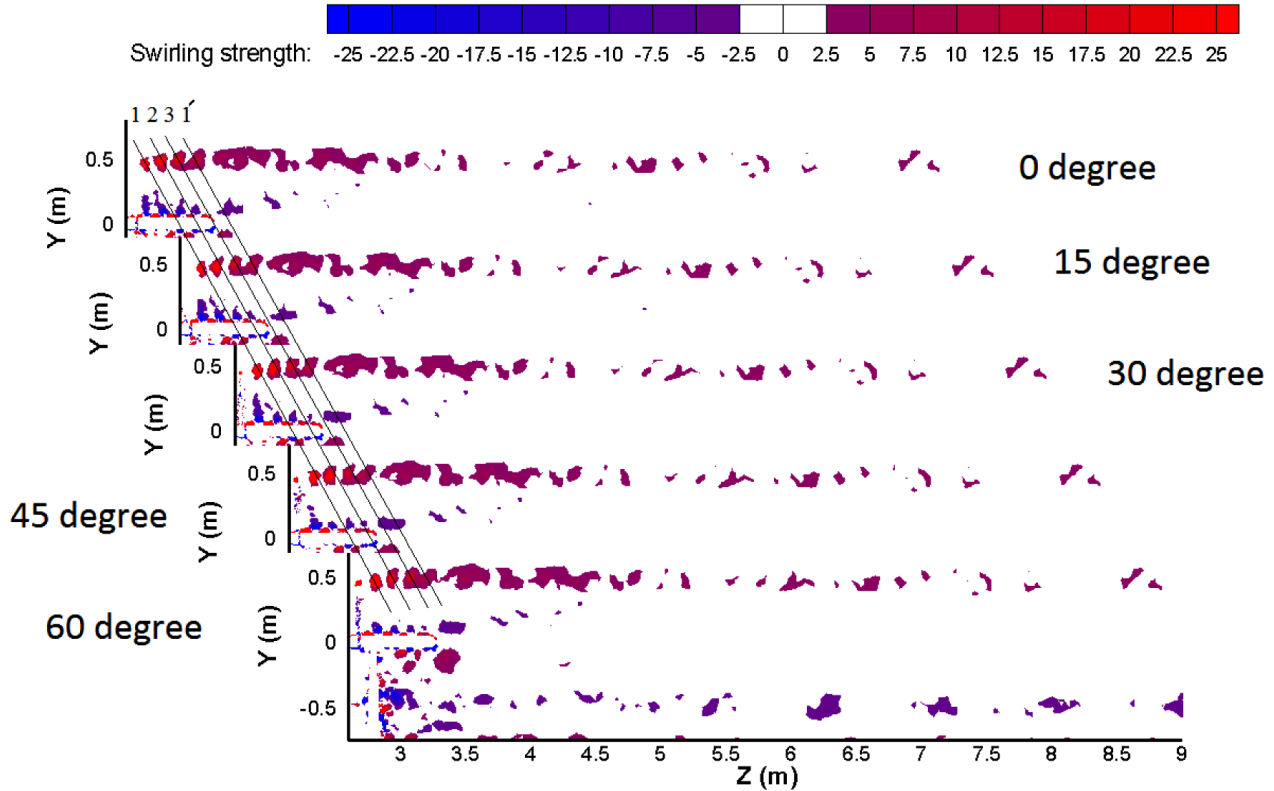
در رابطه بالا، ω_x ورتیسیته عرضی لحظه‌ای است. در مطالعه حاضر در نیمه بالایی تونل باد گردابه‌های جدا شده از لبه پره با لکه‌های قرمز و گردابه‌های جدا شده از ته پره با لکه‌های آبی مشخص شده است. در نیمه پایینی رنگ این لکه‌ها برعکس است.

شکل ۹ قدرت چرخش را در میدان سرعت لحظه‌ای برای یک توربین باد تنها در سرعت دورانی $\lambda_1=3$ نشان می‌دهد. سیر و گسترش گردابه‌ها با گام‌های ۱۵ درجه‌ای تا ۶۰ درجه چرخش پره‌های توربین باد دنبال می‌شود. توربین باد کار حاضر سه پره‌ای است. بنابراین گردابه‌های ۱ و ۱' از یک پره مشابه جدا شده‌اند. در واقع سه حلقه مارپیچی از لبه‌های پره جدا می‌شوند و به سمت پایین دست جریان حرکت می‌کنند. یک ردیف از گردابه‌های



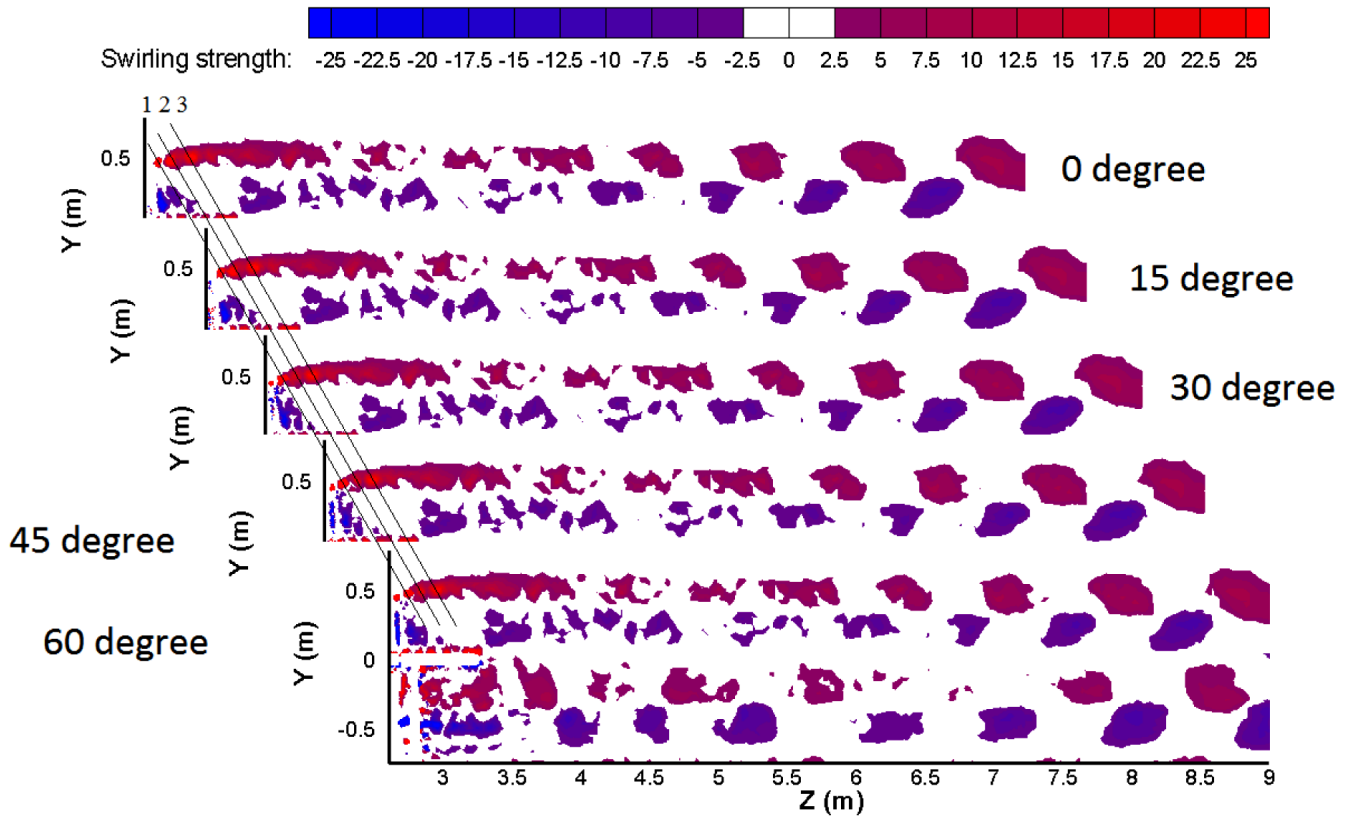
شکل ۹: شدت چرخش در میدان سرعت لحظه ای برای سرعت دورانی $\lambda_1 = 3$

