



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 solution 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.

بررسی عملکرد آیرودینامیکی و میدان جریان اطراف یک توربین بادی 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

توربین‌های بادی رایج، برای تولید توان بالا نیاز به پره‌هایی با طول بسیار زیاد دارند. این مسئله مشکلاتی از قبیل نحوه ساخت پره‌های عظیم، افزایش هزینه 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 می‌دهد که مدل ویکی‌ینسن-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 تقریباً ۴ برابر قطر معادل توربین تک روتور نسبت به یکدیگر قرار گیرند.

کلیدواژه‌ها: توربین بادی، 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 توربین‌ها به گونه‌ای است که از تقسیم یک توربین بزرگ به ابعاد کوچک‌تر با مساحت معادل حاصل می‌شود. 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 علی‌رغم 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 توربین‌ها 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 توربین‌های چند روتور شامل ۴۵ توربین بادی در دسته‌های 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 ترانس 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 عکس‌العمل‌های 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 هوانگ (Qunwu Huang) و همکاران^[5]، به بررسی نحوه ساخت یک سیستم هیبریدی تولید توان با استفاده از پنل خورشیدی در روز و

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 به دست 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 به دست 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 به دست آمده را با شبیه‌سازی بر اساس معادلات گردابه‌ای بزرگ (Large Eddy Simulation) و همچنین داده‌های آزمایشگاهی یک نمونه توربین بادی محور افقی، مقایسه کرده‌اند. این مدل که در واقع از معادلات بقای مومنوم 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 ژیاوژیا (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.

توربین بادی چند روتور در شب پرداخته‌اند. در این پژوهش برای طراحی توربین چند روتور، ۸ توربین ۵۰ وات با یک توربین ۴۰۰ وات مقایسه شده‌اند. مقایسه نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد، ۸ توربین ۵۰ وات در سرعت‌های کمتر از ۷/۲ متر بر ثانیه توان بیشتری تولید می‌کنند و در سرعت‌های بالاتر نیز میزان تولید تقریبا یکسان است. یوجی اوها (Yuji Ohya) و همکاران^[6]، به مقایسه ضریب درگ و ضریب توان توربین بادی چند روتور دارای دیفیوزر پرداختند. دو و سه توربین دارای دیفیوزر در کنار یکدیگر قرار داده شده و ضریب درگ و ضریب توان با تغییر فاصله اندازه‌گیری محاسبه و با یک توربین بادی معمولی در همان شرایط مقایسه شده‌اند. طبق نتایج به دست 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 به دست آورد. با توجه به نتایج به دست آمده در چیدمان سه روتور با زاویه ۱۸۰ درجه و در فاصله ۰/۵ 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 به دست 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 (Barthelme) و همکاران^[11]، همیلتون (Hamilton) و همکاران^[12] و کامارو (Chamorro) و همکاران^[13] یافت. مطابق

در مقابل مدل $k-\omega$ در نزدیکی لایه مرزی دیواره از دقت محاسباتی بالایی برخوردار است. مدل SST با ترکیب دو مدل فوق و استفاده از مدل $k-\epsilon$ در خارج از لایه مرزی اطراف دیواره و مدل $k-\omega$ 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].

$$\frac{u_w}{u_0} = 1 - \frac{2a}{(1 + 2kx/D_r)^2} \quad (1)$$

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 می‌شود [14].

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

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].

$$\frac{\Delta u}{u_0} = \left(1 - \sqrt{1 - \frac{C_T}{8(\sigma/d_0)^2}} \right) \times \exp \left(-\frac{1}{2(\sigma/d_0)^2} \left\{ \left(\frac{r}{d_0} \right)^2 \right\} \right) \quad (3)$$

