



مطالعه عددی توربین داریوس با استفاده از مدل شش درجه آزادی برای در نظر گرفتن اثر اینرسی و برهم کنش میان سیال و جسم صلب

علیرضا عرب گلارچه¹، محمد مقیمان^{2*}، سید محمد جوادی مال آباد³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه مهندسی فناوری های نوین، قوچان

* مشهد، صندوق پستی 91775-1111، moghiman@um.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 26 تیر 1394

پذیرش: 27 شهریور 1394

ارائه در سایت: 30 آبان 1394

کلید واژگان:

توربین باد

داریوس

CFD

برهم کنش سیال و جسم صلب

6DOF

چکیده

توربین بادی داریوس برخلاف توربین های محورافقی با مشکل خود راه اندازی مواجه است. محاسبه شتاب و گشتاور نوسانی توربین های بادی محور عمودی به دلیل نیاز به حل همزمان معادلات اویلری حاکم بر جریان سیال و معادلات لاگرانژی حاکم بر بدنه صلب توربین، دارای پیچیدگی و محاسبات بالایی است. اما در بیشتر مطالعات انجام شده با صرف نظر از اثر ممان اینرسی، سرعت زاویه ای توربین مشخص و ثابت فرض شده است. در این مطالعه با محاسبه برآیند نیروهای آیرودینامیکی ناشی از باد و نیروهای خارجی ناشی از اصطکاک و ژنراتور، شتاب، سرعت و موقعیت توربین با انتگرال گیری از قانون دوم نیوتن محاسبه می شود. معادلات حاکم بر سیال بر اساس روش حجم محدود گسسته و توسط الگوریتم پیزو حل شده است. شبیه سازی به صورت غیرپایا و از شبکه دینامیک برای بررسی حرکت روتور استفاده شده است. نتایج شبیه سازی حرکت توربین از لحظه سکون تا رسیدن به سرعت حدی نشان می دهد که با در نظر گرفتن اثر متقابل جریان باد و پره های صلب می توان دریافت که با افزایش ممان اینرسی، زمان رسیدن به سرعت حدی افزایش می یابد. نتایج نشان می دهد در ابتدای حرکت گشتاور راه اندازی این توربین کم است و با افزایش سرعت دورانی، ابتدا گشتاور تولیدی افزایش و سپس کاهش می یابد. همچنین نتایج نشان می دهد در سرعت دورانی کمتر از حد بهینه، واماندگی بالا و گریز جریان از داخل روتور بدون برخورد با پره ها موجب افت توان تولیدی می شود. نتایج بررسی اثر ممان اینرسی نشان می دهد این پارامتر نقش مهمی بر فرکانس و دامنه ی سرعت زاویه ای و گشتاور توربین دارد که در تحلیل مکانیکی پره ها مانند پدیده خستگی از اهمیت زیادی برخوردار است.

Numerical simulation of Darrieus wind turbine using 6DOF model to consider the effect of inertia and the fluid-solid interaction

Alireza ArabGolarche¹, Mohammad Moghiman^{1*}, Seyyed Mohammad Javadi MalAbad²

1- Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University Of Mashhad, Mashhad, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Quchan University of Advanced Technology, Quchan, Iran.

* P.O.B. 91775-1111, Mashhad, Iran, moghiman@um.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 17 July 2015
Accepted 18 September 2015
Available Online 21 November 2015

Keywords:

VAWT
Fluid-solid interaction
6DOF
Moment of inertia

ABSTRACT

Unlike HAWT, Darrieus wind turbine is faced with the self-start problem and high fluctuations at output torque. Because of the need for techniques based on meshing and coupling Eulerian fluid equations and the Lagrangian equations for moving rigid body, the calculation of rigid body acceleration and fluctuations torque of VAWT is very complicated and is a function of the moment of inertia of the turbine. In most studies, regardless of this effect, the angular velocity of turbine is assumed to be fixed. In this study, for calculating the turbine rotational speed and position, the sum of wind-driven aerodynamic forces and external forces caused by friction and generators is calculated and placed into Newton's second law to calculate the acceleration, and integrate it in time steps. The governing equations of fluid are discretized based on finite volume method and coupled by Piso algorithm. The simulation is performed unsteady and dynamic mesh is used for moving the rotor. The results could check the interaction between wind and rigid blades in the process of increasing the rotational speed of turbine, and simulate the rotor from the moment of rest until the turbine reaches its final rotational speed. The causes of reduction in torque at low rotational speed are investigated and it has been shown that high dynamic stall and passing high exergy flow into the rotor without interaction with blades results in power reduction. Moment of inertia has significant impact on the frequency and amplitude of rotational velocity, fluctuations of output torque and output power, which is important in mechanical analysis of blades' fatigue.

1- مقدمه

انرژی و کم شدن منابع سوخت های فسیلی، توجه بسیاری از محققین به

توربین های بادی جلب شده است. اولین نوع توربین بادی ساخته شده توسط

در سال های اخیر، در پی عواملی چون آلودگی های محیطی، افزایش تقاضای

Please cite this article using:

A. ArabGolarche, M. Moghiman, S.M. Javadi MalAbad, Numerical simulation of Darrieus wind turbine using 6DOF model to consider the effect of inertia and the fluid-solid interaction, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 12, pp. 143-152, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

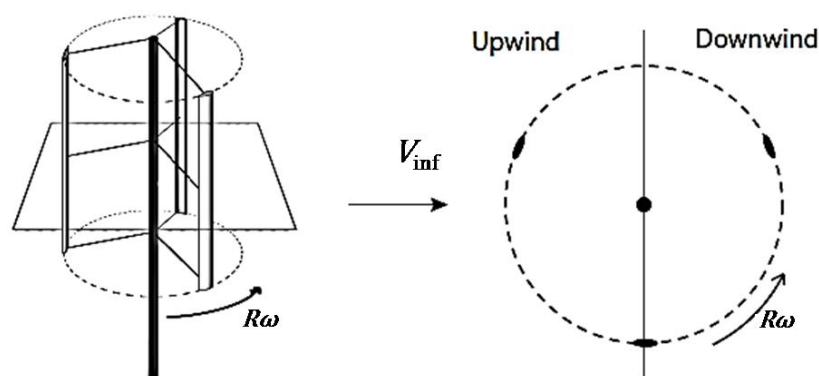
معرفی شدند. در این راستا در سال 1981 پاراسچیو [7]، مدل تحلیلی تیوب جریانی دوبل را ارائه کرد. این مدل نسبت به مدل تک تیوب جریانی² تمپلین [8] و مدل تیوب جریانی چندگانه³ ویلسون [9] پیشرفته تر بود. این مدل ها می توانستند منحنی مشخصه توربین را بدست آورند. همچنین نشان می دادند این توربین، در مقایسه با دیگر انواع توربین ها، گشتاور راه اندازی بسیار کمی تولید می کند.

با این وجود، روش های تحلیلی، درک بالایی از علل این پدیده را نشان نمی دادند. این روش ها برای در نظر گرفتن نیروی برای پره نیاز به اطلاعات آزمایشگاهی دارند که برای پره در حالت ثابت (غیر متحرک) و در زوایای حمله متغیر بدست آمده است. به عبارتی در این مدل ها ضریب برای پره معادل با حالت ثابت فرض می شوند. با وجود چنین فرضی، پدیده هایی چون واماندگی دینامیکی، مسیر منحنی جریان نسبت به پره (به خصوص در صلبیت بالا) و اثر برخورد گردابه های بالادست با پره در پایین دست در نظر گرفته نمی شود [7]. در سال 2013 باتیستا [10] نشان داد که روش های تحلیلی در مقابل محاسبات سبک با معایبی چون وجود نداشتن اطلاعات مناسب ایرفویل ها در زوایای حمله بالای حد واماندگی و نتایج نامناسب در صلبیت بیشتر از 0.5 و نسبت سرعت نوک پره⁴ (λ) بیشتر از 6 مواجه هستند.

به علت مشکلات روش های تحلیلی، در سال های اخیر از دینامیک سیالات محاسباتی نیز جهت بررسی این توربین استفاده می شود. در دینامیک سیالات محاسباتی برای در نظر گرفتن حرکت توربوماشین در دامنه شبکه بندی شده معمولاً از دو روش قاب مرجع یا شبکه لغزان استفاده می شود. در روش قاب مرجع شبکه متغیر نبوده و حرکت توربین با استفاده از یک روش ریاضی به معادلات اعمال می شود؛ اما در روش شبکه لغزان، شبکه همراه با حرکت توربین تغییر می کند. استفاده از روش قاب مرجع به علت پایا بودن نمی تواند جدایش و برهم کنش گردابه ها با پره ی پایین دست را در نظر بگیرد. لذا معمولاً در مورد این نوع خاص از توربوماشین ها روش شبکه لغزان مورد استفاده قرار می گیرد.

کوربنکو [11] در 2013 با استفاده از روش حجم محدود یک توربین داریوس را به صورت دوبعدی مدل کرد. او برای شبیه سازی حرکت روتور از روش شبکه لغزان استفاده کرد. در شبیه سازی او سرعت دوران توربین به صورت ثابت و مقدار آن جزء فرضیات مسئله در نظر گرفته شده بود. او نیروهای وارد بر پره را در چند سرعت دورانی ثابت توربین محاسبه کرد.

در اغلب تحقیقات عددی انجام شده، روش شبیه سازی توربین داریوس بدون در نظر داشتن تفاوت ها، از روش های مورد کاربرد در توربین های محور افق کپی برداری شده است.



ب: شماتیک سه بعدی توربین

الف: تصویر دوبعدی مقطع توربین

Fig. 1 T Sketch of a straight-bladed VAWT

شکل 1 نمای توربین داریوس پره مستقیم

بشر نوعی از توربین های محور عمودی پسایی بود که در منطقه سیستان ایران مورد استفاده قرار گرفت [1]. اما با پیشرفت این صنعت، توربین های محور افقی معرفی شدند. این توربین ها که براساس نیروی برآ عمل می کنند، راندمان بیشتری داشته و موجب بازنشسته شدن توربین های محور عمودی پسایی شدند، به طوری که عمده تحقیقات مربوط به انرژی باد در قرن گذشته به توربین های محور افقی اختصاص یافت.