Fig. 9. Swirl intensity in the instantaneous velocity field at rotational speed of $\lambda_1 = 3$



شکل ۱۰: شدت چرخش در میدان سرعت لحظه ای برای سرعت دورانی $\lambda_2 = 6$

Fig. 10. Swirl intensity in the instantaneous velocity field at rotational speed of $\lambda_2 = 6$



شکل ۱۱: شدت چرخش در میدان سرعت لحظه‌ای برای سرعت دورانی $\lambda_3=10$

Fig. 11. Swirl intensity in the instantaneous velocity field at rotational speed of $\lambda_3 = 10$

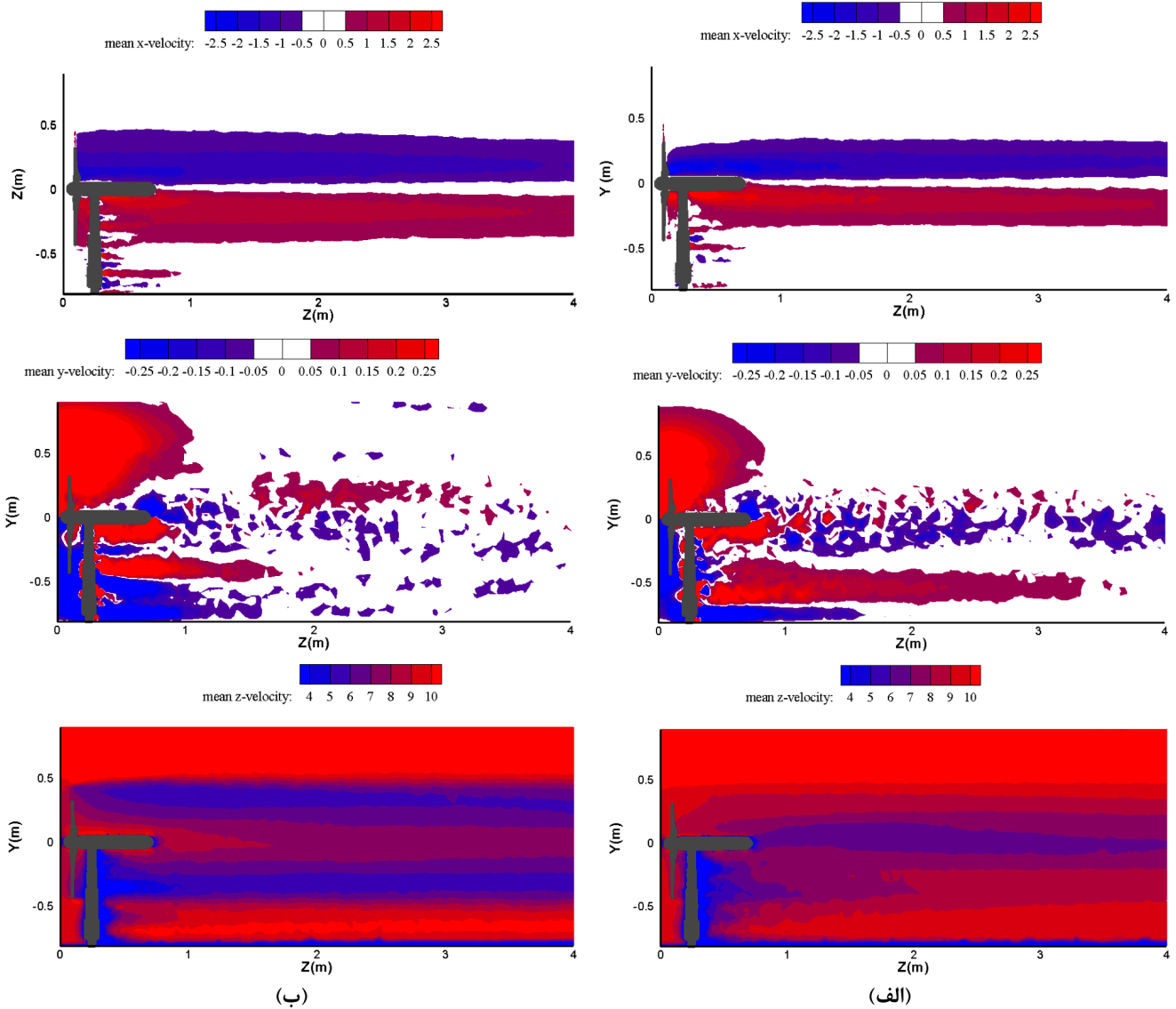
ولی با افزایش سرعت دورانی به $\lambda_2=6$ نواحی بیشتری را در بر می‌گیرد و اثرات آن تا نوک پره دیده می‌شود. در سرعت دورانی $\lambda_2=6$ با حرکت به سمت پایین دست جریان بر خلاف سرعت دورانی $\lambda_1=3$ سرعت عرضی به سمت مرکز تونل باد متراکم می‌شود. این موضوع نشان دهنده نرخ بازیابی سریع‌تر دنباله است که به خاطر اختلاط آشفتگی است (شکل ۱۳). با افزایش سرعت دورانی افت سرعت در ناحیه قرار نوک پره افزایش می‌یابد و دو نقطه کمینه در محل قرار گیری نوک پره تشکیل می‌شود. با افزایش سرعت دورانی اثرات ستون بر دنباله کاهش می‌یابد (شکل ۱۳). برای مثال در مقطع عرضی تونل باد در $1D$ پایین دست توربین باد در سرعت دورانی $\lambda_2=6$ کمینه سرعت $U/U_{ref}=0.154$ است که در فاصله $1D$ این مقدار به $U/U_{ref}=0.167$ می‌رسد. در سرعت دورانی $\lambda_3=10$ کمینه سرعت در فاصله $1D$ $U/U_{ref}=0.126$ است که در فاصله $1D$ به $U/U_{ref}=0.168$ می‌رسد. در نیمه بالایی تونل باد سرعت عمودی در مجاورت پره‌های توربین باد مثبت است. در نیمه پایینی تونل باد این مقدار منفی است، با این تفاوت که به خاطر وجود ستون و اثرات کف تونل اثرات آن زودتر اضمحلال می‌رود و شکل جدیدی از سرعت عمودی پس از ستون ایجاد می‌شود. اثرات برج نگهدارنده در فاصله پایین دست بیشتری مشاهده می‌شود. سرعت عمودی دو ناحیه مثبت و منفی در نیمه بالایی و پایینی تونل باد درست

