



مدل سازی پسابد توربین بادی آزمون مکزیکو با استفاده از توزیع نیروی بیضوی در مدل خط عملگر در نرم افزار اپن فوم

محسن بوجاری¹، اسمعیل محمودی^{2*}، علی عباس نژاد³، ساسان سرمست⁴

- 1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود
 2- استادیار، مهندسی مکانیک بیو سیستم، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود
 3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود
 4- استادیار، مهندسی انرژی بادی، دانشگاه آيسلاند، گاتلند، سوئد
 * شاهرود، صندوق پستی 3613674319، esmahmoodi@shahroodut.ac.ir

چکیده

توربین های بادی، از سازه های پیچیده در محبت شبیه سازی عددی جریان می باشند. از سوی دیگر، گسترش روزافزون کاربرد انرژی بادی در جهان، منجر به ایجاد تقاضا برای به کارگیری مدل های دقیق تر و با کارایی بیشتر برای شبیه سازی توربین ها شده است. پسابدهای به وجود آمده توسط توربین بادی تأثیر قابل توجهی بر کاهش توان خروجی و ایجاد پدیده خستگی در پرده دارند و بنابراین، مطالعه آن ها از اهمیت زیادی برخوردار است. روش خط عملگر، یکی از دقیق ترین مدل ها برای تحلیل میدان جریان و پسابدهای جریان آشفته می باشد که نیاز به حل جریان در داخل لایه مرزی ندارد و به همین دلیل نسبت به مدل روتور کامل کارایی بیشتری دارد. در این روش می توان با دقت بالایی به مدل سازی اثرات یک توربین در جریان باد بدون نیاز به ساخت مدل هندسی از روتور توربین و فقط با استفاده از پارامترهای توربین پرداخت. در این مقاله، با پیاده سازی روش خط عملگر در نرم افزار اپن فوم و نیز با استفاده از روشی نوین جهت توزیع نیروی اعمالی بر خطوط عملگر، مدل سازی توربین بادی آزمون مکزیکو انجام شده است. همچنین به منظور تحلیل میدان جریان اطراف توربین، از روش شبیه سازی گردابه های بزرگ استفاده شده است. شبیه سازی برای دو حالت مختلف شامل حالت شرایط طراحی و حالت واماندگی صورت گرفت. نتایج حاصل از شبیه سازی و تخمین پسابدها و پارامترهای عملکردی توربین، با داده های آزمون تجربی مقایسه و همگرایی خوبی مشاهده شد. نتایج پارامترهای عملکردی حالت واماندگی در توافق بهتری با داده های تجربی بودند، به طوری که نیروی رانش با 8.5 درصد و گشتاور و توان خروجی توربین به ترتیب با 2.8 و 2.4 درصد اختلاف، پیش بینی شدند.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
 دریافت: 25 خرداد 1395
 پذیرش: 24 تیر 1395
 ارائه در سایت: 21 شهریور 1395
 کلید واژگان:
 خط عملگر
 پسابد
 شبیه سازی گردابه های بزرگ
 توربین مکزیکو

Modeling the Wake of MEXICO Experiment's Wind Turbine Using Elliptic Force Distribution in Actuator-Line Method in OpenFOAM

Mohsen Boojari¹, Esmail Mahmoodi^{2*}, Ali Abbas Nejad¹, Sasan Sarmast³

- 1- Department of Mechanical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.
 2- Department of BioMechanical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.
 3- Department of Earth Sciences, University of Uppsala, Gotland, Sweden.
 * P.O.B. 3613674319 Shahrood, Iran, esmahmoodi@shahroodut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
 Received 14 June 2016
 Accepted 14 July 2016
 Available Online 11 September 2016

Keywords:

Actuator-Line
 Wake
 Large Eddy Simulation
 MEXICO rotor

ABSTRACT

Wind turbines are highly complex structures for numerical flow simulation. Today, developments and increasing use of wind energy in the world has created a demand for progressively more accurate and efficient models for wind applications. Wind turbine wakes have significant effects on decreasing the produced power and blades fatigue loads, thus, the study on wake turbulence has great importance in wind turbine simulations. Actuator line model (ALM) is one of the most accurate models for characterization of the flow field and the turbulent wakes created by the turbines. AL model does not require boundary layer resolution and is therefore significantly more efficient than the fully-resolved computations. This model can accurately simulate the wakes of wind turbines operating in a flow field without any need to create or import the CAD turbine models and just by using turbine parameters. In this paper, AL method is implemented in openFOAM solver and a new method is used to spread forces on actuator lines. In order to validate the results, MEXICO rotor was modeled and large eddy simulation's turbulence model is used to investigate the flow field around wind turbine. Simulation has been done for two different conditions including design conditions and stalled conditions. Results obtained for predicted wakes and performance parameters were compared to experimental data and it was observed that the ALM results agree well with measured data. Stall condition's results were in better agreement with experimental data so that the thrust had 8.5% difference while torque and power showed difference of 2.8 and 2.4% respectively.

Please cite this article using:

M. Boojari, E. Mahmoodi, A. Abbas Nejad, S. Sarmast, Modeling the Wake of MEXICO Experiment's Wind Turbine Using Elliptic Force Distribution in Actuator-Line Method in OpenFOAM, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 9, pp. 77-86, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

1- مقدمه

استفاده از انرژی بادی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع تجدید پذیر انرژی، در دهه‌های اخیر به‌طور قابل‌توجهی گسترش یافته است. علی‌رغم پیشرفت‌های شگرف در زمینه طراحی و ساخت توربین‌های بادی، شبیه‌سازی دقیق جریان عبوری از توربین‌ها بخصوص در مزارع بادی¹، همچنان یکی از پیچیده‌ترین کارها در محبت انرژی بادی می‌باشد [2,1]. به‌عنوان مثال، در تخمین عملکرد توربین‌ها در مزارع باد، نیاز است تا اطلاعات دقیقی از شرایط جریان ورودی به توربین که معمولاً متأثر از پساب‌های² توربین‌های بالادستی است، در دسترس باشد. محاسبه و تحلیل چنین جریان‌های پیچیده‌ای با استفاده از روش‌های متداول دینامیک سیالات محاسباتی³ که نیازمند حل جریان لایه‌مرزی⁴ هم بر روی پرها و هم برای پساب‌ها می‌باشد، بسیار هزینه‌بر است.

در سال‌های اخیر، به‌منظور کاهش هزینه‌های محاسبات مورد نیاز برای شبیه‌سازی جریان لایه‌مرزی، مدل‌های عملگر شامل دیسک عملگر⁵ (چرخشی و بدون چرخش) [4,3]، قطاع عملگر⁶ [5]، خط عملگر⁷ [7,6] و سطح عملگر⁸ [8] ارائه شده‌اند.

مدل دیسک عملگر، یک روش مبتنی بر میانگین زمانی است که در آن دیسک، یک صفحه مدور قابل نفوذ برای سیال است که جایگزین روتور توربین می‌گردد. مدل‌سازی در این روش شامل تحلیل یک دیسک با هندسه کامل صفحه‌ای یا حجمی و هم‌اندازه با روتور است که قابل نفوذ بوده و می‌توان مرکز اجزاء صفحه‌ای یا حجمی آن را با دسته‌ای از نیروهای واحد (مقدار نیرو بر واحد سطح یا حجم) همراه کرد. این صفحه یا حجم مجهز شده به نیروهای تکانه‌ای می‌تواند در فضای محاسبات دینامیک سیالاتی بر معادله ناویر-استوکس اثر کند. از معایب این مدل باید به عدم امکان مطالعه پساب‌ها و پیش‌بینی رفتار آن‌ها اشاره کرد.

تاکنون پژوهش‌های متعددی با مدل دیسک عملگر انجام شده است که به‌عنوان مثال می‌توان به موارد زیر اشاره کرد. محمودی و همکاران [9]، به مدل‌سازی توربین بادی محور افقی با استفاده از مدل دیسک عملگر و مدل‌سازی میدان جریان با استفاده از دو مدل آشفتگی متفاوت میانگین رینولدز⁹ و ناویر-استوکس لایه‌ای¹⁰ پرداختند و نتایج کارشان را با داده‌های آزمایشگاهی پروژه مکزیکو مقایسه کردند. نتایج مقایسه نشان داد که بین مدل LNS روی دیسک عملگر با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی تطابق خوبی وجود دارد. آن‌ها مجموعه کامل تونل باد و توربین را مدل‌سازی کردند و نشان دادند که دیسک عملگر به‌خوبی می‌تواند در مقایسه با نتایج سرعت‌سنجی تصویری ذرات¹¹، پساب پشت روتور و همچنین بار وارده بر پره توربین بادی را شبیه‌سازی کند [11,10].