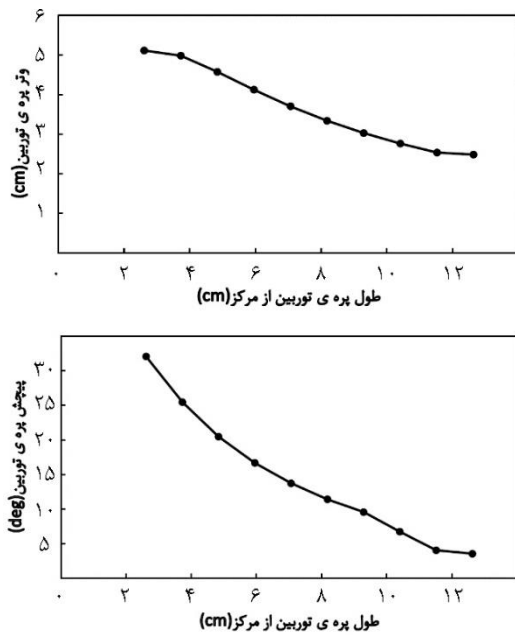
که در آن پارامتر σ نشان دهنده انحراف از معیار سرعت ناحیه دنباله با توجه به شکل نرمال مدل گوسیان در فاصله محوری x ، C_T ضریب نیروی محوری وارد بر توربین، d_0 قطر توربین و r شعاع جریان دنباله می‌باشد [15].

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.

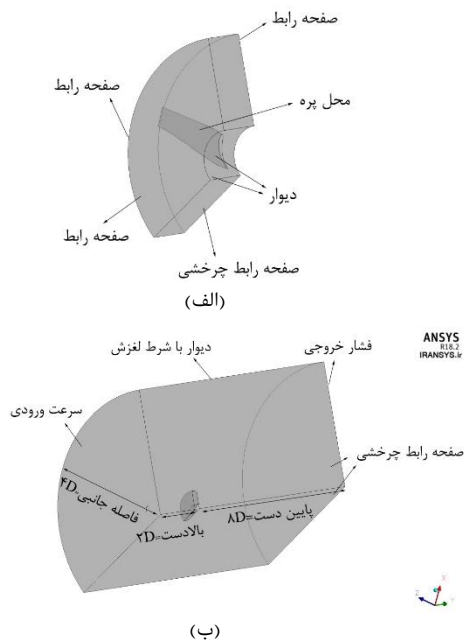
تمرکز پژوهش‌های پیشین بیشتر بر روی بررسی عملکرد ایرودینامیکی توربین چند روتور در مقایسه با توربین تک روتور بوده است. با توجه به اینکه مطالعات چندان در زمینه تحلیل جریان دنباله توربین چندروتور در مقایسه با توربین‌های بادی تک‌روتور انجام نشده است، اطلاعات حاصل از بررسی جریان دنباله برای تصحیح مدل‌های دنباله دور مورد استفاده در طراحی چیدمان مزارع بادی ضروری است. از مزایای این مدل‌های ریاضی ساده‌گی آنها و کاهش حجم محاسبات در بهینه کردن چیدمان مزارع است. در پژوهش پیش رو، عملکرد ایرودینامیکی 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

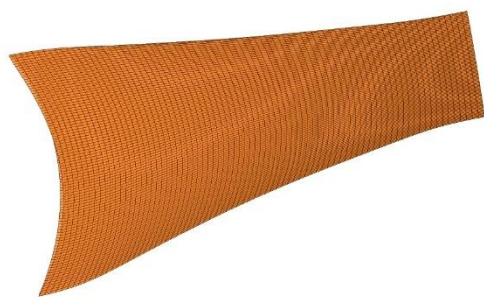
برای بررسی کامل جریان اطراف توربین بادی، معمولاً از روش‌های تجربی، عددی و یا مدل‌های جریان دنباله استفاده می‌گردد. یکی از روش‌های رایج عددی، استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی می‌باشد که اساس آن محاسبه رفتار سیال با استفاده از حل معادلات ناویر استوکس است. با توجه به ماهیت غیرخطی این معادلات برای سهولت در حل آنها، روش‌های مختلفی معرفی گردیده که یکی از موارد نسبتاً 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 $k-\epsilon$ (محاسبه بر اساس میزان انرژی جنبشی جریان آشفته و نرخ اتلاف این انرژی)، $k-\omega$ (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 $k-\epsilon$ 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 گردان فشار منفی دارای خطای بسیاری در محاسبات 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

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 می شود [18]:

$$\Delta u(x, r) = -\frac{u_0}{9} [C_{TA}(x + x_0)^{-2}]^{1/3} \left\{ r^3 (3c_1^2 C_{TA}(x + x_0))^{-0.5} - \left(\frac{35}{2\pi}\right)^{0.3} (3c_1^2)^{-0.2} \right\} \quad (4)$$