جدیدتر مانع از اضمحلال آن‌ها می‌شود. این موضوع در کارهای گذشته گزارش نشده است.

۳-۳- میدان سرعت

به منظور بررسی تغییرات میدان سرعت در ناحیه دنباله، کانورهای سه مؤلفه سرعت در راستای جریان برای دو سرعت دورانی $\lambda_1=3$ و $\lambda_2=6$ مطالعه می‌شود. چون انرژی سینتیکی از جریان باد برداشت می‌شود، سرعت در راستای جریان کاهش و در راستاهای عرضی و عمودی افزایش می‌یابد. شکل ۱۲ یک نمای کلی از سه مؤلفه سرعت متوسط‌گیری شده در دو سرعت دورانی $\lambda_1=3$ و $\lambda_2=6$ در صفحه $Z-Y$ ارائه می‌کند.

ناحیه جاروب شده حدوداً بین 0.45 تا -0.45 قرار دارد. نوک توپی دقیقاً در مرکز تونل باد قرار دارد ($Y=0$). مقادیر مثبت سرعت‌های جانبی، نشان دهنده چرخش به سمت داخل صفحه و مقادیر منفی نشان دهنده چرخش به سمت خارج صفحه است. سرعت عرضی الگوی تقریباً مشابهی را در نیمه بالایی و نیمه پایینی تونل باد در هر دو سرعت دورانی نشان می‌دهد. این موضوع نشان می‌دهد که برج نگهدارنده و ستون اثرات زیادی بر سرعت عرضی در پایین دست جریان ندارند. در سرعت دورانی $\lambda_1=3$ سرعت عرضی در ناحیه بین برج نگهدارنده تا وسط پره مشاهده می‌شود

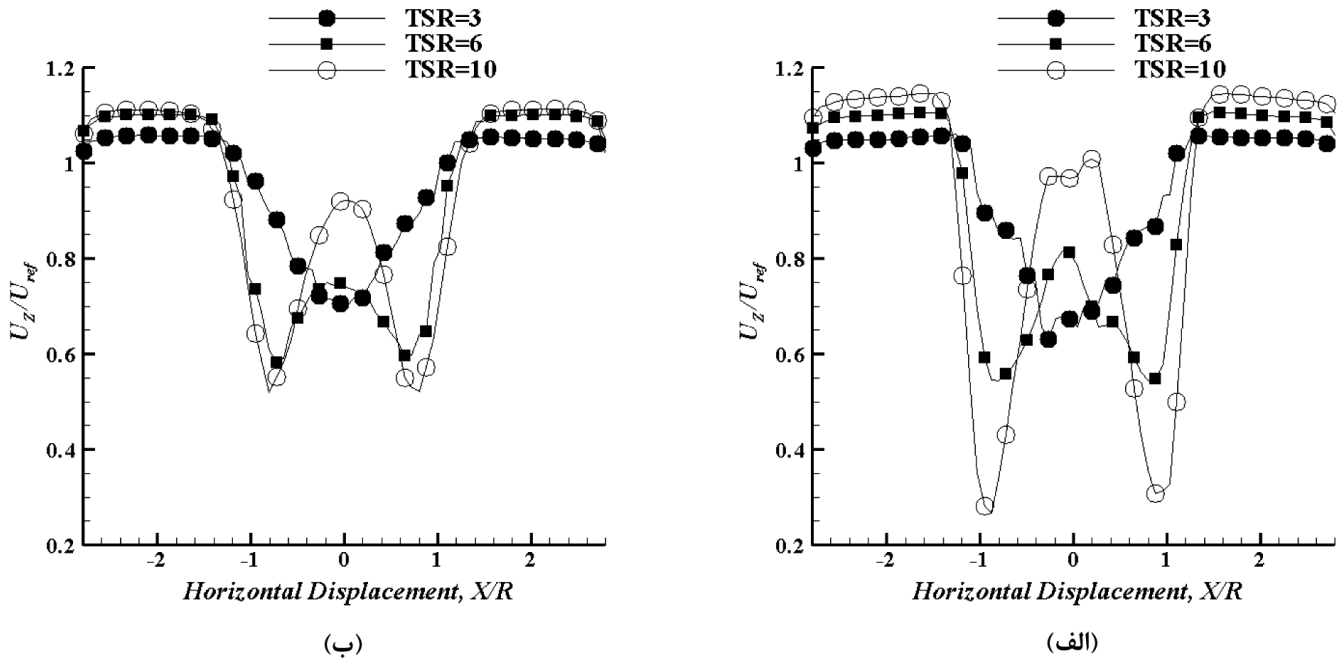


شکل ۱۲: کانتورهای متوسط‌گیری شده زمانی سرعت در مرکز تونل باد و در صفحه Z - Y . سرعت عرضی (ردیف اول)، سرعت عمودی (ردیف دوم) و سرعت در راستای جریان (ردیف سوم) برای دو سرعت دورانی متفاوت (الف) $\lambda_1=3$ (ب) $\lambda_2=6$

Fig. 12. Time average velocity contours at the center of wind tunnel and Z - Y plane, transverse velocity (first row), normal velocity (second row) and the axial velocity (third row) for two different rotational speeds (a) $\lambda_1 = 3$, (b) $\lambda_2 = 6$

دورانی $\lambda_2=6$ بیشترین افت سرعت در نزدیکی ستون و نوک پره است. اثرات ستون در اینجا نیز به سرعت اضمحلال می‌روند. همچنین در این سرعت دورانی سرعت در راستای جریان الگوی توزیع متفاوتی دارد. با حرکت از مرکز تونل باد به سمت نوک پرها سرعت در راستای جریان کاهش می‌یابد که نشان دهنده برداشت بیشتر انرژی در نواحی نوک پره است. افزایش سرعت در خارج از ناحیه جاروب شده بخاطر بالا بودن نسبت انسداد است. اثر نسبت انسداد بر میدان سرعت با افزایش سرعت دورانی افزایش می‌یابد شکل ۱۳ در هندسه داده شده این نسبت ۱۲/۱ درصد است. هرچند مطالعات صورت گرفته نسبت انسداد بالای ۱۰ درصد را برای تونل باد پیشنهاد نمی‌کنند [۴۰]، با این حال این موضوع توسط سازندگان این مدل نادیده گرفته شده است.