مدل خط عملگر، برای اولین بار در سال 2002 توسط سورنسن و شن تحت نرم‌افزار الیپسیس¹² ارائه شد [6]. روش، شامل خطوط عملگری به‌صورت شعاعی است که به نمایندگی از پره‌های توربین بادی بر سیال عبوری از توربین اثر می‌کنند. این خطوط در فضای سه‌بعدی معادلات ناویر-استوکس،

توسط یک حلگر سیالاتی در یک فرآیند تکرار شونده، حل می‌شوند تا همگرایی به دست آید. مدل خط عملگر باهدف مطالعه پساب‌های نزدیک و دور و نیز برهم‌کنش بین توربین‌ها، به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. ترلدبرگ [7]، پژوهش جامعی را با استفاده از معادلات سه‌بعدی ناویر-استوکس بر روی گردابه‌های توربین‌های بادی در شرایط مختلف جریان انجام داد. او در این پژوهش به مدل‌سازی یک توربین بادی با استفاده از روش خط عملگر، در حلگر الیپسیس پرداخت. بین برخی از نتایج این پژوهش از جمله ضرب توان محاسبه شده، با داده‌های تجربی مقایسه‌ای انجام شد که تطابق خوبی بین این دو داده را نشان داد. جین [12]، مدل خط عملگر را در نرم‌افزار سیالاتی نک 5000¹³ پیاده‌سازی کرد که هدف اصلی مقایسه نتایج شبیه‌سازی مدل خط عملگر در نرم‌افزار فوق با نتایج شبیه‌سازی در نرم‌افزار الیپسیس بود. در آن پژوهش، به بررسی تفاوت توزیع گاوسی دوبعدی و سه‌بعدی نیرو برای این مدل پرداخته شد. هونگ مین و پیگان [13]، اقدام به شبیه‌سازی گردابه‌های یک توربین بادی با استفاده از تلفیق روش‌های خط عملگر و روش لاگرانژی دینامیکی¹⁴ گردابه‌های بزرگ برای سه سرعت مختلف چرخش پرها نمودند. به‌منظور کسب نتایج دقیق‌تر و پایداری عددی بالاتر، تعدادی از پارامترهای موجود در مدل‌سازی محاسبه نشده و عیناً از داده‌های تجربی که قبلاً اندازه‌گیری شده بود در این پژوهش استفاده شد. نتایج تحقیق نشانگر یک رفتار مارپیچ گونه برای گردابه‌های ایجاد شده توسط روتور توربین بود. این رفتار با کاهش نسبت سرعت نوک پرها برجسته‌تر می‌گردد. ویدال و لمکول [14]، اقدام به تحلیل و بررسی یک مزرعه بادی با استفاده از موازی‌سازی روش‌های شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ¹⁵ و خط‌عملگر کردند. همچنین شبیه‌سازی گردابه‌های توربین بادی نیز انجام شد. بررسی‌های اولیه نشانگر صحیح بودن روند موازی‌سازی محاسبات بودند اما شبیه‌سازی نتوانست جریان را با دقت کافی تحلیل کند. سرمست و سورنسن [15]، در پژوهشی اقدام به شبیه‌سازی توربین بادی ان-تی-ان-یو¹⁶ با مدل خط عملگر در نرم‌افزار الیپسیس نمودند. آن‌ها در این پژوهش به مطالعه مشخصات، ساختار و نحوه رفتار پساب‌های پشت روتور پرداختند و توانستند به‌منظور محاسبه طول پساب‌های نزدیک، روابطی تحلیلی ارائه نمایند. در نهایت نتایج شبیه‌سازی با داده‌های تجربی تطابق و همگرایی خوبی مشاهده شد. آن‌ها همچنین در پژوهش دیگری [16]، اقدام به محاسبه طول گردابه‌های نزدیک بر اساس آنالیز پایداری و محل شروع ناپایداری گردابه‌های منتشر شده از نوک پره‌های توربین نمودند. بر اساس رابطه ارائه شده، طول گردابه‌های نزدیک با نیروی رانش توربین، نسبت سرعت نوک و لگاریتم شدت آشفتگی نسبت عکس دارد. سرلک و سرمست [17]، در پژوهشی با عنوان بررسی عددی برهم‌کنش گردابه‌ها، به شبیه‌سازی دو توربین کنار هم با روش خط عملگر و مدل آشفتگی گردابه‌های بزرگ پرداختند. آن‌ها این پژوهش را برای دو سطح شدت آشفتگی کم و زیاد برای جریان آزاد، انجام دادند. نتایج، حاکی از تخمین قابل قبول مشخصات هر دو توربین باوجود قرارگیری جریان پایین دست در ناحیه واماندگی¹⁷ بودند. با این وجود، در تخمین نیروی رانش توربین‌ها خطاهایی مشاهده شد. اثر برهم-کنش گردابه‌ها به‌خوبی نمایان و به‌صورت عبارتهایی از افت سرعت و انرژی جنبشی درهمی ارائه شد.

از آنجاکه مدل خط عملگر همانند سایر روش‌های مدل‌سازی، با خطاهایی

¹³ NEK5000

¹⁴ Lagrangian Dynamic

¹⁵ Large Eddy Simulation (LES)

¹⁶ NTNU

¹⁷ Stall

¹ Wind Farm

² Wake

³ Computational Fluid Dynamics (CFD)

⁴ Boundary Layer

⁵ Actuator Disk

⁶ Actuator Sector

⁷ Actuator Line

⁸ Actuator Surface

⁹ Reynolds Average Navier-Stokes (RANS)

¹⁰ Laminar Navier-Stokes (LNS)

¹¹ Particle Image Velocimetry (PIV)

¹² Ellipsys3D

می‌شوند. حال اگر طبق شکل 1، یک المان مانند المان A در نظر گرفته شود، می‌توان موقعیت معادل با آن را در پره توربین واقعی پیدا کرد. هندسه سطح مقطع المان A (هوابر قرار گرفته در آن نقطه) را می‌توان از داده‌های موجود در جدول مشخصات آن هوابر و با یک درون‌یابی خطی به دست آورد. در هر گام از محاسبات، یک میدان سرعت توسط حلگر تخمین زده می‌شود. سپس می‌توان سرعت محلی جریان برای هر المان را با استفاده از معادله (3) محاسبه کرد.

$$V_{rel} = \sqrt{V_z^2 + (\Omega r - V_\theta)^2} \quad (3)$$

در معادله (3)، Ω سرعت دورانی پره، V_z سرعت در راستای محوری و V_θ سرعت در راستای مماسی برای المان مورد نظر است.

همان‌طور که در شکل 2 مشاهده می‌شود، زاویه جریان که عبارت است از زاویه بین صفحه روتور توربین و V_z از معادله (4) تعیین می‌شود. همچنین زاویه حمله برای هر سطح مقطع از معادله (5) به دست می‌آید.

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{V_z}{\Omega r - V_\theta} \right) \quad (4)$$

$$\alpha = \phi - \gamma \quad (5)$$

در معادله (5)، α ، زاویه حمله، ϕ ، زاویه جریان و γ زاویه گام است.

نیرو بر واحد طول هر المان از پره از معادله (6) محاسبه می‌شود:

$$\vec{f}_E = \frac{d\vec{F}}{dr} = \frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 C (C_l \vec{e}_L + C_d \vec{e}_D) \quad (6)$$

در معادله (6)، C ، طول وتر، $C_l = C_l(\alpha, Re)$ و $C_d = C_d(\alpha, Re)$ به ترتیب ضرایب برا و پسای هوابر هستند.

