

شبیه‌سازی جریان اطراف توربین باد محور افقی با سرعت‌های دورانی متفاوت به روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ

امین الله ویسی

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

محمدحسین شفیعی میم*

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بزرگمهر قائنات، قاین، ایران

چکیده

در کار حاضر تمرکز بر جریان اطراف یک توربین باد محور افقی است. از شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ به منظور مطالعه سرعت‌های دورانی مختلف استفاده شده است. تانسور تنش پسماند غیر ایزوتروپیک با استفاده از مدل زیر شبکه اسماگورینسکی به دست می‌آید. مطالعه حاضر با نسبت سرعت نوک پره ۳، ۶ و ۱۰ بررسی شده است. نتایج کار حاضر با نتایج تجربی گزارش شده در کارهای گذشته تطابق خوبی دارد. گسترش دنباله در امتداد خط افقی گذرنده از مرکز تونل باد در فواصل مختلف برای تمامی سرعت‌های دورانی نشان می‌دهد که با افزایش فاصله پایین‌دست، سرعت در راستای جریان افزایش می‌یابد. همچنین افزایش سرعت دورانی باعث افزایش سرعت پس از توربین باد می‌گردد، ولی در این حالت دنباله سریع‌تر بازیابی می‌شود. در مقطع عرضی تونل باد در محل قرارگیری نوک پره‌ها پس از توربین باد در سرعت دورانی ۶ حداقل سرعت ۵۴ درصد سرعت اولیه و حداکثر بازدهی آن در فاصله مورد بررسی ۶۷ درصد سرعت اولیه می‌باشد. در حالی که برای سرعت دورانی ۱۰ حداقل سرعت ۲۶ درصد و حداکثر آن ۶۸ درصد سرعت اولیه است. با افزایش سرعت دورانی میزان شدت آشفتنگی افزایش و اثرات گردابه‌های جدا شده از پره دیرتر از بین می‌رود. در سرعت دورانی ۳ اثرات گردابه‌های جدا شده از پره دیده نمی‌شود، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت اثرات گردابه‌های جدا شده از پره با افزایش سرعت دورانی افزایش می‌یابند.

واژه‌های کلیدی: توربین باد، شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، جریان آشفته، مدل زیر شبکه اسماگورینسکی.

Large Eddy Simulation of flow around a Horizontal-axis wind Turbine at Different Rotational Speed

A. A. Veisi

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

M. H. Shafiei Mayam

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

Abstract

The present study focuses on the flow around a horizontal axis wind turbine. Large Eddy Simulation has been employed in order to study the flow at different rotational speeds. Anisotropic residual stress tensor is driven by The Smagorinsky model. Three simulations were performed at different tip speed ratio of 3, 6 and 10. The acquired results are in good agreement with presented experimental data in literatures. It is also revealed that development of the wake is decreased when downstream velocity is increased along the horizontal line at different downstream distance of wind turbine. In addition, velocity defect behind the wind turbine is increased when tip speed ratio increases but the recovery of wake is happened faster. At rotational speed equals 6, minimum velocity is 54% of the initial velocity and maximum efficiency is 67% at the lateral section of wind tunnel where the tip of blade is located, while they are 26% and 68% respectively when rotational speed is 10. Turbulence intensity is increased by increasing Tip Speed Ratio while separated vortices from the blade are disappeared later. The effect of separated vortices from the blades of wind turbine are not seen when rotational speed is 3, while they are revealed at rotational speed of 6 and 10. As a result, it can be concluded that the effect of separated vortices are augmented when rotational speed is increased.

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

در پایین‌دست خواهد شد. فهم پدیده گسترش دنباله^۱ در پشت پره‌های توربین باد برای حداقل کردن اثرات بر هم کنش و بهینه کردن عملکرد توربین باد در یک مزرعه بادی اهمیت بسزایی دارد. ساختارهای آشفتنگی و به‌ویژه توزیع شدت آشفتنگی^۲ در دنباله، بر تحمل خستگی در توربین‌های پایین‌دست اثر می‌گذارد [۲]. این موضوع مورد توجه محققین زیادی در طول دو دهه گذشته قرار گرفته است. در واقع درک بهتر و پیش بینی از نحوه عملکرد و جریان روی توربین‌های بادی می‌تواند چیدمان بهتر توربین‌های پایین‌دست را در پی داشته باشد، تا افت قدرت

۱- مقدمه

ظرفیت انرژی باد قابل استفاده در سرتاسر دنیا خیلی بیشتر از انرژی مصرفی جهان است [۱]. از این رو به علت افزایش تقاضای انرژی در سال‌های اخیر، توسعه سریع توربین‌های باد و مزارع بادی در سرتاسر دنیا مورد توجه قرار گرفته است. جریان باد گذرنده از یک توربین باد (پایین‌دست)، سرعت کمتر و آشفتنگی بیشتری نسبت به جریان قبل از توربین باد (بالادست) دارد که باعث افت قدرت در توربین‌های نصب شده

^۱ Wake

^۲ Turbulence Intensity

آن‌ها به حداقل ممکن برسد. به عبارت دیگر دانش توسعه دنباله در پشت پره‌های توربین‌های بادی برای کمینه کردن اثرات بر هم کنش و بهینه کردن عملکرد توربین بادی یک معیار مهم طراحی مزارع بادی است. مطالعات عددی و آزمایشگاهی فراوانی به منظور بررسی دنباله آشفته در پایین‌دست یک توربین بادی محور افقی انجام شده است [۳]، با این حال چالش عمده پیش‌رو شبیه‌سازی کامل هندسه توربین بادی یعنی پره، برج آن و همچنین جریان آشفته می‌باشد که بدین منظور در کار حاضر از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ^۱ استفاده شده است.

ناحیه دنباله به دو قسمت دنباله نزدیک توربین^۲ و دنباله دور از توربین^۳ تقسیم شده است. ناحیه دنباله نزدیک توربین حد فاصل بین ۱ تا ۳ برابر قطر روتور توربین بادی و ناحیه پایین‌دست این قسمت، ناحیه دنباله دور از توربین بادی تعریف می‌شود [۴].

اوهمو و همکاران [۵] به بررسی تغییرات سرعت باد بر ناپایداری و گسترش دنباله‌ها استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگو مدلش لغزان پرداختند. آن‌ها مشاهده کردند که در ناحیه دنباله نزدیک توربین بادی گردابه‌های مارپیچی پایداری، توسط پره‌های توربین ایجاد می‌شود که این ساختارهای آشفته در ناحیه دنباله ناپایدار می‌شوند و در ناحیه دنباله دور از توربین به گردابه‌های کوچک‌تری تفکیک می‌شوند. پخته اگل و همکاران [۶] با استفاده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ به مطالعه لایه مرزی اتمسفری گذرنده از توربین بادی و مزارع بادی پرداختند و بر همکنش دنباله حاصل از توربین‌های بالادست با توربین‌های پایین‌دست را بررسی کردند. نتایج کار آن‌ها می‌تواند برای افزایش بازدهی توربین‌های بادی و افزایش عمر توربین‌های بادی مورد استفاده قرار گیرد. استیون و همکاران [۷] با بررسی اثرات هم‌راستایی و طول مزرعه بادی نشان دادند که برای دست‌یابی به حداکثر قدرت تولیدی لزوماً نیاز به استفاده از پیکربندی شطرنجی توربین‌های بادی در مزارع بادی نمی‌باشد. لی و همکاران [۸] جریان حول یک توربین بادی محور افقی با سرعت‌های متفاوت جریان باد ورودی با دو رویکرد RANS و DES را مورد مطالعه قرار دادند. مطالعات آن‌ها نشان داد که در سرعت‌های پایین جریان باد، هر دو مدل RANS و DES نتایج مشابه‌ای را ارائه می‌دهند اما در سرعت‌های بالای جریان باد DES برتری خود در نمایش گردابه‌های جدا شده از پره‌های توربین باد را نشان می‌دهد. ابرون و همکاران [۹] 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 آشفته مختلف مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها نشان دادند مدل ساده شده غیر چرخان متخلخل دنباله را در پایین‌دست توربین باد به درستی پیش بینی می‌کند. یانگ و همکاران [۱۰] در مطالعه آزمایشگاهی نشان دادند که حرکت مارپیچی گردابه‌های جدا شده از پره‌ها جهت معکوس نسبت به چرخش پره‌های توربین باد دارند. یانگ و همکاران [۱۱] با استفاده از روش آزمایشگاهی PIV نشان دادند ناحیه دنباله نزدیک توربین بادی با خصوصیات گردابه‌های مارپیچی جدا شده از پره‌های توربین، غیر یکنواختی و ناهمگنی شدید مشخصه‌های جریان آشفته شناخته می‌شود. مائدا و همکاران [۱۲] با

مطالعه شدت آشفته‌گی جریان باد ورودی به تونل باد نشان دادند که در شدت آشفته‌گی بالا، ناحیه دنباله سریع‌تر بازیابی می‌شود.