پشت برج نگهدارنده ایجاد می‌کند. افزایش سرعت دورانی باعث اضمحلال سریع‌تر سرعت عمودی می‌شود. در تمامی سرعت‌های دورانی با افزایش فاصله پایین‌دست سرعت در راستای جریان افزایش می‌یابد و دنباله بازیابی می‌شود. توزیع سرعت در راستای جریان در سرعت دورانی $\lambda_1=3$ عدم تقارن را خصوصاً در ناحیه دنباله نزدیک نشان می‌دهد که به خاطر وجود ستون و اثرات کف تونل باد است. در سرعت دورانی $\lambda_1=3$ بیشترین افت سرعت در راستای جریان در نزدیکی ستون و مرکز تونل باد است. اثرات ستون به سرعت از بین می‌روند ولی اثرات برج نگهدارنده در فاصله بیشتری دیده می‌شود. با حرکت از مرکز تونل باد به سمت نوک پرها سرعت افزایش می‌یابد که نشان از برداشت بیشتر انرژی باد در ناحیه ته پره دارد. در سرعت



شکل ۱۳: مقایسه سرعت متوسط گیری شده زمانی در راستای جریان در امتداد خط افقی گذرنده از مرکز تونل باد در فواصل (الف) ۱D (ب) ۵D برای سه سرعت دورانی ۱۰ و ۶ و ۳ λ

Fig. 13. Comparison of the time average velocity at the flow direction along the horizontal line passing through the center of wind tunnel at intervals (a) 1D, (b) 5D, for three different rotational speeds $\lambda = 3, 66, 10$

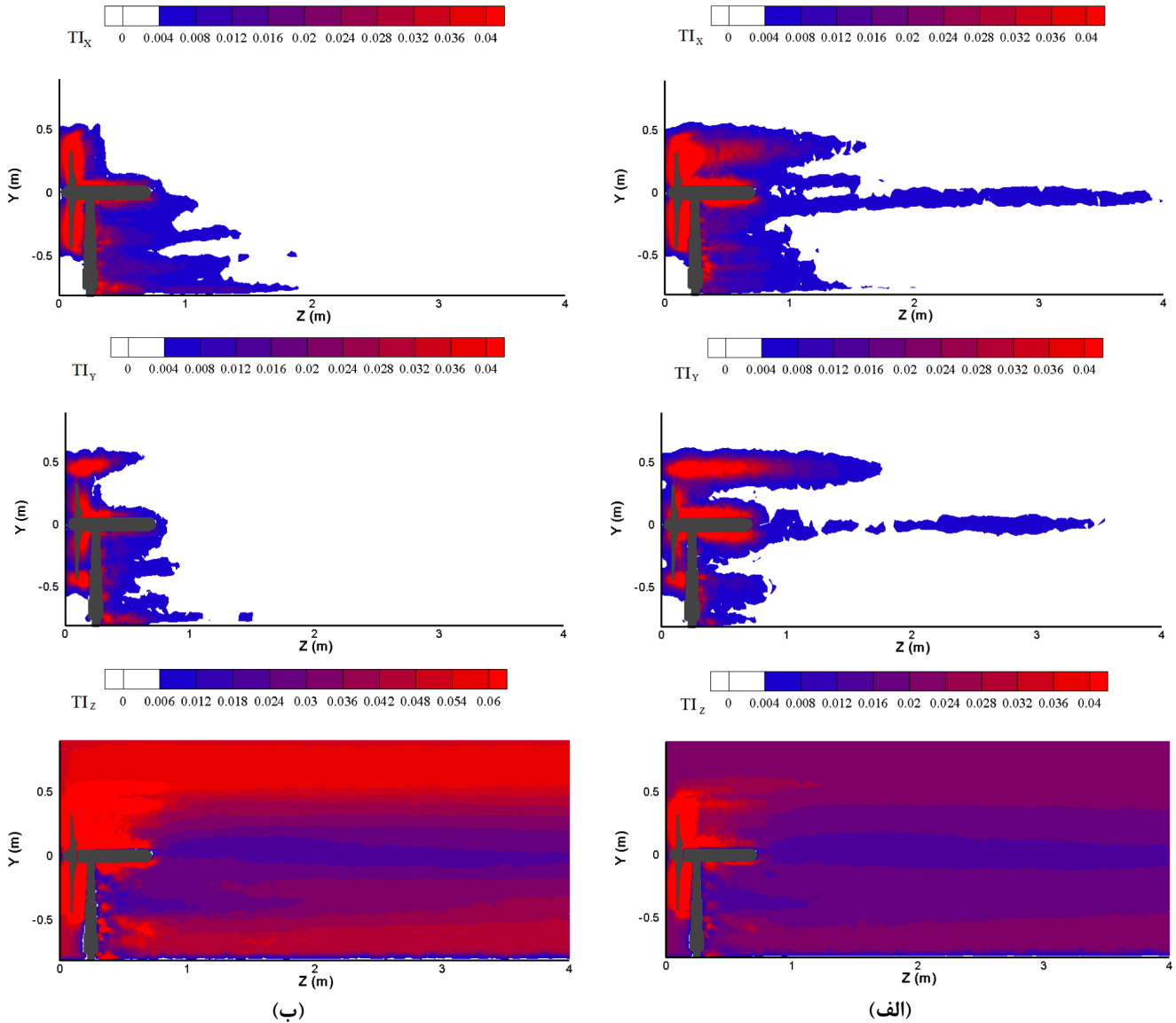
۳-۵- تنش‌های رینولدز

توزیع تنش‌های برشی رینولدز در صفحه عمودی در راستای جریان برای دو سرعت دورانی $\lambda_1=3$ و $\lambda_2=6$ در شکل ۱۵ نمایش داده شده است. سطح بالای تنش برشی رینولدز $-u'w'$ در پشت ستون فقط در ناحیه دنباله نزدیک دیده می‌شود ولی تنش برشی پشت پرده‌ها در ناحیه دنباله دور نیز مشاهده می‌شود. توزیع تنش برشی $-u'w'$ مشابه توزیع شدت توربولانسی I_z است. این موضوع ناشی از نیروهای برشی شدید حاصل از جریان باد و همچنین تولید مکانیکی انرژی سینتیکی آشفتگی است. تنش رینولدز $-u'v'$ مقداری منفی در پشت پرده‌های توربین باد دارد و در ناحیه ته پره و برج نگهدارنده مقدار آن مثبت است. ماکزیمم مقدار تنش رینولدز $-u'v'$ و $-v'w'$ کمتر از نصف تنش برشی $-u'w'$ است. افزایش سرعت دورانی باعث کاهش تمامی تنش‌های برشی رینولدز می‌شود. همچنین با حرکت به سمت پایین دست جریان دنباله پخش می‌شود و اثرات تنش‌های برشی رینولدز کم می‌شود (شکل ۱۵). با افزایش فاصله پایین دست اثرات تنش‌های رینولدز به سرعت از بین می‌رود (شکل ۱۶). افزایش سرعت دورانی باعث کاهش تنش‌های رینولدز می‌شود ولی نرخ اضمحلال آن‌ها کمتر می‌شود (شکل ۱۶ ب)). در تمامی سرعت‌های دورانی بیشترین تأثیر تنش‌های رینولدز در ناحیه جاروب شده است.