پارامترهای به کار برده شده در معادله ۴ از جمله c_1 و x_0 تنها وابسته به ابعاد توربین می باشند و برای سادگی معادله به کار برده شده اند [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 می گردد. سپس دو شرط مرزی برای حل معادله نرمال مورد استفاده قرار می گیرد. 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 می گردد. در نتیجه دو رابطه ۵ و ۶ به ترتیب برای مرکز و توزیع شعاع جریان دنباله ارائه شده است [16].

$$u^* = u_0 \left[(1 - 2a) / (1 + kx/r_1)^2 \right] \quad (5)$$

$$u = u_0 - (u_0 - u^*) \frac{5.16}{\sqrt{2\pi}} \times \frac{e^{-r^2}}{e^{2(2.58)^2}} \quad (6)$$

$$r_x = kx + r_1 \quad (7)$$

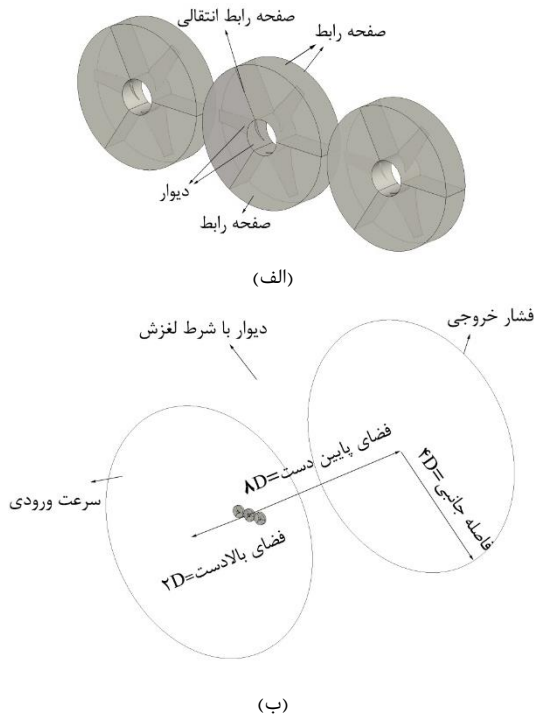
در این روابط r_1 شعاع جریان دنباله بلافاصله پس از توربین، u^* سرعت جریان دنباله در مرکز و u سرعت جریان در توزیع شعاع دنباله می باشد [16].

۳- مدل سازی هندسه توربین بادی تک روتور

در این بخش هندسه توربین بادی محور افقی کوچکی که توسط شیرزاده آجرلو و همکاران [19] به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت، برای مدل سازی استفاده شد. روتور، توربین کوچکی با قطر ۲۵ سانتی متر، با سطح مقطع ایرفویل ناکا ۴۴۱۲ می باشد که توزیع وتر و توزیع زاویه پیچش آن در شکل ۱ نشان داده شده است. نتایج به دست آمده از آزمایش نشان می دهند که این توربین در نسبت سرعت طراحی ۳/۳ بیشترین راندمان معادل با ۰/۳۶ را خواهد داشت [19].

برای شبیه سازی هندسه توربین بادی تک روتور، 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 شبکه بندی هندسه پره مورد نظر در شکل ۳ آورده شده است. برای پره و فضای دوار اطراف آن از شبکه بندی سازمان یافته با y^+ کمتر از ۱ (۰/۹) استفاده گردیده است.



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 0.000165 ثانیه و کل زمان شبیه‌سازی برابر 0.1188 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 $3/6$ مشاهده می‌شود که برابر $4/2$ درصد است.

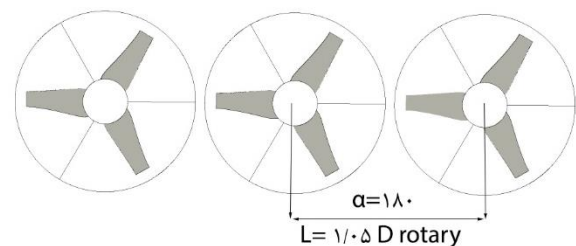
اختلافی که بین نتایج به دست آمده از طریق آزمایش و شبیه‌سازی وجود دارد می‌تواند به دلیل عدم ثبات سرعت باد ورودی توسط سیمولاتور، اتلاف زیاد ژنراتور و ایزوله نبودن شرایط آزمایشگاه باشد. از سوی دیگر به دلیل محدودیت فضای آزمایشگاهی، موقعیت سیمولاتور در نزدیکی دیوار می‌باشد که همین نیز می‌تواند عاملی برای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

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 3392493 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 0.000165 ثانیه و کل زمان شبیه‌سازی برابر با 0.0594 ثانیه می‌باشد.