تاکنون اکثر مطالعات صورت گرفته با استفاده از مدل‌سازی عددی جریان سیال^۴ بر روی میدان سرعت متوسط انجام شده است. در این کارها فقط اطلاعات متوسط میدان جریان به دست آمده و نمی‌توان در مورد دینامیک جریان و اطلاعات لحظه‌ای میدان سرعت اظهار نظر کرد. در کار حاضر سعی شده تا به مطالعه کامل میدان جریان اطراف یک توربین باد تحت سرعت‌های دورانی مختلف پرداخته شود. از همین‌رو علاوه بر میدان‌های سرعت و ضریب فشار، گردابه‌ها و ساختارهای آشفته‌گی و تاثیر آنها بر عملکرد توربین نیز مورد مطالعه و بررسی قرار خواهد گرفت. به عبارت دیگر با تغییر سرعت دورانی و بررسی اثرات سرعت‌های دورانی بر میدان جریان، تاثیر میدان جریان بر عملکرد توربین مطالعه خواهد شد. نتایج کار حاضر می‌تواند در اصلاح و چیدمان 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 انرژی های نو، کار حاضر یک مطالعه کاربردی و مفید خواهد بود.

۲- شبیه‌سازی عددی

۲-۱- معادلات حاکم

در روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، حرکت‌های سه بعدی ناپایدار بزرگ‌تر به طور مستقیم حل می‌شوند و اثرات حرکت‌های مقیاس کوچک مدل می‌شوند. در روش عددی مستقیم تمامی ساختارهای آشفته‌گی تا مقیاس کولوموگروف، حل می‌شوند. از نظر هزینه محاسباتی، شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ بین مدل تنش‌های رینولدز^۵ و روش شبیه‌سازی عددی مستقیم قرار می‌گیرد و دلیل به‌وجود 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 [۱۳].

محدوده محاسباتی در مطالعه حاضر به طور کلی از دو بخش محرک و ثابت تشکیل شده است. در بخش ثابت معادلات پیوستگی و مومنوم فیلترگیری شده برای جریان تراکم ناپذیر به صورت زیر 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 (۲) $\bar{P}(x, t)$ میدان فشار فیلتر شده است. تجزیه میدان سرعت در روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ و متوسط‌گیری زمانی میدان سرعت به ترتیب در معادلات (۳) و (۴) 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 پسماند و u میدان سرعت نوسانی می‌باشد.

¹ Large Eddy Simulation (LES)

² Near wake

³ Far wake

⁴ Reynolds-Averaged-Navier-Stokes (RANS)

⁵ Reynolds Stress Models

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 مسئله محصور در روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ پیشنهاد شده است. ژرمانو و همکاران [۱۵] 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 [۱۶] و مننوو و همکاران [۱۷] صورت گرفت. مدل‌های دیگری نیز توسط بردینا و همکاران [۱۸] و کلارک و همکاران [۱۹] پیشنهاد شد، این مدل‌ها ترکیبی از مدل اسماغورینسکی با مدل‌های دیگر است که اصطلاحاً به آن‌ها مدل‌های ترکیبی^۳ گفته می‌شود. ثابت اسماغورینسکی یک ثابت تجربی است که با توجه به شرایط مسئله و موارد تجربه شده‌ی قبلی انتخاب می‌شود. در این مطالعه مقدار ثابت اسماغورینسکی برابر $C_S = 0.1$ انتخاب شده است که مطابقت خوبی با نتایج تجربی داشته است. عرض فیلتر برابر اندازه شبکه در نظر گرفته شده است و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

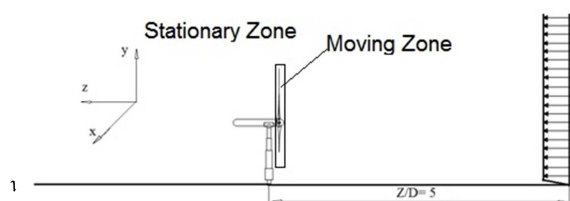
$$\Delta = (\Delta_x \Delta_y \Delta_z)^{1/3} \quad (17)$$

۳-۲- مشخصات توربین باد محور افقی

این مطالعه بر اساس نتایج آزمایشگاهی بلایند تست^۱ می‌باشد که توسط نورکو و نویچ [۲۰] در سال ۲۰۱۱ میلادی در نروژ طراحی شده است. ایرفویل 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 [۲۱]. توصیف کاملی از ایرفویل همراه با ضرایب برا و پسا برای جریان‌هایی با اعداد رینولدز بالا توسط سامر [۲۲] ارائه شده است.

۴-۲- شرایط مرزی و شبکه محاسباتی

تونل باد شبیه‌سازی شده در این مطالعه به ترتیب طول، عرض و ارتفاع 11.14 m ، 2.7 m و 1.8 m دارد. توربین باد در مرکز تونل باد نصب شده است. فاصله توربین از ورودی تونل باد برابر $5D$ است. در اینجا قطر روتور توربین است. ارتفاع مرکز توبی از سطح زمین 10.817 mm است (شکل ۱). همان‌طور که در ابتدا اشاره شد یکی از چالش‌های عمده در شبیه‌سازی توربین‌های بادی شبیه‌سازی کامل هندسه توربین باد که شامل پره، برج و همچنین میدان جریان می‌باشد. 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.



شکل ۱- محل قرار گیری توربین در مطالعه حاضر

از آنجاکه ضرب فیلتر شده $\overline{U_i U_j}$ با ضرب سرعت‌های فیلتر شده $\overline{U_i} \overline{U_j}$ تفاوت دارد، رابطه (۲) با معادلات ناویر استوکس تفاوت دارد. اختلاف بین این دو، تانسور تنش پسماند است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\tau_{ij}^R = \overline{U_i U_j} - \overline{U_i} \overline{U_j} \quad (5)$$

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 (۳) در رابطه (۲) و تعریف تانسور تنش پسماند غیر ایزوتروپیک و فشار فیلتر شده اصلاح شده به صورت زیر

$$\tau_{ij}^r = \tau_{ij}^R - \frac{2}{3} k_r \delta_{ij} \quad (7)$$

$$\bar{P} = \bar{P} + \frac{2}{3} \rho k_r \quad (8)$$

در نهایت معادله مومنوم به صورت زیر در می‌آید:

$$\frac{\partial \overline{U_j}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{U_i U_j}}{\partial x_i} = \nu \frac{\partial^2 \overline{U_j}}{\partial x_i \partial x_i} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}^r}{\partial x_i} \quad (9)$$

