



## بررسی عوامل مؤثر بر راندمان توربین محور عمودی داریوس به روش آیرودینامیکی

علیرضا عرب گلارچه<sup>1</sup>، محمد مقیمان<sup>2</sup>، سید محمد جوادی مال آباد<sup>3\*</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد  
 2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد  
 3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه مهندسی فناوری‌های نوین، قوچان  
 \* مشهد، صندوق پستی 91775-1111، mohammad.javadi@qiet.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
 دریافت: 13 بهمن 1393  
 پذیرش: 05 اسفند 1393  
 ارائه در سایت: 15 فروردین 1394  
 کلید واژگان:  
 توربین باد  
 داریوس  
 مقطع پره  
 صلبیت

توربین داریوس یکی از انواع توربین‌های بادی محور عمودی است که با وجود ساختار ساده، تحلیل بسیار پیچیده‌ای دارد. مکانیزم دینامیکی پیچیده جریان در اطراف این ماشین باعث شده مسأله بهینه‌سازی آیرودینامیکی آن هنوز یک مسأله باز باقی بماند. از طرفی با توجه به تعداد زیاد پارامترهای مؤثر بر عملکرد توربین، استفاده از حل‌های مبتنی بر دینامیک سیالات محاسباتی، با وجود دقت بالا، به دلیل زمان محاسبات بسیار زیاد، به ندرت با هدف بهینه‌سازی توربین مورد استفاده قرار می‌گیرد. لذا در این مقاله از روش تحلیلی چند تیوب جریان دوگانه برای محاسبه اثر عوامل ضخامت پره، صلبیت، عدد رینولدز، گام زاویه‌ای و ضریب منظره بر راندمان و گشتاور راه‌اندازی توربین استفاده شده است. با توجه به اینکه روش تحلیلی چند تیوب جریان دوگانه، یک روش نیمه تجربی است، ضرایب برآ و پسای مقاطع مورد استفاده در زوایای حمله مختلف، با استفاده از اطلاعات آزمایشگاهی موجود وارد کد شده است. نتایج نشان می‌دهد افزایش ضخامت، عدد رینولدز و صلبیت موجب افزایش قابلیت خود راه‌اندازی توربین می‌شود. همچنین افزایش صلبیت موجب کاهش دامنه کاری توربین در سرعت‌های مختلف روتور خواهد شد. از طرفی افزایش ضریب منظره منجر به افزایش راندمان به‌خصوص در سرعت چرخش میانه می‌شود. همچنین نتایج نشان می‌دهند که توربین با صلبیت متغیر (توربین با پره منحنی) می‌تواند علاوه بر خود راه‌اندازی بهتر، در دامنه سرعت‌های روتور وسیع‌تری مورد استفاده قرار گیرد. اما بررسی پره با ضخامت متغیر نشان داد، تغییر ضخامت پروفیل در طول پره، تأثیر مثبتی بر خود راه‌انداز بودن توربین ندارد. افزایش گام زاویه‌ای، تأثیر مناسبی بر عملکرد دارد. مقایسه نتایج مطالعه حاضر با نتایج تجربی نشان می‌دهد کد استفاده شده از دقت مناسبی برخوردار است، اما با بالاتر رفتن سرعت دورانی روتور از سرعت دورانی نامی دقت این روش کاهش می‌یابد.

## Investigation of effective parameters on darrieus wind turbine efficiency with aerodynamics models

Alireza ArabGolarche<sup>1</sup>, Mohammad Moghiman<sup>1</sup>, Seyyed Mohammad Javadi MalAbad<sup>2\*</sup>

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, mohammad.javadi@qiet.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
 Received 02 February 2015  
 Accepted 24 February 2015  
 Available Online 04 April 2015

**Keywords:**  
 Wind Turbine  
 Darrieus  
 Section of Blade  
 Solidity

### ABSTRACT

Darrieus turbine is a type of vertical axis wind turbine which, unlike its simple structure, makes behavior analysis a hard computational task. Because of the complex flows around the machines, aerodynamic optimization problem still remains an open question. In this paper, a numerical algorithm based on the Double Multiple Stream tube model is used to calculate the effect of the parameters that influence the efficiency of the Darrieus turbine. This method is a semi-empirical method using lift and drag coefficients obtained from experimental data. Comparison between the results of the present study with the experimental measurements shows that although the developed algorithm gives acceptable results, for higher rotational speeds it achieves nominal rotational velocity, and the model accuracy becomes lower. The aim of this paper is to find optimal conditions, parametrically analyze the effect of blade thickness, solidity, Reynolds number, pitch angle and aspect ratio on turbine efficiency and start. The results show that increasing thickness, Reynolds number and solidity cause an increase in the turbine self-start capability. On the other hand, increasing the solidity of the turbine will reduce working range, and increasing the aspect ratio will increase efficiency, especially at the nominal rotational velocity. The results also show that the designed turbine, having variable solidity, can have the benefits of both low and high solidity turbines simultaneously. But manufacturing variable thickness blades does not have proper justification. Limited increase in pitch angle can also have positive effect on efficiency.

### 1- مقدمه

تقاضای انرژی و کم شدن منابع سوخت‌های فسیلی، توجه بسیاری از محققان  
 تمرکز بر روی منابع انرژی تجدیدپذیر در پی آلودگی‌های محیطی، افزایش  
 را در سال‌های اخیر به توربین‌های بادی جلب کرده است. اولین نوع توربین

Please cite this article using:

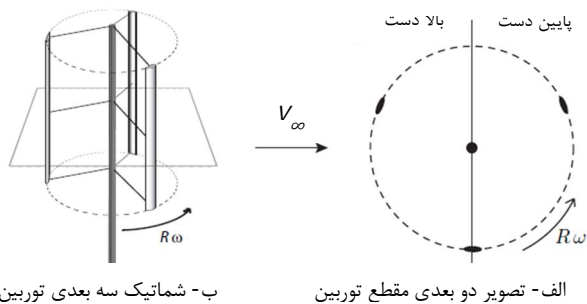
A. ArabGolarche, M. Moghiman, S. M. Javadi MalAbad, Investigation of effective parameters on darrieus wind turbine efficiency with aerodynamics models, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 5, pp. 295-301, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

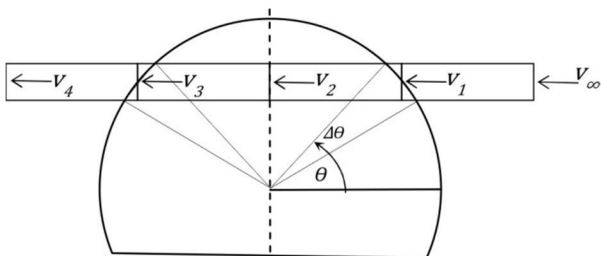
پاراسچیو [6]، مدل چند تیوب جریان دوگانه<sup>7</sup> را ارائه کرد (شکل 2). در این مدل محاسبات برای دو بخش جریان بالادست و پایین دست انجام می‌شود. چرا که سرعت القا شده در بالادست کمتر از سرعت جریان آزاد و سرعت القا شده در پایین دست کمتر از بالادست است. بنابراین جریان باد عبوری در لوله‌ها از دو دیسک فعال پشت سر هم عبور می‌کند. در تکمیل این مدل مرتنز [7] نیز مدل چند تیوب جریانی را برای پیش‌بینی کارایی یک توربین محور عمودی سرعت بالا در جریان مورب روی سقف توسعه داد.