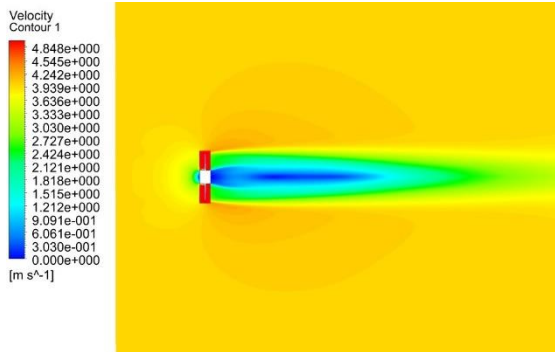
۴- مدل‌سازی هندسی توربین بادی سه‌روتور

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 180 درجه و با فاصله جانبی 0.2 قطر یک روتور جهت بررسی جریان پشت توربین بادی سه روتور انتخاب گردیده است که در شکل ۴ 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 25 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.

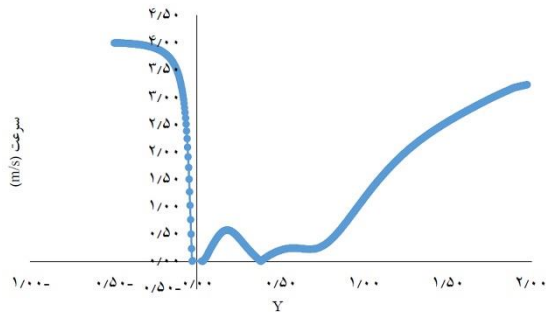
سرعت جریان ورودی هوای آزاد ۴ متر بر ثانیه و مقدار سرعت زاویه‌ای برای نسبت سرعت راس طراحی $(\lambda=3/3)$ 105 rad/s در نظر گرفته شده است. از مش اجرا شده برای توربین تک روتور، این بار برای توربین بادی سه روتور استفاده می‌گردد. تعداد المان‌های مش در این حالت $30,802,693$ می‌باشد. در شکل‌های ۵-الف و



شکل ۶) چیدمان توربین‌ها در کنار یکدیگر

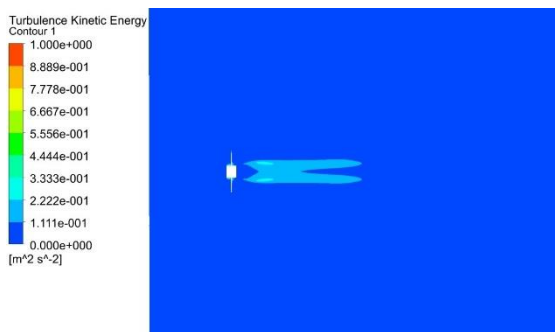


(الف)

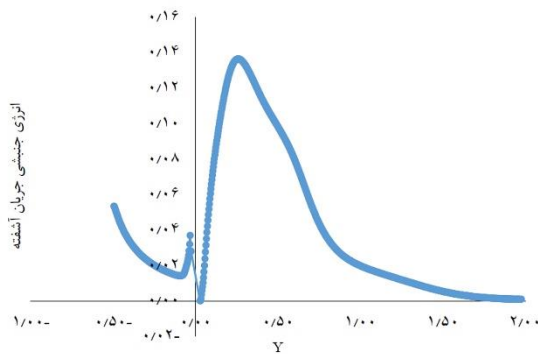


(ب)

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

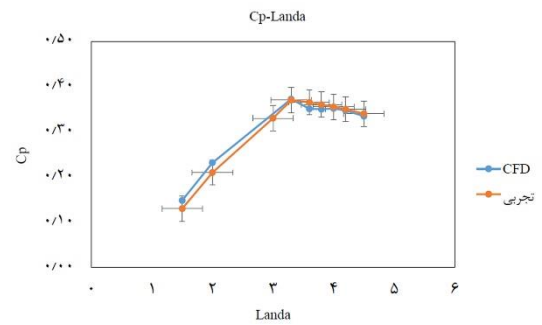


(الف)



(ب)

شکل ۸ تغییرات انرژی جنبشی؛ الف) کانتور نحوه تغییرات انرژی جنبشی جریان آشفته بعد از توربین بادی تک روتور در ثانیه ۰/۰۵۹۴، ب) نمودار تغییرات انرژی جنبشی جریان آشفته روی خط محوری در جهت Y



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 آشفته‌گی 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 کانتور 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 (۲ 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.