۳-۴- آشفتگی

شدت آشفتگی به عنوان معیاری برای بارهای ناشی از خستگی بر بخش‌های مختلف یک توربین باد استفاده می‌شود. مطالعه شدت آشفتگی پس از توربین باد به منظور نصب توربین‌های باد پایین دست در یک مزرعه بادی از اهمیت بسیاری برخوردار است. یک خصوصیت مهم در ناحیه دنباله نزدیک، گردابه‌های ماریپیچی جدا شده از پره می‌باشند که توسط چرخش پره‌های توربین ایجاد می‌شود. مشخص شده است که این گردابه‌ها می‌توانند منبع مهم تولید نویز و لرزش پره‌ها در توربین باد باشند. کانتورهای شدت آشفتگی در راستای جریان برای دو سرعت دورانی $\lambda_1=3$ و $\lambda_2=6$ در شکل ۱۵ نشان داده شده است.

شدت آشفتگی در راستای جریان (I_z) درست پشت پره‌های توربین باد بیشینه است. با این حال اثرات شدت آشفتگی در این ناحیه به سرعت اضمحلال می‌روند ولی اثرات شدت آشفتگی در محل قرارگیری برج نگهدارنده با حرکت به سمت پایین دست جریان تقویت می‌شود. افزایش سرعت دورانی، شدت آشفتگی را در نزدیکی نوک پره توربین باد تشدید می‌کند که می‌تواند به خاطر گردابه‌های جدا شده از پره باشد. شدت‌های آشفتگی جانبی مقدار کمتری نسبت به شدت آشفتگی در راستای جریان دارند و به سرعت اضمحلال می‌روند. افزایش سرعت دورانی باعث می‌شود اثرات شدت‌های آشفتگی جانبی تنها در ناحیه دنباله نزدیک مشاهده شود که با نتایج پخته اگل و همکاران و ژانگ و همکاران [۱۳و۴] تطابق دارد.



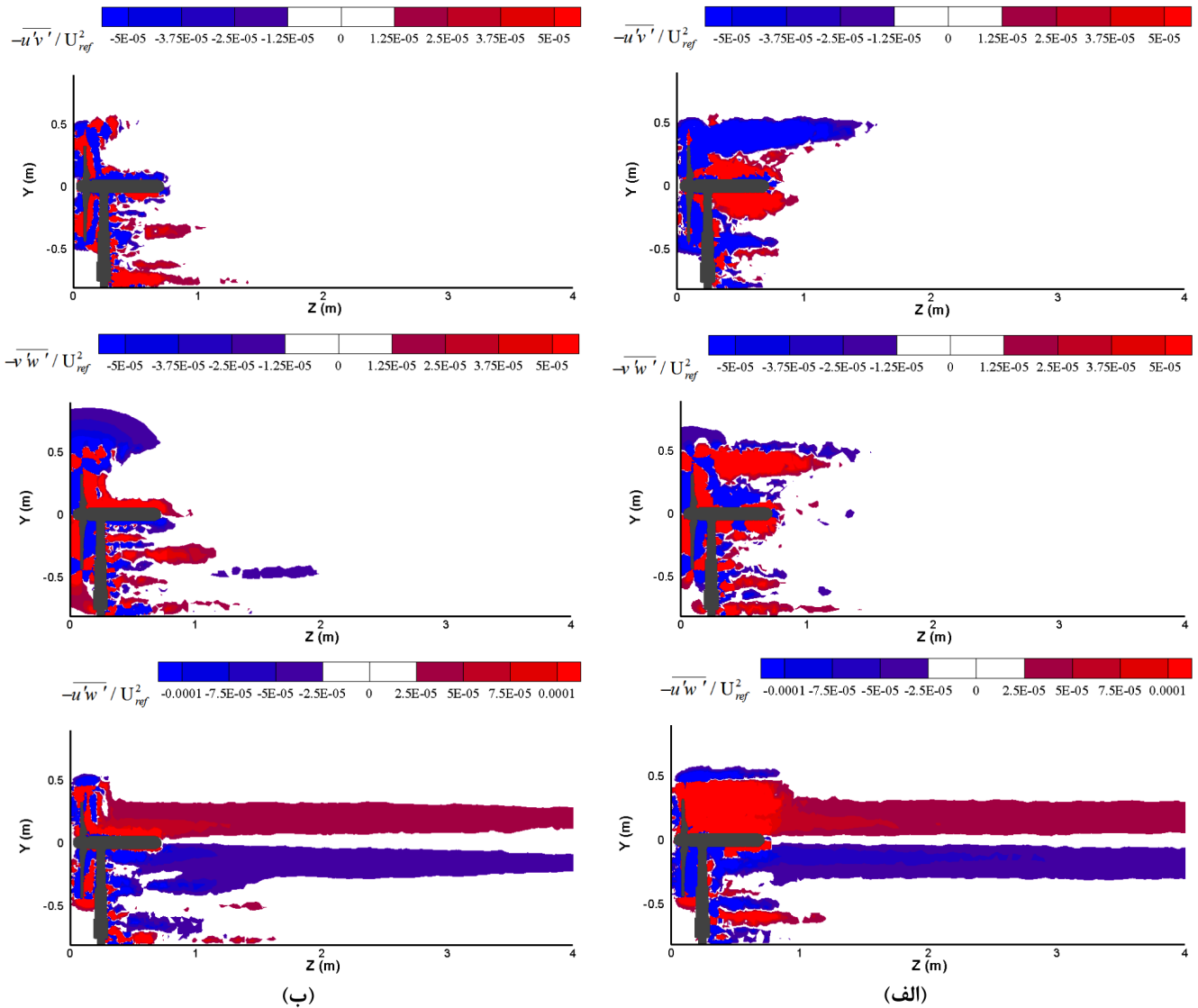
شکل ۱۴: کانتورهای متوسط‌گیری شده زمانی شدت آشفتگی در مرکز تونل باد و در صفحه Z-Y؛ I_x (ردیف اول)، I_y (ردیف دوم) و I_z (ردیف سوم) برای دو سرعت دورانی متفاوت (الف) $\lambda_1=3$ (ب) $\lambda_2=6$