دگلیره و همکاران [8] در سال 2009 به بررسی عددی نیروهای وارده بر توربین داریوس پرداختند و دریافتند مقطع پره توربین یک عامل مهم مؤثر بر عملکرد توربین است. هاول و همکاران در سال 2010 [9] با آزمایش یک توربین کوچک در تونل باد دریافتند با افزایش سرعت باد (عدد رینولدز) و با کاهش تعداد پره‌ها (کاهش صلبیت<sup>8</sup>) کارایی توربین افزایش و قابلیت خود راهاندازی توربین بهبود بخشیده می‌شود. در سال 2011 بری و همکاران [10] به بررسی اثر شکل ایرفویل توربین داریوس از نوع پره مستقیم پرداختند و نتایج آن‌ها نشان داد افزایش ضخامت ایرفویل تا یک حد مشخص موجب بهبود خود راهاندازی می‌شود.

در تحقیقات پیشین انجام شده بر روی توربین داریوس، به صورت پراکنده و آن هم در شرایطی متفاوت تأثیر عوامل مؤثر مورد تحقیق قرار گرفته است. اما بررسی تأثیر تک تک این عوامل در شرایطی یکسان و به طور یک جا می‌تواند اطلاعات ارزشی را در اختیار محققان قرار دهد. لذا در این مقاله با هدف دستیابی به شرایط بهینه، اثر عوامل مؤثر بر راندمان و همچنین بهبود قابلیت خود راهاندازی توربین، شامل تأثیر مقطع پره توربین، تأثیر عدد رینولدز، گام زاویه‌ای، صلبیت و ضریب منظری با استفاده از روش تحلیلی چند تیوب جریانی دوگانه، که یکی از کامل‌ترین روش‌های تحلیلی می‌باشد، مورد مطالعه قرار گرفته شده است.



شکل 1 نمایش تغییرات سرعت در طول یک تیوب جریان با عرض  $\Delta\theta$



شکل 2 نمای توربین داریوس تیغه مستقیم

بادی ساخته شده توسط بشر، نوعی از توربین‌های محور عمودی پس‌آیی بوده که در منطقه سیستان ایران مورد استفاده قرار گرفته است [1].

مزیت اصلی توربین‌های بادی محور عمودی<sup>1</sup> استقلال از جهت باد است که این توربین را سامانه‌ای مناسب برای شرایط شهری که باد دارای جهت غالب نیست معرفی می‌کند [2]. توربین داریوس پره مستقیم یکی از انواع توربین‌های بادی محور عمودی است که از ویژگی‌های آن در میان توربین‌های محور عمودی می‌توان به بر اساس نیروی برآ کار کردن آن اشاره کرد. لذا برخلاف توربین ساونیس، نیروی لیفت باعث چرخش توربین و نیروی پس‌آ حکم بازدارنده را دارد. سرعت چرخش توربین داریوس چندین برابر سریع‌تر از سرعت بادی است که به آن می‌وزد. از این رو گشتاور تولیدی این توربین پایین و سرعت چرخش آن بالا است. به همین دلیل توربین داریوس گزینه مناسب‌تری برای تولید برق نسبت به ساونیس خواهد بود.

توربین داریوس (شکل 1) به علت ویژگی‌های خاص اشاره شده، در دهه اخیر با رونق ساختمان‌های سبز، مجدداً مورد توجه محققان قرار گرفته است. با این وجود توربین داریوس ضعف در راهاندازی خودکار دارد و نیاز به مطالعات بیشتری است تا بتوان از آن در شرایطی بهینه استفاده کرد.

روش‌های عددی بررسی توربین‌های بادی را می‌توان در سه دسته دینامیک سیالات محاسباتی<sup>2</sup>، تحلیل گردابه‌ای<sup>3</sup> و روش مومنتم تقسیم‌بندی کرد. روش تحلیلی مومنتم یک روش پرکاربرد در بررسی آیرودینامیکی توربین‌های بادی است. این روش بر اساس موازنه مومنتم جریان باد در عبور از توربین عمل می‌کند. به این روش‌ها در حالت کلی روش‌های تحلیلی مومنتم المان پره<sup>4</sup> می‌گویند [3].

از مزایای روش تحلیلی نسبت به روش دینامیک سیالات محاسباتی و روش گردابه‌ای، هزینه کم، سرعت بالای محاسبات و عدم محدودیت در تغییر شکل توربین است. این روش‌ها به دلیل سرعت بالای که در محاسبات دارند، اساساً به عنوان یک تحلیل اولیه در بررسی مدل‌های جدید و اصلاحات مختلف روی توربین‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند و در صورت نیاز به حل دقیق‌تر از روش‌های عددی یا آزمایشگاهی استفاده می‌شود [4].

تمپلین [5] اولین و ساده‌ترین مدل برای بررسی این نوع از توربین‌ها را با نام مدل تک تیوب جریانی<sup>5</sup>، بر پایه تئوری دیسک متحرک گلوئرت [5] معرفی کرد. این مدل ابتدا برای آسیاب بادی ثبت شد، اما سپس برای توربین داریوس گسترش یافت. در این تئوری فرض شده است که سرعت القایی در طول روتور ثابت بوده و از برابری نیروی پس‌آ در جهت جریان با تغییر مومنتم در این جهت بدست می‌آید. این تئوری به اثر واماندگی ایرفویل توجه دارد، اما آن را به صورت استاتیکی فرض می‌کند. این تئوری می‌تواند اثر تغییر پارامترهای هندسی مانند صلبیت، ضریب منظری و همچنین اثر ضریب پس‌آ برآ-صفر را بر ویژگی‌های کیفی به حساب آورد، اما این مدل توانایی بررسی اثرات برشی باد را نداشت [4]. ویلسون [5] برای در نظر گرفتن اثرات برشی باد، حجم جاروب شده توسط توربین را به چند تیوب جریان کنار هم تقسیم کرد تا تغییرات سرعت القا شده در جلوی دیسک در دو جهت عمودی و افقی به حساب آورده شود. این مدل، مدل چند تیوب جریانی<sup>6</sup> نام گرفت.