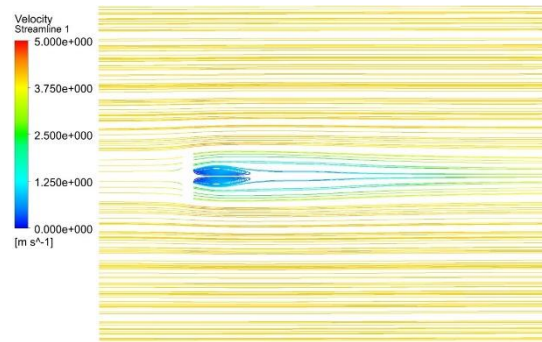
شکل ۸، انرژی جنبشی جریان آشفته (Turbulence Kinetic Energy) در اطراف توربین بادی تک روتور را نشان می‌دهد. پره و در ناحیه دنباله نزدیک، بیشترین میزان آشفته‌گی مشاهده می‌گردد. در ناحیه دنباله دور جریان‌های پشت توربین ترکیب شده و با غلبه جریان اطراف و اتلاف انرژی جنبشی جریان آشفته در طول مسیر، از میزان آشفته‌گی 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 می‌شود، در ناحیه دنباله دور، بر اثر ورود هوای اطراف با مومنتوم بیشتر به درون جریان، سرعت جریان افزایش می‌یابد.

است. همانطور كه در شكلهاى ۱۰-پ و ۱۰-ت مشخص است، به دليل انبساط دنباله توربين ميانى، عبور جريان با سرعت بالا از فاصله بين توربينها و برهم كنش دنباله ها بازيابى سرعت در پشت توربينهاى مجاور سريع تر صورت گرفته و دنباله آنها کوتاهتر مى باشد. هرچند كه به دليل بالا بودن آشفتگى در اين نواحى امكان استفاده از اين سرعت بالا وجود ندارد.

شكل ۱۱ نحوه تغييرات شدت انرژى جنبشى جريان آشفته را براى توربين بادی سه روتور نشان مى دهد. مطابق شكل با توجه به تركيب جريانهاى گردابه اى نوک پره هر دو روتور کنار هم، ميزان آشفتگى جريان در اين نواحى بسيار بالاتر است. در توربين بادی سه روتور انرژى جنبشى جريان آشفته در جهت شعاعى افزايش پيدا مى كند به همين جهت ميزان سرعت بادی ورودى، در توربينهاى كنارى كمى بيشتر از سرعت جريان آزاد هوا خواهد بود.

شكل ۱۲ نحوه عبور جريان از اطراف توربين بادی سه روتور تركيب جريان پشت سه روتور را نشان مى دهد. همانطور كه مشخص است جريانهاى گردابه اى ايجاد شده در نوک پره هاى هر يك از سه روتور كه با يكديگر ارتباط دارند، به واسطه توسعه شعاعى دنباله، به سمت خارج سوق داده مى شود. در پشت توربين، سرعت دنباله جريان ناشى از توربينهاى مجاور در جهت شعاعى خلاف جهت سرعت دنباله مربوط به توربين ميانى مى باشد. همين امر سبب خنثى سازى اثر مولفه عمود بر راستاى جريان اصلى هر توربين توسط توربين مجاور خود شده و با جمع شدن مولفه هاى هم راستاى جريان، طول دنباله کاهش مى يابد.