توربین داریوس پره مستقیم یکی از انواع توربین های بادی محور عمودی است که بر اساس نیروی برآ کار می کند. توربین داریوس در سال 1931 اختراع شد [2]؛ اما از آن جا که ساخت آن در ابعاد بزرگ دشوار بود و توانایی تولید برق در مقیاس بزرگ را نداشت، تا مدت ها صنعت علاقه کمتری به آن نشان می داد. با این وجود در دهه اخیر، با تعریف نیازهای جدید، محققین دوباره به این نوع توربین علاقه نشان دادند. با معرفی ساختمان های انرژی صفر و لزوم ایجاد منابع تولید برق در مناطق دور از شبکه، عوامل دیگری چون سادگی ساخت، قیمت ساخت پایین و کارایی بالا در ابعاد و ارتفاع کم، در کنار راندمان بالا برای توربین اهمیت یافت.

به طور خلاصه مزیت اصلی توربین های بادی محور عمودی ($VAWT^1$) استقلال از جهت باد است که این توربین را سامانه ای مناسب برای شرایط شهری (که باد دارای جهت غالب نیست) معرفی می کند. علاوه بر این، توربین داریوس راندمان مناسبی در ابعاد کوچک، سرعت باد و ارتفاع کم دارد. هزینه ساخت و نگهداری کم و سادگی سیستم نیز مزایای دیگر این نوع توربین است. با وجود اینکه توربین های محور افقی هنوز هم در ابعاد بزرگ راندمان بهتری نسبت به توربین های محور عمودی دارند، اما برای مصارفی چون ساختمان های انرژی صفر و مناطق دور از شبکه که نیاز به ساخت توربین عظیم نیست؛ با توجه به مزایای ذکر شده می توان توربین داریوس را انتخاب مناسب تری دانست. در مقابل مزایای یاد شده این توربین معایبی دارد که در سال های اخیر جهت بهبود، مورد توجه محققین بوده است. به طور عمومی این تحقیقات اکثراً در سه بخش بهبود ضریب توان، تقویت ناحیه مرده و کاهش نوسانات خروجی قرار می گیرد.

همان طور که عنوان شد، راه اندازی اولیه این نوع توربین به دلیل پدیده های موسوم به ناحیه مرده با مشکلاتی همراه است. این پدیده در اثر عوامل مختلف مانند برخورد گردابه ها به پره و قرارگیری پره در زاویه غیر مناسب به وجود می آید [3,4]. از طرفی برخورد گردابه های جدا شده در بالادست با پره پایین دست موجب اثرگذاری بیشتر در نیروی لیفت می شود.

توربین های بادی داریوس در طول یک گردش کامل خود، به طور ذاتی دارای شرایط آیرودینامیکی کاملاً ناپایدار هستند [5]. این شرایط ناپایدار اساساً به دلیل تغییرات پیوسته زاویه حمله در طی یک دوران به وجود می آید. این پدیده در سایر کاربردهای ایرفویل ها، نظیر توربین های بادی محور افقی کمتر رخ می دهد. این ویژگی خاص توربین های محور عمودی موجب می شود علاوه بر جهت سرعت نسبی وارد به پره، اندازه سرعت و در نتیجه، عدد رینولدز نسبی هم در طول یک گردش متغیر باشد. این پدیده موجب بروز پدیده واماندگی دینامیکی و پیچیده شدن درک عوامل مختلف بر عملکرد توربین می شود و تأثیر مستقیم و مهمی بر روی نیروهای آیرودینامیک توربین و در نتیجه آن بر گشتاور و توان توربین دارد [6].

اگرچه توربین داریوس با پره مستقیم (شکل 1) از ساده ترین انواع توربین های بادی برای ساخت هستند؛ اما بررسی آیرودینامیکی آن بسیار پیچیده است. در ابتدا، انواعی از روش های تحلیلی جهت بررسی این توربین

1- Vertical Axis Wind Turbine

2- Single streamtube model
3- Multiple streamtube model
4- Tip-speed ratio

به دلیل درگیر نبودن توربین محور افقی با پدیده ناحیه مرده، بررسی روند افزایش سرعت توربین از لحظه سکون تا رسیدن به سرعت کاری خود، اهمیت کمی دارد؛ اما در توربین داریوس به دلیل فیزیک مورد اشاره نمی‌توان به سادگی این فرض را مورد قبول دانست.

در روش کلاسیک که در چند سرعت ثابت روتور، توربین بررسی می‌شود، روند افزایش سرعت و درگیری با ناحیه مرده نشان داده نمی‌شود. علاوه بر این در نسبت سرعت نوک پره کمتر از یک که نرخ تغییرات سرعت روتور بسیار ناپایا است، روش سرعت ثابت جوابگو نیست. در تحقیقات انجام شده گذشته نیز، علی‌رغم اهمیت این ناحیه، به دلیل ذکر شده، از این ناحیه صرف نظر شده و معمولاً بررسی تنها در نسبت سرعت نوک پره بیشتر از یک انجام می‌شود [12].

وجود نداشتن راه حل جامع برای تمامی مراحل تا رسیدن به سرعت نهایی و پایداری نشان دهنده این است که هنوز توربین‌های محور عمودی نیاز به مطالعاتی دارد که درک بهتری از وضعیت حرکت توربین بدهد تا بتواند در بررسی ناحیه مرده مورد استفاده قرار گیرد.

پدیده ناحیه مرده تنها مشکل تولید انرژی مکانیکی توسط این توربین نیست. یکی از مشکلات مهم این توربین وجود نوسان در گشتاور تولیدی توربین است. بنابراین نیاز به روش‌هایی وجود دارد که کیفیت انرژی حاصل از باد را جهت اتصال به شبکه برق سراسری بالا ببرد. در این جهت روش‌های کنترلی مانند DF1G¹ برای کاهش نوسانات خروجی توربین باد ارائه شده است [13]. این روش نیاز به اندازه‌گیری‌هایی دارد که اثر اینرسی در بدست آوردن گشتاور تولیدی در نظر گرفته شده باشد. این نیاز این روش‌ها را به اندازه‌گیری‌های تجربی محتاج می‌کند.

مایتغه در سال 2013 جهت بررسی نوسانات گشتاور خروجی مقدار گشتاور تولیدی لحظه‌ای توربین در یک دوران را اندازه گرفت [14]. برای اندازه‌گیری تجربی گشتاور توربین داریوس دو روش وجود دارد که باید یکی از دو پارامتر بار یا سرعت توربین را ثابت در نظر گرفت. با توجه به اینکه مقدار گشتاور تولیدی توربین در یک دوران نوسانی است. او به اجبار از روش سرعت ثابت استفاده کرد. نتایج او به خوبی گشتاور لحظه‌ای توربین در یک دوران، که به تعداد پره‌ها نوسان داشت، نشان داد. اگرچه اندازه‌گیری او دقیق‌ترین روش مرسوم بود؛ اما نتایج، فرض ثابت بودن سرعت را زیر سؤال برد. نرخ سرعت یک توربین رابطه مستقیم با گشتاور تولیدی آن دارد؛ اما نتایج نشان می‌دهد گشتاور توربین نوسانی است لذا فرض ثابت بودن سرعت مورد شک قرار می‌گیرد. در توربوماشین‌های دیگر مانند پمپ، سرعت توربین بر اساس سرعت موتور تعیین می‌شود؛ بنابراین فرض سرعت ثابت فرضی مناسب است. در توربین‌های محور افقی هم با توجه به نوسانات کم گشتاور تولیدی در یک دوران این فرض مورد قبول است. اما در توربین مقاله حاضر به دلیل شرایط مورد اشاره درستی این فرض نیازمند بررسی بیشتری است.

نتایج عددی امت [15] نیز مانند نتایج تجربی مایتغه نشان می‌داد که در نسبت سرعت نوک پره بیشتر از دو مقدار گشتاور تولیدی بین حداکثر خود یعنی در حالتی که پره در بالادست توربین قرار دارد تا حداقل خود یعنی در حالتی که پره در پایین دست توربین قرار دارد، نوسان می‌کند. به عبارتی برخلاف توربین‌های محور افقی که توربین در زوایای مختلف قرارگیری، گشتاور تولیدی ثابتی دارد، با تغییر موقعیت پره، گشتاور تولیدی نوسان دارد. علت این پدیده به سادگی در مطالعه پیشین نویسندگان [16] مشخص است. با محاسبه زاویه حمله در طول دوران توربین، به سادگی روشن است در طول

دوران، زاویه حمله نسبی توربین برخلاف انواع محور افقی در نوسان است. این نتایج به روشنی نشان می‌دهد که در حالت پایا گشتاور تولیدی توربین باد داریوس به صورت نوسانی است؛ بنابراین با توجه به قانون دوم نیوتن سرعت دوران توربین به صورت نوسانی خواهد بود. درحالی که در تحقیقات عددی پیشین، سرعت دورانی توربین به صورت ثابت و جزء داده‌های مسئله فرض شده است.

همان‌طور که اشاره شد در روش‌های مرسوم که در این مقاله با عنوان کلاسیک نام برده می‌شود سرعت حرکت روتور جز داده‌های مسئله فرض می‌شود و در چند سرعت دورانی ثابت، نیروهای آیرودینامیکی محاسبه می‌شوند. بنابراین روش کلاسیک از بررسی روند افزایش سرعت توربین ناتوان است و این روش تنها کنش سیال در برابر حرکت اجباری توربین را نشان می‌دهد. در چنین مسایلی بسیار مهم است تا برهم کنش میان سیال و توربین توسط ارائه‌ی یک پردازش مناسب در نظر گرفته شود.

هدف از این مقاله، مطالعه جریان پیچیده اطراف توربین داریوس، از لحظه سکون تا رسیدن به سرعت دورانی حدی، توسط روش شش درجه آزادی، است. در این راستا اثر ممان اینرسی توربین بر سرعت لحظه‌ای، گشتاور تولیدی و توان لحظه‌ای توربین بررسی خواهد شد و نتایج با روش کلاسیک مقایسه خواهد شد.

2- معادلات حاکم

در این مقاله برخلاف بیشتر مطالعات انجام شده، به جای ثابت در نظر گرفتن سرعت چرخش روتور، سرعت آن به صورت لحظه‌ای و به کمک یک کد عددی نوشته شده به زبان C بر اساس نیروهای وارد به روتور محاسبه شده است. بنابراین علاوه بر بخش مربوط به معادلات حاکم بر جریان سیال، در این بخش نحوه محاسبه مکان و سرعت لحظه‌ای توربین در هر لحظه نیز ذکر می‌شود.

