ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 2021;21(8):551-561

Aerodynamic Assessment and Wake Analysis of a Small Horizontal Axis Multi-Rotor Wind Turbine

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Nadi A.[1]
Nabatian N.*[2]
Hashemi Tari P.[1]
Asghari S.[1]

How to cite this article
Nadi A, Nabatian N, Hashemi Tari P, Asghari S. Aerodynamic Assessment and Wake Analysis of a Small Horizontal Axis Multi-Rotor Wind Turbine. Modares Mechanical Engineering. 2021;21(8):551-561.

[1] Renewable Energies Department, Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
[2] Energy Conversion Department, Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

***Correspondence**
Address: Energy Conversion Department, Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran,
N_nabatian@sbu.ac.ir

Article History
Received: December 08, 2019
Accepted: February 20, 2021
ePublished: July 18, 2021

ABSTRACT

A new generation of wind turbines, in comparison to the old versions, have been designed with colossal blades to produce a larger amount of power output. However, this has led to some unpredictable challenges including their construction procedure and expenses and particularly blades' transportation. To overcome these issues, multi-rotor wind turbines have been suggested. The aerodynamic performances of such turbines have been previously assessed by other investigators. However, the wake characteristics of these turbines have been less studied. The focus of the present research is on the assessment of these characteristics, which are crucial in the process of any wind farm design. For this purpose, the wake flow of a small three-rotor wind turbine is numerically simulated using computational fluid dynamics. A numerical simulation has been conducted for a single-rotor wind turbine and three-rotor small horizontal axis wind turbine with an angle of 180◦ arrangement. The results of a single rotor wind turbine indicated that far downstream wake extended up to 8D, with Jensen-Gaussian model can be better predicted. The comparison between the three-bladed wind turbine and the results of wake models for the equivalent turbine showed that because of wake interactions in downstream of the rotor, the loss of turbulent kinetic energy and recovery of the stream speed will be faster. As a result, in the wind farms, the turbines in closer distances around 4D of the equivalent single-rotor wind turbine can be installed.

Keywords Energy; Wind Turbine; Multi-rotor Wind Turbine; Wake Flow; Far Wake Model

CITATION LINKS

[1] Multi-Rotor; A sulotion to 20 MW and beyond. [2] Multi Rotor Wind Turbine Design And Cost Scaling. [3] A novel dual-rotor turbine for increased wind energy capture. [4] A novel dual-rotor turbine for increased wind energy capture. [5] Multi-turbine wind-solar hybrid system. [6] Power augmentation of shrouded wind turbines in a multi-rotor system. [7] Aerodynamics of Multi-Rotor Wind Turbine Systems using Diffuser-Augmentation. [8] Wind turbine wake aerodynamics. [9] Review of computational fluid dynamics for wind turbine wake aerodynamics. [10] Flow structure and turbulence in wind farms. [11] Quantifying the Impact of Wind Turbine Wakes on Power Output at Offshore Wind Farms. [12] Wind turbine boundary layer arrays for Cartesian and staggered configurations: Part II, low-dimensional representations via the proper orthogonal decomposition, [13] Turbulent Flow Inside and Above a Wind Farm: A Wind-Tunnel Study. [14] Wind turbine wake models developed at the technical university of denmark: a review. [15] A new analytical model for wind-turbine wakes. [16] Optimization of wind turbine layout position in a wind farm using a newly-developed two-dimensional wake model. [17] A simple stationary semi-analytical wake model. [18] Turbulence modeling for CFD. [19] Development of a wind turbine simulator to design and test micro HAWTs. [20] Large eddy simulation of the wind turbine wake characteristics in the numerical wind tunnel model.

Copyright© 2020, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

بررسی عملکرد آیرودینامیکی و میدان جریان اطراف یک توربین بادي محور افقی چندروتور کوچک

آراز نادی
گروه انرژی‌های تجدیدپذیر، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
نگار نباتیان*
گروه تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
پویان هاشمی طاری
گروه انرژی‌های تجدیدپذیر، ،دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
شیوا عسگری
گروه انرژی‌های تجدیدپذیر، ،دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده

توربین های بادی رایج، برای تولید توان بالا نیاز به پره‌هایی با طول بسیار زیاد دارند. این مسئله مشکلاتی از قبیل نحوه ساخت پره‌های عظیم، افزایش هزینهٔ ساخت و حمل و نقل آن را ایجاد می‌کند. برای بهبود این شرایط، توربین‌های بادی چند روتور پیشنهاد شده‌اند. در حالیکه عملکرد توربین‌های چندروتور پیش‌تر توسط پژوهشگران مورد مطالعه قرار گرفته، رفتار جریان در ناحیه دنباله آن که در طراحی چیدمان مزارع بادی حائز اهمیت می‌باشد، کمتر مورد توجه بوده است. لذا تمرکز پژوهش پیش‌رو بر روی این بخش است. بدین منظور جریان سیال توربین بادی سه روتور با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی مدل‌سازی شده است. شبیه‌سازی عددی برای یک توربین تک-روتور و توربین سه-روتور با زاویه ۱۸۰ درجه نسبت به هم انجام شده و جهت اعتبار سنجی، نتایج به‌دست آمده حاصل از شبیه‌سازی توربین تک روتور با نتایج تجربی مقایسه شد. نتایج عددی توربین تک روتور نشان می دهد که مدل ویکی ینسن-گوسیان می‌تواند در پیش‌بینی دنباله توربین تک روتور عملکرد بهتری داشته باشد. با مقایسه نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی توربین بادی سه روتور و نتایج حاصل از مدل‌های ویکی برای توربین معادل، مشخص می‌شود که به دلیل برهم کنش جریان‌های دنباله‌ای در پشت توربین سه روتور، اتلاف انرژی جنبشی سریع‌تر اتفاق افتاده و سرعت در پشت توربین سریع‌تر از توربین بادی تک روتور معادل بازیابی می‌شود. همین امر اهمیت بسزایی در طراحی بهینه مزارع بادی دارد، چرا که توربین‌ها می‌توانند در فاصله کمتری تقریبا ۴ برابر قطر معادل توربین تک روتور نسبت به یکدیگر قرار گیرند.

کلیدواژه‌ها: توربین بادي، توربین بادی چند روتور، جریان دنباله، مدل دنباله دور

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۱۷
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۱۵
*نویسنده مسئول: n_nabatian@sbu.ac.ir

۱- مقدمه

یکی از انواع انرژی‌های تجدیدپذیر در زمینه تولید توان، انرژی باد است که برای استفاده از آن انواع توربین‌های بادی در ابعاد مختلف استفاده می‌شود. توربین‌های بادی متداول مورد استفاده در مزارع بادی با توجه به توان تولیدی خود، نیاز به پره‌هایی با طول زیاد داشته که چالش‌هایی در ساخت پره و حمل آن تا محل نصب، به علاوه هزینه بسیار را به همراه خواهند داشت. بدین منظور در چند سال اخیر تحقیقات گسترده‌ای بر روی توربین‌های بادی با چند روتور آغاز شده است. در این نوع توربین‌ها با نصب دو یا چند روتور بر روی یک برج از ابعاد پره کاسته و حمل و نقل، ساخت و نصب آنها نسبت به یک توربین بادی تک‌روتور با مساحت دوران و توان تولیدی مشابه، آسان‌تر می‌شود[1]. طراحی این توربین ها به گونه-ای است که از تقسیم یک توربین بزرگ به ابعاد کوچکتر با مساحت معادل حاصل می شود. به عبارت دیگر، حاصل جمع مساحت چرخش توربین‌های کوچک (A_1 تا A_n) با مساحت چرخش یک توربین بزرگ (A) برابر خواهد بود که بدین ترتیب توان نامی برابری تولید می‌کنند. توربین‌های چندروتور علی رغم وجود مزایای ذکر شده، پیچیدگی‌هایی نظیر ساخت سازه، نحوه چیدمان روتورها برای برداشت حداکثر توان، حفظ تعادل سازه بر روی برج با توجه به نحوه قرارگیری روتورها و بررسی بارهای دینامیکی وارد بر سازه با توجه به چرخش چند روتور بر روی برج دارند که بایستی در هنگام ساخت مورد توجه واقع شوند[2]. تحقیقات محدودی در راستای مطالعه نحوه عملکرد این توربین ها انجام شده که خلاصه‌ای از آنها در ذیل آورده شده است.