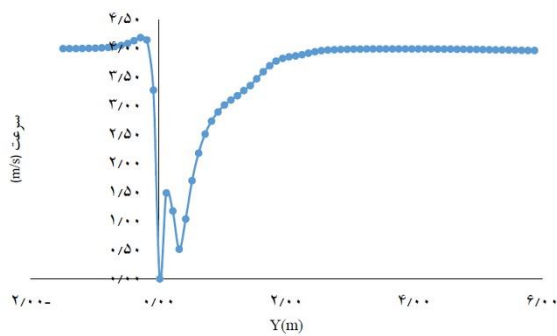


شكل ۹) نحوه عبور جريان در اطراف يك توربين بادی نوک روتور در ثانيه ۰/۰۵۹۴

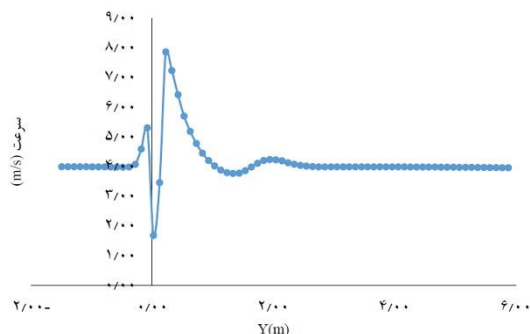
۶- نتايج حاصل از تحليل جريان توربين بادی سه روتور

نتايج شبیه سازى جريان دنباله ناشى از سه روتور با استفاده از معادلات رينولدز ميانگين در شكلهاى ۱۰ تا ۱۲ نشان داده شده است. در شكل ۱۰ كانتور سرعت در ناحيه هاى بالادست و پائين دست روتور نشان داده شده اند. در ناحيه دنباله نزديك كه مطابق شكل ۱۰-الف بين فاصله محورى ۰/۵D تا ۱D قرار دارد و مطابق شكل ۱۰-ب سرعت جريان در روى خط عبورى از مركز توربين ميانى، از ۱ متر بر ثانيه به ۲/۷ متر بر ثانيه مى رسد. در اين ناحيه جريان داراى گردابيان فشار مثبت حاصل از هر سه روتور، با يكديگر تركيب شده و يك فضاى هسته جريان كاهنده، در پشت توربينها ايجاد مى كند.

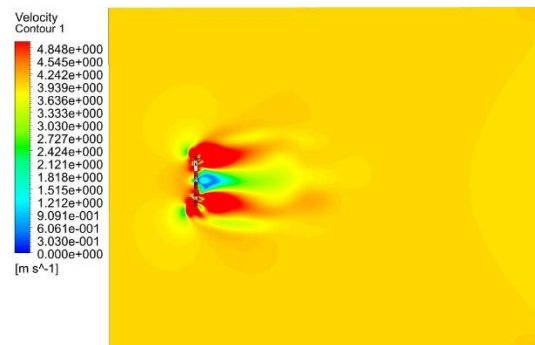
در نمودارهاى ۱۰-پ و ۱۰-ت، به ترتيب سرعت روى خط عبورى از محور توربين بالا و توربين پائين در امتداد محور Y نشان داده شده



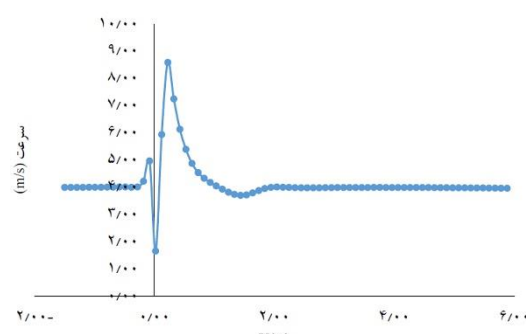
(ب)



(ت)

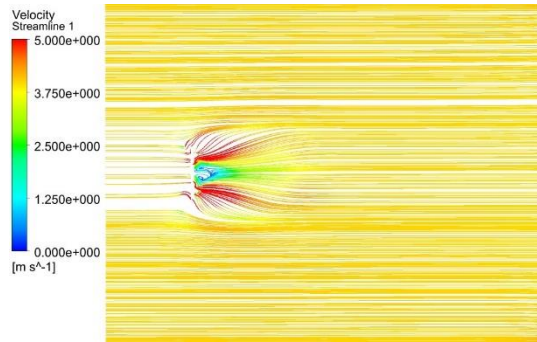


(الف)