ضریب گشتاور، نسبت سرعت نوک پره به سرعت باد (λ) و ضریب توان به ترتیب توسط معادلات 1 تا 3 محاسبه می‌شوند. در این معادلات R شعاع توربین، A مساحت جلوی توربین، V_∞ سرعت باد بالادست، ω سرعت دورانی توربین و T گشتاور تولیدی توربین می‌باشد.

$$C_T = T / 0.5 \rho R A V_\infty^2 \quad (1)$$

$$\lambda = \omega R / 2 V_\infty \quad (2)$$

$$C_P = \lambda C_T \quad (3)$$

2-1- معادلات حاکم بر سیال

به منظور شبیه‌سازی عددی جریان اطراف توربین توسط دینامیک سیالات محاسباتی، معادلات اساسی حاکم بر میدان جریان، شامل معادلات بقا جرم و مومنتم (4) می‌باشد [17].

$$\frac{\partial(\rho \phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho \phi(U - U_g)) = \text{div}(\Gamma_\phi \text{grad} \phi) + S_\phi \quad (4)$$

$$\phi = 1, u, v$$

در این معادلات ρ چگالی سیال، Γ ضریب نفوذ، U بردار سرعت جریان، S_ϕ ترم چشمه‌ی ϕ و در نهایت U_g سرعت حرکت شبکه می‌باشد.

علاوه بر معادله (4) برای در نظر گرفتن آشفتگی سیال، از مدل آشفتگی انتقال تنش برشی² [17] استفاده شده است تا در داخل لایه مرزی، جریان به صورت کاملاً توربولانس در نظر گرفته نشده و از فرضیات قوانین دیواره استفاده نشود. بلکه جهت محاسبه بهتر شرایط جریان در کنار دیواره و

مطابق فلوجارت شکل 2 ابتدا سرعت زاویه‌ای اولیه صفر در نظر گرفته می‌شود. برای محاسبه سرعت لحظه‌ای در هر گام زمانی، ابتدا معادلات حاکم بر میدان جریان روتور ساکن حل شده و شرایط میدان جریان در اطراف روتور محاسبه می‌شود. در مرحله بعد توسط کد نوشته شده گشتاور ناشی از نیروهای فشاری و لزجی (M_p و M_τ) محاسبه و با قرارگیری در قانون دوم نیوتن شتاب زاویه‌ای محاسبه خواهد گردید.

در این راستا، شتاب زاویه‌ای روتور ($\ddot{\theta}$) براساس ممان اینرسی و گشتاور برآیند وارد بر آن، از معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$\ddot{\theta} = M_{oz} I_{oz} \quad (9)$$

که در آن:

$$M_{oz} = M_p + M_\tau + M_f \quad (10)$$

و I_{oz} ممان اینرسی روتور حول محور z M_p گشتاور ناشی از فشار، M_τ گشتاور ناشی از نیروهای لزج و M_f گشتاور مقاوم ناشی از بار ژنراتور که تلفات مکانیکی را نیز شامل می‌شود، می‌باشد. لازم به ذکر است M_p و M_τ توسط محاسبات میدان جریان سیال که در مرحله قبل، طبق رابطه 11 و 12 محاسبه شده و M_f توسط اطلاعات ژنراتور و اتصالات منظور می‌شود.

$$M_p = \sum_f [r_f \times (p_f a_f)] \quad (11)$$

$$M_\tau = - \sum_f [r_f \times (\tau_f a_f)] \quad (12)$$

در این معادلات p_f فشار وارد بر سطح، τ_f تنش برشی وارد بر سطح، a_f بردار مساحت سطح و r_f بردار فاصله مرکز جرم تا مرکز سطح می‌باشد که بر روی تک تک شبکه‌های سطوح جسم جمع می‌شود.

با انتگرال‌گیری از شتاب زاویه‌ای در یک گام زمانی کوچک، سرعت زاویه‌ای و سپس موقعیت جدید هر پره و روتور در گام زمانی بعد مشخص می‌شود. با محاسبه موقعیت جدید، با استفاده از روش شبکه لغزان، شبکه موجود برای مکان جدید روتور و پرها تغییر شکل می‌یابد.

3- دامنه حل

برای در نظر گرفتن حرکت روتور به صورت چرخان، دامنه شبکه‌بندی شده حل، به یک دایره چرخان (قسمت خاکستری در شکل 4) و یک مستطیل ساکن در اطراف آن تقسیم شده است. دو ناحیه چرخان و ساکن دامنه حل، توسط دو سطح اشتراکی با یک شرط مرزی رابط⁶ [17] به معادله 13 و 14 مربوط شده‌اند:

$$U_M - U_S = 0 \quad (13)$$

$$(2\mu\epsilon U_S - P_S I)n_S + (2\mu\epsilon U_M - P_M I)n_M = 0 \quad (14)$$

در این معادلات I تانسور یکه، U سرعت، P فشار، S و M به ترتیب نشانه دامنه ثابت و دامنه متحرک و n بردار یکه عمود به سمت بیرون است.

شرایط مرزی و ابعاد دامنه محاسباتی مطابق بر شرایط آزمایشگاهی تاکاو [18] در نظر گرفته شده است (شکل 4). به منظور کاهش اثر شرط مرزی خروجی تونل باد بر الگوی جریان حول روتور، طول تونل باد دو برابر مقدار واقعی آن در نظر گرفته شده است تا شرط مرزی خروجی فشار ثابت ارضا شود. اطلاعات اصلی هندسی توربین مورد آزمون، در جدول 1 آورده شده است.

برای شبکه‌بندی دامنه حل، از یک شبکه ساختاریافته نوع 0، مطابق شکل 2 برای اطراف پره استفاده شده تا با دقت مناسب پروفیل تغییرات سرعت در لایه مرزی روی پره را محاسبه کند. جریان مورد نظر یک جریان آشفته است لذا لایه مرزی ضخامت بسیار کمی دارد.

محاسبه بهتر نیروهای بین سیال و پره توربین، انتقال از جریان آرام در زیر لایه لزج به جریان کاملاً توربولانس در زیر لایه خارجی، توسط دو معادله اضافی، در نظر گرفته می‌شود.

به عبارتی در این مدل معادله 7 برای نوبت¹ (γ) و معادله 8 برای نقطه آغاز انتقال از حالت آرام به توربولانسی در داخل لایه مرزی حل می‌شود و با معادلات انرژی توربولانسی k و فرکانس توربولانسی ω یعنی معادله 2 و 3 کوپل می‌شود [17].

در مسائل جریان خارجی باوجود جدایش، پیش‌بینی خوب زیر لایه انتقالی² (گذار) از این جهت حائز اهمیت است که به پیش‌بینی بهتر گردابه‌های اطراف کمک زیادی می‌نماید.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - Y_k + S_k \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \omega u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho \gamma)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \gamma u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\gamma} \right) \frac{\partial \gamma}{\partial x_j} \right] + P_{\gamma 1} - E_{\gamma 1} + P_{\gamma 2} - E_{\gamma 2} \quad (7)$$

$$\frac{\partial(\rho \tilde{Re}_{\theta t})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \tilde{Re}_{\theta t} u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\sigma_{\theta t} \left(\mu + \mu_t \right) \frac{\partial \tilde{Re}_{\theta t}}{\partial x_j} \right] + P_{\theta t} \quad (8)$$

این معادلات توسط روش حجم محدود در نرم‌افزار فلوئنت گسسته‌سازی شده‌اند. حرکت شبکه توسط روش شبکه لغزان³ می‌باشد. در شبیه‌سازی حاضر ترم‌های نفوذ و جابه‌جایی بر اساس طرح بالادست مرتبه دو⁴ و ترم نا پایا توسط طرح ضمنی مرتبه دو پس‌رو⁵ گسسته‌سازی و معادلات سرعت و فشار توسط روش پیرو متصل شده‌اند.

2-2- مدل ریاضی حرکت جسم صلب

همان‌طور که ذکر شد وجه تمایز این مطالعه در نظر گرفتن اینرسی توربین و پرهیز از فرض ثابت در نظر گرفتن سرعت روتور است. برای بدست آوردن سرعت حرکت روتور و شبکه ناحیه داخلی، یک کد به زبان C نوشته شده است. این کد قادر است میدان جریان حاصل از حل دینامیک سیالات محاسباتی را پردازش کند و سرعت حرکت روتور را به عنوان ورودی گام زمانی بعدی برای حل گر بدست آورد.

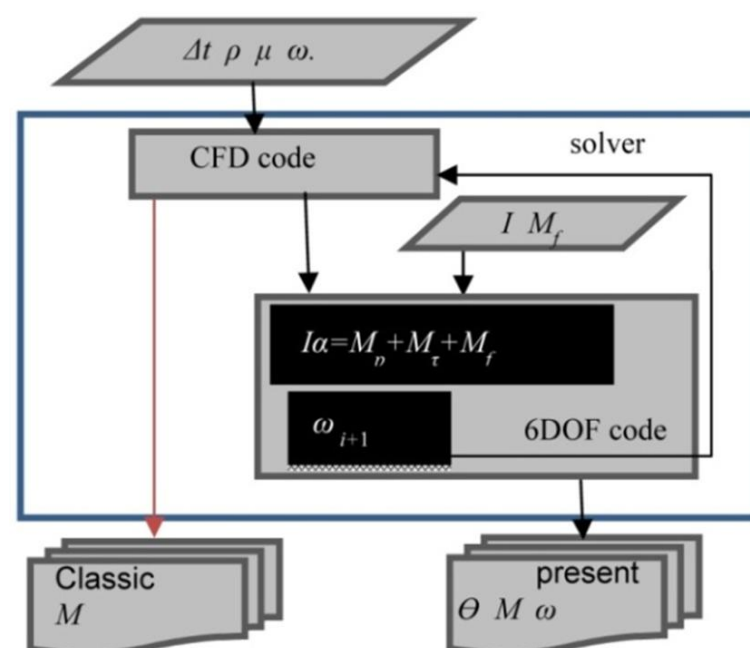


Fig. 2 Flow chart of fluid-rigid body coupling algorithm

شکل 2 فلوجارت روش حل

- 1- Intermittency
- 2- Buffer sub layer
- 3- Sliding Mesh
- 4- linear Upwind
- 5- Backward implicit scheme