پتروس چاساپوگیانیس و همکاران[3] (Petros Chasapogiannis)، در مقاله خود به مقایسه اثرات آیرودینامیکی توان تولیدی یک توربین بادی فراساحلی (Offshore Wind Turbine) ۲۰ مگاواتی با توربین‌هاي چند روتور شامل ۴۵ توربین بادی در دسته های ۷ تایی پرداخته‌اند. برای بررسی جریان اطراف توربین‌ها از روش حل دینامیک محاسباتی سیالات (CFD-Solver) استفاده شده است. این روش حل بر اساس تئوری ایجاد گردابه (Vortex Based-Solver) انجام شده است. طی نتایج حاصل، استفاده از توربین چند روتور، نیروی تراست را ۱/۱۷ تا ۱/۴۹ درصد و توان را ۲/۳۲ تا ۳/۱۵ درصد افزایش می‌دهد. روزنبرگ (Rosenberg) و همکاران[4]، با بررسی یک توربین بادی دو روتور (Dual Rotor Wind Turbine) و مدلسازی جریان آن نتایج حاصل را با یک توربین بادی تک‌روتور و با همان توان تولیدی نامی مقایسه کردند. در این پژوهش، روتورها بر روی یک محور و پشت سر هم قرار داده شده‌اند. هدف این مطالعه کاهش اثر جریان پشت توربین اول، بهینه‌سازی فاصله و بررسی عکس العمل‌های دینامیکی بین دو روتور بود. آنها بر اساس معادلات رینولدز میانگین اقدام به بهینه‌سازی فاصله بین دو روتور و ابعاد روتور دوم کرده‌اند. بر اساس نتایج آنها شعاع بهینه روتور دوم برای افزایش توان توربین ۰/۲۵ تا ۰/۳ شعاع روتور اول و فاصله بهینه بین آنها ۰/۲ شعاع روتور اول است. کنوو هوآنگ (Qunwu Huang) و همکاران[5]، به بررسی نحوه ساخت یک سیستم هیبریدی تولید توان با استفاده از پنل خورشیدی در روز و

توربین بادی چند روتور در شب پرداخته‌اند. در این پژوهش برای طراحی توربین چند روتور، ۸ توربین ۵۰ واتی با یک توربین ۴۰۰ واتی مقایسه شده‌اند. مقایسه نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد، ۸ توربین ۵۰ واتی در سرعت های کمتر از ۷/۲ متر بر ثانیه توان بیشتری تولید می‌کنند و در سرعت‌های بالاتر نیز میزان تولید تقریبا یکسان است. یوجی اوهیا (Yuji Ohya) و همکاران[6]، به مقایسه ضریب درگ و ضریب توان توربین بادی چندروتور دارای دیفیوزر پرداختند. دو و سه توربین دارای دیفیوزر در کنار یکدیگر قرار داده شده و ضریب درگ و ضریب توان با تغییر فاصله اندازه-گیری محاسبه و با یک توربین بادی معمولی در همان شرایط مقایسه شده‌اند. طبق نتایج به‌دست آمده توربین‌های دارای دیفیوزر به دلیل تأثیر جریان دنباله روتورها در کنار یکدیگر، با قرار گرفتن در فاصله جانبی ۰/۲ قطر از یکدیگر، حدود ۱۲٪ توان بیشتری نسبت به توربین‌های بدون دیفیوزر در همان فاصله جانبی تولید می‌کنند. اولی گلتن بات (Uli Goltenbott)[7]، به بررسی آزمایشگاهی نحوه چیدمان توربین‌های بادی در کنار یکدیگر برای افزایش راندمان، با تمرکز بر روی توربین‌های دارای دیفیوزر برای زوایای ۶۰ تا ۱۸۰ پرداخت. دیفیوزر موجود در اطراف روتور و گردابه‌های ایجاد شده در لبه دیفیوزر منجر به افزایش توان تولیدی این توربین‌ها در مقایسه با توربین‌های رایج می‌گردد. او در هر زاویه با تغییر فاصله توربین‌های بادی دیفیوزردار، بهترین فاصله برای نصب توربین‌ها در کنار یکدیگر را به‌دست آورد. با توجه به نتایج به دست آمده در چیدمان سه روتور با زاویه ۱۸۰ درجه و در فاصله ۰/۰۵ تا ۰/۲ قطر دیفیوزر، روتورهای دیفیوزردار بهترین کارایی را داشته و توان تولیدی نسبت به چیدمان ۶۰ درجه ۲ درصد افزایش یافته است. پیتر جامیسون (Peter Jamieson) و مایکل برانی (Michael Branney)[1]، به بررسی هزینه ساخت یک توربین بادی ۲۰ مگاواتی در مقایسه با یک توربین چند روتور شامل ۴۵ توربین ۴۴۴ کیلوواتی و یک توربین چند روتور با ۴ توربین ۵ مگاواتی پرداختند. در ابتدای امر، آنها با به‌دست آوردن یک رابطه برای محاسبه اندازه هر توربین در چند روتور و تعداد آن، نحوه تبدیل یک توربین معمولی به یک چند روتور را نشان داده و سپس به مقایسه هزینه‌های ساخت پرداختند. طی نتایج حاصل، استفاده از ۴۵ توربین ۴۴۴ کیلوواتی به جای ۴ توربین ۵ مگاواتی هزینه را ۸۹ % کاهش و به جای یک توربین ۲۰ مگاواتی هزینه را ۷۰ % کاهش می‌دهد.

در بحث بررسی جریان دنباله و ارائه مدل‌های محاسبه سرعت جریان در پشت توربین تحقیقات متعددی به صورت آزمایشگاهی و عددی ارائه گردیده که جزئیات مربوط به آنها را می‌توان در تحقیقات ورمیر (Vermeer) و همکاران[8]، ساندرس (Sanderse) و همکاران[9]، استیونس (Stevens) و منوی (Meneveau)[10] ، بارتلمی (Barthelmie) و همکاران[11] ، همیلتون (Hamilton) و همکاران[12] و کامارو (Chamorro) و همکاران[13] یافت. مطابق این تحقیقات جریان در ناحیه دنباله به دو ناحیه دنباله نزدیک (Near Wake Region) (تحت تاثیر جریان عبوری از پره توربین) و ناحیه دنباله دور (Far Wake region) تقسیم می‌گردد و برای چیدمان مزرعه بادی با توجه به شرایط جریان در هریک از این دو ناحیه معمولا اطلاعات به‌دست آمده در ناحیه دنباله دور مورد استفاده قرار می‌گیرد. با این وجود به دلیل آنکه روش‌های عددی و آزمایشگاهی زمان‌بر و پیچیده می‌باشند، معادلات ریاضی با ساده‌سازی جریان دنباله ارائه گردیده است که از نتایج قابل قبولی برخوردار می‌باشند. از جمله بررسی‌های صورت گرفته در این زمینه می‌توان به تحقیقات زیر اشاره نمود.

تهفه گکمن (Tohfe Gocmen) و همکاران[14]، مدل‌های جریان دنباله از جمله ینسن (Jensen)، لارسن (Larsen)، فوجا (Fuga) دینامیک دنباله پایا (Dynamic Wake Meandering) و غیره را بررسی و تحلیل کرده و روابط مربوط به هر مدل را بر روی دو مزرعه بادی ساخته شده پیاده‌سازی کرده‌اند. طی این تحقیقات نتایج به دست آمده از هر مدل با داده‌های ثبت شده در مزارع بادی مقایسه گردیده است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد، مدل ینسن، لارسن و فوجا با توجه به سادگی روابط و پیش‌بینی بهتر سرعت جریان در ناحیه دنباله نسبت به سایر مدل‌ها کارایی بهتری دارند. همچنین اگر شرایط عدم قطعیت جهت وزش جریان باد در روابط ذکر شده اعمال گردد، توان تولیدی پیش‌بینی شده برای مزرعه بادی بهبود خواهد یافت. مجید باستان‌خواه و پرته آگل (Porte Agel)[15] ، با فرض توزیع نرمال سرعت دنباله در پشت توربین بادی، مدل دنباله گوسیان را ارائه داده و نتایج به‌دست آمده را با شبیه‌سازی بر اساس معادلات گردابه‌ای بزرگ (Larg Eddy Simulation) و همچنین داده‌های آزمایشگاهی یک نمونه توربین بادی محور افقی، مقایسه کرده‌اند. این مدل که در واقع از معادلات بقای مومنتوم به دست آمده است در مقایسه نتایج، تطابق خوبی با داده‌های شبیه‌سازی و آزمایشگاهی دارد. همچنین این مدل نسبت به سایر مدل‌های دنباله ارائه شده در گذشته از جمله مدل ینسن، دقت بالاتری در پیش‌بینی توان تولیدی توربین بادی پایین دست دارد. گائو ژیائوژیا (Gao Xiaoxia) و همکاران[16]، ضمن مقایسه مدل‌های ینسن و گوسیان، اقدام به ارایه مدل جریانی جدید با ترکیب مدل‌های ینسن و گوسیان کرده و پروفیل سرعت به دست آمده از مدل جریان خود را در فواصل محوری ۲/۵، ۵، ۷/۵ و ۱۰ برابر قطر توربین، با مدل ینسن و داده‌های آزمایشگاهی یک توربین بادی مقایسه کرده‌اند. نتایج حاصل نشان‌دهنده تطابق خوب داده‌های عددی با داده‌های آزمایشگاهی است. سپس آنها با استفاده از مدل ارائه شده خود و الگوریتم ژنتیک، چیدمان توربین‌های بادی در مزرعه بادی را بهینه کرده‌اند. از آنجایی که این مدل تطابق بیشتری با داده‌های آزمایشگاهی نسبت به مدل ینسن دارد، نتایج چیدمان بهینه‌سازی نیز به واقعیت نزدیک‌تر است.