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 $\hat{z}$ است پس

$$\vec{\omega} = \omega \hat{z} \quad (10)$$

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

$$\vec{v}_r = \vec{v} - \vec{\omega} \times \vec{r} \quad (11)$$

در رابطه (۱۱)، $\vec{v}_r$ سرعت نسبی (سرعت در محیط محرک) است، $\vec{v}$ سرعت مطلق (سرعت در محیط ساکن) و $\vec{\omega}$ سرعت زاویه‌ای است. معادلات پیوستگی و مومنوم در سیستم مختصات محرک به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$\nabla \cdot \vec{v}_r = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v}_r \vec{v}) \vec{\omega} \times \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \vec{v} \quad (13)$$

۲-۲- مدل زیر شبکه

در روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ نیز مشابه روش معادلات رینولدز مسئله محصور^۱ وجود دارد. برای حل این مشکل تانسور تنش‌های رینولدز با استفاده از مدل‌های لزجت آشفتگی یا از طریق معادلات تنش رینولدز به دست می‌آید. مسئله محصور در روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ با مدل کردن تانسور تنش پسماند ایزوتروپیک حل می‌شود. ساده‌ترین مدل توسط اسماغورینسکی [۱۴] پیشنهاد شده است. در این مدل ابتدا با استفاده از مدل لزجت گردابه ای خطی

$$\tau_{ij}^r = -2\nu_r \bar{S}_{ij} \quad (14)$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \overline{U_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{U_j}}{\partial x_i} \right) \quad (15)$$

تانسور تنش پسماند به نرخ فیلتر شده کرنش مرتبط می‌شود. ضریب تناسب $\nu_r(x, t)$ را رابطه بالا لزجت گردابه‌ای حرکت‌های پسماند است و $\bar{S}_{ij}$ تانسور نرخ کرنش فیلتر شده است. لزجت گردابه‌ای با قیاس از فرضیه طول اختلاطی^۲ به صورت زیر مدل می‌شود:

$$= (C_S \Delta)^2 \bar{S} \quad (16)$$

¹ Closure problem

² Mixing-length hypothesis

³ Mixed models

۲-۵- روش حل

در این پژوهش برای گسسته‌سازی معادلات از روش حجم محدود استفاده شده است. ترم فشار از طریق الگوریتم SIMPLE به‌دست می‌آید، در روش SIMPLE ابتدا فشار پیش‌بینی و در مرحله بعدی اصلاح می‌شود. گسسته‌سازی مکانی معادله مومنوم بر مبنای تفاضل مرکزی کراندار 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 شبکه‌های محاسباتی مختلف بررسی شده است (جدول ۱). مقایسه بین نتایج نشان می‌دهد تغییر چندانی در ضریب C_p برای شبکه محاسباتی ریزتر از ۲/۷ میلیون وجود ندارد. از این‌رو شبکه محاسباتی ۲/۷ میلیون برای مطالعه حاضر انتخاب شده است. حدود ۰/۴ میلیون از شبکه محاسباتی مربوط به ناحیه متحرک و مابقی مربوط به ناحیه ثابت است. در یک رایانه هشت هسته‌ای با یک cpu با قدرت پردازش ۲/۱GHz زمان محاسباتی برای هر شبیه‌سازی حدوداً ۱۶۰ ساعت است. گام زمانی به صورتی انتخاب شده است که تقریباً معادل ۷/۵ درجه چرخش پره‌های توربین است.

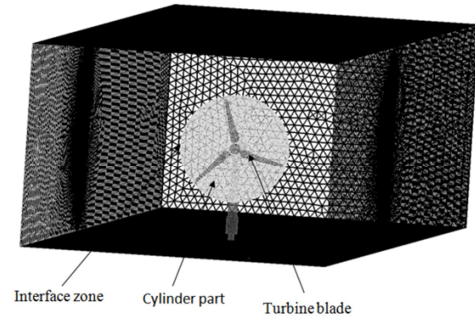
جدول ۱- استقلال از شبکه کار حاضر

ضریب C_p	اندازه شبکه محاسباتی
۰/۳۹۲۴	۱۱۰۰۰۰۰
۰/۳۹۶۵	۱۸۰۰۰۰۰
۰/۴۰۹۵	۲۷۰۰۰۰۰
۰/۴۱۰۲	۳۴۰۰۰۰۰

۳- صحت‌سنجی حل عددی

جهت بررسی صحت حل، ضریب C_p با نتایج تجربی مقایسه شده است (شکل ۳). شکل‌های (۴ و ۵) پروفیل سرعت بی‌بعد شده در راستای جریان و در امتداد خط افقی گذرنده از مرکز چرخش توربین باد برای نسبت سرعت نوک پره ۶ در فاصله ۱D و ۵D پس از توربین باد را نشان می‌دهد. نتایج کار حاضر با نتایج تجربی و مدل‌سازی صورت گرفته توسط هنسن [۲۰] و شبیه‌سازی انجام شده توسط کونو [۲۰] مقایسه شده است (شکل‌های ۴ و ۵). بین نتایج به‌دست آمده و نتایج آزمایشگاهی تطابق خوبی وجود دارد، تنها در فاصله ۵D پس از توربین باد اثرات برج نگهدارنده در مطالعه پیش‌رو و مطالعه کونو اختلافات دیده شده ولی در نتایج آزمایشگاهی اثرات برج نگهدارنده کم شده است.

بخش محرک 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 ۲). به دلیل استفاده از تکنیک مش لغزان^۱ برای بخش متحرک بر خلاف مدل MRF یک وجه مشترک دو لایه‌ای انتخاب شده است. تکنیک مش لغزان دقیق‌ترین روش شبیه‌سازی جریان برای بخش‌های محرک چندگانه می‌باشد، اما استفاده از این روش هزینه محاسباتی را بالا می‌برد.



شکل ۲- محدوده محاسباتی

سرعت باد در ورودی تونل باد ۱۰ m/s است. در این سرعت ورودی شدت آشفتگی $TI = 0.03$ است. شدت آشفتگی به صورت نسبت انحراف معیار به سرعت مرجع تعریف می‌شود:

$$TI = \frac{\langle u^2 \rangle^{1/2}}{U_{ref}} \quad (18)$$

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

$$\lambda = \Omega R / U_{ref} \quad (19)$$

که در اینجا Ω سرعت دورانی، R شعاع روتور و U_{ref} سرعت مرجع است. در کار حاضر برای سه نسبت سرعت نوک پره $\lambda_1 = 3$ ، $\lambda_2 = 6$ و $\lambda_3 = 10$ شبیه‌سازی صورت گرفته است. عدد رینولدز محلی بر اساس وتر پره برای $\lambda_2 = 6$ برابر $Re_c^{tip} = 10^5$ است، البته در مقایسه با یک توربین باد مقیاس واقعی این عدد رینولدز یک مرتبه کوچک‌تر است.

باید ذکر شود که عدد رینولدز بر اساس وتر پره اثرات قابل توجهی بر مشخصه‌های عملکردی توربین باد دارد. برای مثال بیشینه قدرت تولیدی برای توربین بادی که در عدد رینولدز کمتری کار می‌کند، خیلی کمتر از توربین باد با عدد رینولدز بالا است [۲۳]. با این حال مدیسی و آلفردسون [۲۴] 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 مومنوم و انرژی، قدرت خروجی توربین متناسب با مکعب اختلاف سرعت است. اختلاف سرعت بزرگتر نشان دهنده قدرت دریافتی بیشتر از جریان باد توسط توربین باد است. از این‌رو یکی از عوامل تاثیر گذار بر طراحی توربین‌های باد ضریب C_p است، که نسبت انرژی سینتیکی دریافت شده از باد به کل انرژی انرژی باد است. این ضریب در رابطه زیر ارائه شده است:

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho U_0^3 A} \quad (20)$$

¹ Sliding mesh technique

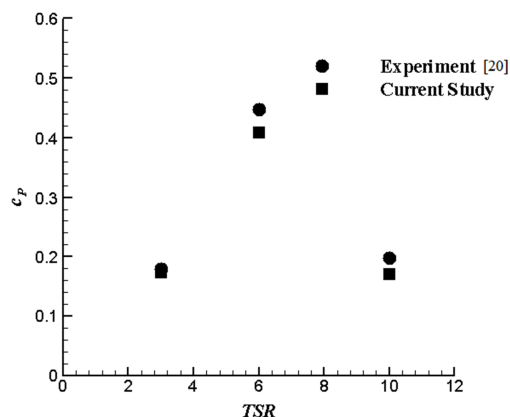
است. کونو [۲۰] از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ برای آزمایش توربین باد استفاده کرده است.