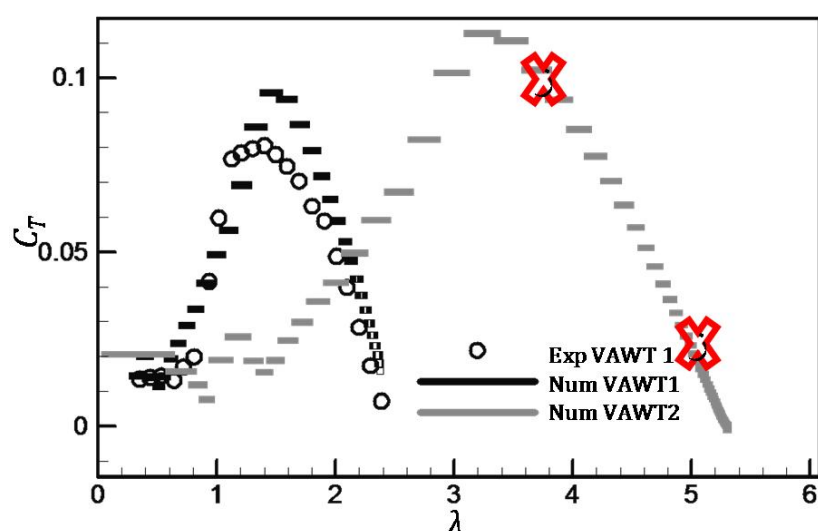


Fig. 5 Validation

شکل 5 اعتبار سنجی با نتایج تجربی

نتایج تطابق خوبی با نتایج تجربی به خصوص در سرعت‌های کم دارد. در سرعت‌های زیاد به علت دوبعدی بودن حل، اثر لبه فرار موجب اختلاف میان نتایج شده که البته قابل چشم‌پوشی است. در توربین 1 گستره‌ی کاری توربین تا $\lambda=2.5$ می‌رسد. این بازه کوچک است. به همین علت در نتایجی که در ادامه مقاله آورده شده است، از نتایج توربین 2 که بازه کاری گسترده‌تری دارد، استفاده شده است تا درک بهتری حاصل شود. این عمل با کاهش صلبیت توربین به وسیله افزایش شعاع توربین انجام گرفته است. به عبارتی تمامی مشخصات و شبکه توربین شماره 1 و 2 به جز شعاع برابر هستند. بنابراین، با این شرایط گستره کاری توربین تا $\lambda=5.3$ ادامه می‌یابد.

همان‌طور که اشاره شد، کد متصل‌شده به نرم‌افزار فلوئنت این توانایی را دارد که در هر زمان سرعت لحظه‌ای توربین را محاسبه و به‌روز کند. بنابراین در این مقاله از فرض ثابت در نظر گرفتن سرعت روتور استفاده نشده و شبیه‌سازی منطبق بر شرایط واقعی است؛ لذا سرعت لحظه‌ای توربین، در هر گام زمانی، متناسب با نیروهای وارده محاسبه می‌شود. در همین راستا در شکل 6، نمودار λ برحسب زمان ترسیم شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که توربین از سرعت چرخشی صفر شروع به حرکت می‌کند و با بالا رفتن سرعت، در نهایت حول $\lambda \approx 5$ به‌طور نوسانی به حالت پایا می‌رسد. برخلاف فرضی که در محاسبات پیشین، سرعت روتور را در یک گردش کامل، ثابت در نظر می‌گرفتند، سرعت روتور حتی در حالت نهایی که توربین به حالت پایدار می‌رسد هم نوسانی است.

علاوه بر سرعت نهایی نوسانی، در این نمودار اثر افزایش سرعت باد نیز بررسی شده است. افزایش سرعت باد از 7 تا مقدار 15 و 25 متر بر ثانیه سبب شده است توربین در زمان کمتری به حالت پایا برسد. علت این پدیده افزایش مومنتوم جریان باد می‌باشد. همچنین این تغییر سرعت باد منجر به افزایش λ متوسط نهایی به ترتیب تا 10% و 15% شده است. فرکانس نهایی نوسان نیز به‌طور متناسب با افزایش سرعت باد افزایش یافته است؛ بنابراین در این نوع توربوماشین، عدد رینولدز سرعت باد، در زمان رسیدن به حالت پایدار و سرعت نهایی توربین اثر گذار است [6].

همان‌طور که اشاره شد، روش‌های گذشته که توربین را در چند سرعت روتور ثابت مورد تحلیل قرار می‌دادند نمی‌توانستند روند افزایش سرعت را به‌صورت پیوسته بررسی کنند. با استفاده از این نتایج می‌توان، روند افزایش سرعت را در سه مرحله مورد بررسی قرار داد. مرحله اول (شروع به کار) از حالت سکون تا $\lambda=1$ که توربین از ناحیه مرده عبور می‌کند. مرحله دوم روند افزایش سرعت، از $\lambda=1$ تا $\lambda=4$ و مرحله نهایی که کاهش نرخ افزایش سرعت تا رسیدن به حالت نهایی پایا می‌باشد.

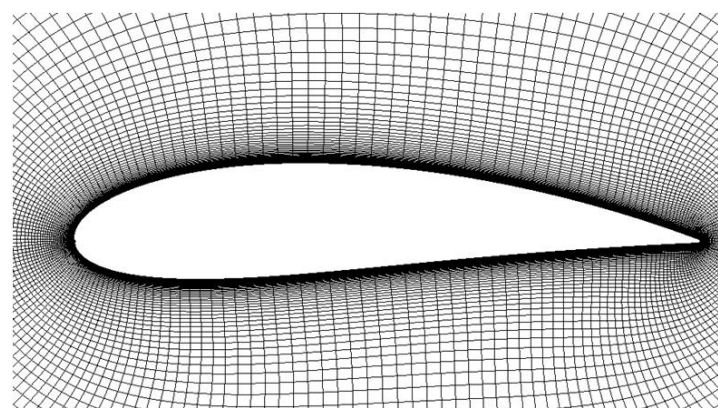


Fig. 3 The grid mesh around airfoil

شکل 3 نمایشی از شبکه ساختاریافته اطراف ایرفویل‌ها

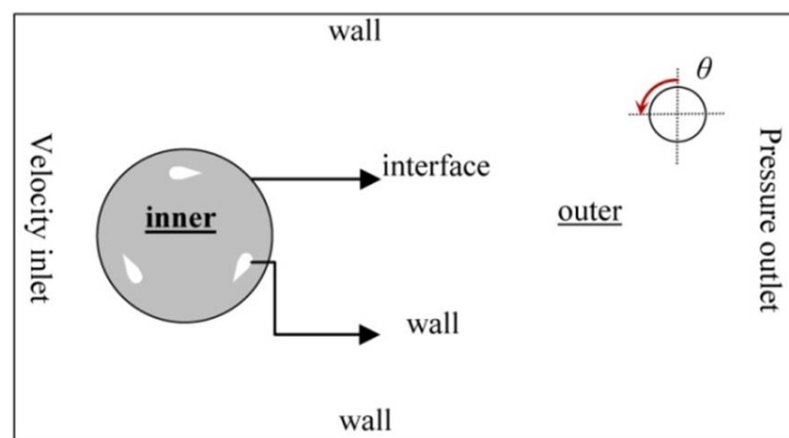


Fig. 4 Diagram of the model geometry and boundary conditions

شکل 4 شرایط مرزی و دامنه محاسباتی

جدول 1 پارامترهای دامنه موردبررسی

Table 1 Main geometrical features of the tested model

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
نوع ایرفویل	4515NACA	سرعت باد	7 m/s
طول وتر	0.10 m	شعاع توربین	0.30 و 1 m
طول دامنه	10 m	عرض دامنه	5 m
شعاع منطقه داخلی	0.90 m		

جدول 2 بررسی استقلال نتایج از گام زمانی و اندازه شبکه

Table 2 Time step and grid size independency

گام زمانی (s)	0.00005	0.0005	0.005
C_T برای حالت مرجع	0.108	0.110	0.153
Y^+ اولین شبکه در سطح پره	0.5	1.2	30
C_T برای حالت مرجع	0.112	0.110	0.185

بنابراین برای محاسبه اثر نیروی پسای برشی که مرتبط با تغییرات سرعت در عرض لایه مرزی است، از شبکه ساختار یافته بسیار ریز (Y^+ برابر با 1.2) در داخل زیر لایه لزج لایه مرزی استفاده شده است. در فاصله دورتر از پره (دو برابر طول وتر پره) از شبکه بدون ساختار مثلثی استفاده شده است. استقلال نتایج از اندازه‌ی شبکه‌بندی و گام زمانی مطابق جدول 2 مورد مطالعه قرار گرفته و در نهایت شبکه‌ای با Y^+ برابر با 1.2 و گام زمانی 0.0005 ثانیه مورد استفاده قرار گرفته است.

4- بحث و بررسی نتایج

در شکل 5 نمودار متوسط ضریب گشتاور محاسبه شده برحسب نسبت سرعت نوک پره (λ) برای توربین 1 با نتایج آزمایشگاهی توربین 1 [18] و نتایج عددی توربین 2 مقایسه شده است. به علت نوسانات شدید گشتاور در این نمودار از میانگین گشتاور در یک دوارن کامل روتور (هر خط کوچک) استفاده شده است. عرض خطوط نشانگر نوسانات سرعت زاویه‌ای توربین در همان دوران است که این عرض برای روش قدیمی برابر صفر بدست می‌آمد. این نوسانات، در روتورهای با ممان اینرسی بسیار پایین می‌تواند موجب ناپایداری شود.

7 برای چند سرعت بی بعد روتور مختلف رسم شده است. جزئیات بدست آوردن این نمودار در مرجع [6] به طور کامل شرح داده شده است.

در نمودار 7 نشان داده شده در $\lambda < 1$ زاویه حمله بین صفر تا 90° نوسان می کند. با توجه به اینکه پره مورد استفاده حدوداً در α بیشتر از 14° دچار واماندگی می شود، بنابراین پره فقط در زوایای قرارگیری (θ) صفر تا حداکثر 15° برای مثبت تولید می کند و در باقی 360° از دوران یا دچار واماندگی است، یا برای مثبت تولید نمی کند.

این موضوع به خوبی علت نیروی راه اندازی ضعیف توربین در $\lambda = 0$ (حالت سکون) تا 1 را به مدت زمان کمی از یک دوران که توربین بدون جدایش نیروی برآ تولید می کند، مربوط می کند. از طرفی با افزایش λ از یک، طبق نمودار 7 توربین مدت زمان بیشتری از دوران را بدون ایجاد واماندگی، نیروی برآ تولید می کند؛ بنابراین این انتظار وجود دارد که با افزایش سرعت دوران، گشتاور تولیدی بیشتر شود. اما همان طور که در شکل 8 مشاهده می شود با افزایش سرعت دوران تا $\lambda = 1$ ، گشتاور تولیدی توربین کاهش می یابد و یک کمینه نسبی در این سرعت وجود دارد.