تمرکز پژوهش های پیشین بیشتر بر روی بررسی عملکرد ایرودینامیکی توربین چند روتور در مقایسه با توربین تک روتور بوده است. با توجه به اینکه مطالعات چندانی در زمینه تحلیل جریان دنباله توربین چندروتور در مقایسه با توربین‌های بادی تک‌روتور انجام نشده است، اطلاعات حاصل از بررسی جریان دنباله برای تصحیح مدل های دنباله دور مورد استفاده در طراحی چیدمان مزارع بادی ضروری است. از مزایای این مدل های ریاضی سادگی آنها و کاهش حجم محاسبات در بهینه کردن چیدمان مزارع است. در پژوهش پیش رو، عملکرد آیرودینامیکی و رفتار جریان هوای پشت یک توربین بادی سه روتور کوچک با روش دینامیک سیالات محاسباتی مورد مطالعه قرار گرفته است. بدین منظور از یک نمونه توربین بادی محور افقی کوچک که در آزمایشگاه بادی دانشگاه شهید بهشتی، طراحی و ساخته شده و عملکرد آن به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته، جهت شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار استفاده شده است. نتایج حاصل از مدل سازی پس از راستی‌آزمایی به شکل میدان سرعت، شدت آشفتگی و خطوط جریان دنباله ارائه شده و با نتایج مدل سازی برای یک توربین بادی تک‌روتور مقایسه شده است. در پایان نتایج میدان سرعت در ناحیه پشت توربین بادی سه روتور با میدان سرعت پیش‌بینی شده توسط مدل‌های ویکی، برای توربین تک روتور معادل، مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

۲- روش‌های تحلیل جریان اطراف توربین بادی و مدل‌های جریان دنباله دور

برای بررسی کامل جریان اطراف توربین بادی، معمولا از روش‌های تجربی، عددی و یا مدل‌های جریان دنباله استفاده می‌گردد. یکی از روش های رایج عددی، استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی می‌باشد که اساس آن محاسبه رفتار سیال با استفاده از حل معادلات ناویر استوکس است. با توجه به ماهیت غیرخطی این معادلات برای سهولت در حل آنها، روش‌های مختلفی معرفی گردیده که یکی از موارد نسبتا دقیق و سریع در ارائه نتایج، استفاده از معادلات رینولدز میانگین است. این معادلات با میانگین گرفتن از معادلات ناویر استوکس و کاهش تاثیر نوسانات سرعت در معادلات، به حل معادلات سرعت می‌بخشند. برای محاسبه میزان نوسانات سرعت و آشفتگی جریان، مدل‌های جریان آشفته مختلفی معرفی گردیده‌اند که از جمله آنها می‌توان به مدل‌های دو معادله‌ای k-ε (محاسبه بر اساس میزان انرژی جنبشی جریان آشفته و نرخ اتلاف این انرژی)، k-ω (محاسبه بر اساس میزان انرژی جنبشی جریان آشفته و میزان فرکانس اتلاف این انرژی) و مدل انتقال تنش برشی (SST- Shear Stress Transport) اشاره کرد. مدل k-ε برای بررسی و تحلیل شرایط اثر دنباله و لایه تنش برشی مناسب بوده و نسبت به شرایط ورودی سیال حساس نمی‌باشد، اما در محاسبات رفتار سیال در کنار دیواره‌ها به خصوص هنگام ایجاد گرادیان فشار منفی دارای خطای بسیاری در محاسبات است. در مقابل مدل k-ω در نزدیکی لایه مرزی دیواره از دقت محاسباتی بالایی برخوردار است. مدل SST با ترکیب دو مدل فوق و استفاده از مدل k-ε در خارج از لایه مرزی اطراف دیواره و مدل k-ω در نزدیکی دیواره‌های شبیه‌سازی شده جریان آشفته را مدلسازی کرده و به همین علت از دقت بالایی در تحلیل و مدلسازی جریان آشفته برخوردار است[17].

علاوه بر مدل سازی عددی جریان دنباله که اطلاعات دقیقی از جریان در اختیار می‌گذارد، استفاده از مدل‌های ریاضی نیز جهت پیش‌بینی رفتار جریان دنباله، به ویژه در ناحیه دنباله دور، رایج هستند. این مدل‌ها با ارائه روابط ریاضی، به شکل ساده‌تر و سریع‌تر نسبت به روش دینامیک سیالات محاسباتی سرعت جریان پشت توربین را در فاصله محوری و شعاعی مختلف (در ناحیه دنباله دور) محاسبه می‌کنند که از این مدلها برای بهینه سازی چیدمان توربینهای بادی می‌توان استفاده کرد. از معروف‌ترین مدل‌های جریان دنباله دور، مدل دنباله ینسن می‌باشد. این مدل با استفاده از قانون بقای جرم و با فرض عدم تغییر سرعت جریان در طول شعاع دنباله، رابطه ۱ را برای محاسبه سرعت جریان دنباله ارائه می‌دهد[14].

$$\frac{u_w}{u_0} = 1 - \frac{2a}{\left(1 + {2kx}/{D_r}\right)^2} \qquad (۱)$$

که در آن، u_w سرعت ناحیه دنباله و u_0 سرعت جریان آزاد هوا می‌باشد. k میزان شیب افزایش قطر جریان دنباله است و طبق نتایج آزمایشگاهی انجام شده ۰/۰۴ در نظر گرفته می‌شود[15]. پارامتر x فاصله محوری از صفحه روتور توربین بادی و پارامتر a ضریب القایی محوری سرعت می‌باشد. که با رابطه ۲ محاسبه می شود[14].

$$a = \frac{1 - \sqrt{1 - C_T}}{2} \qquad (۲)$$

که در آن پارامتر C_T ضریب تراست توربین بادی می‌باشد.

یکی دیگر از مدل‌های جریان دنباله دور، مدل گوسیان است. این مدل بر خلاف مدل ینسن تغییرات جریان در شعاع را به صورت توزیع نرمال بیان کرده و از معادلات بقای مومنتوم برای محاسبه سرعت دنباله استفاده می‌کند. رابطه ۳ نحوه محاسبه تغییرات سرعت جریان دنباله در این مدل را نشان می‌دهد[15].

$$\frac{\Delta u}{u_0} = \left(1 - \sqrt{1 - \frac{C_T}{8\left({\sigma}/{d_0}\right)^2}}\right) \times exp\left(-\frac{1}{2\left({\sigma}/{d_0}\right)^2}\left\{\left(\frac{r}{d_0}\right)^2\right\}\right) \qquad (۳)$$

که در آن پارامتر σ نشان دهنده انحراف از معیار سرعت ناحیه دنباله با توجه به شکل نرمال مدل گوسیان در فاصله محوری x ، CT ضریب نیروی محوری وارد بر توربین، d0 قطر توربین و r شعاع جریان دنباله می‌باشد[15].

مدل جریان لارسن یکی دیگر از مدل‌های جریان دنباله دور بوده که متقارن و سهموی است. این مدل از معادلات رینولدز میانگین با صرف نظر از تغییرات فشار در طول جریان دنباله استفاده می‌کند.