۴- بحث و آنالیز نتایج

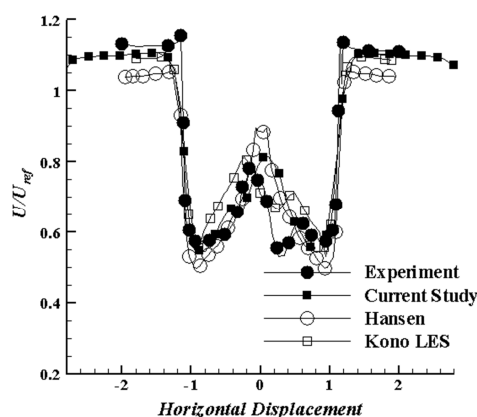
۴-۱- پروفیل سرعت

پس از اطمینان از درستی حل، گسترش دنباله ایجاد شده پس از توربین باد برای سرعت‌های دورانی مختلف در امتداد خط افقی در مرکز تونل باد و در فواصل مختلف بررسی شده است. افزایش سرعت در امتداد عرضی تونل باد در پایین‌دست توربین باد که در نتایج آزمایشگاهی نیز مشاهده شد بخاطر بالا بودن نسبت انسداد^۲ است. در واقع این افزایش سرعت به جهت نسبت انسداد و مساحت جاروب شده توسط توربین باد به مساحت عرضی تونل باد می‌باشد، که در اینجا برای هندسه داده شده این نسبت ۱۲/۱ درصد است. هرچند مطالعات صورت گرفته نسبت انسداد بالای ۱۰ درصد را برای تونل باد پیشنهاد نمی‌کنند [۲۵]، با این حال این موضوع توسط سازندگان این مدل نادیده گرفته شده است. نتایج متوسط‌گیری شده پروفیل بی‌بعد سرعت در شکل‌های (۶ تا ۸) برای نسبت سرعت نوک پره ۳، ۶، ۱۰ نشان داده شده است. با مشاهده توزیع سرعت مشخص می‌گردد که در مقاطع عرضی مؤلفه محوری سرعت، V_z ، در ناحیه دنباله به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. این کاهش سرعت محوری می‌تواند بخاطر گردابه‌های جدا شده از نوک پره در امتداد جریان باشد. به عبارت دیگر ساختارهای آشفتگی ایجاد شده در ناحیه دنباله توربین به نحوی تشکیل می‌گردد که این نواحی کم سرعت را ایجاد می‌کنند. دلیل دیگر کاهش سرعت در این نواحی می‌تواند به به این خاطر باشد که انرژی بیشتری در ناحیه نوک پره نسبت به ته پره از جریان باد دریافت می‌شود که به خاطر بیشتر بودن سرعت در نوک پره نسبت به ته پره است. همان‌طور که مشاهده می‌شود برای تمامی سرعت‌های دورانی با افزایش فاصله پایین‌دست دنباله ایجاد شده پس از توربین باد بازیابی می‌شود. در واقع توزیع سرعت در عرض تونل باد به سمت یکنواخت شدن میل می‌کند.

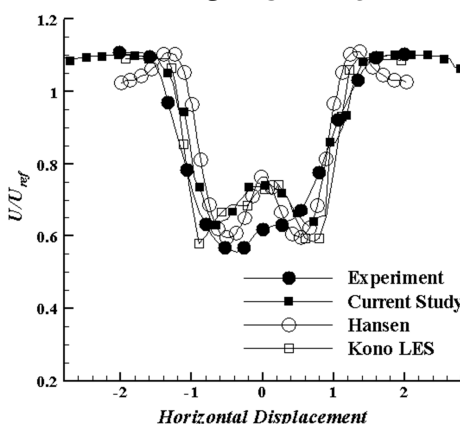
در نسبت سرعت نوک پره $\lambda_1=3$ اثرات گردابه‌های جدا شده از پره ناچیز است اما با افزایش نسبت سرعت نوک پره این اثرات تشدید شده و به وضوح قابل رویت می‌باشد. در واقع برای $\lambda_1=3$ فقط یک نقطه کمینه در ناحیه دنباله پشت توربین قرار دارد، در حالی که برای $\lambda=6, 10$ دو نقطه کمینه وجود دارد. این نقاط دقیقاً در فاصله نوک پره ($Z/R=1$) قرار گرفته‌اند. به عبارت دیگر اثر دنباله در نوک پره به جهت قدرت چرخشی و آشفتگی در دنباله جریان اثرات قابل توجهی داشته به نحوی که این نقاط ایجاد می‌گردد. از طرفی افزایش نسبت سرعت نوک پره باعث افت شدیدتر میدان سرعت پس از توربین باد می‌شود (شکل‌های ۶ تا ۸). با این حال در سرعت‌های دورانی بالاتر به خاطر اختلاط آشفتگی^۳ نرخ بازیابی میدان سرعت سریع‌تر است. برای مثال در مقطع عرضی تونل باد در فاصله ($Z/R=1$) در سرعت دورانی $\lambda_7=6$ حداکثر افت سرعت $U/U_{ref}=0.54$ و در $\lambda_7=10$ حداکثر افت سرعت $U/U_{ref}=0.26$ می‌باشد. در حالی که حداکثر بازیابی در حد فاصل ۱D تا ۷D در پشت



شکل ۳- مقایسه ضریب C_p کار حاضر با نتایج تجربی [۲۰]



شکل ۴- مقایسه سرعت در امتداد خط افقی در فاصله ۱D در پایین-دست توربین باد با نتایج تجربی و دو مطالعه عددی



شکل ۵- مقایسه سرعت در امتداد خط افقی در فاصله ۵D در پایین-دست توربین باد با نتایج تجربی و دو مطالعه عددی

در نتایج نشان داده شده در شکل‌های (۴ و ۵) هنسن [۲۰] تنها به مدل‌سازی پره‌های توربین باد پرداخته و از مدل‌سازی برج نگهدارنده آن صرف‌نظر کرده است. مدل آشفتگی $k-\omega$ SST برای حل مسئله محصور استفاده شده است. تعداد سلول‌های این شبکه محاسباتی حدود ۲۳ میلیون است. در شبیه‌سازی هنسن [۲۰] میدان جریان به طور کامل تا $y^+=1$ بر روی پره حل شده است. به عبارت دیگر زیر شبکه لزج^۱ کاملاً حل شده است. از این رو تعداد شبکه محاسباتی این مطالعه زیاد

^۲ Blockage ratio

^۳ Turbulent mixing

^۱ Viscous sublayer

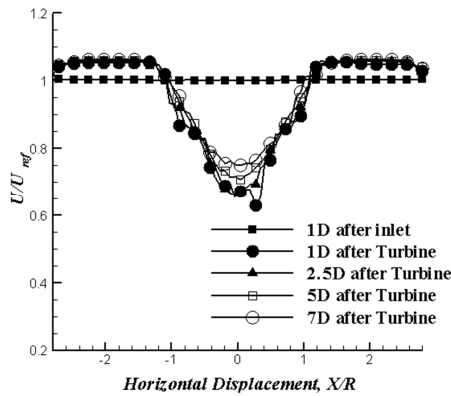
توربین باد برای λ_2 برابر $U/U_{ref}=0.67$ و برای λ_3 برابر 0.68 می‌باشد.