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{\cos \theta}{\sin \theta - (\lambda / (1 - a))} \right) \quad (15)$$

در مورد علت به وجود آمدن این کمینه نسبی چنین می توان ذکر کرد که در توربین های بادی، نیروی پسا، حداکثر تا سرعت پره برابر سرعت باد می توانند عامل محرک باشند. به عبارتی در $\lambda < 1$ با توجه به اینکه محدوده تولید برآ به علت زاویه حمله بزرگ، کوچک است، به جای نیروی برآی تولیدی بیشتر نیروی پسا عامل محرک است. از طرفی نیروی پسا حداکثر تا $\lambda = 1$ ، کارگر است و حداقل گشتاور تولیدی این توربین $\lambda = 1$ قرار می گیرد. در این ناحیه می توان عامل محرک توربین از حالت سکون تا $\lambda = 1$ را نیروی پسا عنوان کرد. این شرایط مشخص می کند که برای کاهش اثر ناحیه مرده، بالا بردن گشتاور تولیدی در $\lambda = 1$ مهم است و تنها انتخاب پره با برآی زیاد کافی نیست. این مشکل حتی می تواند با زیاد کردن پسای ایرفول در ناحیه مربوطه هم بهبود یابد. تحقیقات گذشته هم تأیید می کند که ایرفویل های با ضخامت بیشتر که پسای بیشتری تولید می کنند شرایط خود راه اندازی مناسب تری ایجاد می کنند. البته سود بردن از پسا هم باید تابع شرایط صورت گیرد. نتایج محققین نشان داده است کمک راه اندازیهایی مانند ساونیس که حداکثر گشتاور خود را در $\lambda = 1$ دارند، به مراتب کارتر از کمک راه اندازیهایی مانند توربین پسایی کاسه ای که حداکثر گشتاوری در $\lambda = 2/3$ دارند، می باشد [4].

برای بررسی مرحله دوم ($\lambda = 1$ تا $\lambda = 4$)، در شکل 8 ضریب گشتاور تولیدی متوسط و λ برحسب زمان رسم شده است. به دلیل نوسانات شدید در گشتاور تولیدی، از متوسط ضریب گشتاور تولیدی در هر دوران کامل استفاده شده است. این نمودار از تعدادی خطوط ناپیوسته تشکیل شده است. هر یک از خطوط ناپیوسته مربوط به میانگین کمیت در هر دوران توربین است؛ بنابراین عرض خطوط نشانگر مدت زمان یک دوران و تعداد خطوط نشانگر تعداد دوران توربین می باشد. این شکل نشان می دهد که برخلاف توربین های پسایی، در این توربین گشتاور در حالت سکون کم، و با افزایش سرعت نوک پره به حداکثر خود می رسد و سپس به تدریج تا مقدار صفر کاهش می یابد.

کانتور شکل 9 میدان جریان را در سه زمان مختلف که روتور دارای سرعت و گشتاور متفاوت است نمایش داده است. با توجه به کانتور شکل 9 حداقل سه دلیل می توان برای گشتاور اولیه کم و افزایش گشتاور تولیدی با افزایش سرعت روتور بیان کرد. اول اینکه در λ کم، مانند 1، در مدت زمانی که جریان از جلوی توربین به پشت آن می رسد پره فقط 1 بار حجم باد را جاروب می کند و در نتیجه آن مقدار زیادی از انرژی باد با اغزرژی زیاد باقی می ماند.

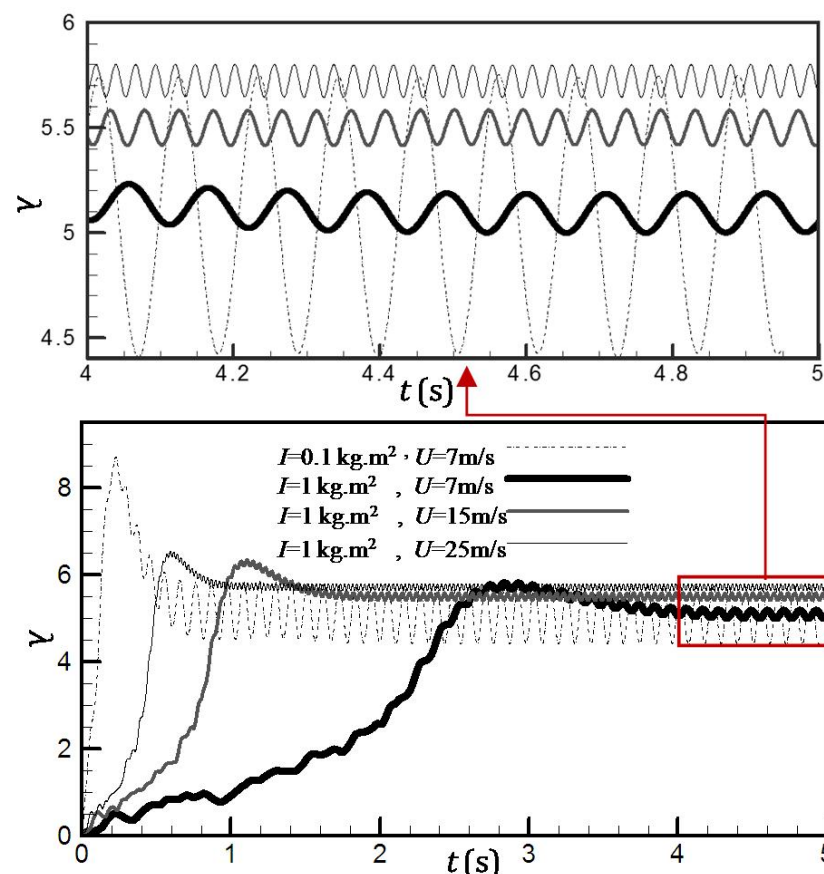


Fig. 6 λ versus time for several cases

شکل 6 نمودار λ برحسب زمان همراه با بزرگنمایی

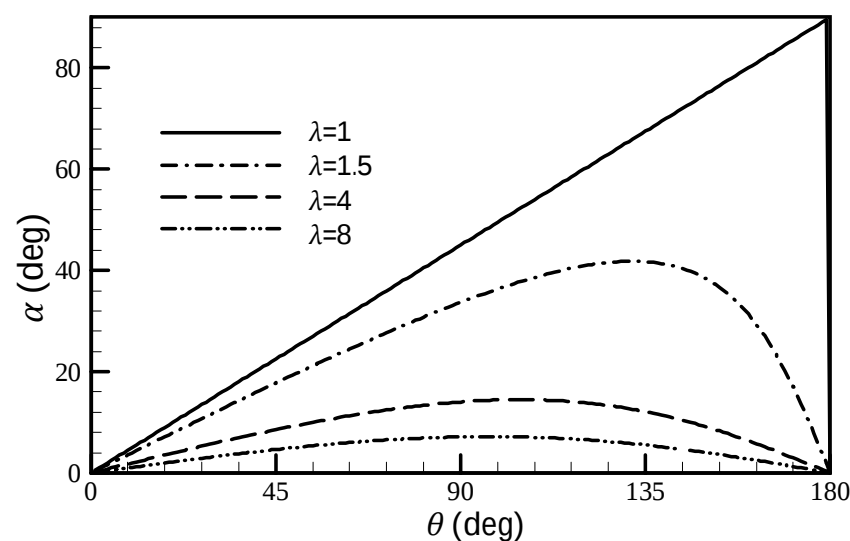


Fig. 7 α (deg) versus θ (deg) for several λ

شکل 7 نمودار زاویه حمله بر اساس زاویه قرار گیری برای چهار λ

با توجه به ضعف راه اندازی این توربین، بررسی آغاز حرکت مهم است. مقادیر اولیه میدان جریان در لحظه صفر می تواند در کیفیت نتایج و زمان رسیدن به حالت پایدار بسیار اثرگذار باشد. تنها تفاوت در مقادیر اولیه وجود گردابه در پشت پره های بالادست می باشد که از طریق کاهش فشار پایین دست یا برخورد با پره پایین دست اعمال اثر می کند. حضور چنین گردابه هایی در میدان جریان اولیه موجب افت گشتاور اولیه خواهد شد.

به عبارتی در مرحله اول (شروع به کار)، حضور یا حضور نداشتن گردابه ها می تواند تأثیراتی در آینده جریان داشته باشد. یکی از مزایای روش مورد استفاده این است که در روش های پیشین در چند سرعت ثابت نیروهای وارد بر توربین محاسبه می شدند، اما در این روش می توان اثر شرایط اولیه مختلف را بر افزایش سرعت روتور بررسی کرد؛ به عبارتی در این روش اثر حافظه جریان در نظر گرفته می شود.

برای تحلیل بهتر علت وجود گردابه های ایجاد شده، می توان اثر زاویه حمله وارد بر پره را مورد بررسی قرار داد. در شکل 7 زاویه حمله پره با در نظر داشتن سرعت نسبی باد که پره تجربه می کند، در طول یک دوران کامل رسم شده است. طبق رابطه 15 زاویه حمله، زاویه بین وتر پره و سرعت نسبی باد از دید پره تعریف می شود. باید در نظر داشت سرعت حرکت پره در سرعت نسبی باد مؤثر است؛ بنابراین زاویه حمله پره در یک دوران، در شکل

برای کلی توربین میگذارند. نکته مهم و پیچیده در این شرایط این است که این برخورد در پایین دست بسته به شرایط ممکن است موجب افت یا افزایش نیروی برآ پره در پایین دست شود. بنابراین محاسبه دقیق زمان و شدت برخورد گردابه‌های جدا شده از بالادست با پره پایین دست اهمیت می‌یابد.

داناو [19] نشان داد که افزایش سرعت دوران توربین بر مکان و شدت جدایش جفت گردابه‌ها تأثیر زیادی دارد. بنابراین در صورتی که گشتاور توربین مثبت باشد، سرعت توربین در حال افزایش است و شرایط در نقطه تولید گردابه جهت تولید هر گردابه متغیر است؛ زیرا با گذر زمان سرعت توربین افزایش یافته و مقدار حداکثر زاویه حمله کاهش می‌یابد. بنابراین فرض است که سرعت توربین را ثابت در نظر گرفته بود موجب می‌شود گردابه‌هایی که با پره در پایین دست توربین برخورد می‌کنند با شدت و مکان و زمان دقیقی محاسبه نشده باشند.