Fig. 14. Time average turbulence intensity contours at the center of wind tunnel and Z-Y plane, I_x (first row), I_y (second row) and I_z (third row) for two different rotational speeds (a) $\lambda_1 = 3$, (b) $\lambda_2 = 6$

۴- نتیجه گیری

در کار حاضر جریان حول یک توربین باد محور افقی در سرعت‌های دورانی مختلف به روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ مطالعه شده است. هدف اصلی این مطالعه بررسی خصوصیات جریان‌های آشفته در ناحیه دنباله بود. بدین منظور مشخصه‌های جریان آشفته شامل گردابه‌های جدا شده از پره‌های توربین باد، میدان سرعت، شدت آشفتگی و تنش‌های برشی رینولدز در ناحیه دنباله بررسی شدند. کار حاضر با نتایج تجربی گذشته تطابق خوبی دارد. در مطالعه حاضر از روش λ_{ci} به منظور استخراج گردابه‌های جدا شده از پره استفاده شده است. گردابه‌های جدا شده از نوک پره با گام ۱۵ درجه‌ای تا ۶۰ درجه چرخش پره‌های توربین باد دنبال می‌شوند. در سرعت دورانی $\lambda_1=3$

یک مسیر منفصل از گردابه‌ها مشاهده می‌شود که به سرعت اضمحلال می‌روند. با بالا رفتن سرعت دورانی گردابه‌ها به یکدیگر نزدیک‌تر می‌شوند و یک مسیر پیوسته را تشکیل می‌دهند. بنابراین دنبال کردن آن‌ها مشکل می‌شود. همچنین گردابه‌های جدا شده از پره حین حرکت به سمت پایین دست جریان تمایل به پخش شدت در جهت عمودی دارند که با افزایش سرعت عمودی پخش گردابه‌ها بیشتر می‌شود. گردابه جدا شده از نوک پره و ته پره علامتی خلاف یکدیگر دارند. با افزایش سرعت دورانی اثرات گردابه‌ها در ناحیه دنباله دور نیز دیده می‌شود. این گردابه‌ها شدت کمتری داشته ولی لکه‌های بزرگتری را تشکیل می‌دهند. نویسندگان معتقدند اثرات گردابه‌ها در ناحیه دنباله دور تنها بخاطر افزایش شدت چرخش نیست بلکه بخاطر برخورد



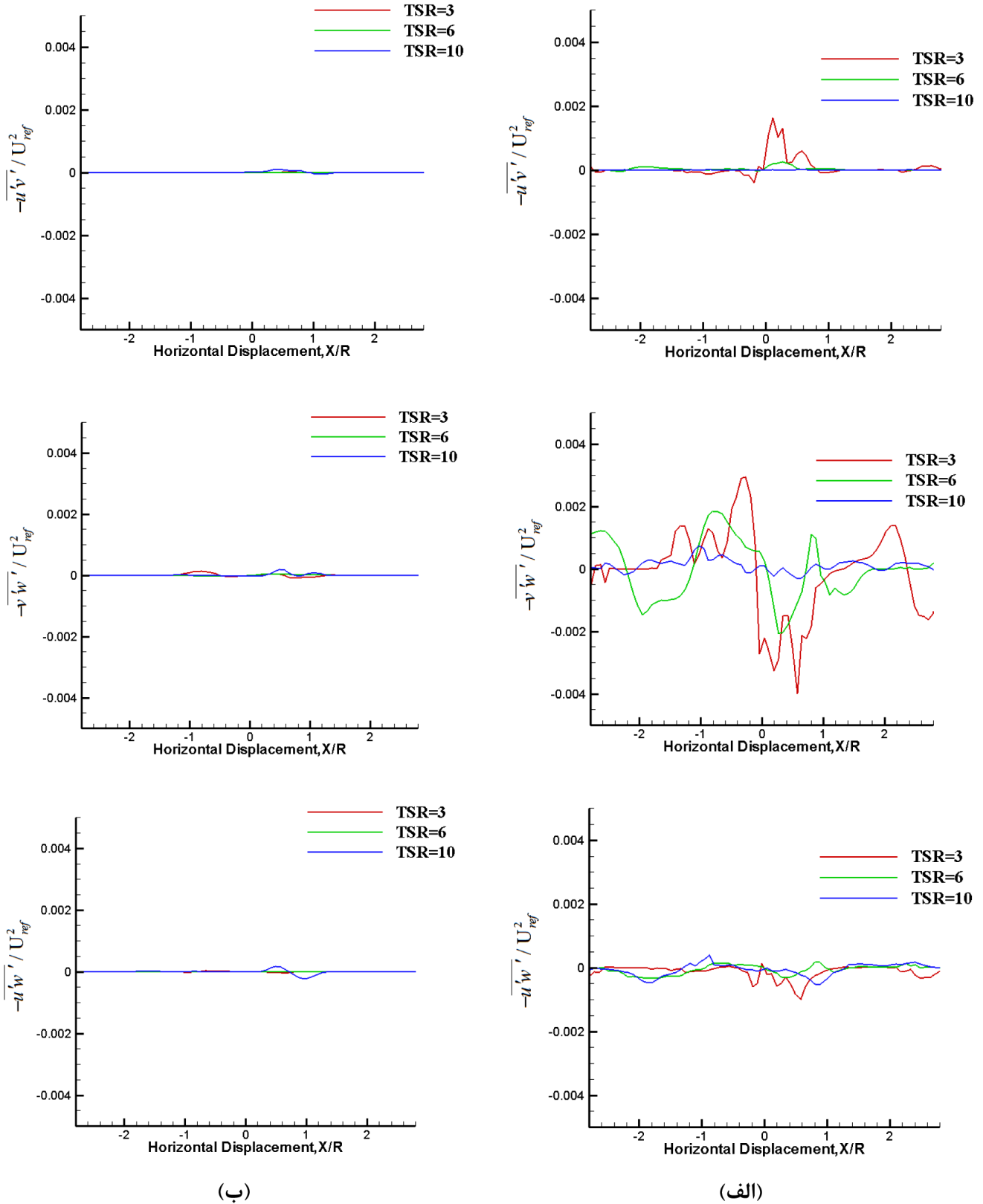
شکل ۱۵: کانتورهای متوسط‌گیری شده زمانی تنش‌های برشی رینولدز در مرکز تونل باد و در صفحه Z-Y؛ $-u'v' / U_{ref}^2$ (ردیف اول)،

$$\lambda_2=6 \text{ (ب)} \lambda_1=3 \text{ (الف)} \text{ برای دو سرعت دورانی متفاوت (ردیف سوم) و } -v'w' / U_{ref}^2 \text{ (ردیف دوم) و } -u'w' / U_{ref}^2 \text{ (ردیف اول)}$$