سرعت جریان باد برخورد کننده به پره توربین در بالادست، بیشتر از سرعتی است که باد با پره پایین دست برخورد می‌کند. به همین دلیل

1- Vertical-Axis Wind Turbines  
2- Computational Fluid Dynamic (CFD)  
3- Vortex Panel Method  
4- Blade Element Momentum  
5- Single Streamtube Model  
6- Multiple Streamtube Model

7- Double-Multiple Streamtube Model  
8- Solidity

## 2- معادلات حاکم

برای مدل‌سازی فیزیک حاکم بر مسأله از مدل چند تیوب جریانی دوگانه که یک روش تحلیلی است، استفاده شده، که در این بخش تشریح می‌شود. در این مدل ناحیه عبوری جریان از میان توربین، به چند تیوب کوچک، در جهت جریان باد تقسیم می‌شود. به عبارتی حرکت باد از میان توربین، از داخل چند تیوب کوچک فرضی انجام می‌شود. هر تیوب به دو قسمت مساوی در طول خود برای بالادست و پایین‌دست جریان تقسیم می‌شود. سپس در هر قسمت نیروهای آیرودینامیکی توسط معادلات حاکم محاسبه شده و ضرایب مجهول در هر ناحیه با تکرار بدست می‌آید. در مرحله بعد تمامی گشتاورهای محاسبه شده برای تیوب‌ها با هم جمع می‌شوند و گشتاور کلی و توان کلی وارده به توربین محاسبه می‌شود. این نحوه تقسیم‌بندی، برای یک تیوب، در شکل 2 نشان داده شده است.

بر اساس تئوری دیسک متحرک سرعت باد مماس بر پره توربین ( $v_1$ ) به دلیل ممانعتی که پره ایجاد خواهد کرد، دارای مقداری کمتر از سرعت جریان آزاد ( $v_\infty$ ) خواهد بود. این سرعت با در نظر گرفتن یک ضریب القایی<sup>1</sup>، یعنی  $a$  (برای ناحیه بالادست) نسبت به سرعت جریان آزاد محاسبه می‌شود. مکان سرعت‌های  $v_1$ ،  $v_2$  و  $v_3$  در شکل 2 نشان داده شده و طبق روابط (1) تا (4) بدست خواهند آمد.

$$v_1 = (1 - a)v_\infty \quad (1)$$

$$v_2 = (1 - 2a)v_\infty \quad (2)$$

$$v_3 = \frac{1}{2}(v_2 + v_\infty) \quad (3)$$

$$v_3 = (1 - b)v_2 = (1 - b)(1 - 2a)v_\infty \quad (4)$$

در رابطه (4) ضریب  $b$  مقدار ضریب القایی در ناحیه پایین‌دست است. با در نظر داشتن این نکته که افت مومنتم جریان به دلیل کاهش سرعت از مقدار  $v_1$  تا مقدار  $v_2$  صرف ایجاد تغییر مومنتم در پره توربین می‌شود، می‌توان این تغییر مومنتم را به‌صورت نیرویی با روابط (5) و (6) بدست آورد.

$$f_{ave} = \frac{d}{dt}(m \cdot \Delta v) \quad (5)$$

$$f_{ave} = 2\rho h [r \cos \theta \cdot \Delta \theta] \cdot (1 - a)a \cdot v_\infty^2 \quad (6)$$

رابطه (6) مقدار نیروی متوسط وارد بر پره در اثر افت مومنتم جریان را در یک چرخش 360 درجه‌ای نشان می‌دهد. در این معادله مقدار داخل کروشه برابر عرض تیوب، مقدار  $h$  ارتفاع تیوب و  $\rho$  چگالی سیال است. بنابراین برای نیروی کلی وارد بر این پره باید از این رابطه در طی بازه زمانی یک نیم سیکل، یعنی  $\pi$  رادیان، انتگرال گرفت. زمان طی شده در این نیم سیکل از رابطه (7) بدست می‌آید. با انتگرال‌گیری از معادله (6) در این زمان، معادله (8) به دست می‌آید.

$$t_{dwell} = N \frac{\Delta \theta}{\pi} \quad (7)$$

$$f_{mom} = \frac{2\rho h \cdot r \cos \theta \cdot (1 - a)a \cdot v_\infty^2}{N} \quad (8)$$

در رابطه (7)،  $N$  تعداد نواحی جریان است. نیروی مومنتم محاسبه شده در معادله (8) در راستای جریان می‌تواند به‌صورت رابطه (9) بی‌بعد شود.

$$f_{mom}^* = \frac{N \cdot f_{mom}}{\frac{1}{2}\rho \cdot h \cdot r \cdot v_\infty^2} = \pi \cos \theta \cdot 4(1 - a) \cdot a \quad (9)$$

این رابطه برای  $a$  کوچک‌تر از 0/4، یعنی زمانی که جدایش آشفته نیست، معتبر است. در حالتی که جدایش آشفته می‌شود، یعنی  $a$  بزرگتر از

0/4، معادله تصحیح می‌شود. برای بدست آوردن حاصل رابطه بالا باید مقدار زاویه حمله ( $\alpha$ )، مساحت سطح پره ( $A_{bi}$ ) و سرعت جریان روی پره ( $v_{bi}$ ) مشخص باشد. مقدار مساحت سطح از حاصل ضرب وتر پره ( $C$ )، در دهانه پره ( $s$ ) بدست می‌آید. برای استفاده بهتر از روابط بالا، از پارامترهای بی‌بعد توربین باد، شامل نسبت سرعت نوک پره<sup>2</sup> (رابطه 10) و صلیبیت (رابطه 11) استفاده می‌شود. در این معادلات  $\omega$  سرعت زاویه‌ای توربین،  $r$  برابر با شعاع توربین و  $n$  تعداد پره‌های توربین است.

$$\lambda = TSR = \frac{r\omega}{v_\infty} \quad (10)$$

$$\sigma = \frac{nC}{r} \quad (11)$$

زاویه حمله بر اساس بردار سرعت القایی در اثر حرکت پره و بردار سرعت باد عبوری از روی پره ( $v_1$ ) با رابطه (12) محاسبه می‌شود.

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{\cos \theta}{\sin \theta - (\lambda / (1 - a))} \right) \quad (12)$$

در شکل 3 بازه تغییرات زاویه حمله برحسب موقعیت قرارگیری آن در چهار نسبت سرعت نوک پره به سرعت باد مختلف رسم شده است. برای رسم این شکل، مقدار  $a$  برابر صفر فرض شده است.

اندازه سرعت نسبی پره ( $v_{rel}$ )، در رابطه (13) نشان داده شده است، که می‌توان این رابطه را بصورت رابطه (14) برحسب  $v_\infty$  بی‌بعد کرد.

$$V_{rel} = \sqrt{[v_1 \cos \theta]^2 + [v_1 \sin \theta - \omega r]^2} \quad (13)$$

$$V_{rel}^* = \frac{V_{rel}}{V_\infty} = \sqrt{(1 - a)^2 + \lambda^2 - 2\lambda(1 - a) \sin \theta} \quad (14)$$

نیروی آیرودینامیکی وارد بر پره، در جهت چرخش توربین، بصورت تابعی از ضریب برآ ( $C_L$ ) و پسا ( $C_D$ )، سرعت نسبی ( $v_{rel}$ )، صلیبیت توربین ( $\sigma$ ) و زاویه حمله می‌تواند بصورت زیر در قالب رابطه (15) نوشته شود.

$$f_{trq}^* = V_{rel}^2 \sigma [C_L \sin \alpha - C_D \cos \alpha] \quad (15)$$

بنابراین مقدار نیروی آیرودینامیکی وارده بر پره در جهت باد را می‌توان بصورت رابطه (16) در نظر گرفت.

$$f_{aero}^* = V_{rel}^2 \sigma [C_L \cos(\alpha + \theta) - C_D \sin(\alpha + \theta)] \quad (16)$$

روابط (9)، (12) و (14) برای نیمه بالادست<sup>3</sup> تیوب‌ها معرفی شده است.