۲-۴- کانتور سرعت

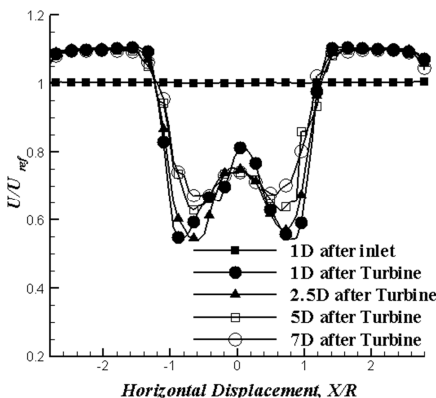
به منظور بررسی بیشتر تغییرات دنباله در پایین‌دست توربین باد کانتورهای سرعت در سه مکان متفاوت با سرعت‌های دورانی $\lambda_1=3$ و $\lambda_2=6$ مورد مطالعه قرار گرفته است. توربین باد بخشی از انرژی باد را جذب می‌کند. به عبارت دیگر سرعت در راستای جریان کاهش می‌یابد و در راستای عرضی و عمودی افزایش می‌یابد. بر اساس بقای مومنوم زاویه‌ای دنباله در پایین‌دست توربین باد در خلاف جهت چرخش توربین باد می‌چرخد. شکل ۹ کانتورهای متوسط‌گیری شده زمانی سرعت در راستای جریان را برای دو سرعت دورانی $\lambda_1=3$ و $\lambda_2=6$ در فواصل پایین‌دست متفاوت نمایش می‌دهند (بردارهای سرعت متوسط‌گیری شده زمانی به آن اضافه شده است). در هر دو سرعت دورانی با افزایش فاصله پایین‌دست سرعت در راستای جریان افزایش می‌یابد. در $Z/D=1$ توزیع نسبتاً متقارن دنباله در فواصل $X/D=-0.52$ تا $X/D=0.52$ برای سرعت دورانی $\lambda_1=3$ دیده می‌شود در حالی که این توزیع دنباله برای سرعت دورانی $\lambda_2=6$ از $X/D=-0.62$ تا $X/D=0.62$ دیده می‌شود. به عبارت دیگر پخش دنباله با افزایش سرعت دورانی افزایش می‌یابد. افت سرعت در راستای جریان در ناحیه پشت توربین باد رفتار متفاوتی در سرعت‌های دورانی مختلف دارد. در سرعت دورانی $\lambda_1=3$ افت سرعت در راستای جریان در مرکز توربین باد (محل قرارگیری توپی) بیشینه است و با حرکت به سمت لبه‌های پره افت سرعت کاهش می‌یابد. در سرعت دورانی $\lambda_2=6$ رفتار متفاوتی مشاهده می‌شود، در این سرعت دورانی افت سرعت در نزدیکی محل قرار گیره لبه‌های پره بیشینه است و با حرکت به سمت ته پره و توپی افت سرعت کمتری مشاهده می‌شود. به عبارت دیگر با افزایش سرعت دورانی میزان برداشت انرژی از جریان باد در قسمت لبه‌های پره افزایش می‌یابد. این کاهش سرعت در نزدیکی محل قرارگیری نوک پره‌ها همچنین می‌تواند بخاطر تشدید گردابه‌های جدا شده از پره‌ها باشد. با حرکت به سمت پایین‌دست این الگوی جریان برای هر دو سرعت دورانی حفظ می‌شود ولی توزیع سرعت یکنواخت‌تر می‌شود.

۳-۴- گردابه‌های جدا شده از توربین باد

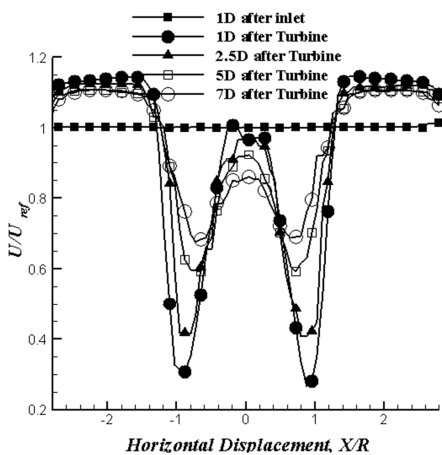
فهم بهتر ساختارهای جریان آشسته در ناحیه دنباله توربین باد به منظور کمینه کردن بارهای دینامیکی حاصل از جریان باد بر توربین‌های پایین‌دست و همچنین بهینه سازی طراحی مزارع بادی از اهمیت بسیاری برخوردار است. این موضوع احتیاج به دانش گسترده‌ای درباره توزیع مکانی ساختارهای آشسته در ناحیه دنباله دارد. یک ویژگی مهم در جریان حول توربین باد محور افقی گردابه‌های مارپیچی جدا شده از پره است



شکل ۶- مقایسه پروفیل سرعت متوسط‌گیری شده زمانی پس از توربین باد و ۱D پس از ورودی تونل باد برای $\lambda_1=3$



شکل ۷- مقایسه پروفیل سرعت متوسط‌گیری شده زمانی پس از توربین باد و ۱D پس از ورودی تونل باد برای $\lambda_2=6$