با فرض اینکه اختلاف سرعت جریان دنباله و جریان محیط اطراف در ناحیه شعاع دنباله صفر بوده و در معادلات بقای مومنتوم سرعت جریان هوای آزاد بسیار بیشتر از اختلاف سرعت جریان دنباله و جریان هوای آزاد است، رابطه ۴ برای توصیف جریان ارائه می‌شود[18]:

$$\Delta u(x,r) = -\frac{u_0}{9}\left[C_T A(x+x_0)^{-2}\right]^{1/3}\left\{r^{\frac{3}{2}}(3c_1{}^2 C_T A(x+x_0))^{-0.5} - \left(\frac{35}{2\pi}\right)^{0.3}(3c_1{}^2)^{-0.2}\right\} \quad (۴)$$

پارامترهای به کار برده شده در معادله ٤ از جمله x_0 و c_1 تنها وابسته به ابعاد توربین می‌باشند و برای سادهنویسی معادله به کار برده شده‌اند[18].

مدل دیگری که برای جریان دنباله استفاده می شود، مدل جریان ینسن-گوسیان است. در این مدل مانند مدل گوسیان، توزیع سرعت جریان به صورت نرمال فرض می‌گردد. سپس دو شرط مرزی برای حل معادله نرمال مورد استفاده قرار می‌گیرد. اولین شرط برابری دبی جریان پشت توربین با دبی جریان محاسبه شده از رابطه مدل ینسن است. در شرط دوم سرعت جریان در ناحیه شعاع دنباله برابر سرعت جریان آزاد فرض می‌گردد. در نتیجه دو رابطه ۵ و ٦ به ترتیب برای مرکز و توزیع شعاع جریان دنباله ارائه شده است[16].

$$u^* = u_0\left[(1-2a)/(1+{}^{kx}/_{r_1})^2\right] \quad (۵)$$

$$u = u_0 - (u_0 - u^*)\frac{5.16}{\sqrt{2\pi}} \times e^{\frac{-r^2}{2(\frac{r_x}{2.58})^2}} \quad (۶)$$

$$r_x = kx + r_1 \quad (۷)$$

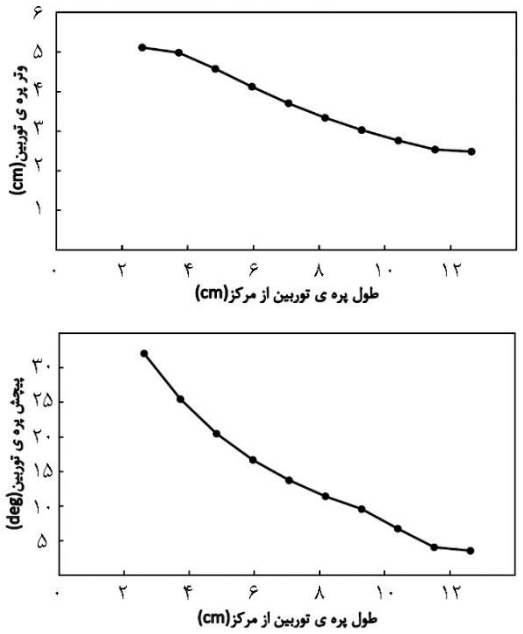
در این روابط r_1 شعاع جریان دنباله بلافاصله پس از توربین، u^* سرعت جریان دنباله در مرکز و u سرعت جریان در توزیع شعاع دنباله می‌باشد[16].

۳- مدلسازی هندسه توربین بادی تک‌روتور

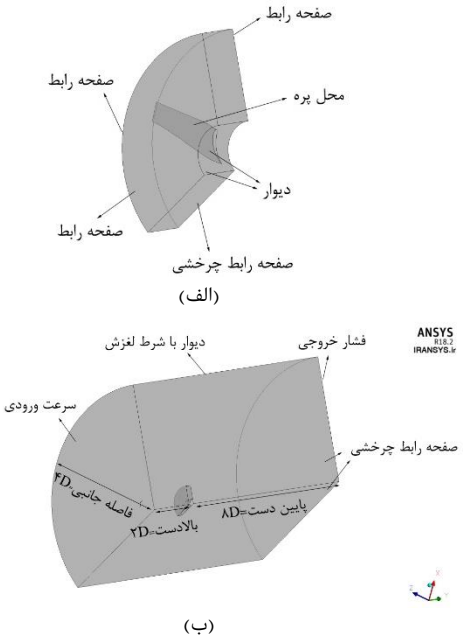
در این بخش هندسه توربین بادی محور افقی کوچکی که توسط شیرزاده آجرلو و همکاران[19] به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت ، برای مدل‌سازی استفاده شد. روتور، توربین کوچکی با قطر ۲۵ سانتی‌متر، با سطح مقطع ایرفویل ناکا ٤٤١٢ می‌باشد که توزیع وتر و توزیع زاویه پیچش آن در شکل ۱ نشان داده شده است. نتایج به‌دست آمده از آزمایش نشان می‌دهند که این توربین در نسبت سرعت طراحی ۳/۳ بیشترین راندمان معادل با ۰/۳۶ را خواهد داشت[19].

برای شبیه‌سازی هندسه توربین بادی تک‌روتور، یک سوم پره به همراه فضای اطراف در نظر گرفته شده است. در شکل ۲ فضای جریان نزدیک پره و جریان اطراف توربین بادی به همراه ابعاد در نظر گرفته شده نشان داده شده است.

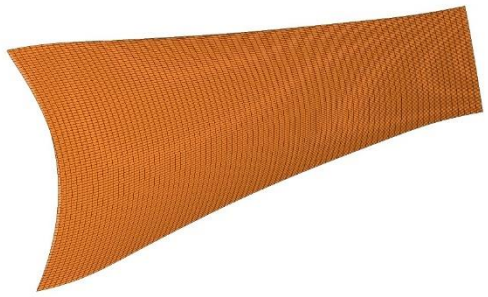
نحوه شبکه‌بندی هندسه پره مورد نظر در شکل ۳ آورده شده است. برای پره و فضای دوار اطراف آن از شبکه‌بندی سازمان‌یافته با y^+ کمتر از ۱ (۰/۹) استفاده گردیده است.



شکل ۱) توزیع وتر و زاویه پیچش در طول پره توربین بادی مورد نظر



شکل ۲) پره و توربین؛ الف) فضای اطراف پره، ب) فضای اطراف توربین



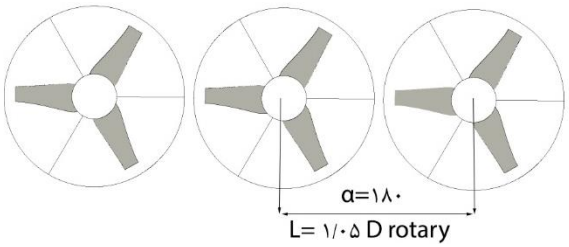
شکل ۳) نحوه اجرای ایجاد لایه مرزی بر روی دیواره پره

نوع شرایط مرزی استفاده شده برای شبیه‌سازی توربین تک روتور در شکل‌های ۲-الف و ۲-ب نشان داده شده است[20].سرعت جریان ورودی هوای آزاد ۴ متر بر ثانیه در نظر گرفته می‌شود و مقدار سرعت زاویه‌ای برای هر میزان نسبت سرعت راس پره (λ) تغییر می‌کند. تعداد المان مش سازمان‌یافته پس از اجرای فرآیند استقلال از مش با مقایسه پارامتر ضریب توان توربین بادی و ثابت شدن مقدار آن، برابر با ۳۳۹۲۴۹۳ المان برای شبیه‌سازی کل فضا در نظر گرفته شده است. همچنین گام زمانی برابر مقدار زمانی است که طول می‌کشد تا توربین ۱ درجه را طی کند که در این مورد برابر با ۰/۰۰۰۱۶۵ ثانیه و کل زمان شبیه‌سازی برابر با ۰/۰۵۹۴ ثانیه می‌باشد.