این روابط برای نیمه پایین‌دست<sup>4</sup> متفاوت است. روابط حاکم بر نواحی پایین‌دست را نیز می‌توان با استفاده از یک ضریب القایی مربوط به این نواحی یعنی  $b$ ، نوشت. کاهش سرعت جریان آزاد به مقدار سرعت  $v_3$  در رابطه (3) آورده شده است. زاویه حمله در پایین‌دست را می‌توان بصورت رابطه (17) و سرعت نسبی را به‌صورت رابطه (18) نوشت که در این معادلات،  $C$  توسط رابطه (19) محاسبه خواهد شد.

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{\cos \theta}{\sin \theta - (\lambda / (1 - 2a)(1 - b))} \right) \quad (17)$$

$$V_{rel}^* = \sqrt{c^2 + \lambda^2 + 2c\lambda \sin \theta} \quad (18)$$

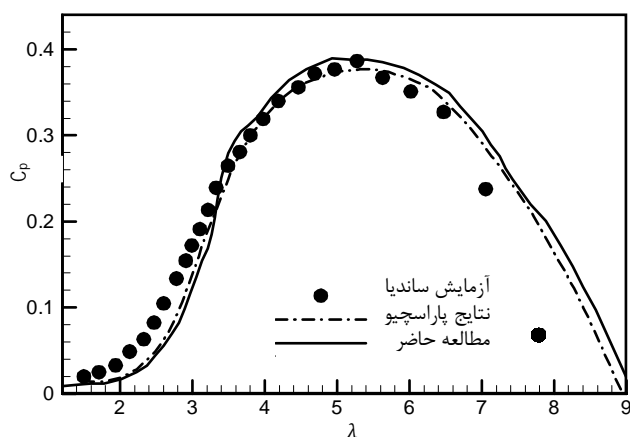
$$c = (1 - b)(1 - 2a) \quad (19)$$

مقدار نیروی مومنتم در ناحیه پایین‌دست را می‌توان به‌صورت رابطه (20) نوشت. نیروی آیرودینامیکی در این ناحیه نیز مشابه ناحیه بالادست محاسبه می‌شود.

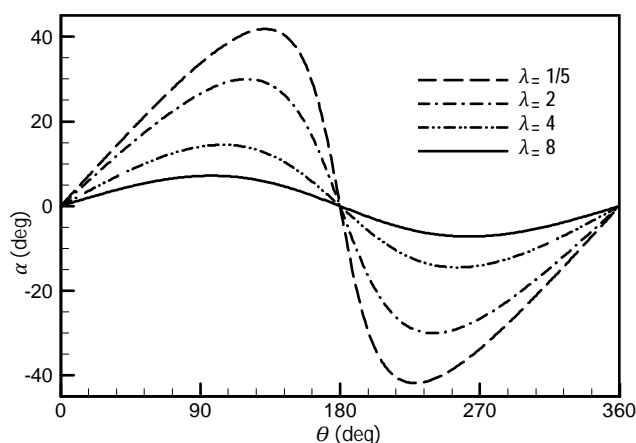
$$f_{mom}^* = \pi \cos \theta \cdot 4(1 - b)(1 - 2a)b \quad (20)$$

2- Tip Speed Ratio (TSR)  
3- Upwind  
4- Downwind

1- Induction Factor



شکل 4 مقایسه نتایج مطالعه حاضر با نتایج منابع دیگر



شکل 3 اثر تغییرات  $\lambda$  بر بازه تغییرات زاویه حمله بر حسب موقعیت قرارگیری

دلیل این اختلاف را می‌توان چنین عنوان کرد که مقداری بار اصطکاک در نتایج آزمایشگاهی وجود دارد که در حل عددی در نظر گرفته نمی‌شود. از طرفی با حل دوبعدی از افت نوک پره صرف‌نظر شده که این خود موجب افزایش توان محاسبه شده می‌شود. با توجه به اختلاف کم میان نتایج حاصل از کد استفاده شده و نتایج آزمایشگاهی می‌توان نتایج کد مورد استفاده را قابل اعتماد دانست.

برای بررسی اثر شکل ایرفویل، از 5 ایرفویل متقارن ناکا<sup>1</sup> استفاده شده است. بررسی در عدد رینولدز 300,000 (که با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد) و صلبیت کم (0/08) انجام شده تا نتایج از حداکثر اعتبار خود برخوردار باشند. شکل 5 منحنی عملکرد برای پره‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد. برای تحلیل بهتر، مقایسه از دو دیدگاه انجام می‌شود. در صورتی که بیشترین راندمان مد نظر باشد، طبق شکل ایرفویل‌های نازک پاسخ بهتری هستند؛ چرا که در بازه کاری توربین ( $\lambda$  برابر با 4 تا 8) راندمان بهتری دارند. اما همان‌طور که گفته شد یکی از مشکل‌های اصلی توربین داریوس ضعف در خود راه‌اندازی است. طبق شکل 5 در صورتی که از ایرفویل نازک استفاده شود با وجود ضریب توان بالاتر در  $\lambda$  بالا، در  $\lambda$  کمتر از 4 حتی ممکن است توان منفی تولید کند. توان منفی به این معناست که توربین هیچ‌گاه به‌صورت خود راه‌انداز نمی‌تواند تا  $\lambda$  های بالاتر، که راندمان مناسبی دارند، دست یابد. اصطلاحاً گفته می‌شود توربین در ناحیه مرده<sup>2</sup> باقی‌مانده است. در صورتی که ایرفویل نازک برای بالا بردن راندمان انتخاب شود، حتماً نیاز به موتور راه‌انداز وجود خواهد داشت تا با سرعت دادن به روتور، توربین را از ناحیه مرده (ناحیه‌ای که توان آن منفی است) عبور دهد.

علت این پدیده (راندمان بالا در  $\lambda$ ی بالا برای ایرفویل نازک و توان بالا در حالت شروع به کار در ایرفویل‌های ضخیم) را می‌توان در منحنی ضریب برآ این پره‌ها یافت. همان‌طور که در شکل 3 نشان داده شده در  $\lambda$  برابر با 4 زاویه حمله بین صفر تا حداکثر  $14^\circ \pm$  نوسان می‌کند. در این محدوده طبق شکل 6 حداکثر میزان ضریب برآ برای ایرفویل نازک بیشتر است. اما در  $\lambda$  برابر با 2 زاویه حمله بین صفر تا حداکثر  $30^\circ \pm$  نوسان می‌کند که در این محدوده واماندگی رخ می‌دهد و ایرفویل‌های نازک افت بیشتری به سبب واماندگی دارند. لذا میانگین ضریب برآی ایرفویل‌های نازک در این محدوده پایین‌تر از ضریب برآی ایرفویل‌های ضخیم است.