در صورتی که هدف بررسی ناحیه مرده باشد و مانند امت در چند سرعت دورانی ثابت از $\lambda=0$ تا λ ی نهایی در چند مرحله توربین بررسی شود حافظه جریان در نظر گرفته نخواهد شد. هر گردابه‌ای که در زمان حال با پره پایین دست برخورد می‌کند در زمان گذشته توسط پره بالا دست تولید شده است. از طرفی در مرحله راه‌اندازی، با گذر زمان سرعت دورانی توربین افزایش می‌یابد. بنابراین سرعت توربین در لحظه تشکیل گردابه در اطراف پره بالادست با سرعت توربین در لحظه برخورد گردابه با پره پایین دست متفاوت است. باید به حافظه جریان اهمیت داد زیرا گردابه‌ای که در سرعت $\lambda=2$ جدا می‌شود به‌طور کامل با گردابه‌ای که در $\lambda=1$ جدا می‌شود متفاوت است. بنابراین برای تحقیق کردن درباره ناحیه مرده و نوسانات گشتاور برخلاف دیگر توربومشین‌ها نیاز به روشی است که حافظه جریان را در نظر می‌گیرد و فرضی در مورد ثابت بودن سرعت توربین ندارد.

در نهایت، توربین به مرحله سوم ($\lambda > 4$) یا همان مرحله کاهش نرخ افزایش سرعت خواهد رسید. در این مرحله همان‌طور که در شکل 9 و در زمان 40 ثانیه نمایش داده شده، میدان جریان موجب می‌شود توربین مانند یک جسم صلب عمل کند. به عبارتی سرعت بالای پره موجب افزایش فشار در جلوی توربین شده و توربین مانند استوانه‌ای عمل می‌کند که در مقابل جریان قرار گرفته است. پدیده انسداد¹، موجب می‌شود جریان از اطراف توربین عبور کند و سیال عبوری از داخل توربین سرعت کمتری داشته باشد. این اتفاق موجب کاهش نیروی برآی تولیدی از برخورد با جریان و در نتیجه کاهش گشتاور می‌شود.

در سرعت‌های دورانی زیاد، حداکثر زاویه حمله در طول دوران کاهش می‌یابد. به عنوان مثال در $\lambda=5.3$ زاویه حمله بین 10° و 10° نوسان می‌کند. هرچند جدایش از سطح پره اتفاق نمی‌افتد، اما زاویه حمله کم هم باعث می‌شود نتوان از حداکثر ضریب برآی توربین استفاده کرد. به عنوان دلیل آخر، افزایش سرعت هرچند ضریب پسا تقریباً ثابت است اما موجب افزایش نیروی پسای وارد بر پره می‌شود. بنابراین در مرحله سوم نیروی پسا بر گشتاور تولیدی نیروی برآ غلبه می‌کند و شتاب به صفر میل می‌کند.

همان‌طور که اشاره شد، روش مورد استفاده می‌تواند به‌خوبی روند افزایش سرعت توربین را شبیه‌سازی کند و در درک عوامل مؤثر بر سرعت روتور بیافزاید. اما موارد کاربرد این روش به این مورد محدود نمی‌شود. با توجه به اینکه در معادلات استفاده شده جهت بدست آوردن سرعت لحظه‌ای توربین از ممان اینرسی توربین استفاده شده، توسط این روش می‌توان اثر این کمیت را نیز بررسی نمود.

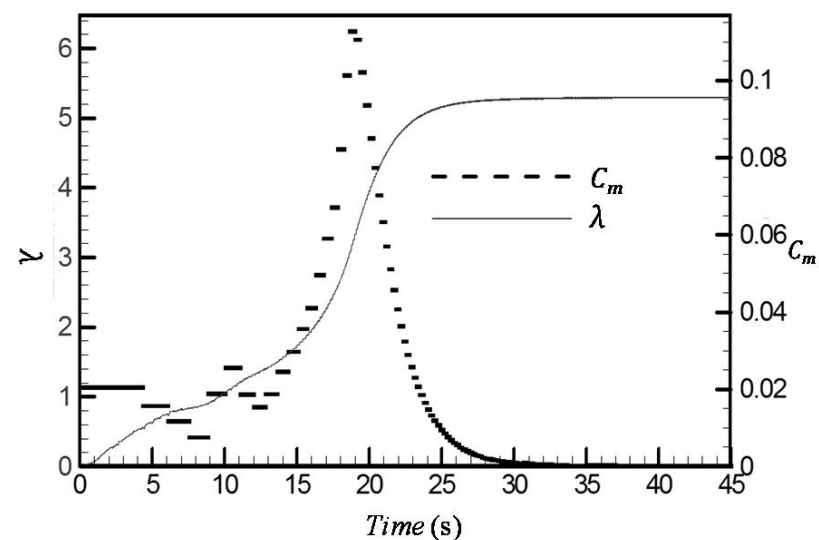


Fig. 8 λ and C_m versus Time (s)

شکل 8 نمودار لامبدا و ضریب گشتاور تولیدی بر حسب زمان

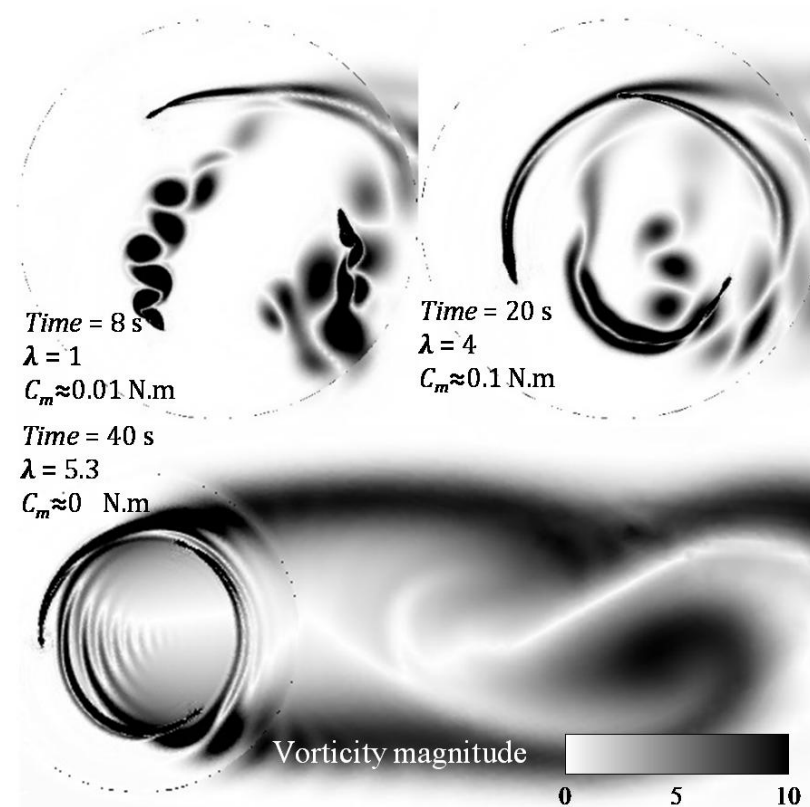


Fig. 9 Vorticity contours at the three time

شکل 9 کانتور ورتیسیت در سه زمان با گشتاور متفاوت

اما با بالا رفتن سرعت چرخش توربین تا $\lambda=4$ ، در این مدت زمان، پره جلویی 6 بار از حجم جریان باد، انرژی دریافت می‌کند که موجب بالا رفتن راندمان و از دست دادن کمتر انرژی باد می‌شود. دوم اینکه افزایش انرژی دریافتی توسط پره‌های بالادست موجب می‌شود انرژی کمتری به پره در پایین دست، یعنی مکان تولید گشتاور منفی، برسد.

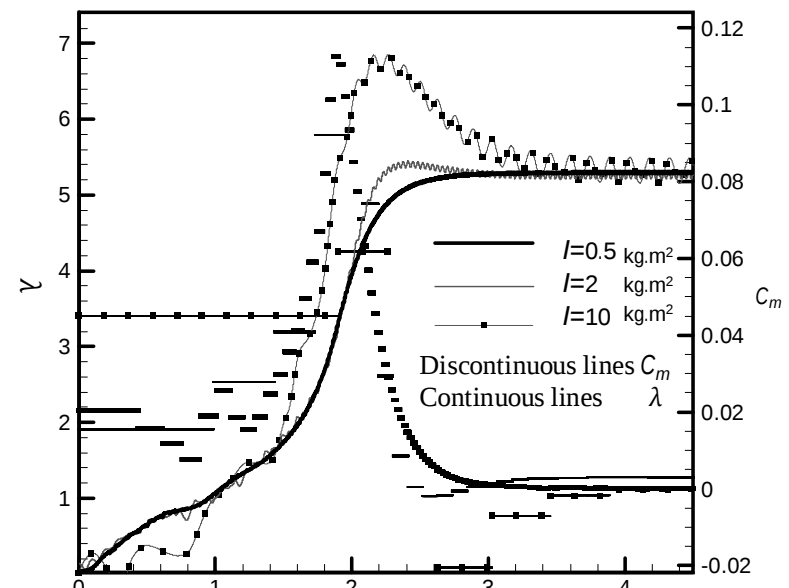
به عنوان دلیل سوم که مهم‌ترین اثر را هم دارد، می‌توان چنین عنوان کرد که با افزایش λ ، پره، حداکثر زوایای حمله‌ای کمتر از حد واماندگی را تجربه می‌کند. این جدانشدن جریان موجب افزایش نیروی برآ و راندمان می‌شود. برای مثال در $\lambda=4$ حداکثر زاویه حمله 14 است که تقریباً کمتر از شرایط واماندگی این ایرفویل قرار می‌گیرد و در تمام دوران تقریباً جدایش اتفاق نمی‌افتد. از شکل 9 هم به راحتی می‌توان دریافت که در $\lambda=4$ گردابه‌های کمتری از $\lambda=1$ ایجاد شده که خود موجب افزایش راندمان می‌شود. ایجاد گردابه یا برخورد گردابه با پره موجب افت در نیروی برآی تولیدی توسط ایرفویل می‌شود.