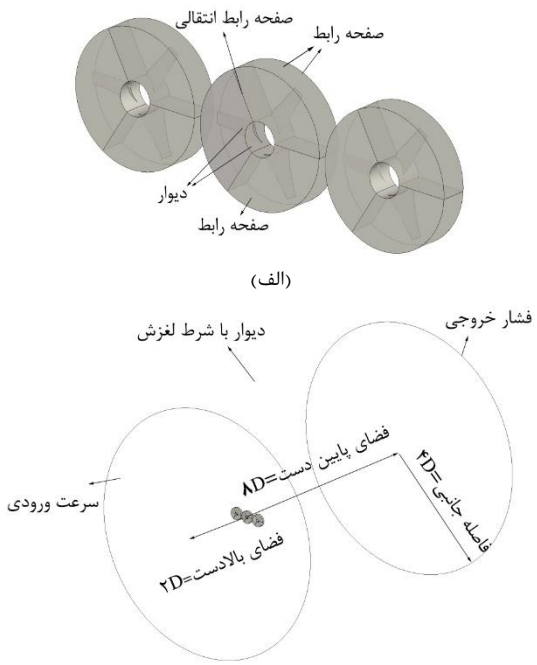
۴- مدلسازی هندسی توربین بادی سه‌روتور

برای بررسی عملکرد توربین بادی چندروتور، یک نمونه توربین بادی ۳ روتور در نظر گرفته می‌شود. از عوامل موثر در عملکرد یک توربین بادی چندروتور، نحوه قرارگیری روتورها در کنار یکدیگر و فاصله آنها از هم می‌باشد. در واقع چیدمان روتورها، زمانی مناسب خواهد بود که در کمترین فاصله ممکن (برای اشغال حداقل فضا در مزرعه بادی) و با زاویه مناسب در کنار یکدیگر قرار گیرند. تحقیقات آزمایشگاهی اولی گلتن بات[7] مبنای تعیین این مقادیر در مدل سازی حاضر بوده است. لذا در این پژوهش، چیدمانی از روتورها با زاویه ۱۸۰ درجه و با فاصله جانبی ۰/۲ قطر یک روتور جهت بررسی جریان پشت توربین بادی سه روتور انتخاب گردیده است که در شکل ٤ نشان داده شده است. شکل ۵ شبیه‌سازی این نوع توربین سه روتور در نرم‌افزار را نشان می‌دهد. توربین مورد استفاده برای روتورهای توربین سه روتور، توربین شبیه‌سازی شده در بخش قبل، یعنی توربین با قطر ۲۵ سانتی‌متر می‌باشد. برای این منظور فضای مدل‌سازی با مشخصات هندسی ارائه شده در شکل ۵-ب ساخته شده است. در این شکل D قطر توربین سه‌روتور می‌باشد.

سرعت جریان ورودی هوای آزاد ٤ متر بر ثانیه و مقدار سرعت زاویه‌ای برای نسبت سرعت راس طراحی (λ=۳/۳) ۱۰۵ rad/s در نظر گرفته شده است. از مش اجرا شده برای توربین تک روتور، این بار برای توربین بادی سه روتور استفاده می‌گردد. تعداد المان‌های مش در این حالت ۳۰،۸۰۲،٦۹۳ می‌باشد. در شکل‌های ۵-الف و



شکل ۴) چیدمان توربین‌ها در کنار یکدیگر



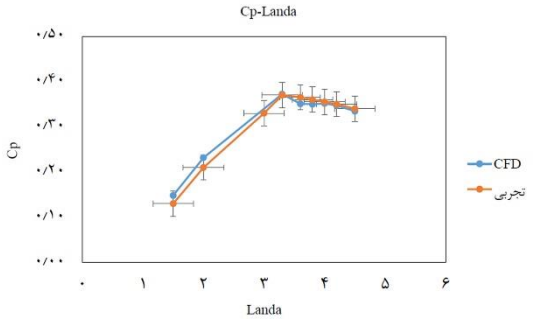
شکل ۵) شرایط مرزی توربین بادی سه‌روتور؛ الف) قسمت دوار توربین، ب) توربین

۵-ب شرایط مرزی فضای دوار و ثابت اطراف توربین بادی سه روتور به ترتیب مشخص شده است. در این شبیه‌سازی گام زمانی برابر با ۰/۰۰۰۱۶۵ ثانیه و کل زمان شبیه‌سازی برابر ۰/۱۱۸۸ ثانیه می‌باشد. بخش پره و هاب توربین به صورت دیواره تعریف شده است. سایر فضاها شامل فضای ورودی و خروجی جریان و صفحات در تلاقی با هم مطابق با آنچه در شکل ۵-الف نشان داده شده، صفحات رابط تعریف گردیده‌اند.

۵- نتایج تحلیل جریان اطراف توربین بادی تک روتور

در ابتدا برای اعتبارسنجی نتایج به دست آمده، نمودار ضریب توان بر حسب نسبت سرعت راس پره رسم شده و نتایج آن با داده‌های آزمایشگاهی صورت گرفته بر روی آن، مقایسه می‌شود. همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است، نمودار تغییرات ضریب توان مطابق نتایج آزمایشگاهی بوده و بیشترین اختلاف در نسبت سرعت ۳/۶ مشاهده می‌شود که برابر ۴/۲ درصد است.

اختلافی که بین نتایج به‌دست آمده از طریق آزمایش و شبیه-سازی وجود دارد می‌تواند به دلیل عدم ثبات سرعت باد ورودی توسط سیمولاتور، اتلاف زیاد ژنراتور و ایزوله نبودن شرایط آزمایشگاه باشد. از سوی دیگر به دلیل محدودیت فضای آزمایشگاهی، موقعیت سیمولاتور در نزدیکی دیوار می‌باشد که همین نیز می‌تواند عاملی برای ایجاد خطا باشد. همچنین شبیه سازی عددی با حل معادلات رینولدز میانگین و مدل آشفتگی رینولدر متوسط $k-w\ SST$ میدان واقعی جریان را با تقریب مدل می کنند.

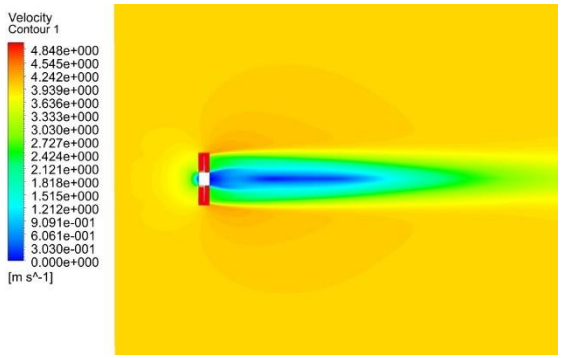


شکل ۶) مقایسه نتایج داده‌های شبیه‌سازی توربین بادی تک‌روتور و نتایج داده‌های آزمایشگاهی

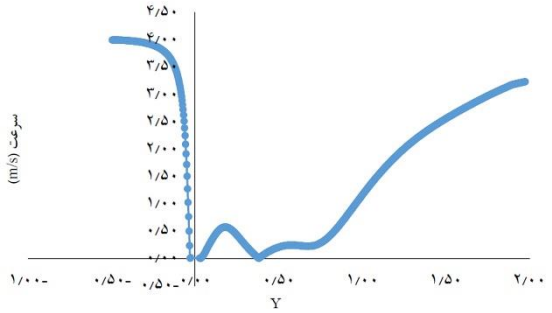
شکل ۷-الف و ۷-ب به ترتیب کانتور و نمودار تغییرات سرعت را در بالادست روتور و پائین‌دست آن در ناحیه دنباله پشت توربین تا فاصله ۸ برابر قطر توربین برای سرعت جریان هوای مرجع ۴ متر بر ثانیه نشان می‌دهد. در ناحیه اثر دنباله نزدیک که دو تا سه برابر قطر توربین (۵۰ تا ۷۵ سانتی متر) است، سرعت به حداقل مقدار خود، ۰/۳ متر بر ثانیه، می‌رسد. پس از آن با انتقال مومنتم از جریان آزاد اطراف توربین به جریان هوای پشت آن، میزان آشفتگی جریان کاهش یافته و سرعت آن افزایش می‌یابد. بیشینه سرعت در محل روتور و در شعاعی بیش از شعاع پره اتفاق می‌افتد که مقدار سرعت نسبی به ۱۴/۲ متر بر ثانیه میرسد که برای مشخص شدن ناحیه دنباله دور و نزدیک با وضوح بیشتر، بازه کنتور سرعت تا سرعت آزاد محدود شده است. با حرکت در راستای محوری، موقعیت شعاعی این سرعت بیشینه افزایش می‌یابد. این حاکی از گسترش دنباله در راستای شعاعی است. پس از اثر دنباله نزدیک، اثر دنباله دور آغاز گردیده و تا بیش از ۸ برابر قطر توربین (2 متر) ادامه دارد. همانطور که در شکل ۷-ب نشان داده شده است، در این بازه نیز سرعت مرکز جریان از مقدار ۱/۲ متر بر ثانیه شروع و در فاصله ۸ برابر قطر توربین به حدود ۳/۲۵ متر بر ثانیه می‌رسد.