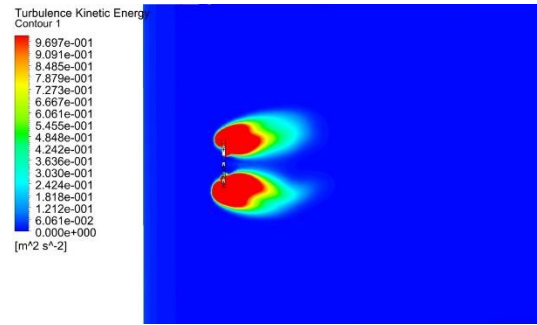


(پ)

شكل ۱۰) تغييرات سرعت؛ الف) جريان هوا قبل و بعد از توربين بادی سه روتور در ثانيه ۰/۱۱۸۸، ب) جريان روى محور توربين ميانى در جهت Y، پ) روى محور توربين بالا در جهت Y، ت) روى محور توربين پائين در جهت Y



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



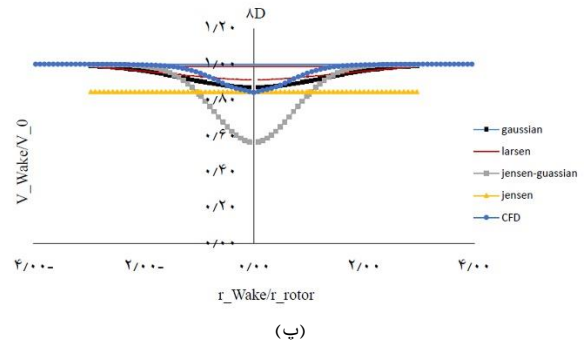
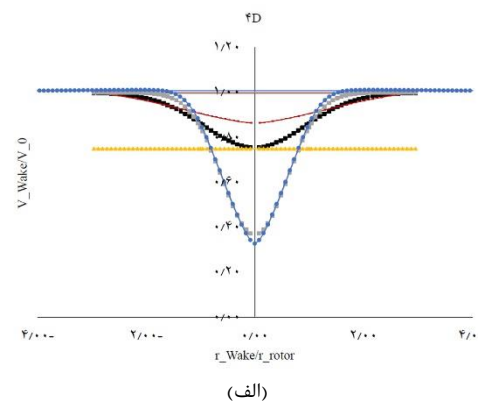
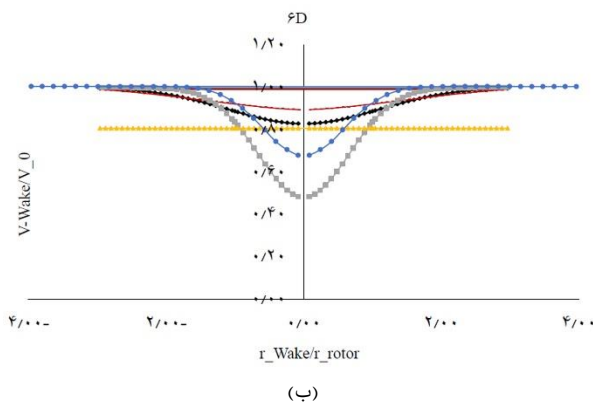
شکل ۱۱) نحوه تغییرات شدت انرژی جنبشی آشفتگی اطراف توربین بادی سه روتور

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 ۱۴ نتایج به دست آمده از مدل‌های پیش‌بینی را با نتایج حاصل از شبیه‌سازی مقایسه می‌کند. قطر معادل برای توربین بادی سه روتور برابر ۴۴ سانتی متر است که طبق رابطه زیر محاسبه شده است:

$$r_{eq} = \sqrt{n \times r_1^2} \quad (۸)$$

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 ویک که برای توربین بادی تک روتور معادل انجام شده نشان می‌دهد که بر خلاف پیش‌بینی‌هایی که توسط مدل ویک ینسن-گوسین انجام شده است، سرعت در