برای هر تیوب جریانی یک ضریب القایی مخصوص آن ناحیه تعریف می‌شود و به وسیله یک حدس اولیه با استفاده از مساوی قرار دادن نیروی مومنتم محاسبه شده، که تابع ضرایب القایی و زاویه قرارگیری تیوب است، با نیروی آیرودینامیکی، که برحسب ضرایب برآ و پس‌آیی که معمولاً از داده‌های آزمایشگاهی مقاطع پره بدست می‌آیند، تصحیح می‌شوند. این عمل تکراری آن قدر ادامه می‌یابد تا مقدار باقی‌مانده به سمت یک عدد کوچک میل کند. پس از محاسبه ضرایب القایی مقدار توان توربین از رابطه (21) محاسبه می‌شود.

$$p = \tau \cdot \omega = \left( n f_{aero} \frac{\frac{1}{2} \rho h r v_{\infty}^2}{N} \cdot r \right) \cdot \left( \frac{\lambda v_{\infty}}{r} \right) \quad (21)$$

مقدار ضریب توان توسط معادله (23) از حاصل جمع مقادیر توان بی‌بعد محاسبه شده از رابطه (22) مربوط به همه نواحی جریانی به دست می‌آید.

$$p^* = \frac{pN}{\frac{1}{2} \rho h r v_{\infty}^3} = \lambda f_{aero}^* \quad (22)$$

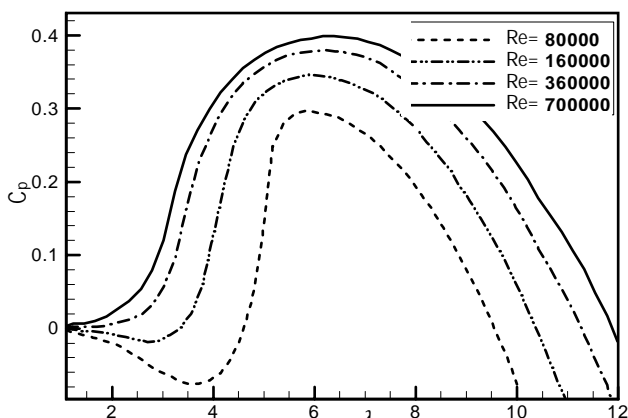
$$C_p = \frac{1}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{3\pi}{2}} \frac{1}{2} p^* d\theta \quad (23)$$

### 3- بحث و بررسی نتایج

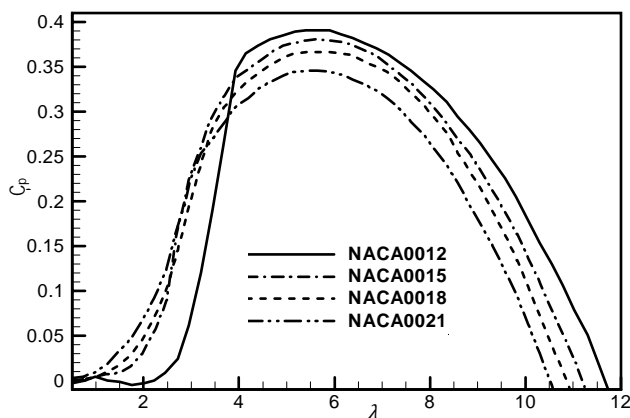
متأسفانه منابعی که ضرایب برآ و پس‌آ آزمایشگاهی را برای تمامی  $360^\circ$  گردش ایرفویل مورد مطالعه قرار داده باشد، محدود است. یکی از این مطالعات توسط شدال در آزمایشگاه ملی سانديا آمریکا [11] انجام گرفته است. این مطالعه برای شش ایرفویل متقارن ناکا در 10 عدد رینولدز متفاوت انجام شده که در این پژوهش از این مقادیر استفاده شده است.

برای اعتبارسنجی کد استفاده شده، در شکل 4 نتایج بدست آمده از کد با نتایج آزمایشگاهی سانديا [11] و نتایج تحلیلی پاراسچيو [6] مقایسه شده است. این مقایسه در عدد رینولدز 300000، صلبیت 0/22 و برای پره ناکا 0015 انجام شده است. نتایج بدست آمده از کد مورد استفاده با نتایج پاراسچيو اختلاف بسیار کمی دارند که ناشی از خطای عددی و منابع ضریب برآ و پس‌آ مورد استفاده است. نتایج عددی، حتی با استفاده از روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی، همواره به میزان کمی مقادیری بیشتر از نتایج آزمایشگاهی پیش‌بینی می‌کنند [9].

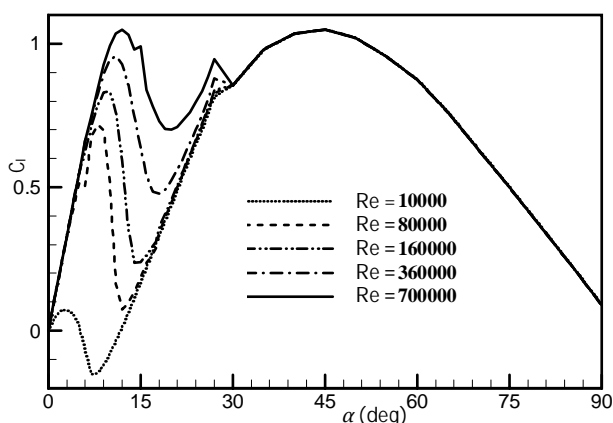
1- NACA (National Advisory Committee for Aeronautics)  
2- Dead Band



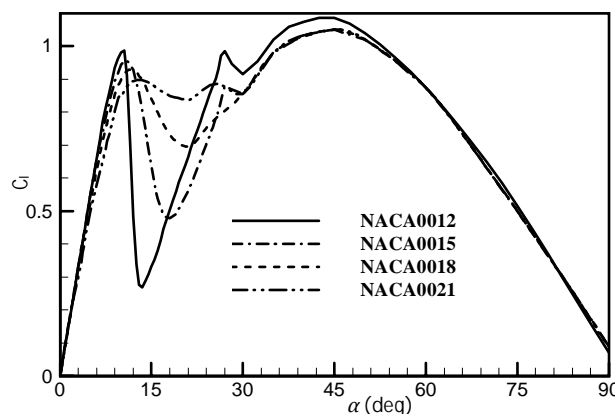
شکل 7 اثر تغییرات عدد رینولدز بر منحنی ضریب توان



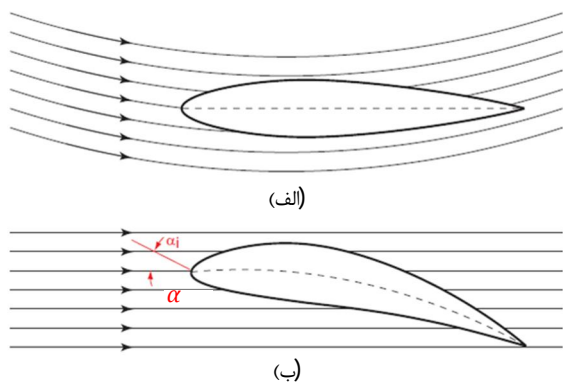
شکل 5 اثر تغییر ضخامت پره بر منحنی ضریب توان