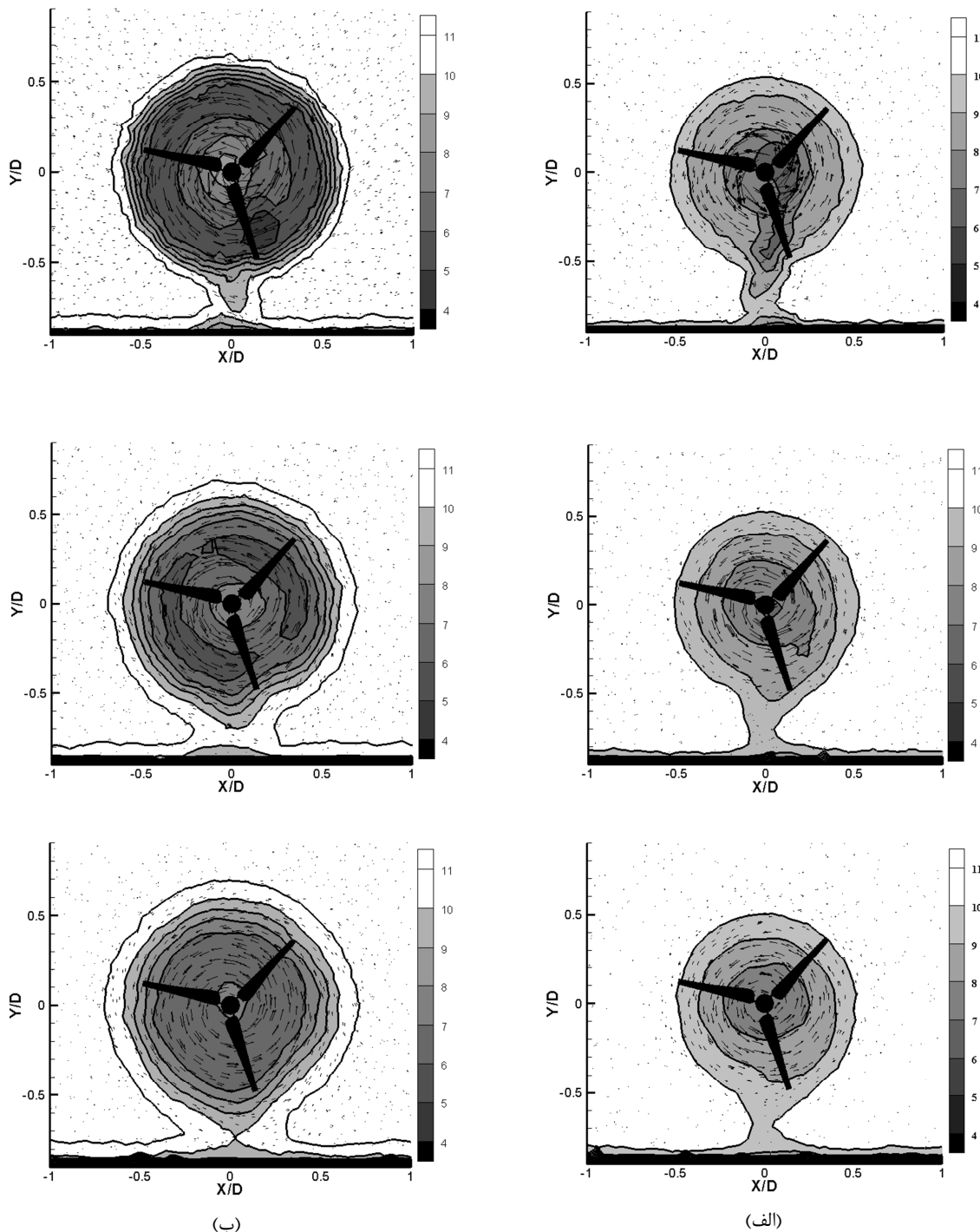


شکل ۸- مقایسه پروفیل سرعت متوسط‌گیری شده زمانی پس از توربین باد و ۱D پس از ورودی تونل باد برای $\lambda_3=10$

امروزه بسیاری از محققان تاکید کرده‌اند که ورتیسیته 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

یک ناحیه مشابه در ناحیه دنباله برای $\lambda_1=3$ برابر ۴ است (شکل ۱۰ الف) و برای $\lambda_2=6$ برابر هفت است (شکل ۱۰ ب)، در حالی که تعداد دقیق گردابه‌ها در سرعت دورانی $\lambda_3=10$ مشخص نیست، به جای آن یک مسیر پیوسته از گردابه‌های به هم چسبیده دیده می‌شود.

بر اساس تانسور گرادیان سرعت، ∇u ، می‌باشند. بسته به روش استفاده شده معیارهای محلی می‌تواند بر اساس متغیرهای λ_2 [۲۶]، Δ [۲۷]، Q [۲۸] و λ_{ci} [۲۹] باشند. شکل ۱۰ گردابه‌های جدا شده از توربین باد را در میدان سرعت لحظه‌ای در سرعت‌های دورانی متفاوت با استفاده از روش λ_{ci} را نشان می‌دهد. تعداد گردابه‌های جدا شده در



شکل ۹- کانتورهای متوسط‌گیری شده زمانی سرعت در راستای جریان (بردارهای سرعت متوسط‌گیری شده زمانی به آن اضافه شده است) در صفحه $X-Y$ در فواصل $Z/D=1$ (ردیف اول)، $Z/D=4$ (ردیف دوم) و $Z/D=7$ (ردیف سوم). (الف) $\lambda_1=3$ (ستون اول) (ب) $\lambda_2=6$ (ستون دوم)

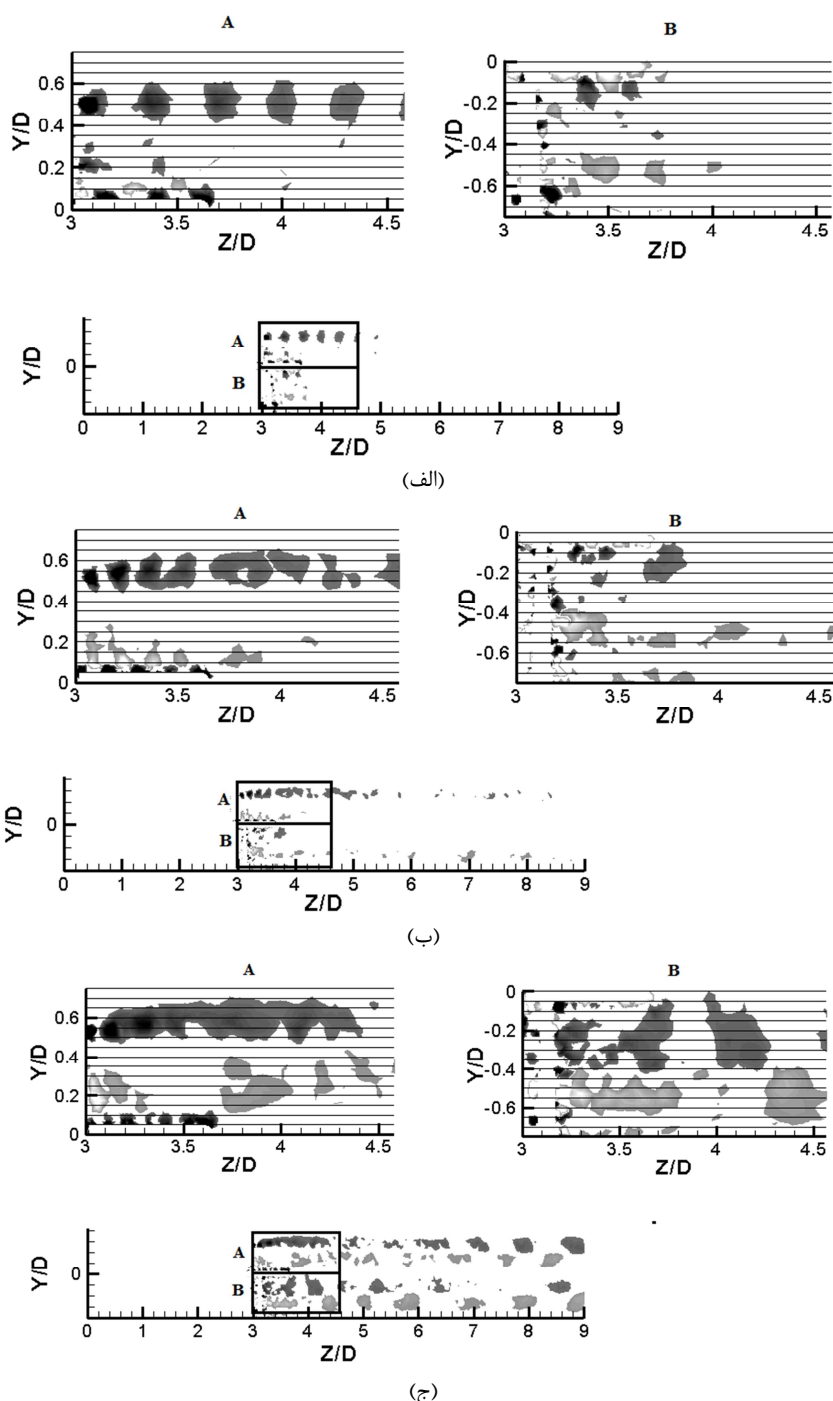
افزایش می‌یابد. در سرعت دورانی $\lambda_1=3$ اثرات گردابه‌های جدا شده از پره تنها در ناحیه دنباله نزدیک دیده می‌شود، گردابه‌های جدا شده از لبه

این نتایج نشان می‌دهد فرکانس گردابه‌های جدا شده از پره با افزایش سرعت دورانی افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر با افزایش سرعت دورانی فاصله بین دو گردابه مجاور کاهش می‌یابد در حالی که قدرت چرخش

۴-۴- شدت آشفتگی

شدت آشفتگی به عنوان معیاری برای بارهای ناشی از خستگی بر بخش‌های مختلف یک توربین باد استفاده می‌شود. در شکل‌های (۱۱) تا (۱۳) متوسط زمانی شدت آشفتگی در فواصل مختلف و در امتداد خط افقی مرکز تونل باد برای سرعت‌های دورانی مختلف نشان داده شده است.