شکل ۸، انرژی جنبشی جریان آشفته (Turbulence Kinetic Energy) در اطراف توربین بادی تک روتور را نشان می‌دهد. روی پره و در ناحیه دنباله نزدیک، بیشترین میزان آشفتگی مشاهده می‌گردد. در ناحیه دنباله دور جریان‌های پشت توربین ترکیب شده و با غلبه جریان اطراف و اتلاف انرژی جنبشی جریان آشفته در طول مسیر، از میزان آشفتگی کاسته می‌شود و به تدریج در فاصله ۳ برابر قطر توربین میزان انرژی جنبشی جریان آشفته به صفر می‌رسد و سرعت به آرامی شروع به بازیابی می‌کند.

شکل ۹ خطوط جریان در اطراف توربین بادی تک روتور را نشان می‌دهد. سرعت در نزدیکی توربین و در بالادست جریان به علت جریان‌های القایی ناشی از روتور کاهش می‌یابد. همانطور که در شکل مشاهده می شود، در ناحیه دنباله دور، بر اثر ورود هوای اطراف با مومنتوم بیشتر به درون جریان، سرعت جریان افزایش می‌یابد.

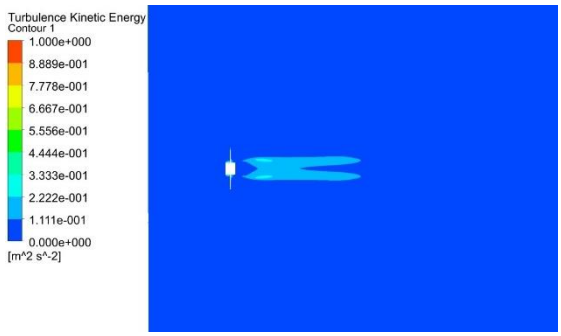


(الف)

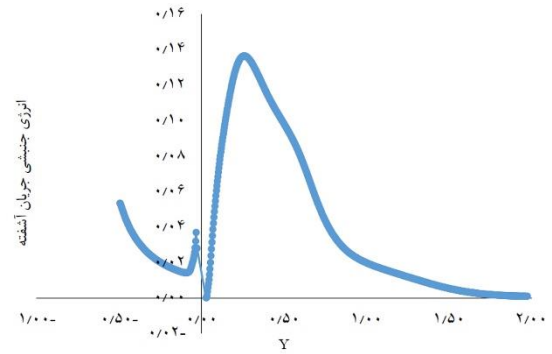


(ب)

شکل ۷) تغییرات سرعت؛ الف) کانتور تغییرات سرعت جریان هوا قبل و بعد از توربین بادی ؛ ب) نمودار تغییرات سرعت روی خط عبوری از محور توربین در راستای Y

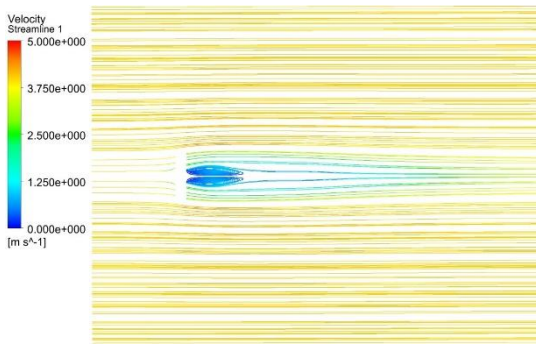


(الف)



(ب)

شکل ۸) تغییرات انرژی جنبشی؛ الف) کانتور ت نحوه تغییرات انرژی جنبشی جریان آشفته بعد از توربین بادی تک روتور در ثانیه ۰/۰۵۹٤ ثانیه، ب) نمودار تغییرات انرژی جنبشی جریان آشفته روی خط محوری در جهت Y



شکل ۹) نحوه عبور جریان در اطراف یک توربین بادی تک روتور در ثانیه ۰/۰۵۹۴

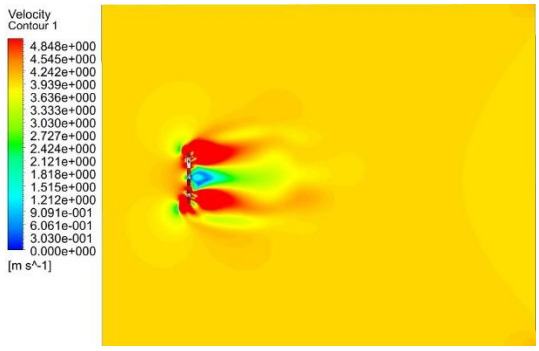
۶- نتایج حاصل از تحلیل جریان توربین بادی سه روتور

نتایج شبیه سازی جریان دنباله ناشی از سه‌روتور با استفاده از معادلات رینولدز میانگین در شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ نشان داده شده است. در شکل ۱۰ کانتور سرعت در ناحیه‌های بالادست و پائین‌دست روتور نشان داده شده‌اند. در ناحیه دنباله نزدیک که مطابق شکل ۱۰-الف بین فاصله محوری ۰/۵D تا ۱D قرار دارد و مطابق شکل۱۰-ب سرعت جریان در روی خط عبوری از مرکز توربین میانی، از ۱ متر بر ثانیه به ۲/۷ متر بر ثانیه می‌رسد. در این ناحیه جریان دارای گرادیان فشار مثبت حاصل از هر سه روتور، با یکدیگر ترکیب شده و یک فضای هسته جریان کاهنده، در پشت توربین‌ها ایجاد می‌کند.

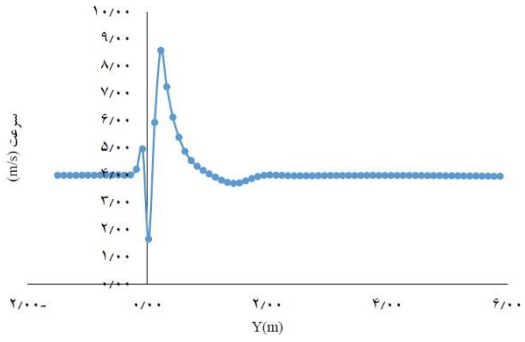
در نمودارهای ۱۰-پ و ۱۰-ت، به ترتیب سرعت روی خط عبوری از محور توربین بالا و توربین پایین در امتداد محور Y نشان داده شده است. همانطور که در شکلهای ۱۰-پ و ۱۰-ت مشخص است، به دلیل انبساط دنباله توربین میانی، عبور جریان با سرعت بالا از فاصله بین توربین‌ها و و برهم کنش دنباله ها بازیابی سرعت در پشت توربین‌های مجاور سریع تر صورت گرفته و دنباله آنها کوتاه‌تر می‌باشد. هرچند که به دلیل بالا بودن آشفتگی در این نواحی امکان استفاده از این سرعت بالا وجود ندارد.

شکل ۱۱ نحوه تغییرات شدت انرژی جنبشی جریان آشفته را برای توربین بادی سه‌روتور نشان می‌دهد. مطابق شکل با توجه به ترکیب جریان‌های گردابه‌ای نوک پره هر دو روتور کنار هم، میزان آشفتگی جریان در این نواحی بسیار بالاتر است. در توربین بادی سه روتور انرژی جنبشی جریان آشفته در جهت شعاعی افزایش پیدا می‌کند به همین جهت میزان سرعت بادی ورودی، در توربین-های کناری کمی بیشتر از سرعت جریان آزاد هوا خواهد بود.

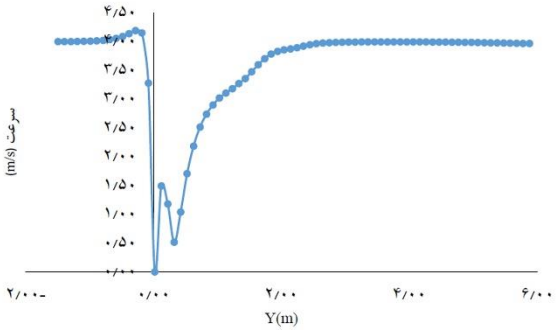
شکل ۱۲ نحوه عبور جریان از اطراف توربین بادی سه روتور ترکیب جریان پشت سه‌روتور را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است جریان‌های گردابه‌ای ایجاد شده در نوک پره‌های هر یک از سه روتور که با یکدیگر ارتباط دارند، به واسطه توسعه شعاعی دنباله، به سمت خارج سوق داده می‌شود. در پشت توربین، سرعت دنباله جریان ناشی از توربین‌های مجاور در جهت شعاعی خلاف جهت سرعت دنباله مربوط به توربین میانی می‌باشد. همین امر سبب خنثی سازی اثر مولفه عمود بر راستای جریان اصلی هر توربین توسط توربین مجاور خود شده و با جمع شدن مولفه های هم راستای جریان، طول دنباله کاهش می یابد.