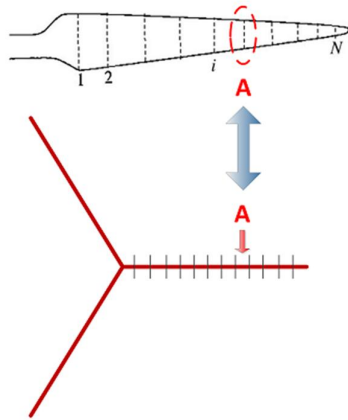


Fig. 1 Blade modeling in actuator line method

شکل 1 مدل‌سازی پره در روش خط عملگر

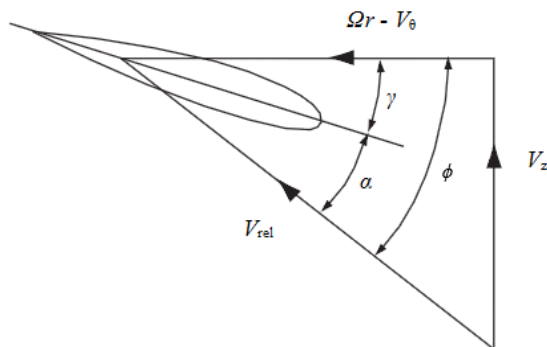


Fig. 2 Velocity components at a segment along the blade

شکل 2 مؤلفه‌های سرعت برای یک المان در امتداد پره

همراه است، لذا توسعه و پیاده‌سازی این مدل در سایر نرم‌افزارهای سیالاتی و یا تصحیح پارامترهای مؤثر بر این روش به‌منظور کسب نتایج دقیق‌تر، امری مهم و ضروری تلقی می‌گردد. تاکنون، این مدل در نرم‌افزارهایی همچون الپسیس، نک و انسیس - فلونتت پیاده‌سازی شده است. همچنین، در بیشتر پژوهش‌های انجام‌شده، برای تعیین پارامتر عرض توزیع نیرو در این مدل، از روش اصلی در مدل پایه، یعنی اختصاص یک مقدار ثابت که بر اساس وضوح شبکه‌بندی مسأله می‌باشد، استفاده شده است.

در این مقاله، با پیاده‌سازی مدل خط عملگر در نرم‌افزار سیالاتی این‌فوم و با بکارگیری روش آشننگی گردابه‌های بزرگ برای تحلیل میدان جریان اطراف روتور و نیز استفاده از یک الگوریتم جدید و هوشمندتر که در آن عرض توزیع نیرو بر مبنای نسبت منظری پره، وضوح شبکه‌بندی و همچنین طول محلی وتر پره تعیین می‌شود، توربین بادی آزمون تجربی مکزیکو¹ مدل‌سازی می‌شود. در بخش دوم مقاله روش عددی پژوهش بیان شده و در بخش سوم مدل آشفتگی مورد استفاده شرح داده شده است. در بخش چهارم آزمون تجربی مکزیکو معرفی شده و در بخش پنجم مدل‌سازی توربین انجام گرفته است. نهایتاً و در بخش‌های پایانی، نتایج شبیه‌سازی در نمودارهای مختلف ارائه و با داده‌های آزمون تجربی اعتبار سنجی شدند.

2- روش عددی

2-1- معادلات حاکم

از آنجاکه سرعت جریان در اطراف یک توربین بادی در مقایسه با سرعت صوت بسیار کمتر است، می‌توان رفتار جریان را با فرض چگالی ثابت و با حل صورت سه‌بعدی و تراکم ناپذیر معادلات ناویر-استوکس با دقت بالایی پیش‌بینی کرد. با توجه به درهم بودن جریان، از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، که در آن گردابه‌ها با مقیاس درشت مستقیماً حل شده و گردابه‌ها با مقیاس ریز توسط مدل مقیاس زیر شبکه، بر پایه لزجت ادی مدل می‌شوند، استفاده شده است.

معادلات تراکم ناپذیر و فیلتر شده ناویر-استوکس به‌صورت روابط (2,1)

بیان می‌شوند:

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

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

در معادله (1)، \vec{f}_E ، نیروی حجمی اعمال‌شده بر خطوط عملگر است که

در قسمت بعد به‌طور مفصل توضیح داده خواهد شد. تنش‌های درمی است که در این پژوهش، از مدل لزجت گردابه‌ای اسماگورینسکی [18] برای محاسبه آن‌ها استفاده شد. همچنین مقادیر فیلتر شده با علامت (*) نشان داده شده است.

2-2- مدل خط عملگر

ایده اصلی نظریه خط عملگر بدین صورت است که پره‌های توربین بادی، توسط نیروهای حجمی در حال دوران بیان می‌شوند و این نیروها، جایگزین پره‌های واقعی هستند. نیروهای حجمی، با استفاده از فرایند تحلیل اجزاء پره، همراه با بهره‌گیری از جدول مشخصات دوبعدی هوابر² (توزیع ضرایب برا و پسا در زاویه‌های مختلف حمله) تعیین می‌شوند.

به‌منظور مدل‌سازی پره‌ها، نخست، خطوط عملگر به چند قسمت تقسیم

¹ MEXICO (Model Experiment in Controlled Condition)

² Airfoil

روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ مبتنی بر نظریه آشبار کولومگروف است. در این نظریه، انرژی به بزرگترین مقیاس داده شده و سپس این انرژی به مقیاس‌های کوچکتر منتقل می‌شود. این فرایند تا آنجا ادامه می‌یابد که انرژی در کوچکترین مقیاس‌ها تلف شده و موازنه انرژی برقرار شود.

همان‌گونه که اشاره شد، در شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، ابتدا مقیاس‌های بزرگ که انرژی به آن‌ها داده می‌شود حل می‌شوند. از آنجا که تنها با حل مقیاس‌های بزرگ، موازنه انرژی برقرار نمی‌شود، لذا لازم است تا اثر مقیاس‌های کوچک که تلف‌کننده انرژی هستند نیز در نظر گرفته شود [20]. بدین منظور، از مدل‌های مقیاس زیرشبه که در راستای تخمین نرخ اتلاف انرژی توسعه یافته‌اند، استفاده می‌شود. بنابراین در این روش، حرکت‌های مقیاس بزرگ دقیق‌تر حل می‌شود و حرکت‌های مقیاس کوچک به‌جای حل شدن، مدل‌سازی می‌شود.

به‌منظور مدل‌سازی جمله‌های مربوط به لزجت و تنش‌های درهمی در معادله مومنتم، تاکنون مدل‌های زیادی پیشنهاد شده است که معتبرترین و مناسب‌ترین آن‌ها، مدل‌های وابسته به جریان و هندسه است. البته این موضوع همچنان به‌عنوان زمینه‌ای قوی جهت تحقیقات، از پتانسیل بالایی برخوردار است. اما از آنجا که این عامل در مقایسه با وضوح شبکه‌بندی و همچنین نوع تصویر نیرو تأثیر بسیار کمتری در شبیه‌سازی به روش خط عملگر دارد [21]، در این مقاله، از مدل اسمگورینسکی استفاده شده است. مدل اسمگورینسکی، باوجود سادگی، نتایج خوبی در پی داشته و همچنان از کاربرد زیادی برخوردار است.

اساس این مدل استفاده از هندسه و خصوصیات جریان جهت مدل‌سازی نبوده و ثابت مدل اسمگورینسکی (C_{SGS})، بدون مدل‌سازی و به‌صورت یک ثابت تجربی مورد استفاده قرار می‌گیرد. به‌این‌ترتیب، بر اساس مدل اسمگورینسکی می‌توان ترم تنش‌های درهمی را به‌صورت رابطه (11) نوشت:

$$\tau_{ij} = -2\nu_t \overline{S}_{ij} \quad (11)$$

ν_t یا ν_{SGS} ، لزجت گردابه‌ای زیرمقیاس و \overline{S}_{ij} تانسور نرخ کرنش از معادله‌های (12, 13) به دست می‌آیند:

$$\overline{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \overline{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{U}_j}{\partial x_i} \right) \quad (12)$$

$$\nu_t = K_\nu \Delta^2 |S| \quad (13)$$

که مقدار K_ν نیز طبق رابطه (14) محاسبه می‌شود:

$$K_\nu = (C_{SGS})^2 \quad (14)$$

همچنین Δ ، اندازه متوسط شبکه‌بندی بوده و از رابطه (15) محاسبه می‌شود:

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

\overline{S}_{ij} در معادله (12)، ماهیت تانسوری داشته و در هر نقطه به‌صورت یک ماتریس 3×3 با 9 عضو تعریف می‌شود که "i" و "j" نشان‌دهنده جهات مختلف می‌باشند.