امت [15] نشان داد در سرعت‌های دورانی پایین ($2 > \lambda$) زاویه حمله تا مقادیر بیشتر از حد واماندگی نوسان می‌کند، بنابراین در این شرایط جدایش اثر بسیار مخربی در ایجاد ناحیه مرده خواهد داشت. این جدایش موجب کاهش نیروی برآی پره در بالادست می‌شود. علاوه بر این، گردابه‌های جدا شده از پره در بالادست با پره‌ی پایین دست برخورد کرده و تأثیر مضاعفی در

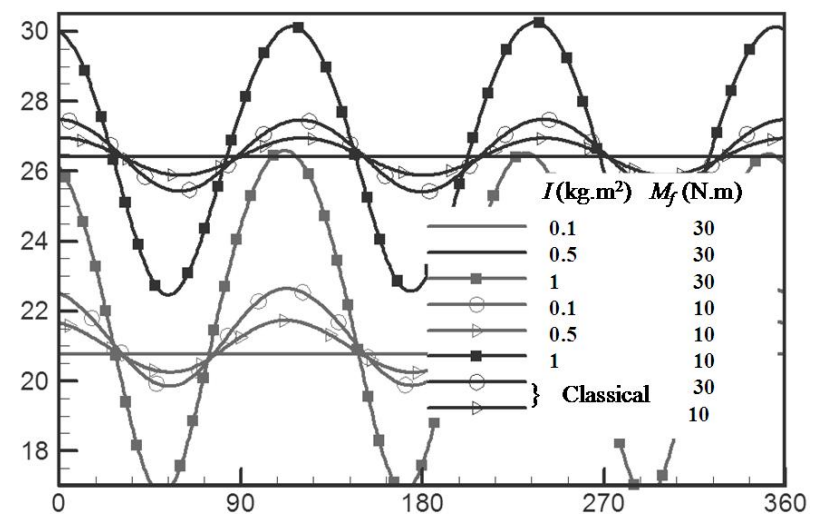
استفاده می‌تواند بار خارجی را چه به صورت ثابت و چه متغیر توسط معادله 12 وارد محاسبات کرده و سرعت توربین را بدون هیچ فرضی محاسبه کند. در شکل 11 مقایسه‌ای بین روش کلاسیک که سرعت روتور ثابت در نظر گرفته می‌شود با روش ارائه شده در این مقاله که یک درجه آزادی حرکت برای توربین وجود دارد و مشابه شرایط آزمایشگاهی است، انجام شده است. این نمودار در دو نقطه که در شکل 5 با علامت X مشخص شده‌اند رسم شده و برای پایداری از گشتاور مقاوم 10 و 30 (Nm) استفاده شده است. به عبارتی بار خارجی ناشی از ژنراتور روی توربین قرار گرفته و به توربین فرصت داده شده تا در حالت پایدار خود قرارگیرد. شایان ذکر است در روش‌های گذشته امکان در نظر گرفتن بار خارجی وجود نداشت و تنها روش معرفی شده است که بار خارجی و اینرسی توربین وارد معادلات می‌شود. همانطور که در شکل 11 مشاهده می‌شود، برخلاف تحقیقات پیشین که سرعت روتور را در حالت پایا ثابت فرض می‌کردند، سرعت دارای تغییرات نوسانی است. با توجه به نوسانی بودن گشتاور تولیدی، این تغییرات در سرعت طبق معادله 11 قابل پیش‌بینی بود. اگرچه در روش‌های پیشین این پدیده در نظر گرفته نمی‌شد. مقدار این نوسانات سرعت تحت تأثیر ممان اینرسی قرار دارد که با میل کردن اینرسی به بینهایت سرعت روتور به یک مقدار ثابت میل می‌کند. شکل 12 نشان می‌دهد علاوه بر اینرسی مقدار گشتاور مقاوم هم بر دامنه نوسانات تأثیرگذار است و همچنین موجب کمی اختلاف فاز می‌شود. در تحقیقات انجام شده توسط مایتنه، بین نتایج آزمایشگاهی و عددی، اختلاف دامنه و مقدار کمی اختلاف فاز وجود داشت که برای این اختلاف فاز توجیهی نداشتند [14]. همان‌طور که مشاهده می‌شود این اختلاف فاز ناشی از در نظر نگرفتن اینرسی توربین است.

شکل 12 نشان می‌دهد تغییرات سرعت فقط معلول از گشتاور تولیدی نیست، بلکه بر گشتاور تولیدی تأثیر می‌گذارد. در شکل 12 گشتاور تولیدی توسط یک پره و سرعت حرکت روتور برحسب زاویه قرارگیری، برای روش کلاسیک و روش حاضر مقایسه شده‌اند. نمودار سرعت شامل سه نوسان است. هر یک از سه پره با قرار گرفتن در جلوی توربین یعنی زاویه حدود $\pi/2$ حداکثر گشتاور تولیدی خود را دارد. بنابراین هر نوسان در سرعت به علت حداکثر رسیدن گشتاور در یک پره می‌باشد. گشتاور تولیدی توسط روتور به نیروی برآ که خود به شدت تابعی از سرعت پره می‌باشد، وابسته است. در زاویه 75° به علت کمتر بودن سرعت نسبی از میانگین، گشتاور تولیدی محاسبه شده توسط روش ارائه شده کمتر از روش کلاسیک است. در زاویه 110° با افزایش سرعت، نیروی برآ افزایش یافته و گشتاور بیشتری تولید شده است. مشابه همین اتفاق در زاویه 210° افتاده اما افزایش نیروی برآ در این وضعیت موجب تولید گشتاور منفی بیشتر شده است؛ بنابراین در صورتی که سرعت توربین به صورت واقعی (نوسانی) محاسبه نشود و به طور ثابت فرض شود، نیروی برآ بسته به شرایط گفته شده می‌تواند بیشتر یا کمتر از مقدار واقعی خود محاسبه شود.

در یک توربین بادی مهم‌ترین پارامتر توان خروجی از توربین می‌باشد. توان به طور مستقیم با سرعت روتور و گشتاور تولیدی توربین رابطه دارد. در شکل 13 ضریب توان لحظه‌ای توربین برحسب سرعت لحظه‌ای بدون بعد توربین برای یک دوران کامل رسم شده است. این مقایسه در دو گشتاور مقاوم 0 و 30 (Nm) و پس از رسیدن به حالت پایدار نشان داده شده است. این نمودار نشان می‌دهد در حالتی که با استفاده از روش معرفی شده اینرسی توربین در نظر گرفته شود، در دامنه نوسانات توان خروجی و دامنه نوسانات سرعت لحظه‌ای توربین مقداری تفاوت با روش کلاسیک وجود دارد.

Fig. 10 λ and C_m versus Time for several I

شکل 10 لامبدا (λ) و ضریب گشتاور متوسط برحسب نسبت زمان به اینرسی

Fig. 11 ω versus θ for several I and M_f

شکل 11 مقایسه اثر اینرسی بر سرعت زاویه‌ای برحسب مکان قرارگیری

در شکل 10 نمودار نسبت سرعت نوک پره به سرعت باد (λ) و ضریب گشتاور متوسط برحسب نسبت زمان به ممان اینرسی (time/I) رسم شده است. هر خط ناپیوسته‌ی ضریب گشتاور متوسط، نشان دهنده یک دوران است؛ بنابراین تعداد خطوط ناپیوسته نشان‌گر تعداد دوران تا رسیدن به حالت نهایی و عرض خطوط ناپیوسته نشانگر زمان یک دوران است. همان‌طور که ذکر شد و بر طبق نمودار 10، سرعت اولیه روتور صفر است. با گشتاور تولیدی مثبت، سرعت رو به افزایش است تا زمانی که به سرعتی برسد که گشتاور برآیند وارد بر روتور صفر شود و متوسط سرعت زاویه‌ای روتور ثابت شود. با افزایش اینرسی زمان رسیدن به حالت پایدار تقریباً متناسب با اینرسی افزایش می‌یابد.

در نتایج منحنی سرعت روتور با اینرسی کمتر، یک قله مشاهده می‌شود. طبق همین نمودار در این نقطه گشتاور منفی است. می‌توان گفت به علت گشتاور زیاد در ناحیه $\lambda=2$ تا $\lambda=4$ و اینرسی کم، زمان کافی برای کاهش شتاب وجود ندارد و توربین تا ناحیه‌ای که گشتاور متوسط منفی است پیش می‌رود، اما پس از آن به علت گشتاور منفی کاهش سرعت داشته تا در سرعتی که گشتاور تولیدی برابر صفر است به حالت پایدار برسد.

در اینرسی 10 kg.m^2 به علت وجود زمان کافی برای کاهش نرخ تغییرات سرعت، این قله وجود ندارد. با زیاد شدن اینرسی تعداد خطوط گشتاور متوسط که هر یک نشانگر یک دوران می‌باشد افزایش یافته است.

همان‌طور که ذکر شد، در روش‌های محاسباتی پیشین سرعت روتور را به صورت ثابت در نظر می‌گرفتند. این درحالی است که در اندازه‌گیری‌های تجربی، معمولاً بار وارد بر روتور ثابت قرار داده می‌شود. با این وجود معمولاً نتایج این دو حالت با یکدیگر مقایسه می‌شوند. خوشبختانه روش مورد

نواحی کاری توربین موجب افت عملکرد می‌شود، بنابراین استفاده از پره‌های نامتقارن که در λ کم پسای بیشتر و در λ زیاد پسای کمی دارند توصیه می‌شود. بررسی اثر ممان اینرسی اختلاف بین نتایج روش مرسوم با فرض سرعت ثابت و روش حاضر را نشان می‌دهد. همچنین نشان داده شده است که سرعت حرکت روتور حتی در حالت پایا به صورت نوسانی است که موجب تغییر در نوسانات گشتاور خروجی و توان خروجی می‌شود؛ بنابراین در صورتی که هدف شبیه‌سازی اهدافی مانند خستگی توربین و نوسانات توان خروجی باشد، بهتر است از روش معرفی شده استفاده شود. مدل عددی ارائه شده موجب یک قدم مهم در راستای مطالعه طبیعت غیر پایای توربین داریوس می‌شود. این روش همچنین بررسی پدیده‌هایی که بر اثر وجود بار خارجی بر روی روتور اتفاق می‌افتد را ممکن می‌کند.

