



## بررسی جریان و ضریب گشتاور توربین بادی داریوس بر حسب تغییرات زاویه گام و نسبت سرعت نوک پره

امیر ساغری چی<sup>۱</sup>، محمدجواد مغربی<sup>۲\*</sup> و علیرضا عرب گلارچه<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

<sup>۲</sup> دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

<sup>۳</sup> کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۲/۰۱؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۵/۰۷/۱۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۱/۲۶

### چکیده

توربین بادی داریوس، به دلیل طراحی ساده و عدم وابستگی به جهت باد، مورد توجه محققان قرار گرفته است. به دلیل افزایش زاویه حمله پره در سرعت‌های نوک پایین و ایجاد واماندگی، اساساً این توربین‌ها با مشکل راه‌اندازی مواجه هستند. در این مطالعه نشان داده می‌شود که استفاده از زاویه گام پره متغیر، یک راه‌کار مناسب برای رفع مشکلات توربین بادی داریوس است. در این مقاله، اثر زاویه گام متغیر پره بر میزان گشتاور خروجی، رفتار جریان حول روتور و خاصیت راه‌اندازی توربین بادی داریوس بررسی شده است. شبیه‌سازی‌ها به صورت غیردائمی، دوبعدی و با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی به کمک مدل آشفتگی  $SST-k\omega$  در نرم‌افزار انسیس فلونت صورت پذیرفته و برای شبیه‌سازی چرخش روتور، از تکنیک شبکه‌بندی لغزشی استفاده شده است. بررسی عددی نشان می‌دهد که استفاده از روش گام متغیر با هدف کاهش اندازه زاویه حمله، شانس توربین برای تولید گشتاور در زوایای چرخش مختلف را افزایش می‌دهد. همچنین سبب افزایش اختلاف فشار حول ناحیه کم‌فشار و پرفشار پره شده، و واماندگی جریان را به تأخیر می‌اندازد. به همین دلیل توربین با زاویه گام متغیر در مقایسه با توربین با زاویه گام ثابت صفر درجه، در سرعت‌های نوک متوسط و پایین، توان بیشتری تولید کند.

**کلمات کلیدی:** توربین بادی داریوس؛ زاویه گام متغیر؛ واماندگی؛ ضریب توان.

## Investigation of Flow Field and Torque Coefficient of Darrieus Wind Turbine with Respect to Pitch Angle Variations and Tip Speed Ratios

A. Sagharichi<sup>1</sup>, M.J. Maghrebi<sup>2,\*</sup>, A. ArabGolarche<sup>3</sup>

<sup>1</sup> M.Sc. Student, Mech. Eng., Ferdowsi Univ., Mashhad, Iran.

<sup>2</sup> Prof., Mech. Eng., Ferdowsi Univ., Mashhad, Iran.

<sup>3</sup> M.Sc. Student, Mech. Eng., Ferdowsi Univ., Mashhad, Iran.

### Abstract

The Darrieus VAWT has been considered by many scientists due to the simplicity of design and independence to the wind direction. The straight-bladed Darrieus wind turbines have the inherent problem of self-starting inability. In this study has been showed that use of the variable pitch angle blades is a suitable solution to overcome the self-starting problem and increasing the output power. So, the effect of variable blade pitch angle mechanism on output torque, flow field around the rotor and self-starting of Darrieus wind turbine has been investigated. The unsteady two-dimensional simulation is conducted using computational fluid dynamics with  $SST-k\omega$  turbulence model and moving mesh technique is used for simulation of the rotating rotor. The numerical investigation shows that variable pitch mechanism decreases the angle of attack makes the turbine have a chance to produce more torque at different azimuthal angles. Also the use of variable pitch blades increases the pressure difference between the low and high pressure of around the blade and delays stall. So, the Darrieus turbine with variable pitch angle in comparison with zero fixed pitch angle blade Darrieus turbine has the ability to produce more power at the middle and lower tip speeds ratios.

**Keywords:** Darrieus Wind Turbine; Variable Pitch; Stall; Power Coefficient.

\* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۵۱۳۸۸۰۵۰۵۱؛ فکس: ۰۵۱۳۸۸۰۵۰۵۱

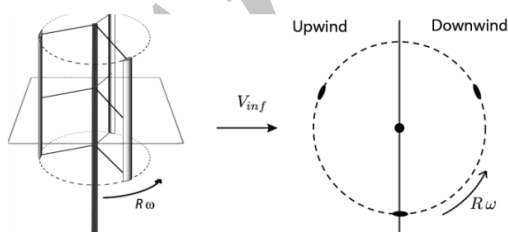
آدرس پست الکترونیک: [mjmaghrebi@um.ac.ir](mailto:mjmaghrebi@um.ac.ir)