همچنین $|S|$ ، معرف اندازه تانسور \overline{S}_{ij} در هر نقطه است که به‌صورت رابطه (16) محاسبه می‌شود:

$$|S| = \sqrt{2 \overline{S}_{ij} \overline{S}_{ij}} \quad (16)$$

ثابت اسمگورینسکی، ثابتی تجربی بوده و در هر مسأله به‌طور خاص و بنابر موارد تجربه شده قبلی فرض می‌گردد. با این وجود محدود 0.1-0.5 در اغلب مسائل جواب مناسبی در برداشته است. مقدار فرض شده در این

در نهایت نیروی حجمی کل با توجه به انتگرال‌گیری از نیروهای آئروپنایمیک تمامی المان‌ها به‌صورت رابطه (7) بیان می‌شود:

$$F(x, y, z, t) = \sum_{j=1}^3 \vec{f}_\varepsilon \frac{1}{\varepsilon^3 \pi^{3/2}} \left[-\left(\frac{|r|}{\varepsilon}\right)^2 \right] \quad (7)$$

در معادله (7)، اندیس j معرف تعداد پره‌های توربین، ε عرض تصویر نیرو و r فاصله بین المان i ام و نقطه (x, y, z) در میدان جریان است.

ε ، نیروی محاسبه‌شده المان‌های پره را بر روی شبکه‌بندی توزیع می‌کند. با این کار اندازه نیروی تصویر شده و فاصله محل اعمال نیرو از مرکز المان مربوط به آن نیرو تعیین می‌شود. این پارامتر باید به‌اندازه کافی بزرگ باشد تا از نوسانات و اغتشاشات عددی جلوگیری شود. همچنین باید به‌اندازه کافی کوچک باشد تا منجر به تخمین کمتر یا بیشتر از میزان واقعی توان محاسبه شده توربین نشود.

برای انتخاب پارامتر ε ، چندین روش وجود دارد که در این مقاله، از یک روش نوین نسبت به سایر روش‌ها به نام روش توزیع بیضوی استفاده شده است. معادلات مورد استفاده در این روش برای تعیین مقدار ε به‌صورت (10-8) می‌باشند:

$$\varepsilon/c^* = f(r, \Delta r, AR) = \frac{\Delta r}{4R} n_{\max} (\pi AR) \quad (8)$$

$$C^*(r) = \left(\frac{4}{\pi R} \int_0^R C(r) dr \right) \sqrt{1 - \left(\frac{2r}{R}\right)^2} \quad (9)$$

$$AR = R \left(\frac{1}{R} \int_0^R C(r) dr \right)^{-1} \quad (10)$$

در معادلات (10-8)، AR ، نسبت منطقی، Δr ، اندازه شبکه‌بندی در صفحه روتور، R ، شعاع پره، $C(r)$ ، طول وتر هواپر و $n_{\max} = \Delta r/R$ است.

شکل 3، شماتیکی از مراحل شبیه‌سازی به روش خط عملگر را نشان می‌دهد. در یک مرحله از روند حل، نخست، خطوط عملگر المان‌بندی شده که نماینده پره‌های توربین هستند، نسبت به گام زمانی قبلی دوران می‌یابند. سپس با توجه به روابط 3 تا 5، اندازه بردار سرعت نسبی و زاویه حمله تعیین می‌شود. پس از این مرحله، نیروهای برا و پسا محاسبه شده و در نهایت این نیروی محاسبه شده توسط رابطه (7) و پارامتر ε بر روی شبکه‌بندی مسأله تصویر می‌شود.

3- مدل‌سازی آشفته‌گی

در سال‌های اخیر، در ارتباط با شبیه‌سازی ناحیه گردابی پشت توربین بادی، به روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ توجه زیادی شده است. زیرا این مدل توانایی کار کردن در شرایط ناپایا و جریان‌های آشفته غیر همسان‌گرد که تحت تأثیر ساختارهای با مقیاس بزرگ هستند را دارد. این مزیت بسیار مهمی نسبت به روش میانگین رینولدز می‌باشد. اما اشکال این روش، هزینه محاسباتی بالاتر نسبت به روش میانگین رینولدز می‌باشد.

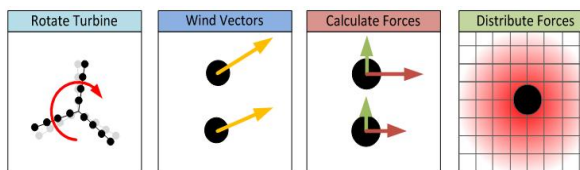


Fig. 3 Actuator line's simulation steps

شکل 3 مراحل شبیه‌سازی به روش خط عملگر [19]

پایه سازی و افزودن مدل خط عملگر به کتابخانه نرم افزار، حل می شوند. به منظور جلوگیری از وقوع جدایش سرعت-فشار در روند حل معادلات، از روش میانبایی رای-چو [24] استفاده شد. در این مقاله، الگوریتم پیرو برای همبستگی سرعت-فشار، همراه با دو بار اعمال تصحیح برای معادله فشار در هر گام زمانی بکار گرفته شد. همچنین طبق پژوهش آنه مت [25]، از رابطه (17) برای یافتن گام زمانی حل استفاده شد.

$$\frac{(R\Omega) \Delta t}{\Delta x} \leq 1 \quad (17)$$

در رابطه (17)، Δx طول شبکه بندی، Δt ، گام زمانی، R ، طول پره و Ω سرعت دورانی بر حسب دور بر دقیقه است.

مدلسازی توربین برای دو سرعت ورودی 15 (m/s) و 24 (m/s) انجام گرفت. سایر شرایط مسأله و نیز مشخصات توربین مکزیکو در جدول 1 آورده شده است.

2-5- دامنه حل و شبکه بندی

در فرآیند حل این پژوهش از سیستم مختصات کارتزین استفاده شد به طوری که راستای جریان در جهت X، راستای طولی پره ها در جهت Y و راستای عمودی (ارتفاع) در جهت Z انتخاب شد. دامنه حل برای انجام محاسبات یک مکعب مستطیل با ابعاد $18 \times 18 \times 54$ متر است. توربین در فاصله 4 برابر قطر یعنی 18 متر از قسمت ورودی قرار دارد (ناحیه القاء فشار روی جریان ورودی) و نسبت به دو راستای دیگر در مرکز دامنه حل قرار دارد. به منظور انجام شبکه بندی منظم، این مکعب به 12 بلوک (3 بلوک در راستای X، 2 بلوک در راستای Y، 2 بلوک در راستای Z) تقسیم شد. در شبکه بندی اولیه، هر یک از بلوک ها به 66 قسمت در هر کدام از راستاهای Y و Z و نیز 99 قسمت در راستای X تقسیم شدند. یعنی به طور کلی 297 قسمت در راستای X و 132 قسمت در دو راستای دیگر. پس از ایجاد شبکه بندی اولیه، از ابزار اسپینی هگژ مش¹ که یکی از ابزارهای کمکی این فوم است جهت ریز کردن شبکه بندی در قسمت روتور توربین استفاده شد. تعداد کل سلول ها در شبکه بندی نهایی 11M است و شبیه سازی به کمک یک سیستم با تعداد 12 پردازشگر و میزان حافظه 64 گیگابایت انجام شده است. در شکل 5 دامنه حل مسأله نشان داده شده است.

3-5- شرایط مرزی

شرایط مرزی در روش گردابه های بزرگ از اهمیت زیادی برخوردار است. در معادله مومنتوم، شرط مرزی تقارن² در تمام دیوارها در نظر گرفته شده

جدول 1 مشخصات کلی توربین بادی مکزیکو

Table 1 Basic parameters of the MEXICO wind turbine

حالت واماندگی	شرایط طراحی	
4.167	6.67	نسبت سرعت نوک (-)
24	15	سرعت باد (m/s)
424.5	424.5	سرعت دورانی (rpm)
	9	ارتفاع مرکز روتور از زمین (m)
	-2.3	زاویه گام (°)
	0	زاویه یلو (°)
	4.5	قطر روتور (m)
	ساعتگرد (دید از سمت بالادست جریان)	جهت دوران (-)

¹ snappyHexMesh

² Symmetry

مسأله برابر $C_{SGS}=0.1$ بوده که مطابقت خوبی با نتایج تجربی داشته است.