6- فهرست علائم

D	نفوذ عرضی ($\text{kg m}^{-3}\text{s}^{-2}$)
G	تولید ($\text{kg m}^{-3}\text{s}^{-2}$)
P	فشار ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$)
$\text{Re}_{\theta 2}$	عدد رینولدز ضخامت گذار مومنتوم
Re	عدد رینولدز
S	چشمه ($\text{kg m}^{-3}\text{s}^{-2}$)
t	زمان (s)
u	سرعت (ms^{-1})
γ	اضمحلال ناشی از توربولانس ($\text{kg m}^{-3}\text{s}^{-2}$)

علائم یونانی

α	زاویه حمله (درجه)
θ	زاویه قرارگیری توربین (درجه)
ρ	چگالی ($\text{kg m}^{-3}\text{s}^{-2}$)
μ	لزجت دینامیکی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)
λ	نسبت سرعت نوک پره به سرعت باد

زیر نویس‌ها

k	انرژی جنبشی توربولانسی
ω	فرکانس اضمحلال
Γ	ضریب نفوذ مؤثر

7- مراجع

- [1] D. A. Spera, Wind Turbine Technology: Fundamental Concepts in Wind Turbine Engineering, Second Edition: ASME, pp. 100-196, 2009.
- [2] G. J. M. HARRIETTS, Turbine having its rotating shaft transverse to the flow of the current, US1835018, Google Patents, 1931.
- [3] M. Islam, D. S. Ting, A. Fartaj, Desirable airfoil features for smaller-capacity straight-bladed VAWT, Wind Engineering, Vol. 31, No. 3, pp. 165-196, 2007.
- [4] A. R. Jha, Wind turbine technology, pp. 265-300, New York : CRC Press, 2011.
- [5] S. Wang, D. B. Ingham, L. Ma, M. Pourkashanian, Z. Tao, Numerical investigations on dynamic stall of low Reynolds number flow around oscillating airfoils, Computers & Fluids, Vol. 39, No. 9, pp. 1529-1541, 2010.
- [6] A. ArabGolarche, M. Moghiman, S. M. Javadi, Investigation of effective parameters on darrieus wind turbine efficiency with aerodynamics models, Modares Mechanical Engineering, Vol. 15, No. 5, pp. 295-301, 2015. (in Persian)
- [7] I. Paraschivoiu, Wind turbine design: with emphasis on Darrieus concept, pp. 101-121, Canada : Presses inter Polytechnique, 2002.
- [8] R. Templin, Aerodynamic performance theory for the NRC vertical-axis wind turbine, NASA STI/Recon Technical Report N, Vol. 76, pp. 16-18, 1974.

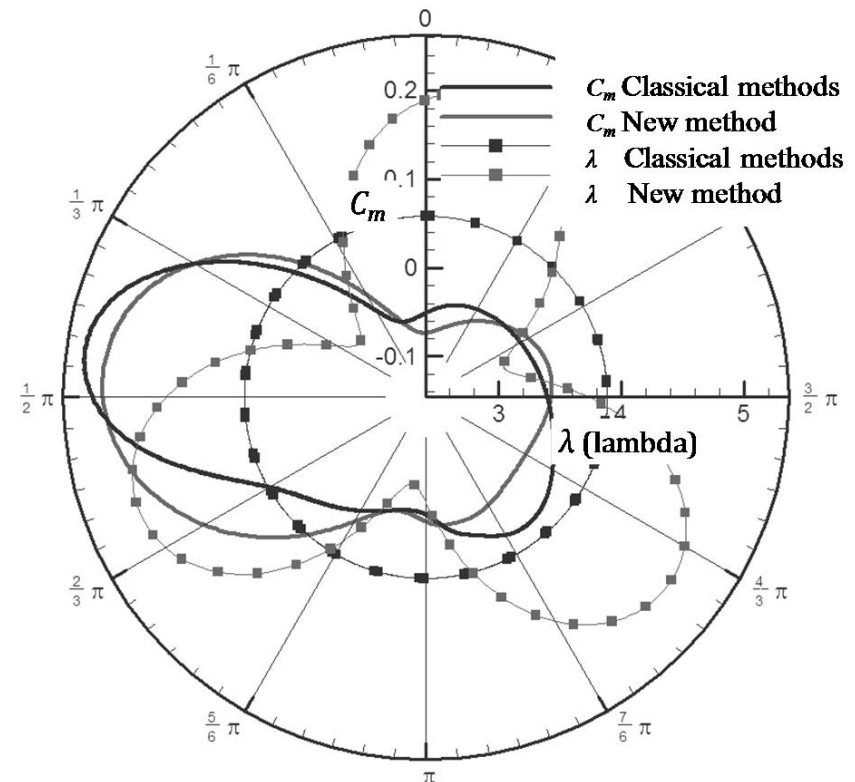


Fig. 12 λ and C_m versus θ for tow method

شکل 12 مقایسه اثر اینرسی در لامبدا (λ) و ضریب گشتاور در یک دوران

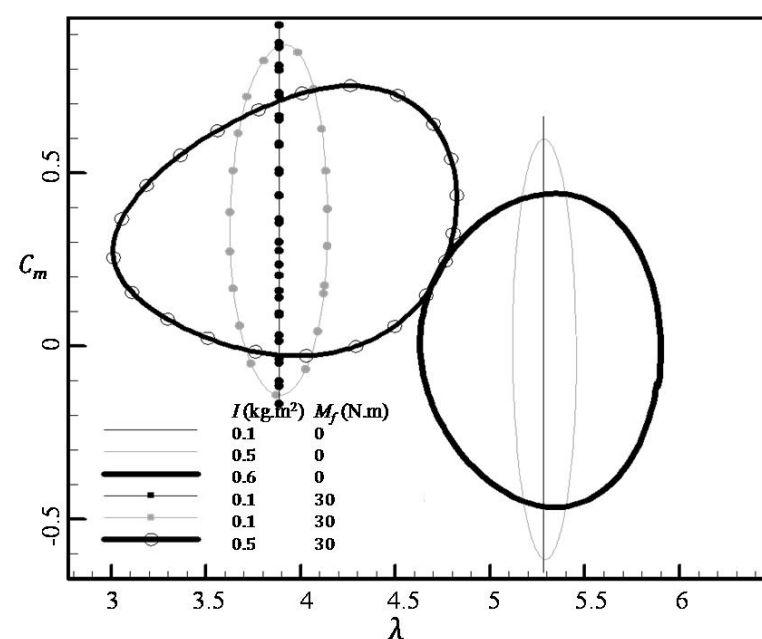


Fig. 13 C_p versus λ for several I and M_f

شکل 13 مقایسه اثر اینرسی نمودار ضریب توان بر حسب لامبدا (λ)

در توربین مورد آزمون با کاهش اینرسی، توان خروجی از توربین، دامنه نوسانات کمتری دارد. کاهش دامنه نوسانات با توجه به توضیح ارائه شده برای شکل 12 قابل قبول است. البته با تغییر توربین این موضوع مجدداً باید تحقیق شود.

5- نتیجه گیری و جمع بندی

در تحقیقات پیشین سرعت زاویه‌ای رتور ثابت فرض می‌شد. برخلاف این تحقیقات، در این مقاله سرعت رتور از عکس‌العمل نیروهای وارد بر پره‌ها، بر طبق قانون دوم نیوتن محاسبه می‌شود. به طور خلاصه می‌توان گفت کاهش گردابه‌های موجود در جریان اولیه اثر مثبت بر افزایش گشتاور اولیه و عبور از ناحیه مرده دارد. افزایش سرعت دوران موجب کاهش گردابه‌های تولیدی و انرژی گرفتن پره از جریان به دفعات بیشتر می‌گردد که موجب تولید گشتاور بیشتر و در نتیجه شتاب بیشتر می‌شود. از طرفی در سرعت بالا توربین شکل یک استوانه صلب را به خود می‌گیرد که موجب کاهش راندمان می‌شود. در سرعت‌های دورانی کمتر از $\lambda=1$ نیروی برآ تولیدی در مقابل نیروی پسا چندان اثرگذار نیست؛ بنابراین برای عبور از ناحیه مرده مناسب است از پره‌های ضخیم‌تر که پسای بیشتری دارند استفاده شود. البته پسای زیاد در

- [15] E. Amet, T. Maït্রে, C. Pellone, J.-L. Achard, 2D numerical simulations of blade-vortex interaction in a darrieus turbine, *Journal of fluids engineering*, Vol. 131, No. 11, pp. 111-103, 2009.
- [16] Y. Hara, K. Hara, T. Hayashi, Moment of Inertia Dependence of Vertical Axis Wind Turbines in Pulsating Winds, *International Journal of Rotating Machinery*, Vol. 2012, pp. 1-12, 2012.
- [17] A. FLUENT, ANSYS FLUENT Theory Guide, ANSYS Inc., USA, 2014.
- [18] M. Takao, H. Kuma, T. Maeda, Y. Kamada, M. Oki, A. Minoda, A straight-bladed vertical axis wind turbine with a directed guide vane row—Effect of guide vane geometry on the performance, *Journal of thermal Science*, Vol. 18, No. 1, pp. 54-57, 2009.
- [19] L. A. Danao, N. Qin, R. Howell, A numerical study of blade thickness and camber effects on vertical axis wind turbines, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, Vol. 226, No. 7, pp. 867-881, 2012.
- [9] R. E. Wilson, P. B. Lissaman, S. N. Walker, Aerodynamic performance of wind turbines, No. PB-259089 , Oregon State University Corvallis, Oregon, pp. 12, 1976.
- [10] N. Batista, R. Melício, V. M. Mendes, J. Figueiredo, A. Reis, Darrieus Wind Turbine Performance Prediction: Computational Modeling, in: *Technological Innovation for the Internet of Things*, Vol. 394, pp. 382-391: Springer, 2013.
- [11] A. Korobenko, M.-C. Hsu, I. Akkerman, Y. Bazilevs, Aerodynamic simulation of vertical-axis wind turbines, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 81, No. 2, pp. 021011, 2014.
- [12] L. A. Danao, J. Edwards, O. Eboibi, R. Howell, A numerical investigation into the influence of unsteady wind on the performance and aerodynamics of a vertical axis wind turbine, *Applied Energy*, Vol. 116, pp. 111-124, 2014.
- [13] M. Chowdhury, N. Hosseinzadeh, W. Shen, Effects of wind speed variations and machine inertia constants on variable speed wind turbine dynamics, in *Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, IEEE, pp. 1-6, 2010.
- [14] T. Maître, E. Amet, C. Pellone, Modeling of the flow in a Darrieus water turbine: Wall grid refinement analysis and comparison with experiments, *Renewable Energy*, Vol. 51, pp. 497-512, 2013.