## ۱- مقدمه

انرژی‌های نو و تجدیدپذیر به علت مزایای فراوان، مورد توجه قرار گرفته‌اند. پس از بحران‌های انرژی که عمده‌ترین آن‌ها در دهه هفتاد میلادی به وقوع پیوست، نظر بسیاری از کشورهای دنیا به تحقیق و استفاده از انرژی‌های نو نظیر، انرژی باد، انرژی خورشید، زمین‌گرایی و سایر منابع تجدید پذیر جلب شده است و در این میان بیشتر پژوهش‌ها مربوط به مبحث انرژی باد است [۱]. توربین‌های بادی بر اساس جهت محور چرخش، به دو دسته توربین‌های بادی محور افقی و محور عمودی دسته‌بندی می‌شوند. به علاوه، توربین‌های بادی محور عمودی بر اساس نوع نیروی باد وارد بر پره، به توربین‌های محرک نیروی پسایی و توربین‌های محرک نیروی برآیی (که بازدهی بیشتری نسبت به توربین‌های پسایی دارند) دسته‌بندی می‌شوند. توربین‌های داریوس، در دسته توربین‌های محرک نیروی برآیی قرار دارند. این توربین‌ها قادرند تا نیروی برآ را به گشتاور<sup>۱</sup> مثبت تبدیل کنند. اغلب توربین‌های بادی داریوس پره مستقیم از ایرفویل‌های مقطع متقارن ساخته شده، دارای زاویه گام (خط بین وتر پره و خط عمود بر لینک اصلی) ثابت می‌باشند [۲]. نمایی از این توربین در شکل ۱ نمایش داده شده است.

عموماً تولیدکنندگان توربین‌های بادی، توربین‌های بادی محور افقی را به دلیل داشتن توان بالاتر به توربین‌های بادی محور عمودی ترجیح می‌دهند [۱]؛ اما مزیت اصلی توربین‌های بادی محور عمودی، استقلال از جهت باد است که توربین را به وجود مکانیزم یا<sup>۲</sup> برای همسو شدن توربین در جهت باد بی‌نیاز می‌سازد. زیبایی، بازدهی مناسب در محیط‌های با وزش باد متلاطم و تولید سروصدای کمتر نسبت به توربین‌های بادی محور افقی، از جمله ویژگی‌های دیگر این نوع توربین‌ها است [۳-۵]. از آنجا که در این توربین‌ها برخلاف توربین‌های محور افقی، زاویه حمله پره در طول یک دور چرخش مدام در حال تغییر است، بازدهی کمتر بوده [۴]، راه‌اندازی اولیه این نوع

توربین‌ها، به دلیل پدیده مرسوم به ناحیه مرده<sup>۳</sup> با مشکلاتی همراه است. یکی از روش‌های پیشنهاد شده برای رفع این مشکلات و بهبود عملکرد شروع به کار توربین در سرعت‌های نوک پایین، استفاده از توربین‌های ترکیبی شامل، دو توربین بادی محور عمودی هم‌محور داریوس و ساوینوس<sup>۴</sup> است؛ اما توربین‌های بادی دارای زاویه گام متغیر<sup>۵</sup>، با کاهش اثرات منفی واماندگی دینامیکی پره، سبب بهبود راه‌اندازی اولیه و کاهش نوسانات گشتاور تولیدی توربین شده، برای دستیابی هم‌زمان به گشتاور شروع به کار بیشتر و بازدهی بیشتر در همه سرعت‌های نوک<sup>۶</sup> توسعه یافته‌اند [۵، ۲]. رفتار پیچیده جریان حول روتور توربین‌های بادی محور عمودی، پیش‌بینی عملکرد آئرو دینامیکی این توربین‌ها را مشکل می‌سازد. به همین دلیل روش‌های تحلیلی ساده‌سازی، مانند تئوری گشتاور المان پره<sup>۷</sup> نمی‌توانند عملکرد این توربین‌ها را به دقت پیش‌بینی کنند؛ بنابراین برای پیش‌بینی دقیق‌تر باید از روش دینامیک سیالات محاسباتی<sup>۸</sup> به صورت خیلی دقیق بهره برد [۶]. دینامیک سیالات محاسباتی در حال حاضر، تبدیل به یک ابزار توانمند در مکانیک سیالات شده که تجزیه و تحلیل جریان سیال را با استفاده از روش‌های عددی و الگوریتم‌ها به کمک کامپیوترهای الکترونیکی انجام می‌دهد. در دهه‌های اخیر، افزایش قابل توجهی در استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی برای تشریح عملکرد توربین‌های بادی محور عمودی مشاهده شده است [۷].