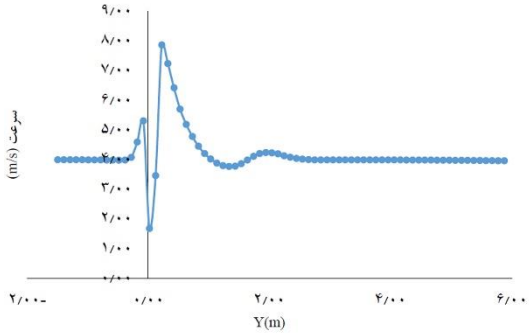
(الف)



(پ)

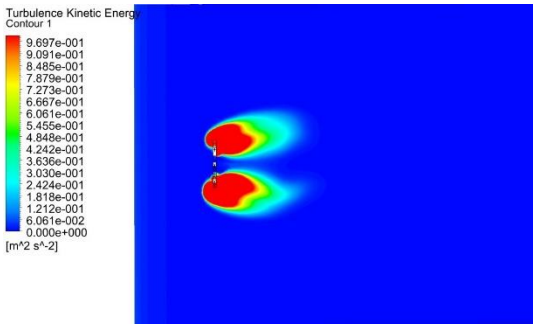


(ب)

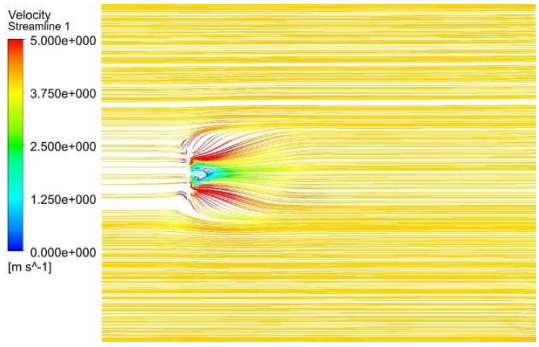


(ت)

شکل ۱۰) تغییرات سرعت؛ الف) جریان هوا قبل و بعد از توربین بادی سه روتور در ثانیه ۰./۱۱۸۸ ثانیه، ب) جریان روی محور توربین میانی در جهت Y، پ) روی محور توربین بالا در جهت Y ت) روی محور توربین پایین در جهت Y



شکل ۱۱) نحوه تغییرات شدت انرژی جنبشی آشفتگی اطراف توربین بادی سه روتور



شکل ۱۲) نحوه عبور جریان از اطراف توربین بادی سه روتور

۷- مقایسه انواع مدل های جریان برای یک توربین بادی

در این بخش با استفاده از شبیه سازي انجام شده، پروفیل مقدار تغییرات سرعت در هر فاصله مورد نظر را به دست مي‌آوریم. با توجه به اینکه مدل‌هاي جریان دنباله معرفي شده براي پیش بیني جریان در ناحیه دنباله دور، استفاده مي‌شوند، لذا فاصله‌هاي مورد نظر براي بررسي به ترتیب ٤D، ٦D و ٨D در نظر گرفته مي‌شود. سپس با بررسي پروفیل سرعت در هر یك از فواصل بالا و همچنین بررسي مدل‌هاي دنباله دور براي هر کدام، بهترین مدل براي پیش بیني جریان پشت توربین را به دست مي‌آوریم.

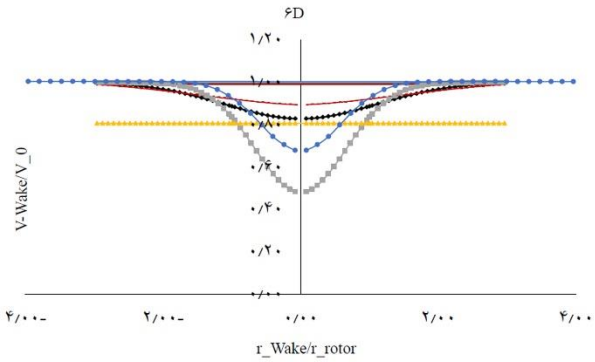
مطابق شکل ۱۳ در فاصله ٤D مدل ینسن – گوسیان مطابقت خوبی با نتایج به‌دست آمده برای توربین تک روتور با قطر ۲۵ سانتی متری را دارد. اما در فواصل ٦D و ٨D مطابقت چندان خوبی نشان نمی‌دهد که ناشی از عدم توسعه کامل دنباله در پشت توربین و کم بودن زمان شبیه‌سازی می‌باشد.

در این شبیه‌سازی به دلیل محدودیت در زمان و منابع امکان شبیه‌سازی زمانی بیش از این وجود نداشت. انتظار می‌رود با توسعه کامل جریان در پشت توربین، مدل ینسن- گوسیان بتواند پیش‌بینی مناسبی از ویک ایجاد شده در پشت توربین داشته باشد.

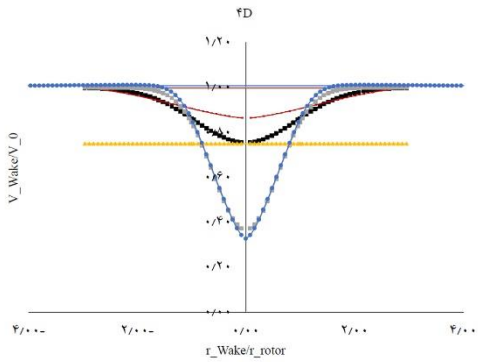
شکل ١٤ نتایج به‌دست آمده از مدل‌های پیش‌بینی را با نتایج حاصل از شبیه‌سازی مقایسه می‌کند. قطر معادل برای توربین بادی سه روتور برابر ٤٤ سانتی متر است که طبق رابطه زیر محاسبه شده است:

$$r_{eq} = \sqrt{n \times r^2{}_1} \qquad (۸)$$

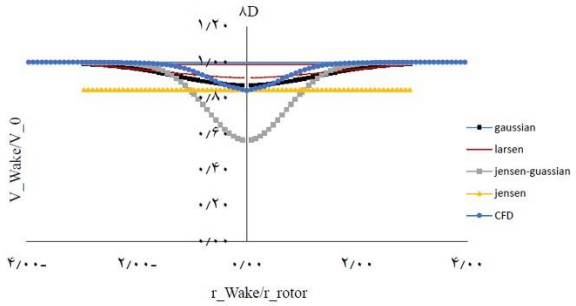
با توجه به اینکه در توربین تک روتور مدل ینسن- گوسین به عنوان مدل مناسب انتخاب شد، مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی توربین سه روتور با مدل‌های ویکی که برای توربین بادی تک روتور معادل انجام شده نشان می‌دهد که بر خلاف پیش‌بینی‌هایی که توسط مدل ویکی ینسن- گوسین انجام شده است، سرعت در



(ب)

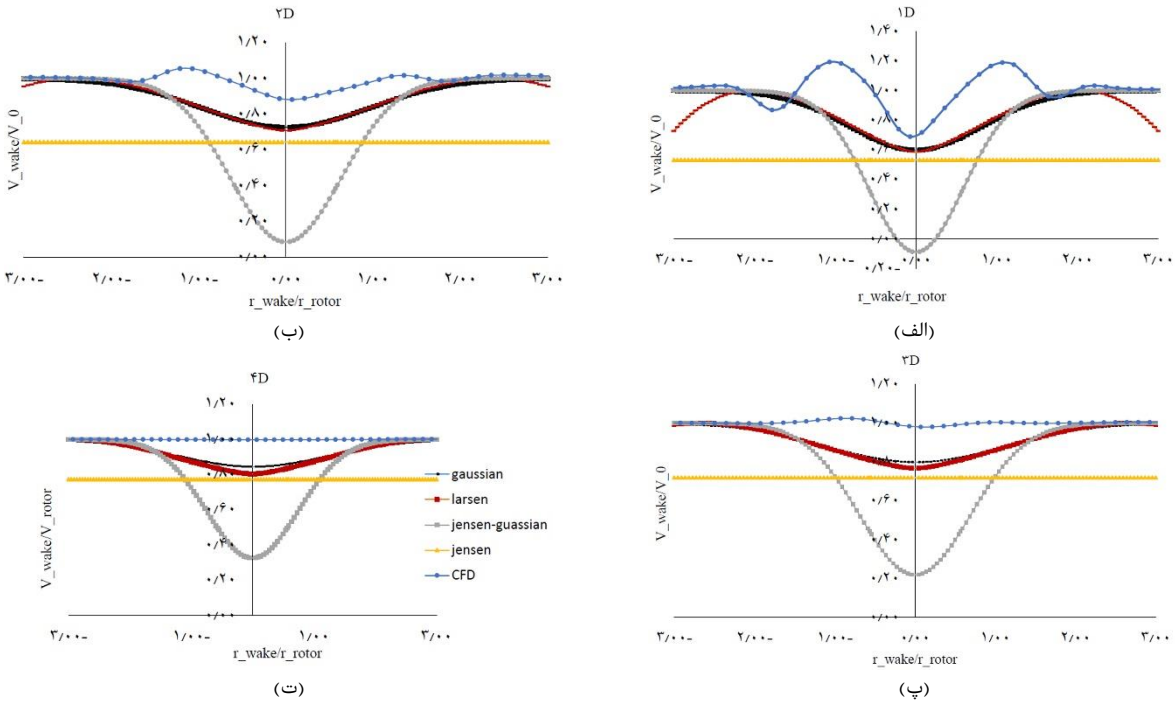


(الف)