4-آزمون تجربی مکزیکو

آزمون توربین بادی مکزیکو در شرایط کنترل شده توسط اتحادیه اروپا در سال 2006 میلادی تأمین مالی شد و طراحی بخش های مختلف آزمون با همکاری مؤسسه ها و دانشگاه های مختلف به انجام رسید. مرکز تحقیقات انرژی هلند که مدیریت این پروژه را در دست داشت، در راستای اهداف پروژه، جهت توسعه نظریه های مختلف در زمینه مدلسازی توربین های بادی با بستن قرارداد با دانشگاه های مطرح اروپا، مجموعه تحقیقاتی یکپارچه ای به نام مکس- نکست را راه اندازی نمود.

آزمون مکزیکو بر روی یک توربین بادی سه پره با قطر 4.5 متر و در تونل باد DNW/LLF، بزرگترین تونل باد اروپا انجام شده است. مقطع آزمون این تونل باد، متغیر بوده و با ابعاد 9.5×9.5 مترمربع می تواند بیشینه سرعت 55 متر بر ثانیه که برابر عدد رینولدز 3.9×10^6 است را برای آزمون های تجربی فراهم کند و با کوچکترین مقطع، این تونل باد قادر است که محدوده 0.01 تا 0.42 ماخ را پوشش دهد.

پره های توربین از ترکیب سه هواپر دی- یو، ریزو و ناکا همراه با نواحی گذار در بین هواپر ها تشکیل شده اند و برای اندازه گیری توزیع فشار، 148 حسگر اندازه گیری در پنج مقطع مختلف هر پره نصب شدند. این مقاطع به ترتیب در فاصله های 25 درصد، 35 درصد، 60 درصد، 82 درصد و 92 درصد طول پره از طرف مرکز دوران انتخاب شده اند. شکل 4، نمایانگر پره توربین مکزیکو است.

در پروژه مکزیکو، سه مجموعه آزمایش مختلف بر روی توربین مورد نظر انجام شد. سری اول شامل اندازه گیری میدان سرعت در ناحیه بالا و پایین صفحه ای که روتور توربین در آن قرار دارد است. سری دوم آزمایش ها، منجر به اندازه گیری میدان سرعت در بالادست و پایین دست پره روتور شد. در نهایت، مجموعه سوم از آزمایش ها که با عنوان جستجوی گردابه انجام شدند، به منظور ردیابی و دنبال کردن امتداد گردابه های دور و نزدیک از توربین انجام شد [23,22].

5-مدلسازی توربین باد

1-5- نحوه حل معادلات

در این پژوهش، معادلات حاکم توسط نرم افزار متن باز این فوم و پس از

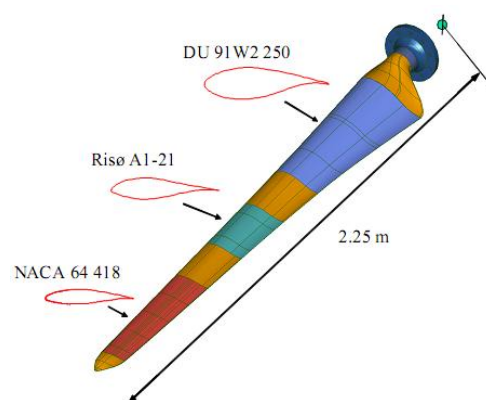


Fig. 4 MEXICO wind turbine's blade

شکل 4 پره توربین بادی مکزیکو [22]

در نمودار شکل 7، مقادیر سرعت شعاعی کمی کمتر از اندازه واقعی پیش‌بینی شده‌اند. شایان ذکر است که روش سرعت سنجی تصویری ذرات به صورت لحظه‌ای است و شامل نوساناتی می‌باشد درحالی‌که سرعت محاسبه شده توسط خط عملگر، به صورت میانگین زمانی است. به همین دلیل منحنی سرعت آن هموارتر می‌باشد. همچنین از آنجایی‌که افت سرعت مستقیماً با نیروی رانش توربین مرتبط است، این تخمین کمتر از میزان واقعی سرعت، حاکی از پیش‌بینی بیش از اندازه واقعی نیروی رانش توربین است.

در شکل‌های 8 و 9، میدان سرعت در راستای طولی پره‌ها در محل حسگر نصب‌شده در فاصله $X = 0.3 \text{ m}$ بعد از توربین، ترسیم شده است. با توجه به نمودار شکل 8، مشاهده می‌شود سرعت محوری برای فواصل 1.4 m به بعد، تقریباً در توافق با نتایج آزمون تجربی است. در موقعیت $r = 1.2 \text{ m}$ در امتداد پره، یک افت بزرگ در سرعت اندازه‌گیری شده آزمون تجربی مشاهده می‌شود که این امر نشانه وقوع پدیده ریزش گردابه¹، توسط ناحیه انتقال بین هوابره‌ای دی-یو و ریزو است. وجود گردابه‌ای با چنین شدت، به تغییر گردش² روی پره مرتبط می‌شود که منجر به بروز خطا در اندازه‌گیری و ثبت داده‌ها توسط حسگرهای آزمون تجربی شده است.

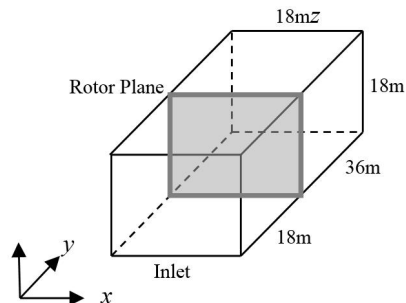


Fig. 5 Solution domain

شکل 5 دامنه حل مسأله

است. سرعت در ورودی برای شرایط مختلف به ترتیب 15 (m/s) و 24 (m/s) در نظر گرفته شده و در خروجی به صورت جریان توسعه یافته فرض شده و به این ترتیب از رابطه $\partial u / \partial x = 0$ at outlet استفاده گردیده است. همچنین برای فشار میانگین ورودی شرط گرادیان صفر و برای فشار میانگین خروجی، شرط فشار اتمسفریک قرار داده شده است.

6- نتایج مدل‌سازی

در این مقاله، شبیه‌سازی توربین مکزیکو برای دو سرعت ورودی 15 (m/s) و 24 (m/s) صورت گرفت. در این بخش نتایج مربوط به میدان سرعت پساب‌ها و نیز پارامترهای عملکردی توربین برای دو حالت فوق ذکر شده است. نتایج توسط دو حسگر، یکی در راستای طولی و دیگری در راستای شعاعی پره‌ها محاسبه شدند. حسگر راستای طولی در فاصله $r = 1.848 \text{ m}$ از ریشه پره قرار دارد و برای ثبت داده‌ها در بازه 4.5 m قبل از توربین تا 6 m بعد از توربین در نظر گرفته شده است. همچنین حسگر راستای شعاعی در فاصله $X = 0.3 \text{ m}$ بعد از توربین قرار دارد و برای محاسبه داده‌ها در بازه $0.523R$ تا $1.22R$ نصب شده است.

1-6- نتایج برای سرعت ورودی 15 (m/s)

در شکل‌های 6 و 7، سرعت پساب‌ها در محل حسگر نصب‌شده روی مقطع $r = 1.848 \text{ m}$ پره، ترسیم شده است. با توجه به شکل 6، مشاهده می‌شود که سرعت محوری در ناحیه پساب‌های پشت روتور، در تطابق خوبی با نتایج آزمون تجربی است.