شکل 8 تغییرات ضریب برآ برحسب زاویه در چند عدد رینولدز مختلف [11]



شکل 6 تغییرات ضریب برآ با زاویه حمله برای چند پره مختلف [11]

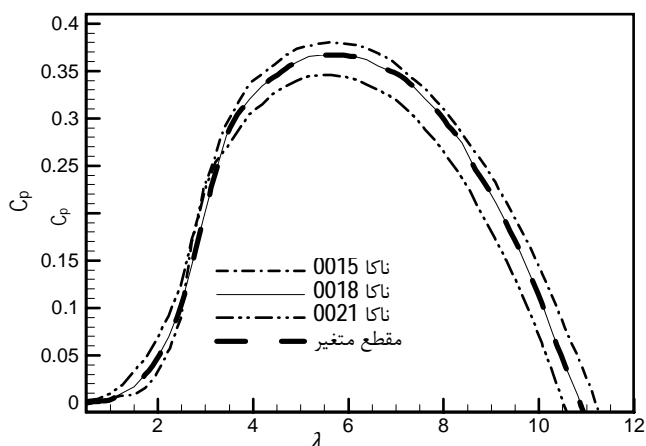


شکل 9 جریان اطراف ایرفویل الف-حالت واقعی ب- حالت معادل مقابل باد مستقیم

با این وجود نتایج روش مورد استفاده برای صلبیت پایین (کمتر از 0/4) معتبر است. زیرا در این شرایط، ایرفویل، انحنا کمی را تجربه می‌کند [12]. در شکل 10 اثر صلبیت بر ضریب توان توربین با پره ناکا 0015 در عدد رینولدز 300000 برای 6 صلبیت مختلف مقایسه شده است. مشاهده می‌شود با افزایش صلبیت تا مقدار 0/25 مقدار بیشینه توان، به حداکثر می‌رسد، ولی با افزایش بیشتر صلبیت، مقدار بیشینه توان خروجی اندکی کاهش می‌یابد. از طرفی با افزایش صلبیت، دامنه عملکرد توربین در اهای مختلف، کاهش شدیدی می‌یابد. لذا با توجه به کاهش دامنه کارکرد و کاهش بیشینه توان، طراحی توربین با صلبیت بالای 0/25 منطقی به نظر نمی‌رسد.

برای بررسی اثر عدد رینولدز، منحنی عملکرد توربینی با پره ناکا 0015 و صلبیت 0/08 در 4 عدد رینولدز متفاوت در شکل 7 رسم شده است. ملاحظه می‌شود با افزایش عدد رینولدز ضریب توان توربین به صورت حدی در تمام بازه  $\lambda$  افزایش می‌یابد و با نزدیک شدن به این حد، تأثیر عدد رینولدز بر توان توربین کاهش می‌یابد. تغییرات توان توربین در اثر افزایش عدد رینولدز در  $\lambda$  پایین قابل ملاحظه‌تر است. به گونه‌ای که هرچه عدد رینولدز در  $\lambda$  کمتر از 3، بالاتر باشد به خود راه‌انداز بودن توربین کمک بیشتری خواهد شد. علت این پدیده را مجدداً می‌توان در منحنی ضریب برآ ایرفویل ناکا 0015 در رینولدزهای مختلف شکل 8 جستجو کرد. همان‌طور که گفته شد در  $\lambda$  برابر با 4 زاویه حمله بین صفر تا حداکثر  $14^\circ \pm$  نوسان می‌کند. در این محدوده طبق شکل 8 با افزایش عدد رینولدز حداکثر ضریب برآ هم به‌طور حدی افزایش می‌یابد. در  $\lambda$  برابر با 2 زاویه حمله بین صفر تا  $30^\circ \pm$  نوسان می‌کند. در این ناحیه افزایش عدد رینولدز بر ضریب برآ اثر گذارتر است، چرا که افزایش عدد رینولدز سبب می‌شود اثر واماندگی کاهش یابد و در نتیجه افت کمتری در ضریب برآ اتفاق می‌افتد. بنابراین افزایش عدد رینولدز موجب افزایش قابلیت خود راه‌اندازی خواهد شد.

در مورد صلبیت لازم به ذکر است به طور ذاتی، در روش مورد استفاده مقداری خطا در پیش‌بینی عمل کرد در صلبیت‌های بالاتر از 0/4 وجود دارد. دلیل این ضعف را می‌توان چنین عنوان کرد که طبق شکل 9- الف جریان اطراف پره (مخصوصاً در  $\lambda$  بالا) به‌شکل منحنی است که با افزایش صلبیت انحنا بیشتر می‌شود؛ در صورتی که ضرایب برآ و پس‌آ استفاده شده در مقابل جریان مستقیم بدست آمده و اگر بخواهیم در مقابل جریان باد مستقیم ضرایب را بدست آوریم در واقع باید مانند شکل 9- ب به پره انحنا داد.



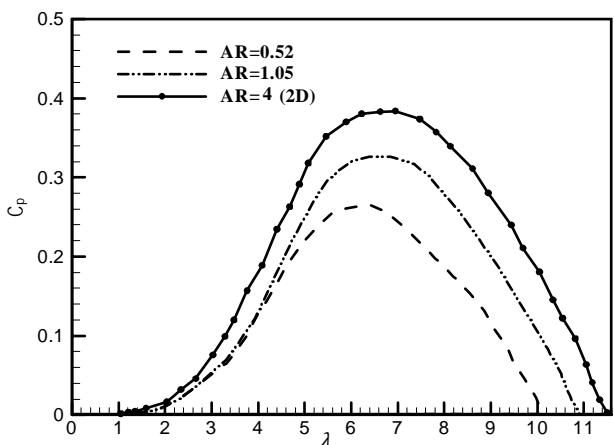
شکل 12 مقایسه ضریب توان توربین با پروفیل پره متغیر با پره‌های با پروفیل ثابت ضریب منظری به صورت نسبت مساحت جلوی توربین به سطح مقطع توربین و با رابطه (24) تعریف می‌شود:

$$AR = \frac{2hr}{\pi r^2} = \frac{2h}{\pi r} \quad (24)$$

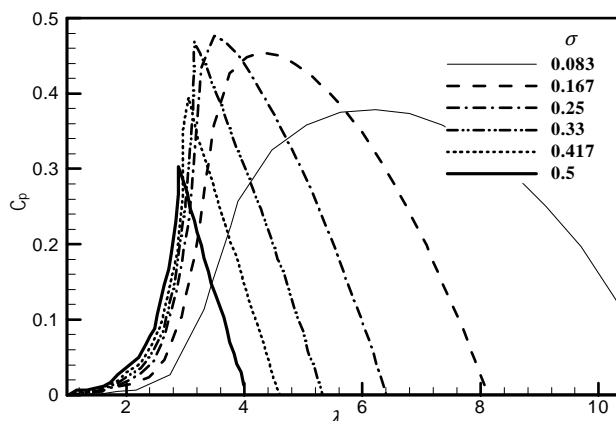
برای درک بهتر می‌توان این ضریب را نسبت ارتفاع توربین به قطر توربین در یک عدد ثابت تصور کرد که با افزایش ارتفاع توربین مقدار آن افزایش خواهد یافت.