(پ)

شکل ۱۳) مقایسه پروفیل‌هاي سرعت حاصل از نتایج عددی با استفاده از مدل‌هاي جریان دنباله در فاصله‌های طولی مختلف برای توربین بادی تک- روتور



شکل ۱۴) مقایسه پروفیل‌هاي سرعت حاصل از نتایج عددی با استفاده از مدل‌هاي جریان دنباله برای توربین معادل با قطر ۴۴ سانتی متر در فاصله‌های طولی مختلف برای توربین بادی سه‌روتور

پشت توربین بادی سه روتور، بسیار سریع‌تر به سرعت جریان هوای آزاد می‌رسد. این نکته اهمیت به‌سزایی در طراحی چیدمان مزارع بادی دارد و امکان کاهش فاصله روتور پایین دستی از روتور بالا دستی را فراهم می‌آورد. شکل پروفیل سرعت در توربین سه روتور دارای دو قله نیز می‌باشد که به دلیل وجود فاصله جانبی بین دو روتور، و عبور جریان با سرعت بالا از این ناحیه می‌باشد.

۸- نتایج

در این پژوهش، رفتار جریان دنباله توربین بادی سه‌روتور با استفاده از روش عددی دینامیک سیالات محاسباتی شبیه‌سازی گردید. بدین منظور یک توربین بادی محور افقی کوچک با قطر ۲۵ سانتی‌متر طراحی شده و جهت راستی آزمایی با نتایج تجربی موجود مقایسه شد. پس از بررسی انواع مدل‌های دنباله و مقایسه آن با پروفیل‌های سرعت مشخص شد که در صورت افزایش زمان شبیه‌سازی مدل ویکی ینسن- گوسیان می‌تواند تطابق بهتری با نتایج به‌دست آمده از طریق شبیه‌سازی داشته باشد. سپس با چیدمان سه توربین بادی تک‌روتور معرفی شده با قطر ۲۵ سانتی-متر که با زاویه ۱۸۰ درجه در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند، یک توربین بادی سه روتور ایجاد شد و شبیه‌سازی جریان مجددا بر روی این نوع توربین صورت گرفت. طبق این نتایج جریان دنباله ایجاد شده، متفاوت از جریان دنباله توربین بادی تک‌روتور بوده است. در توربین سه روتور به دلیل تداخل دنباله‌های سه روتور در پشت توربین، اثر دنباله‌های هر توربین توسط توربین مجاور خنثی می-شود و همین عامل سبب می‌شود تا سرعت در پشت توربین سه روتور سریع‌تر به سرعت جریان هوای آزاد برسد. در این حالت مقایسه نتایج شبیه‌سازی با نتایج حاصل از مدل ویکی ینسن گوسیان توربینی با قطر معادل سه روتور ، که در توربین تک روتور تطابق نسبتاً خوبی با نتایج شبیه‌سازی داشت، نشان می‌دهد که برخلاف پیش‌بینی‌های حاصل از مدل ویک، سرعت در فواصل کمتری از پشت توربین بازیابی می‌شود. همچنین بررسی مقادیر انرژی جنبشی جریان آشفته، در ناحیه دنباله توربین سه روتور، نشان از اتلاف سریع‌تر آن در فاصله محوری نزدیک‌تر به روتور را دارد. هر دو این نتایج دلالت بر این امر دارند که توربین‌های بادی سه روتور در مقایسه با توربین بادی تک‌روتور با مساحت معادل می‌توانند در فاصله محوری نزدیک‌تری نسبت به هم قرار گیرند که این امر می‌تواند در طراحی مزارع بادی تاثیر بسزایی داشته باشد.

تاییدیه اخلاقی: محتویات علمی حاصل فعالیت‌های پژوهشی نویسندگان بوده و صحت نتایج آن نیز بر عهده نویسندگان مقاله است.
تعارض منافع: در فرآیند انجام و گزارش، بی طرفی رعایت شده او تعارض منافعی وکود نداشته است.
منابع مالی: منابع مالی توسط نویسندگان تأمین شده است.

منابع

1-Jamieson P, Branney M. Multi-rotors; a solution to 20 MW and beyond?. Energy Procedia. 2012;24:52-9.

2-Verma P. Multi rotor wind turbine design and cost scaling.

3- Rosenberg A, Selvaraj S, Sharma A. A novel dual-rotor turbine for increased wind energy capture. InJournal of Physics: Conference Series 2014 (Vol. 524, No. 1, p. 012078). IOP Publishing.

4- Rosenberg A, Selvaraj S, Sharma A. A novel dual-rotor turbine for increased wind energy capture. InJournal of Physics: Conference Series 2014 (Vol. 524, No. 1, p. 012078). IOP Publishing.

5- Huang Q, Shi Y, Wang Y, Lu L, Cui Y. Multi-turbine wind-solar hybrid system. Renewable Energy. 2015;76:401-7.

6- Ohya Y, Miyazaki J, Göltenbott U, Watanabe K. Power augmentation of shrouded wind turbines in a multirotor system. Journal of Energy Resources Technology. 2017;139(5).

7-Goltenbott U., "Aerodynamics of Multi-Rotor Wind Turbine Systems using Diffuser-Augmentation," *Msc thesis,* 2017.

8- Vermeer LJ, Sørensen JN, Crespo A. Wind turbine wake aerodynamics. Progress in aerospace sciences. 2003;39(6-7):467-510.

9- Sanderse B, Van der Pijl SP, Koren B. Review of computational fluid dynamics for wind turbine wake aerodynamics. Wind energy. 2011;14(7):799-819.

10- Stevens RJ, Meneveau C. Flow structure and turbulence in wind farms. Annual review of fluid mechanics. 2017;49:311-39.

11- Barthelmie RJ, Pryor SC, Frandsen ST, Hansen KS, Schepers JG, Rados K, Schlez W, Neubert A, Jensen LE, Neckelmann S. Quantifying the impact of wind turbine wakes on power output at offshore wind farms. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2010;27(8):1302-17.

12- Hamilton N, Tutkun M, Cal RB. Wind turbine boundary layer arrays for Cartesian and staggered configurations: Part II, low-dimensional representations via the proper orthogonal decomposition. Wind Energy. 2015;18(2):297-315.

13- Chamorro LP, Porté-Agel F. Turbulent flow inside and above a wind farm: a wind-tunnel study. Energies. 2011;4(11):1916-36.

14- Göçmen T, Van der Laan P, Réthoré PE, Diaz AP, Larsen GC, Ott S. Wind turbine wake models developed at the technical university of Denmark: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016;60:752-69.

15- Bastankhah M, Porté-Agel F. A new analytical model for wind-turbine wakes. Renewable Energy. 2014;70:116-23.

16- Gao X, Yang H, Lu L. Optimization of wind turbine layout position in a wind farm using a newly-developed two-dimensional wake model. Applied Energy. 2016;174:192-200.

17- Larsen GC. A simple stationary semi-analytical wake model. Risø National Laboratory for Sustainable Energy, Technical University of Denmark. 2009.

18-W. D., Turbulence modeling for CFD, 3th edition, 2006.

19- Ajirlo KS, Tari PH, Gharali K, Zandi M. Development of a wind turbine simulator to design and test micro HAWTs. Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2021;43:100900.

20- Mo JO, Choudhry A, Arjomandi M, Lee YH. Large eddy simulation of the wind turbine wake characteristics in the numerical wind tunnel model. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2013;112:11-24.