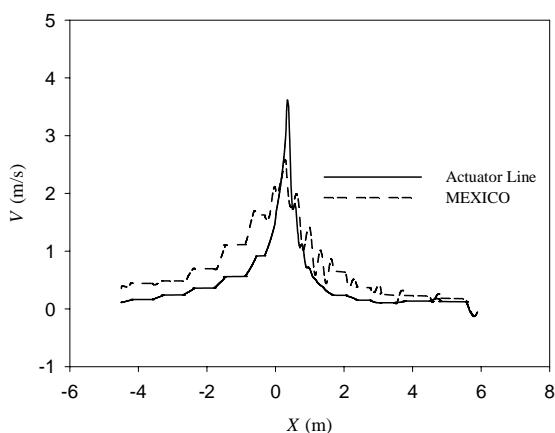


Fig. 7 Radial wake velocity with AL and experiment at $r = 1.84 \text{ m}$
شکل 7 سرعت پساب شعاعی روش خط عملگر و آزمون تجربی در مقطع $r = 1.84 \text{ m}$

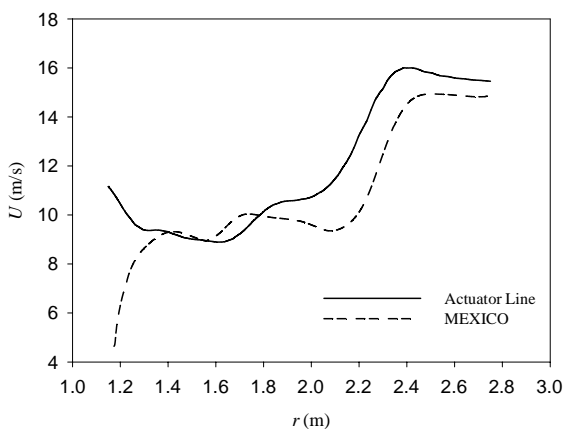


Fig. 8 Axial wake velocity with AL and experiment at $x = 0.3 \text{ m}$
شکل 8 سرعت پساب محوری روش خط عملگر و آزمون تجربی در مقطع $x = 0.3 \text{ m}$

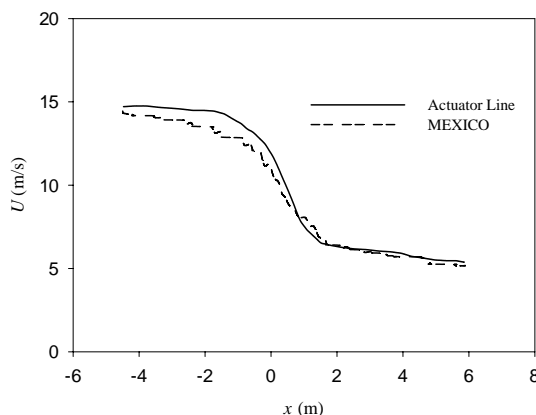


Fig. 6 Axial wake velocity with AL and experiment at $r = 1.84 \text{ m}$
شکل 6 سرعت پساب محوری روش خط عملگر و آزمون تجربی در مقطع $r = 1.84 \text{ m}$

¹ Vortex Shedding

² Circulation

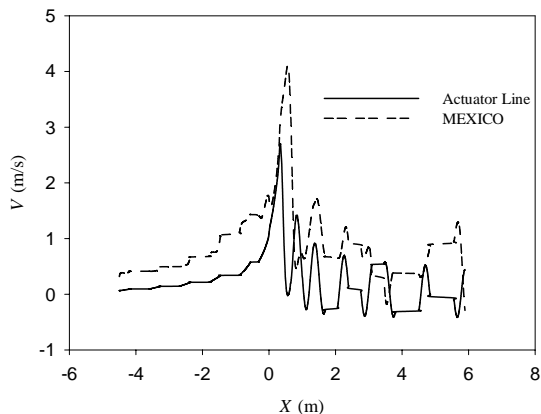


Fig. 11 Radial wake velocity with AL and experiment at $r=1.84m$
 شکل 11 سرعت پسیاد شعاعی روش خط عملگر و آزمون تجربی در مقطع $r=1.84m$

در شکل‌های 12 و 13، میدان سرعت در راستای طولی پره‌ها در محل حسگر نصب‌شده در فاصله $X=0.3m$ بعد از توربین، ترسیم شده است. روند کلی تخمین میدان پسیادها به‌درستی صورت گرفته، اما به دلیل قرارگرفتن پره در ناحیه واماندگی و وقوع جدایش جریان از روی پره، بین نتایج شبیه‌سازی و آزمون تجربی اختلافاتی مشاهده می‌شود.

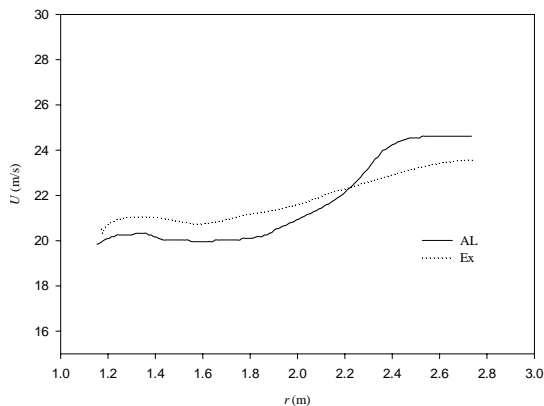


Fig. 12 Axial wake velocity with AL and experiment at $x=0.3m$
 شکل 12 سرعت پسیاد محوری روش خط عملگر و آزمون تجربی در مقطع $x=0.3m$

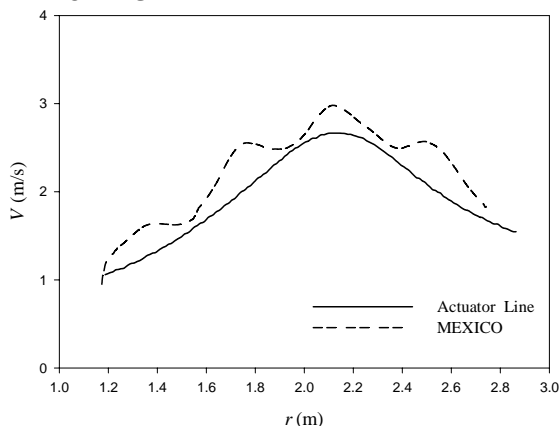


Fig. 13 Radial wake velocity with AL and experiment at $x=0.3m$
 شکل 13 سرعت پسیاد شعاعی روش خط عملگر و آزمون تجربی در مقطع

در شکل 9، الگوی رفتاری مشابه با سرعت محوری مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است، یک جریان شعاعی قدرتمند که توسط گردابه‌های نوک پره ایجاد شده است در داده‌های تجربی دیده می‌شود. این مقدار در شبیه‌سازی، کوچکتر محاسبه شده است. این امر ناشی از خطای شبکه‌بندی نسبتاً ساده مورد نیاز برای روش خط عملگر است.

2-6- نتایج برای سرعت ورودی 24 (m/s)

در شکل‌های 10 و 11، سرعت پسیادها در محل حسگر نصب‌شده روی مقطع $r=1.848m$ پره، ترسیم شده است. با توجه به شکل 10، مشاهده می‌شود که سرعت محوری در ناحیه پسیادها نزدیک به روتور، در تطابق خوبی با نتایج آزمون تجربی است در حالی که در نواحی دورتر (حدود 5m)، این کمیت به‌طور ناگهانی تا مقدار 16 (m/s) افت می‌کند. علت این پدیده، تأثیر تونل باد آزمون بر جریان باد ورودی به توربین است.

با توجه به شکل 11، سرعت شعاعی، کمی کمتر از اندازه واقعی تخمین زده شده است. شایان‌ذکر است که نوسانات سرعت در این حالت، به‌خوبی توسط مدل خط عملگر ثبت شده است. این امر حاکی از شبکه‌بندی مناسب انجام شده برای شبیه‌سازی است.

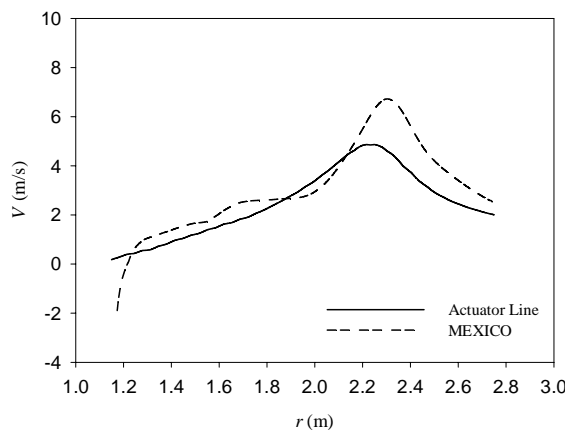


Fig. 9 Radial wake velocity with AL and experiment at $x=0.3m$
 شکل 9 سرعت پسیاد شعاعی روش خط عملگر و آزمون تجربی در مقطع $x=0.3m$