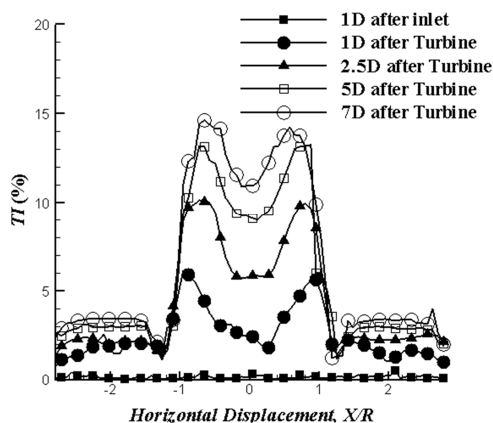
پره نسبت به گردابه‌های جدا شده از ته پره مسافت بیشتری را طی می‌کنند. با افزایش سرعت دورانی اثرات گردابه‌های جدا شده از لبه پره و ته پره در ناحیه دنباله دور نیز دیده می‌شود. در $\lambda_p = 10$ اثرات گردابه‌های جدا شده از ته پره نیز در ناحیه دنباله دور دیده می‌شود اثرات گردابه‌های جدا شده از نوک پره نیز در این ناحیه تشدید می‌شود.



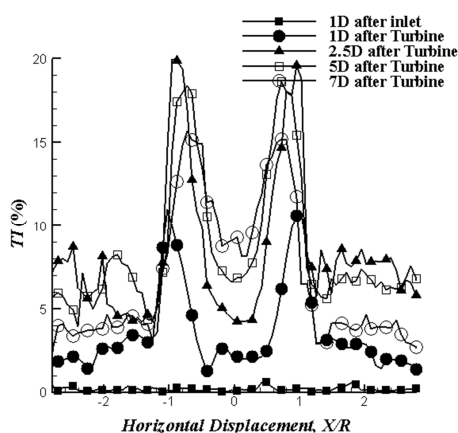
شکل ۱۰- گردابه‌های جدا شده از توربین باد در میدان سرعت لحظه‌ای در سرعت‌های دورانی مختلف (الف) $\lambda_p = 3$ (ب) $\lambda_p = 6$ (ج) $\lambda_p = 10$

توربین باد به منظور نصب توربین‌های باد پایین‌دست در یک مزرعه بادی از اهمیت بسیاری برخوردار است. یک خصوصیت مهم در ناحیه دنباله

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



شکل ۱۲- مقایسه شدت آشفتگی متوسط‌گیری شده زمانی پس از توربین باد و ۱D پس از ورودی تونل باد برای $\lambda_r=6$



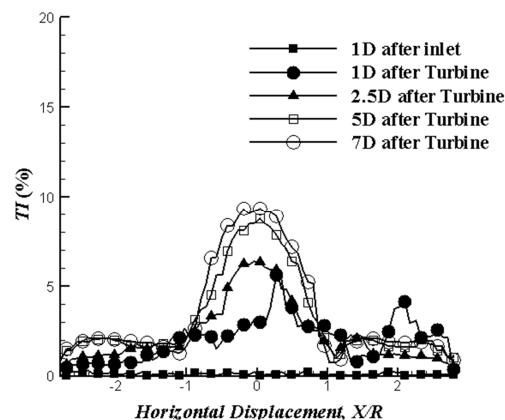
شکل ۱۳- مقایسه شدت آشفتگی متوسط‌گیری شده زمانی پس از توربین باد و ۱D پس از ورودی تونل باد برای $\lambda_r=10$

۵- نتیجه گیری

در این مطالعه جریان حول یک توربین باد محور افقی تحت سرعت‌های دورانی متفاوت به روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ با استفاده از مدل زیر شبکه اسم‌گورینسکی مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. نتایج این مطالعه تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی و دو مطالعه عددی هسن و کونو دارد. بررسی‌های انجام شده روی میدان سرعت در پایین‌دست توربین باد حاکی از کاهش سرعت محوری و افزایش سرعت‌های جانی می‌باشد.

با این وجود با فاصله گرفتن از توربین باد در جهت پایین‌دست، میدان سرعت در دنباله توربین در تمامی سرعت‌های دورانی بازیابی می‌شود. با افزایش سرعت دورانی نقاط کمینه سرعت در محل قرارگیری نوک پره ایجاد شده که این موضوع در تمامی دورها به غیر از $\lambda_1=3$ دیده می‌شود. شایان ذکر است که با افزایش سرعت دورانی شدت این نقاط کمینه بیشتر می‌گردد، اما به جهت افزایش شدت آشفتگی و اختلاط بیشتر میدان جریان نرخ بازیابی دنباله سریع‌تر می‌شود. به عبارت دیگر، با افزایش سرعت دورانی میدان سرعت در فاصله مکانی کوتاه‌تری در پایین‌دست توربین بازیابی می‌شود. وجود نقاط کمینه میدان سرعت در محل نوک پره می‌تواند به خاطر اثرات گردابه‌های جدا شده از نوک پره باشد. در واقع ایجاد حرکت‌های دورانی در میدان جریان با توجه به نوع

نزدیک توربین باد، گردابه‌های مارپیچی جدا شده از پره می‌باشد که توسط چرخش پره‌های توربین ایجاد می‌شود. مشخص شده است که این گردابه‌ها می‌توانند منبع مهم تولید نویز و لرزش پره‌ها باشند. در شکل‌های (۱۱ و ۱۳) نقاط بیشینه محلی نشان دهنده گردابه‌های جدا شده از لبه پره می‌باشد، با افزایش فاصله پایین‌دست اثرات این نقاط بیشینه و در نتیجه گردابه‌های جدا شده از پره بیشتر می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که در سرعت‌های دورانی بالاتر اثرات این گردابه‌ها دیرتر از بین می‌روند. در $\lambda_1=3$ اثرات گردابه‌های جدا شده از پره دیده نمی‌شوند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت اثرات گردابه‌های جدا شده از پره با افزایش سرعت دورانی پره‌های توربین باد افزایش می‌یابد. برای مثال در مقطع عرضی تونل باد در فاصله $(Z/R=1)$ در سرعت دورانی $\lambda_r=6$ حداقل شدت آشفتگی $TI=6/12\%$ است و در $\lambda_r=10$ حداقل مقدار شدت آشفتگی $TI=11/01\%$ می‌باشد. در حالی که حداکثر مقدار شدت آشفتگی در حد فاصل ۱D تا ۷D در پشت توربین باد برای λ_r برابر $TI=14/62\%$ و برای λ_r برابر $TI=19/98\%$ می‌باشد. شدت آشفتگی و قدرت چرخشی با افزایش فاصله پایین‌دست به غیر از ناحیه نوک پره برای سرعت دورانی $\lambda_r=10$ افزایش می‌یابد. این موضوع ناشی از طبیعت جریان آشفته است. زمانی که جریان آشفته شود، شدت آشفتگی که ناشی از اغتشاشات و چرخش‌های ایجاد شده است، می‌تواند تا یک حد تعادل نسبت افت و تولید آشفتگی افزایش یابد. چرا که جریان آشفته خود نگهدارنده است. یعنی تولید و اتلاف باید در تعادل باشند. همچنین با نگاه دوباره به شکل‌های (۱۱ تا ۱۳) مشخص می‌گردد که میزان شدت آشفتگی با افزایش سرعت دورانی افزایش می‌یابد. هرچند سرعت به سمت یکنواختی می‌رود که به خاطر حذف اثرات انسداد طبیعی است، اما شدت آشفتگی افزایش یافته که طبیعت اینگونه جریان‌ها است.