برای بررسی اثر ضریب منظری، منحنی عملکرد توربینی با پره ناکا 0015، صلبیت 0/08 و عدد رینولدز 300.000 در 3 ضریب منظری متفاوت در شکل 13 رسم شده است. ملاحظه می‌شود با افزایش ضریب منظری، ضریب توان توربین به صورت حدی در تمام بازه  $\lambda$  افزایش می‌یابد و به یک مقدار مشخص که معادل همان حل دو بعدی است میل می‌کند. با نزدیک شدن به این حد، اثر ضریب منظری بر توان توربین کاهش می‌یابد. تغییرات توان توربین در اثر افزایش ضریب منظری در  $\lambda$  بالا قابل ملاحظه‌تر است، به گونه‌ای که هرچه ضریب منظری، در  $\lambda$  بالاتر از 5، بیشتر باشد ضریب توان افزایش بیشتری خواهد یافت.

علت این پدیده را می‌توان اثر لبه فرار پره عنوان کرد. گردابه‌های جدا شده از لبه فرار پره موجب کاهش راندمان می‌شوند. در ضریب منظری پایین این گردابه‌ها روی جریان داخل توربین اثر می‌گذارند که با افزایش ارتفاع اندازه این گردابه‌ها ثابت بوده و اثر این گردابه‌ها روی جریان داخل توربین کاهش می‌یابد.



شکل 13 اثر تغییرات ضریب منظری بر منحنی ضریب توان

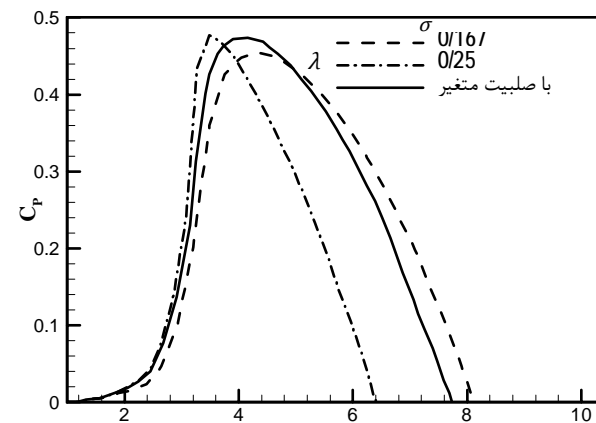


شکل 10 مقایسه اثر تغییرات صلبیت بر منحنی ضریب توان

با توجه به اینکه ضریب توان بالا در املای پایین می‌تواند سبب بهبود فرایند خود راه‌اندازی توربین شود، بر اساس نتایج شکل 10 می‌توان گفت افزایش صلبیت می‌تواند سبب بهبود خود راه‌اندازی توربین شود. اما باید توجه داشت که نقطه پیک نمودار گشتاور در شکل 10 با افزایش صلبیت بیشتر از 0/25 کاهش می‌یابد. راه‌کار ارائه شده در این مطالعه، استفاده از توربین با صلبیت متغیر است. در شکل 11 نتایج برای توربینی با صلبیت متغیر مقایسه شده است. در این توربین فرض شده با افزایش ارتفاع شعاع روتور کاهش یابد و صلبیت از 0/167 به 0/25 برسد. نتایج نشان می‌دهد توربین می‌تواند مزیت توربین با صلبیت بالا و پایین را با هم داشته باشد و علاوه بر گشتاور راه‌اندازی بالا محدوده کارکرد بزرگ‌تری داشته باشد.

در توربین‌ها محور افقی معمولاً با افزایش شعاع توربین، ضخامت و شکل پره تغییر می‌کند. در شکل 12 توربینی با شکل پره متغیر مورد آزمون قرار گرفته است. شکل پره از ناکا 0015 در ارتفاع صفر تا ناکا 0021 در ارتفاع 1 متری تغییر می‌کند. نتایج نشان می‌دهد برخلاف توربین با صلبیت متغیر که مزایای صلبیت کم و بالا را به‌طور همزمان دارد، توربین با شکل پره متغیر به‌طوری که ضخامت نسبت به ارتفاع تغییر کند تأثیری بر بهبود عملکرد ندارد. به عبارتی استفاده از این پره تفاوتی با حالتی که از پره با ضخامت میانگین، یعنی ناکا 0018 استفاده شود، نخواهد داشت.

از دیگر عوامل مؤثر بر راندمان توربین ضریب منظری<sup>1</sup> است.



شکل 11 مقایسه ضریب توان توربین با صلبیت متغیر

1- Aspect Ratio

## 4- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مطالعه برای ایجاد مرجعی مناسب، در شرایط یکسان اثر 5 پارامتر اصلی مؤثر در عملکرد توربین بادی داریوس مورد تحقیق قرار گرفت. رفتار آیرودینامیکی توربین داریوس با استفاده از روش چند تیوب جریانی دوگانه که زمان محاسبات کمتری در مقابل دینامیک سیالات محاسباتی می‌طلبد، مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه اثر پنج پارامتر اساسی یعنی شکل پره، عدد رینولدز، صلیبیت، ضریب منظری و گام زاویه‌ای بررسی شد.

نتایج نشان داد با ضخیم‌تر شدن شکل ایرفویل به علت کاهش افت واماندگی، توربین از قابلیت خود راه‌اندازی بیشتری برخوردار می‌شود. اما این افزایش ضخامت به سبب کاهش مقدار حداکثر ضریب برآ، مقدار حداکثر راندمان توربین کاهش یابد. بررسی تأثیر عدد رینولدز نشان داد افزایش عدد رینولدز موجب کاهش افت واماندگی و افزایش حداکثر ضریب برآ می‌شود که در نتیجه آن با افزایش عدد رینولدز قابلیت خود راه‌اندازی و حداکثر راندمان توربین، هر دو افزایش می‌یابد. بررسی اثر صلیبیت نشان داد افزایش صلیبیت موجب نوک تیز شده نمودار راندمان و افزایش قابلیت راه‌اندازی توربین می‌شود. افزایش صلیبیت تا حدود 0/33 موجب افزایش حداکثر راندمان و پس از آن موجب کاهش حداکثر راندمان خواهد شد. سپس نشان داده شد توربین ترکیبی معرفی شده که صلیبیتی متغیر با ارتفاع دارد، می‌تواند مزایای صلیبیت کم و بالا را به‌طور هم‌زمان دارا باشد. بررسی اثر ضریب منظری نشان داد در ضریب منظری پایین اثر لبه فرار موجب نفوذ گردابه‌ها به داخل پره و کاهش راندمان می‌شود که با افزایش ارتفاع توربین می‌تواند برطرف شود. در انتها نشان داده شد افزایش محدود گام زاویه‌ای موجب افزایش زاویه حمله در نیمه بالادست و کاهش اندازه زاویه حمله در نیمه پایین‌دست می‌شود، لذا می‌تواند اثر مناسبی بر راندمان توربین داشته باشد.