Fig. 15. Time average Reynolds shear stresses contours at the center of wind tunnel and Z-Y plane, $-u'v' / U_{ref}^2$ (first row), $-v'w' / U_{ref}^2$ (second row) and $-u'w' / U_{ref}^2$ (third row) for two different rotational speeds (a) $\lambda_1 = 3$, (b) $\lambda_2 = 6$

راستای جریان برای دو سرعت دورانی $\lambda_1=3$ و $\lambda_2=6$ دو الگوی متفاوت را نشان می‌دهد. افت سرعت در سرعت دورانی $\lambda_1=3$ در محل ته پره بیشینه است در حالی که در سرعت $\lambda_2=6$ در محل قرارگیری نوک پره بیشینه است. این موضوع نشان می‌دهد با افزایش سرعت دورانی برداشت انرژی در قسمت نوک پره افزایش می‌یابد. البته این افت سرعت به خاطر تشدید گردابه‌های جدا شده از پره نیز می‌تواند باشد. توزیع مکانی شدت آشفتگی و تنش‌های برشی رینولدز، تغییرات شدیدی را در ناحیه دنباله نشان می‌دهند. افزایش شدت آشفتگی و تنش برشی رینولدز در ناحیه دنباله نزدیک بخصوص

گردابه‌ها به یکدیگر و تشکیل گردابه‌های جدید نیز است. بررسی میدان سرعت نشان می‌دهند در پشت توربین باد به دلیل برداشت انرژی سینتیکی جریان توسط توربین سرعت در راستای جریان کاهش می‌یابد و سرعت‌های جانبی افزایش می‌یابند. با حرکت به سمت پایین دست جریان دنباله بازبایی می‌شود. به عبارت دیگر سرعت در راستای جریان افزایش و سرعت‌های جانبی کاهش می‌یابند. الگوی مشابه توزیع سرعت عرضی در نیمه بالایی و پایینی تونل باد نشان می‌دهد اثرات ستون و کف تونل باد بر سرعت عرضی کم است. این موضوع برای سرعت عمودی صادق نیست. توزیع سرعت در



شکل ۱۶: نمودار متوسط گیری شده زمانی تنش های برشی رینولدز در مرکز تونل باد و در خط افقی گذرنده از مرکز تونل باد. $-\overline{u'v'}/U_{ref}^2$ (ردیف اول)، $-\overline{v'w'}/U_{ref}^2$ (ردیف دوم) و $-\overline{u'w'}/U_{ref}^2$ (ردیف سوم) برای دو سرعت دورانی متفاوت (الف) $\lambda_1=3$ (ب) $\lambda_2=6$

Fig. 16. The graph of time average Reynolds shear stresses at the center of wind tunnel along the horizontal line passing through the center of wind tunnel. $-\overline{u'v'}/U_{ref}^2$ (first row), $-\overline{v'w'}/U_{ref}^2$ (second row) and $-\overline{u'w'}/U_{ref}^2$ (third row) for two different rotational speeds (a) $\lambda_1 = 3$, (b) $\lambda_2 = 6$

در نیمه بالایی تونل باد در مجاورت نوک پره، به خاطر نیروی برش شدید جریان باد و تولید مکانیکی انرژی سینتیکی باد است. بررسی خصوصیات دنباله، گردابه‌های جدا شده از پره، توزیع مکانی مشخصه‌های جریان آشفته جز موضوعات مورد علاقه محققان حوزه انرژی باد است.

فهرست علائم

علائم انگلیسی

A	مساحت (m^2)	τ_{ij}^r	تانسور تنش پسماند ایزوتروپیک (m^2s^{-2})
C_p	ضریب توان	τ_{ij}^R	تانسور تنش پسماند غیر ایزوتروپیک (m^2s^{-2})
C_s	ثابت اسماگورینسکی	ω	سرعت دورانی (s^{-1})
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_{cr}^{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 آشفته‌گی		
U_{ref}	سرعت مرجع ($m.s^{-1}$)		
U	میدان سرعت لحظه‌ای ($m.s^{-1}$)		
\bar{U}	میدان سرعت فیلتر شده مکانی ($m.s^{-1}$)		
$\bar{U}_i\bar{U}_j$	ضرب سرعت‌های فیلتر شده (m^2s^{-2})		
$\overline{U_iU_j}$	ضرب فیلتر شده سرعت (m^2s^{-2})		
λ	نسبت سرعت نوک پره		

علائم یونانی

δ_{ij} تابع کرانکر دلتا

Δ عرض فیلتر (m)

λ_{ci} قدرت چرخش

v_r ویسکوزیته گردابه‌ای (m^2s^{-1})

l_s مقیاس طولی اسماگورینسکی (m)

ρ چگالی ($kg.m^{-3}$)

τ_{ij}^r تانسور تنش پسماند ایزوتروپیک (m^2s^{-2})

τ_{ij}^R تانسور تنش پسماند غیر ایزوتروپیک (m^2s^{-2})

ω سرعت دورانی (s^{-1})

مراجع

- [1] Chen, D., Zhang, W., Exploitation and research on wind energy, Energy Conservation Technology, 4(1) (2007) 339–343.
- [2] Li, Y., Paik, KJ., Xing, T., Carrica, PM., Dynamic overset CFD simulations of wind turbine aerodynamics, Renewable Energy, 37(1) (2012) 285–298.
- [3] Grant, I., Parkin, P., Wang, X., Optical vortex tracking studies of a horizontal axis wind turbine in yaw using laser-sheet, flow visualization, Experiments in Fluids, 23(6) (1997) 513–519.
- [4] Zhang, W., Markfort, CD., Porté-Agel, F., Nearwake flow structure downwind of a wind turbine in a turbulent boundary layer, Experiments in Fluids, 52(5) (2012) 1219–1235.
- [5] Vermeer, LJ., Sorensen, JN., Crespo, A., Wind turbine wake aerodynamics, Progress in Aerospace Sciences, 39(6) (2003) 467–510.
- [6] Mo, JO., Choudhry, A., Arjomandi, M., Kelso, R., Lee, YH., Effects of wind speed changes on wake instability of a wind turbine in a virtual wind tunnel using large eddy simulation, J Wind Eng Ind Aerodyn, 117(1) (2013) 38–56.
- [7] Mo, JO., Choudhry, A., Arjomandi, M., Lee, YH., Large eddy simulation of the wind turbine wake characteristics in the numerical wind tunnel model, J Wind Eng Ind Aerodyn. 112(1) (2013) 11–24.
- [8] Aubrun, S., Loyer, S., Hancock, PE., Hayden, P., Wind turbine wake properties: Comparison between a non-rotating simplified wind turbine model and a rotating model, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 120(1) (2013) 1–8.