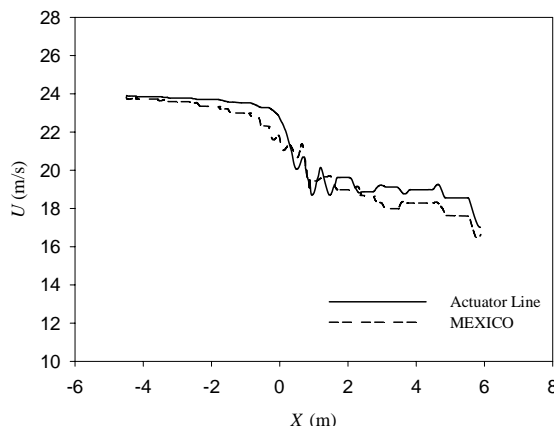


Fig. 10 Axial wake velocity with AL and experiment at $r=1.84m$
 شکل 10 سرعت پسیاد محوری روش خط عملگر و آزمون تجربی در مقطع $r=1.84m$

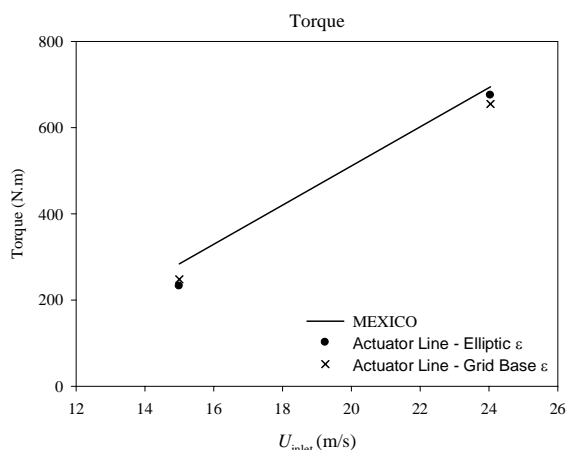


Fig. 15 Torque with AL and experiment

شکل 15 گشتاور روش خط عملگر و آزمون تجربی

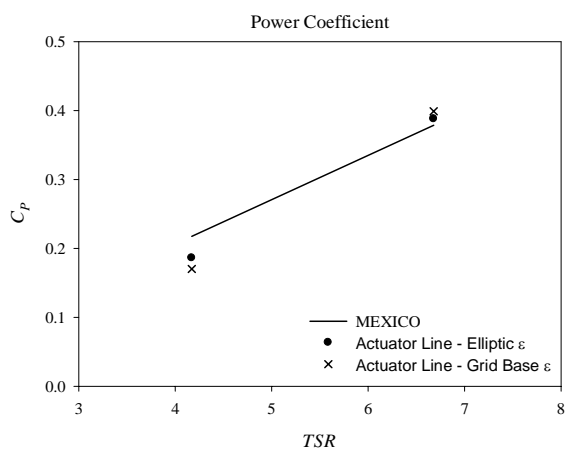


Fig. 16 Power coefficient with AL and experiment

شکل 16 ضریب توان روش خط عملگر و آزمون تجربی



Fig. 17 Vortex isosurface contours and wakes structure

شکل 17 کانتورهای هم سطح گردابه و ساختار پسابها

حالت شرایط طراحی (سرعت $15(m/s)$ و حالت واماندگی (سرعت $24(m/s)$) صورت گرفت. نتایج حاصل، با داده‌های سرعت سنجی تصویری ذرات اعتبار سنجی شدند. این اعتبار سنجی، با مقایسه سرعت‌های محوری و شعاعی جریان در پشت روتور و برای حسگرهای موجود در دو مقطع $R=1.848m$ (حسگر راستای طولی) و $X=0.3m$ (حسگر راستای شعاعی) انجام شد. همچنین پارامترهای عملکردی توربین بررسی و مقایسه شدند.

به صورت کلی، در روند تخمین نتایج، همگرایی خوبی بین آزمون تجربی و

3-6- نتایج پارامترهای عملکردی

در این قسمت نتایج مربوط به پارامترهای عملکردی توربین نظیر ضریب توان، نیروی رانش و گشتاور ذکر شده است.

شکل 14 نمودار نیروی رانش بر حسب سرعت‌های مختلف ورودی است. با توجه به شکل 14، مشاهده می‌شود خط عملگر، نیروی رانش توربین را کمی بیش از اندازه واقعی تخمین زده است که معمولاً این مشکل، در بیشتر مدل‌های شبیه‌سازی توربین بادی، مشاهده می‌شود.

میزان انحراف پیش‌بینی برای سرعت‌های ورودی $15(m/s)$ و $24(m/s)$ به ترتیب برابر 5.4 و 8.5 درصد می‌باشد. طبق نظریه تکانه اجزا پره، افت سرعت، مستقیماً با نیروی رانش توربین مرتبط است [13]، همین امر باعث می‌شود تا میدان سرعت پسابها در راستای شعاعی، کمتر از داده‌های تجربی پیش‌بینی شوند.

شکل‌های 15 و 16 به ترتیب نمودار گشتاور، به ازای سرعت‌های ورودی مختلف و ضریب توان توربین به ازای نسبت‌های سرعت نوک می‌باشد. با توجه به نمودارها، بین نتایج شبیه‌سازی و آزمون تجربی، همگرایی نسبتاً خوبی وجود دارد.

از علل اختلاف در نتایج می‌توان به استفاده از داده‌های آئروپنایمیکی خام هواپرها و نیز ساده‌سازی‌های انجام گرفته برای نواحی انتقالی بین هواپرها در پره اشاره کرد. میزان اختلاف نتایج گشتاور تخمین زده شده برای حالت شرایط طراحی 13 درصد و برای حالت واماندگی 2.8 درصد است. همچنین اختلاف نتایج ضریب توان برای سرعت‌های ورودی $15(m/s)$ و $24(m/s)$ به ترتیب برابر 9 و 2.4 درصد می‌باشد.

شکل 17، تشکیل جریان پسابها در پشت روتور و نیز گردابه‌های نوک و ریشه پره را نمایش می‌دهد. با توجه به شکل، میدان جریان پسابها به دو ناحیه پسابهای دور و پسابهای نزدیک تقسیم‌بندی می‌شود. پسابهای نزدیک، در ناحیه‌ای تا حدود دو برابر قطر توربین، در پشت روتور وجود دارند. پس از این ناحیه، ناحیه به اصطلاح گذار و سپس ناحیه پسابهای دور قرار دارد. در این پژوهش مطالعه رفتار پسابهای نزدیک بررسی شده است.

7- نتیجه گیری

در این مقاله، به شبیه‌سازی جریان ناشی از پسابها در پشت روتور توربین بادی آزمون مکزیکو، با استفاده از نظریه خط عملگر و مدل آشفستگی گردابه‌های بزرگ پرداخته شد. شبیه‌سازی برای دو حالت مختلف آزمون شامل

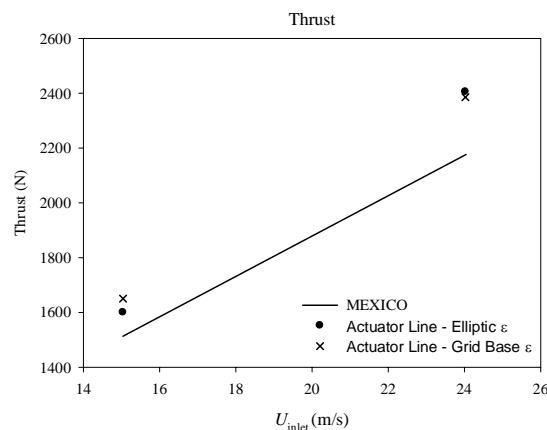


Fig. 14 Thrust force with AL and experiment

شکل 14 نیروی رانش روش خط عملگر و آزمون تجربی

μ_t	لزجت دینامیکی آشفته ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)
ϕ	زوایه جریان (degree)
α	زوایه حمله (degree)
γ	زوایه گام (degree)
Ω	سرعت دورانی (rpm)
Δ	اندازه سلول شبکه‌بندی (m)
ε	عرض تصویر نیرو
ρ	چگالی (kgm^{-3})
τ	تنش‌های درهمی (Pa)
بالانویس‌ها	
AR	نسبت منظری
SGS	مقیاس زیرشبهه
TSR	نسبت سرعت نوک
زیرنویس‌ها	
rel	نسبی
θ	راستای مماسی
z	راستای قائم