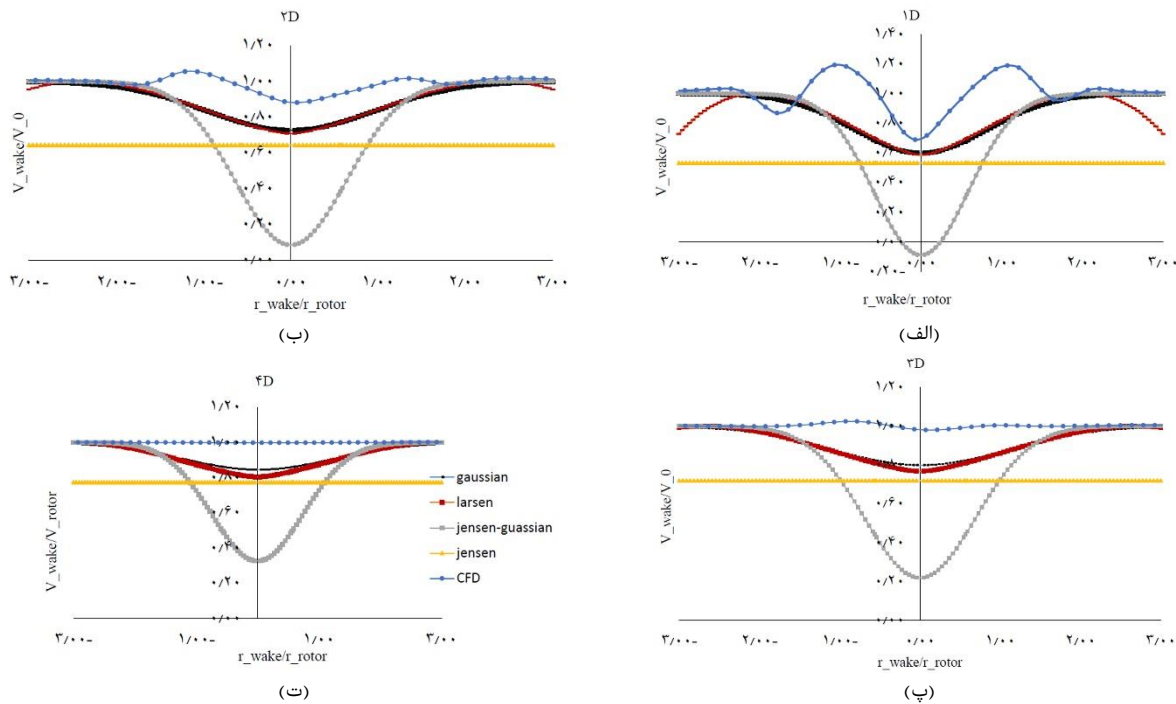


شکل ۱۳) مقایسه پروفیل‌های سرعت حاصل از نتایج عددی با استفاده از مدل‌های جریان دنباله در فاصله‌های طولی مختلف برای توربین بادی تک-روتور

۷- مقایسه انواع مدل‌های جریان برای یک توربین بادی

در این بخش با استفاده از شبیه‌سازی انجام شده، پروفیل مقدار تغییرات سرعت در هر فاصله مورد نظر را به دست می‌آوریم. با توجه به اینکه مدل‌های جریان دنباله معرفی شده برای پیش‌بینی جریان در ناحیه دنباله دور، استفاده می‌شوند، لذا فاصله‌های مورد نظر برای بررسی به ترتیب ۴D، ۶D و ۸D در نظر گرفته می‌شود. سپس با بررسی پروفیل سرعت در هر یک از فواصل بالا و همچنین بررسی مدل‌های دنباله دور برای هر کدام، بهترین مدل برای پیش‌بینی جریان پشت توربین را به دست می‌آوریم.

مطابق شکل ۱۳ در فاصله ۴D مدل ینسن-گوسیان مطابقت خوبی با نتایج به دست آمده برای توربین تک روتور با قطر ۲۵ سانتی متری را دارد. اما در فواصل ۶D و ۸D مطابقت چندان خوبی نشان نمی‌دهد که ناشی از عدم توسعه کامل دنباله در پشت توربین و کم بودن زمان شبیه‌سازی می‌باشد.



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

روتور سریع‌تر به سرعت جریان هوای آزاد برسد. در این حالت مقایسه نتایج شبیه‌سازی با نتایج حاصل از مدل ویکی یینسن 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 ویکی، 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 و تعارض منافی 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.

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 آزمایشی 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 یینسن- 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 مجدداً 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 می‌شود و همین عامل سبب می‌شود تا سرعت در پشت توربین سه

- 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.
- 3- Rosenberg A, Selvaraj S, Sharma A. A novel dual-rotor turbine for increased wind energy capture. In Journal 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. In Journal 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- Göltenbott 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.