## 5- مراجع

- [1] D. A. Spera, *Wind Turbine Technology: Fundamental Concepts in Wind Turbine Engineering*, Second Edition: ASME, 2009.
- [2] A. Esfandiari, M. Bazargan, Effects of blade mount and preset pitch on performance of vertical axis wind turbine, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 2, pp. 79-84, 2014. in Persian
- [3] J. P. Wilhelm, C. Panther, F. A. Perti, J. E. Smith, Momentum analytical model of a circulation controlled vertical axis wind turbine, in *Proceeding of American Society of Mechanical Engineers*, pp. 1009-1017.
- [4] N. Batista, R. Melicio, V. M. Mendes, J. Figueiredo, A. Reis, *Darrieus Wind Turbine Performance Prediction: Computational Modeling*, in: *Technological Innovation for the Internet of Things*, Eds., pp. 382-391: Springer, 2013.
- [5] M. Islam, D. S.-K. Ting, A. Fartaj, Aerodynamic models for Darrieus-type straight-bladed vertical axis wind turbines, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 12, No. 4, pp. 1087-1109, 2008.
- [6] I. Paraschivoiu, *Wind turbine design: with emphasis on Darrieus concept*: Presses inter Polytechnique, 2002.
- [7] S. Mertens, G. van Kuik, G. van Bussel, Performance of an H-Darrieus in the skewed flow on a roof, *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 125, No. 4, pp. 433-440, 2003.
- [8] P. Deglaire, S. Engblom, O. Ågren, H. Bernhoff, Analytical solutions for a single blade in vertical axis turbine motion in two-dimensions, *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, Vol. 28, No. 4, pp. 506-520, 2009.
- [9] R. Howell, N. Qin, J. Edwards, N. Durrani, Wind tunnel and numerical study of a small vertical axis wind turbine, *Renewable Energy*, Vol. 35, No. 2, pp. 412-422, 2010.
- [10] H. Beri, Y. Yao, Effect of Camber Airfoil on Self Starting of Vertical Axis Wind Turbine, *Journal of Environmental Science & Technology*, Vol. 4, No. 3, 2011.
- [11] R. E. Sheldahl, P. C. Klimas, *Aerodynamic characteristics of seven symmetrical airfoil sections through 180-degree angle of attack for use in aerodynamic analysis of vertical axis wind turbines*, Sandia National Labs., Albuquerque, NM (USA), pp. 1981.
- [12] I. M. Asher, M. Drela, J. Peraire, A low order model for vertical axis wind turbines, in *Proceeding of Am Inst Aeronaut Astronaut 28th AIAA Applied Aerodynamics Conference*, Vol. 4401, pp. 1-9.

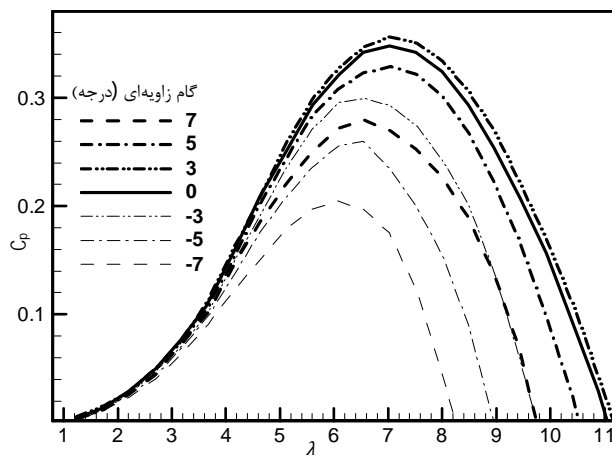
لذا با افزایش ارتفاع تا بی‌نهایت اثر نوک پره به صفر میل می‌کند. مسأله دیگر تأثیر بالای ضریب منظری در  $\lambda$  بالا و اثر کم آن در  $\lambda$  کم می‌باشد. باید در نظر داشت فیزیک جریان در  $\lambda$  پایین به خودی خود به‌شدت در اثر گردابه‌های جدا شده مغشوش است و گردابه جدا شده از نوک پره اثر کمتری نسبت به  $\lambda$  بالا که گردابه‌های کمی جدا می‌شوند، خواهد داشت.

عامل دیگری که اثر آن بر روی توربین مورد مطالعه قرار گرفته، گام زاویه‌ای پره است. گام زاویه‌ای به‌صورت زاویه بین وتر پره و خط مماس بر مسیر چرخش پره تعریف می‌شود. برای بررسی اثر گام زاویه‌ای، منحنی عملکرد توربینی با پره ناکا 0015، صلیبیت 0/08 و عدد رینولدز 300000 در 7 گام زاویه‌ای متفاوت در شکل 14 رسم شده است. 3 گام زاویه‌ای مثبت و 3 گام زاویه‌ای منفی برای بررسی این عامل انتخاب شده‌اند.

ملاحظه می‌شود با افزایش گام زاویه‌ای، ضریب توان توربین در تمام بازه  $\lambda$  ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. کاهش گام زاویه‌ای از صفر به مقادیر منفی به‌طور پیوسته موجب کاهش ضریب توان توربین در تمام بازه  $\lambda$  می‌شود. تغییرات توان توربین در اثر تغییر گام زاویه‌ای در  $\lambda$  بالا قابل ملاحظه‌تر است.

علت این پدیده (اختلاف بالا در  $\lambda$  بالا برای گام زاویه‌ای متفاوت) را می‌توان در شکل 3 یافت. همان‌طور که در شکل 3 نشان داده شده در  $\lambda$  برابر با 5 زاویه حمله بین صفر تا حداکثر  $10^\circ \pm$  نوسان می‌کند. تغییر 7 درجه‌ای یعنی تغییر 70 درصدی زاویه حمله اما در  $\lambda$  برابر با 1 زاویه حمله بین صفر تا حداکثر  $90^\circ \pm$  نوسان می‌کند و تغییر 7 درجه‌ای یعنی فقط یک تغییر 8 درصدی زاویه حمله که موجب تأثیر کمتر این گام زاویه‌ای می‌شود.

مقادیر منفی گام زاویه‌ای موجب کاهش زاویه حمله در نیمه بالادست توربین و افزایش اندازه زاویه حمله توربین در نیمه پایین‌دست توربین می‌شود. اما گام زاویه‌ای مثبت موجب افزایش زاویه حمله در نیمه بالادست و کاهش اندازه زاویه حمله در نیمه پایین‌دست می‌شود. با توجه به اینکه بخش اصلی توان تولیدی توربین در نیمه بالادست آن تولید می‌شود، نیمه بالادست اهمیت بیشتری دارد. لذا گام زاویه‌ای مثبت می‌تواند اثر بهتری بر راندمان توربین داشته باشد. البته افزایش گام زاویه‌ای بیشتر از 3، موجب عبور زاویه حمله نسبی، از حد واماندگی ایرفویل و در نتیجه تولید گردابه‌های بیشتر می‌شود که خود نیروی برآ تولیدی توربین را به‌جای افزایش، کاهش می‌دهد.



شکل 14 اثر تغییر گام زاویه‌ای بر منحنی ضریب توان