شکل ۱۴- مقایسه شدت آشفتگی متوسط‌گیری شده زمانی پس از توربین باد و ۱D پس از ورودی تونل باد برای $\lambda_r=3$

¹Self-sustaining

- [9] Aubrun S., Loyer S., Hancock P. E., Hayden P., Wind turbine wake properties: Comparison between a non-rotating simplified wind turbine model and a rotating model, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn* Vol. 120, No. 1, pp. 1-8, 2013.
- [10] Hu H., Yang Z., and Sarkar P., Dynamic wind loads and wake characteristics of a wind turbine model in an atmospheric boundary layer wind, *Exp. Fluids*, Vol. 52, No. 5, pp. 1277-1294, 2012.
- [11] Zhang W., Markfort C. D., and Porté-Agel F., Near-wake flow structure downwind of a wind turbine in a turbulent boundary layer, *Exp. Fluids*, vol. 52, No. 5, pp. 1219-1235, 2012.
- [12] Maeda T., Kamada Y., Murata J., Yonekura S., Ito T., Oawa A. and Kogaki T., Wind Tunnel Study on Wind and Turbulence Intensity Profiles in Wind Turbine Wake, *Journal of Thermal Science* Vol. 20, No. 2, pp. 127-32, 2011
- [13] Pope S., *Turbulent flows*, Cambridge University Press; 2000
- [14] Smagorinsky J., General circulation experiments with the primitive equations: I. The basic equations, *Monthly Weather Review*, Vol. 91, No. 3, pp. 99-164, 1963.
- [15] Germano M., Piomelli U., Moin P., Cabot W. H., A dynamic subgrid scale eddy viscosity model, *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, Vol. 3, No. 7, pp. 1760-1765, 1991.
- [16] Lilly D. K., A proposed modification of the Germano subgrid-scale closure method, *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, Vol. 4, No. 3, pp. 633-635, 1992
- [17] Meneveau C., Lund T. S., and Cabot W. H., A Lagrangian dynamics subgrid-scale model of turbulence, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 319, No. 1, pp. 353-385, 1996
- [18] Bardina J., Ferziger J. H., and Reynolds W. C., Improved subgrid models for large eddy simulation, 13th Fluid and Plasma Dynamics Conference, Stanford Univ.; CA, United States, July 14-16, 1980
- [19] Clark R. A., Ferziger J. H. and Reynolds W. C., Evaluation of subgrid-scale models using an accurately simulated turbulent flow, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 91, No. 1, pp. 1-16, 1979
- [20] Krogstad P. Å., Eriksen P. E., Blind test calculations of the performance and wake development for a model wind turbine, *Renewable Energy*, Vol. 50, No. C, pp. 325-333, 2013
- [21] Tangler J. L., Somers D. M., NREL airfoil families for HAWTs, *Proceedings of the American Wind Energy Association Windpower Conference*, Washington, National Renewable Energy Laboratory; January 1995.
- [22] Somers D., Design and experimental results for the S825 Airfoil, Technical Report NREL/SR-500-36344, National Renewable Energy Laboratory, 1999.
- [23] Alfredsson P. H., Dahlberg J. A., Vermeulen P. E. J., A comparison between predicted and measured data from wind turbine wakes, *Wind Engineering*, Vol. 6, No. 3, pp. 149-155, 1982
- [24] Medici D., Alfredsson P. H., Measurements on a wind turbine wake: 3D Effects and bluff body vortex shedding, *Wind Energy*, Vol. 9, No. 3, pp. 219-236, 2006
- [25] Sarmast S., Numerical study on instability and interaction of wind turbine wakes, in *Mechanics, Stability, Transition and Control*, PhD Thesis, KTH: Stockholm, 2013.
- [26] Jeong, J., Hussain, F., On the identification of a vortex". *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 285, No. 1, pp. 69-94, 1995
- [27] Perry A. E., Chong M. E., and Cantwell B. J., "A general classification of three-dimensional flow fields, *Phys. Fluids A*, Vol. 2, No. 5, pp. 765-777, 1990
- [28] Hunt J. C. R., Wray A. A., and Moin P., Eddies, stream, and convergence zones in turbulent flows, report ctr-s88. Center for Turbulence Research, pages, pp. 193-208, 1988
- [29] Zhou, J., Adrian R. J., Balachandar, S., and Kendall T. M., Mechanism for generating coherent packets of hairpin vortices in channel flow, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 387, No. 1, pp. 353-396, 1999

چرخش و محل گردابه می‌تواند بر میدان متوسط جریان تاثیرگذار باشد. این موضوع به خاطر تکرار مرتب گردابه‌های جدا شده از پره‌ها می‌باشد. با بررسی حداکثر افت در میدان‌های سرعت که برای سرعت دورانی λ_2 حداکثر افت سرعت $U/U_{ref} = 0.54$ و برای λ_3 برابر 0.26 می‌باشد، این موضوع مجدداً تایید می‌گردد. چرا که با افزایش سرعت دورانی تعداد گردابه‌های جدا شده و فرکانس آن‌ها نیز افزایش می‌یابد. به همین جهت میزان تاثیر این گردابه‌ها بر میدان سرعت نیز افزایش می‌یابد. این درحالی است که حداکثر بازیابی برای این سرعت‌های دورانی که برابر $U/U_{ref} = 0.67$ برای λ_2 و برابر 0.68 برای U/U_{ref} می‌باشد چندان تغییری نمی‌کند. به عبارت دیگر اگر چه تعداد و فرکانس گردابه‌های جدا شده میزان افت میدان سرعت را تحت تاثیر جدی قرار داده، اما در بازیابی میدان سرعت تاثیر چندانی ندارند. از طرفی تعداد و فرکانس گردابه‌های جدا شده بر شدت اختلاط میدان جریان و به طبع آن شدت آشفتگی میدان جریان نیز تاثیر قابل توجهی دارد. این موضوع با بررسی شدت آشفتگی نتایج حاصل از مطالعه حاضر نشان می‌دهد که شدت آشفتگی افزایش می‌یابد. شدت آشفتگی دارای نقاط بیشینه محلی در محل قرارگیری نوک پره به اندازه تمامی سرعت‌های دورانی به غیر از $\lambda_1 = 3$ می‌باشد. در واقع به دلیل وجود گردابه‌های جدا شده و تاثیر آن‌ها بر میدان جریان این افزایش در شدت آشفتگی و ایجاد نقاط بیشینه در آن به وجود می‌آید. از طرفی با افزایش سرعت دورانی و فرکانس گردابه‌های جدا شده اثرات این گردابه‌ها در پایین‌دست توربین دیرتر از بین می‌رود. به همین جهت با افزایش فاصله از توربین در پایین‌دست شدت آشفتگی (به غیر از $\lambda_1 = 3$) افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، به دلیل رشد گردابه‌های جدا شده در فضای پایین‌دست توربین تاثیر آن‌ها بر میدان سرعت و در نتیجه شدت آشفتگی افزایش می‌یابد. این موضوع به جهت ماهیت جریان‌های آشفته است که میزان افت و تولید آشفتگی همیشه در تعادل هستند.

۷- مراجع

- [1] Li Y., Paik K. J., Xing T., Carrica P. M. Dynamic overset CFD simulations of wind turbine aerodynamics, *renewable Energy*, Vol. 52, No. 5, pp. 1219-1235, 2012.
- [2] Zhang W., Markfort C. D., Porté-Agel F., 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.
- [3] Crespo A., Hernandez J., Frandsen S., Survey of modeling methods for wind turbine wakes and wind farms, *Wind Energy*, Vol. 2, No. 1, pp. 1-24, 2012.
- [4] Vermeer L. J., Sorensen J. N., Crespo A., Wind turbine wake aerodynamics; *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 39, No. 6-7, pp. 467-510, 2003.
- [5] Mo. J. O., Choudhry A., Arjomandi M., Kelso R., Lee Y. H., 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 Aerodynamic*, Vol. 117, pp. 38-56, 2013.
- [6] Porté-Agel F., Wu Y. T., Lu H., Conzemius R. J., 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.
- [7] Stevens R. J. A. M., Gayme D. F., Meneveau C., Large eddy simulation studies of the effects of alignment and wind farm length, *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, Vol. 6, No. 2, pp. 611-623, 2014.
- [8] Li Y., Paik K. J., Xing T., Carrica P. M., Dynamic overset CFD simulations of wind turbine aerodynamics, *renewable Energy* Vol. 37, No. 1, pp. 285-298, 2012.