- [24] Alfredsson, PH., Dahlberg, JA., Vermeulen, PEJ., A comparison between predicted and measured data from wind turbine wakes, *Wind Engineering*, 6(3) (1982) 149–155.
- [25] Medici, D., Alfredsson, PH., Measurements on a wind turbine wake: 3D Effects and bluff body vortex shedding, *Wing Energy*, 9(3) (2006) 219–236.
- [26] Kim, J., Evolution of a vortical structure associated with the bursting event in a channel flow, *Turbulent Shear Flow 5*, Springer-Verlag, Berlin, (1985) 221–233.
- [27] Jeong, J., Hussai, F., On the identification of a vortex, *J. of Fluid Mechanics*, 285(1) (2006) 69-94.
- [28] Perry, A.E., Chong, M.E., Cantwell, B.J., A general classification of three-dimensional flow fields, *J. Physics of Fluids*, 2(1) (1990) 765-777.
- [29] Hunt, JCR., Wray, AA., Moin, P., Eddies, streams, and convergence zones in turbulent flows, *Cent. Turbul. Res. Proc.*, (1988).
- [30] Zhou, J., Adrian, RJ., Balachandar, S., Kendall, TM., Mechanism for generating coherent packets of hairpin vortices in channel flow, *Journal of Fluid Mechanics*, 387(1) (1999) 353-396.
- [31] Maciel, Y., Shafiei Mayam, MH., Hairpin structures in a turbulent boundary layer under stalled-airfoil-type flow conditions, *Progress in Turbulence III, Proceedings of the iTi Conference in Turbulence*, Bertinoro, Italy, (2008).
- [32] Shafiei Mayam, M.H., Maciel, Y., Hairpin structures in a turbulent boundary layer with strong adverse pressure gradient, *International Symposium on turbulence and shear flow phenomena (TSFP)*, Munich, Germany, (2007).
- [33] Shafiei Mayam M.H., Maciel Y., Coherent structures in a turbulent boundary layer in stalled-air foil type flow conditions, *AERO Conference and 54th Annual General Meeting*, Toronto, Canada, (2007).
- [34] Shafiei Mayam, MH., Yvan Maciel, Statistical properties of hairpin vortices in a turbulent boundary layer under stalled-airfoil-type flow conditions, *The 18th Annual ISME Conference*, Sharif University of Technology, Iran, (2010).
- [35] VEISI, AA., Shafiei Mayam, MH., Large Eddy Simulation of flow around a single and two in-line horizontal-axis wind turbines, *Energy*, 121(1) (2017) 533-544.
- [36] Veisi, AA., Shafiei Mayam, MH., Effects of blade rotation direction in the wake region of two in-line turbines using Large Eddy Simulation, *Appl Energy*, 197(1) (2017) 375-392.
- [37] Sherry, M., Sheridan, J., Lo, Jacono, D., Characterization
- [9] Sarlak, H., Meneveau, C., Sørensen, JN., Role of subgrid-scale modeling in large eddy simulation of wind turbine wake interactions, *Renew Energy*, 77(1) (2015) 386–399.
- [10] Hu, H., Yang, Z., Sarkar, P., Dynamic wind loads and wake characteristics of a wind turbine model in an atmospheric boundary layer wind, *Experiments in Fluids*, 52(5), (2012) 1277–1294.
- [11] Maeda, T., Kamada, Y., Murata, J., Yonekura, S., Ito, T., Oawa, A., Kogaki, T., Wind tunnel study on wind and turbulence intensity profiles in wind turbine wake, *Journal of Thermal Science*, 20(2) (2011) 127–132.
- [12] Zhong, H., Du, P., Tang, F., Wang, L., Lagrangian dynamic large-eddy simulation of wind turbine near wakes combined with an actuator line method, *Appl Energy*, 144(1) (2015) 224–233.
- [13] Porté-Agel, F., Wu, YT., Lu, H., Conzemius, RJ., Large-eddy simulation of atmospheric boundary layer flow through wind turbines and wind farms, *J Wind Eng Ind Aerodyn*, 99(1) (2011) 154–168.
- [14] Jimenez, A., Crespo, A., Migoya, E., Garcia, J., Advances in large-eddy simulation of a wind turbine wake, *J Phys Conf Ser.*, (2007).
- [15] Giahi, MH., Jafarian Dehkordi, A., Investigating the influence of dimensional scaling on aerodynamic characteristics of wind turbine using CFD simulation, *Renew Energy*, 97(1) (2016) 162–168.
- [16] Meyers, J., Meneveau, C., Optimal turbine spacing in fully developed wind-farm boundary layers, *Wind energy*, 15(1) (2012) 305-317.
- [17] Chu, CR., Chiang, PH., Turbulence effects on the wake flow and power production of a horizontal-axis wind turbine, *J Wind Eng Ind Aerodyn*, 124(1) (2013) 82– 89.
- [18] Park, J., Law, KH., Layout optimization for maximizing wind farm power production using sequential convex programming, *Appl Energy*, 151(1) (2015) 320–334.
- [19] Krogstad, PÅ., Eriksen, PE., Blind test calculations of the performance and wake development for a model wind turbine, *Renewable Energy*, 50(1) (2013) 325–333.
- [20] Pope, SB., *Turbulent Flows*, Cambridge University Press, (2000) 351-558.
- [21] Smagorinsky, J., General Circulation Experiments With the Primitive Equations, *Mon. Weather Rev.*, 91(3) (1963) 99–164.
- [22] Tangler, JL., Somers, DM., NREL airfoil families for HAWTs, *Proceedings of the American Wind Energy Association Wind power Conference*, (1995).
- [23] Somers, D., Design and experimental results for the S825 Airfoil, , National Renewable Energy Laboratory, Technical Report NREL/SR-500-36344, (1999).

- motion in the wake of a model wind turbine, *Renewable Energy*, doi: 10.1016/j. renene.2017.02.031, (2017).
- [40] Sarmast, S., Numerical study on instability and interaction of wind turbine wakes, in *Mechanics, Stability, Transition and Control*, PhD Thesis, KTH: Stockholm, Sweden, (2013).
- of a Horizontal Axis Wind Turbine's Tip and Root Vortices, *Exp. in Fluids*, 54(3) (2013) 1417.
- [38] Hu, H., Tian, W., Ozbay, A., Experimental Investigation on the Wake Characteristics and Aeromechanics of Dual-Rotor Wind Turbines, *J Eng Gas Turbines Power*, 138(1) (2016) 1–17.
- [39] Eriksen, PE., Krogstad, PE., Development of coherent

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

A. Veisi, M. H. Shafiei Mayam, Turbulent Structures in the Wake of a Wind Turbine Using Large Eddy Simulation,

Amirkabir J. Mech. Eng., 51(2) (2019) 261-279.

DOI: 10.22060/mej.2017.12740.5420