9-مراجع

- [1] L. J. Vermeer, J. N. Sorensen, A. Crespo, Wind turbine wake aerodynamics. *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 39, No. 6, pp. 467-510, 2003.
- [2] B. Sanderse, S. P. van del Pijl, B. Koren, Review of computational fluid dynamics for wind turbine wake aerodynamics, *Wind Energy* Vol. 14, No. 7, pp. 799-819, 2011.
- [3] R. Mikkelsen, *Actuator Disc Methods Applied to Wind Turbines*, PhD thesis, Technical University of Denmark, 2003.
- [4] Y. T. Wu, F. Porté-Agel, Large-eddy simulation of wind turbine wakes: evaluation of turbine parametrisations, *Boundary Layer Meteorology*, Vol. 138, No. 3, pp.345-366, 2011.
- [5] R. C. Storey, S. E. Norris, J. E. Cater, An actuator sector method for efficient transient wind turbine simulation, *Wind Energy*, Vol. 18, No. 4, pp. 699-711, 2015.
- [6] J. N. Sørensen, W. Z. Shen, Numerical modelling of wind turbine wakes, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 124, No. 2, pp.393-99, 2002.
- [7] N. Troldborg, *Actuator Line Modeling of Wind Turbine Wakes*, PhD thesis, Technical University of Denmark, 2008.
- [8] W. Z. Shen, J. N. Sorensen, J. H. Zhang, Actuator surface model for wind turbine flow computations, *Proceedings of European Wind Energy Conference and Exhibition*, Milan, Italy, May 7-10, 2007.
- [9] E. Mahmoodi, A. P. Schaffarczyk, Actuator disc modeling of the MEXICO rotor experiment, *Wind Energy-Impact of Turbulence*, Vol. 2, No. 1, pp. 29-34, 2014.
- [10] E. Mahmoodi, A. Jafari, A. Keyhani, Wind turbine rotor simulation via CFD based actuator disc technique compared to detailed measurement, *International Journal of Renewable Energy Development (IJRED)*, Vol. 4, No. 3, pp. 205-210, 2015.
- [11] E. Mahmoodi, A. Jafari, A. Keyhani, Near wake modeling of a wind turbine particle image velocimetry experiment, *Iranica Journal of Energy & Environment*, Vol. 6, No. 3, pp.195-206, 2015.
- [12] W. Jin, *Numerical Simulation of Wind Turbine Wakes based on Actuator Line Method in NEK5000*, Master thesis, Royal Institute of Technology, 2013.
- [13] H. Hongmin Zhong, F. Tang, L. Wang, Lagrangian dynamic large-eddy simulation of wind turbine near wakes combined with an actuator line method. *Applied Energy*, Vol. 144, No. 1, pp. 224-233, 2015.
- [14] A. Baez-Vidal, O. Lehmkuhl, D. M. Valdivieso, C. D. Pérez Segarra, Parallel large eddy simulations of wind farms with the actuator line method, *Procedia Engineering*, Vol. 61, No. 1, pp. 227-232, 2013.
- [15] J. N. Sørensen, R. F. Mikkelsen, S. Sarmast, Simulation of wind

شبیه‌سازی صورت گرفته، مشاهده شد و خصوصیات اصلی جریان به‌درستی ثبت و محاسبه شدند.

پیش‌بینی میدان سرعت پساب‌ها در حالت شرایط طراحی، یعنی سرعت $15(\text{m/s})$ ، نسبت به حالت واماندگی با دقت بالاتری انجام شد و نتایج بسیار رضایت‌بخش بودند اما پارامترهای عملکردی در سرعت $24(\text{m/s})$ اختلاف کمتری داشتند به طوری که به‌عنوان مثال، نیروی رانش با 8.5% درصد و گشتاور و توان خروجی توربین به ترتیب با 2.8% و 2.4% درصد اختلاف، پیش‌بینی شدند.

دلیل این امر، وقوع پدیده جدایش جریان روی پره‌ها در سرعت‌های بالاتر و نیز قرارگیری اکثر نواحی پره در شرایط واماندگی است. به‌منظور تحلیل دقیق‌تر این حالت، نیاز است تا از روش مدل‌سازی روتور کامل که هزینه محاسباتی بسیار بالاتری دارد، استفاده شود.

با افزایش سرعت باد، اختلاف نتایج در ناحیه ریشه پره ملموس‌تر می‌شود. این امر به دلیل زاویه حمله بالاتر در قسمت ریشه، نسبت به سایر نواحی است که موجب شده تا پدیده واماندگی در این ناحیه اثرگذاری بیشتری داشته باشد.

طبق جدول مشخصات آئرو‌دینامیکی دوبعدی هواپره‌های بکار رفته در پره، شرایط اندازه‌گیری و خصوصیات هواپره ریزو نسبت به دو هواپره دیگر بسیار متفاوت است.

از آنجاکه در این پژوهش از داده‌های اصلی هواپره استفاده شده است، عدم تطابق کامل مشخصات عملکردی توربین با مقادیر شبیه‌سازی امری دور از انتظار محسوب نمی‌شود.

همچنین، ساده‌سازی‌های انجام‌شده برای نواحی انتقالی بین هواپره‌ها، منجر به ایجاد خطا در مقادیر نتایج می‌شود، زیرا این ناسازگاری هندسی بین هواپره‌ها منجر به تولید جریان‌های ناخواسته محوری می‌شوند.

با توجه به نتایج شبیه‌سازی صورت گرفته مشاهده می‌شود، مدل خط عملگر همراه با توزیع نیروی بیضوی، به‌خوبی می‌تواند جریان پساب‌های پشت روتور و پارامترهای عملکرد توربین را تخمین بزند و در مبحث شبیه‌سازی توربین‌های بادی، به‌عنوان یک روش کارا مورد استفاده قرار بگیرد.

8-فهرست علائم

C	طول وتر هواپره (m)
C_d	ضریب پسا
C_l	ضریب برا
C_{SGS}	ثابت اسماگورینسکی
e_d	بردار یکه در جهت نیروی پسا
e_l	بردار یکه در جهت نیروی برا
f_ε	نیروی (N)
K_ν	انرژی جنبشی آشفته (I)
p	فشار ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$)
r	شعاع پره (m)
Re	عدد رینولدز
S_{ij}	تانسور تنش
t	زمان (s)
u_j	سرعت (ms^{-1})
u_∞	سرعت جریان آزاد (ms^{-1})

علائم یونانی

μ	لزجت دینامیکی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)
-------	--------------------------------------------------

- [21] H. Sarlak, C. Meneveau, J. N. Sørensen, Role of subgrid-scale modeling in large eddy simulation of wind turbine wake interaction, *Renewable Energy*, Vol.77, No. 1, pp.386-399, 2015.
- [22] H. Snel, J. G. Schepers, B. Montgomerie, The MEXICO project (Model experiments in controlled conditions): The database and first results of data processing and interpretation. *Journal of Physics, Conference Series, The Science of Making Torque* 2007, Vol. 75, 2007.
- [23] J. G. Schepers, K. Boorsma, T. Cho, S. Gomez-Iradi, *Final report of IEA Task 29, Mexnext (Phase 1): Analysis of MEXICO wind tunnel measurements, Technical Report ECN-E12-004, Energy Research Center of the Netherlands*, 2012.
- [24] C. Rhie, W. Chow, Numerical study of turbulent flow past an aerofoil with trailing edge separation, *AIAA journal*, Vol. 21, No. 11, pp.1525-1532, 1983.
- [25] A. Mette, *Wake Modelling using an actuator disk model in openFOAM*, Master thesis, Norwegian University of Science and Technology, 2013.
- turbine wakes using the actuator line technique, *Royal Society of London. Philosophical Transactions A. Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Vol. 373, No. 2035, 2015.
- [16] J. N. Sørensen, R. Mikkelsen, S. Sarmast. Determination of wind turbine near-wake length based on stability analysis, *Journal of Physics Conference*, Vol. 524, No. 1, doi:10.1088/1742-6596/524/1/012155, 2014.
- [17] S. Sarmast, H. Sarlak, Numerical investigation of the wake interaction between two model wind turbines with span-wise offset. *Journal of Physics Conference*, Vol. 524, No. 1, 012137, 2014.
- [18] J. Smagorinsky, General circulation experiments with the primitive equations, I. The basic experiments, *Journal of Monthly Weather Review*, Vol. 91, No. 3, pp. 99-164, 1963.
- [19] T. Fredriksen, *Wind Energy; CFD simulation of wakes and wind turbine forces*, Master Thesis, Telemark University, 2013.
- [20] Gh. Heidarinejad, T. Sedaghat, Simulation of turbulent flow using LES method with localized dynamic sub grid scale model, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 10, No. 2, pp. 31-41, 2010. (فارسی)