شکل ۱- نمای توربین بادی داریوس [۳]

<sup>3</sup> Dead Band

<sup>4</sup> Savinuos

<sup>5</sup> Variable Pitch Angle

<sup>6</sup> TSR (Tip Speed Ratio)

<sup>7</sup> Blade Element Momentum Theory

<sup>8</sup> Computational Fluid Dynamic

<sup>1</sup> Torque

<sup>2</sup> YAW Mechanism

مدل‌های آشفتگی دیگر، به‌خوبی توانایی پیش‌بینی عملکرد آئرو‌دینامیکی توربین را داراست. کین و همکاران [۱۲]، به شبیه‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی توربین بادی محور عمودی، به‌وسیله نرم‌افزار فلونت<sup>۶</sup> پرداختند. آن‌ها نتیجه گرفتند که رفتار منحنی گشتاور پیش‌بینی شده به‌وسیله شبیه‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی، شبیه به یکدیگر است. هاول و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۱۰، با آزمایش یک توربین کوچک در تونل باد دریافتند که با افزایش سرعت باد (افزایش عدد رینولدز) و با کاهش تعداد پره‌ها (کاهش صلبیت<sup>۷</sup>)، کارایی توربین افزایش می‌یابد و راه‌اندازی اولیه توربین در صلبیت‌های پایین بهبود بخشیده می‌شود. آن‌ها همچنین نتایج تونل باد را با نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی عددی دو و سه‌بعدی اعتبار سنجی نموده، با مقایسه عملکرد توربین بادی محور عمودی دو و سه پره دریافتند که ضریب توان<sup>۸</sup> توربین دارای سه پره، بیشتر از دو پره است. هیل [۱۴] و آسلا و همکاران [۱۵]، نشان دادند که پره‌های انحنادار، نیروی مماسی بیشتری تولید کرده، در هر دور چرخش پره نسبت به توربین‌های بادی با پره متقارن، انرژی بیشتری تولید می‌کند. پس ایرفویل‌های نامتقارن به دلیل برای بالا و پسای پایین، برای راه‌اندازی اولیه توربین مناسب‌تر بوده، ضریب توان بیشتری تولید می‌کنند. بعضی از نتایج محققان، نشان‌گر نقش ضخامت و صلبیت پره در راه‌اندازی اولیه توربین است. ازجمله می‌توان به پژوهش‌های کرک [۱۶] و وانگ [۱۷] و همکاران اشاره کرد که مطالعاتشان نشان دادند، افزایش ضخامت و صلبیت پره، باعث کمک به بهبود عملکرد توربین در سرعت نوک پایین می‌شود. در سال ۲۰۱۱ بری و همکاران [۱۸]، به بررسی اثر شکل مقطع پره توربین داریوس از نوع پره مستقیم پرداختند و نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد، افزایش ضخامت ایرفویل تا یک حد مشخص، موجب بهبود راه‌اندازی اولیه توربین می‌شود.

نتیجه بعضی پژوهش‌های ذکرشده نشان‌گر این است که انتخاب ایرفویل مناسب، سهم زیادی در افزایش عملکرد آئرو‌دینامیکی توربین بادی داریوس دارد، اما تخمین این

ازجمله بررسی‌های عددی صورت گرفته به‌منظور بررسی پارامترهای مختلف روی عملکرد توربین‌های بادی محور عمودی داریوس، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد. عرب گلارچه و همکاران [۸]، با بررسی پارامترهای مختلف بر عملکرد توربین بادی داریوس نشان دادند که افزایش ضخامت پره به کمک کاهش افت واماندگی دینامیکی، سبب افزایش قابلیت راه‌اندازی توربین می‌شود. همچنین ایشان با روش جدیدی نشان دادند که در آن سرعت روتور از عکس‌العمل نیروهای وارد بر پره‌ها محاسبه می‌شود که کاهش گردابه ایجادشده در جریان اولیه، سبب افزایش گشتاور راه‌انداز توربین می‌شود [۳]. در سال ۲۰۱۰ وانگ [۹]، از مدل‌های آشفتگی انتقال تنش برشی استاندارد و مدل انتقال تنش برشی با مبنای کی-امگا<sup>۱</sup> برای شبیه‌سازی پدیده واماندگی دینامیکی در اعداد رینولدز<sup>۲</sup> پایین استفاده کرد. پس از مقایسه نتایج این مدل با نتایج تجربی، او نتیجه گرفت که مدل انتقال تنش برشی با مبنای کی-امگا، بهتر از مدل انتقال تنش برشی استاندارد، توانایی پیش‌بینی خواص جریان را دارد و این مدل به‌طور مؤثر ویژگی‌های اصلی پدیده واماندگی دینامیک، مانند بار پسماند آئرو‌دینامیکی و ساختار جریان گردابه‌های<sup>۳</sup> قسمت جلویی ایرفویل را پیش‌بینی می‌کند. دومینی و همکاران [۱۰]، نشان دادند که توربین‌های بادی سه پره، پتانسیل خوبی برای راه‌اندازی اولیه<sup>۴</sup> دارند، ولی راه‌اندازی اولیه توربین‌های بادی محور عمودی دو پره، بستگی به جهت شروع اولیه پره توربین دارد. نوبیل و همکاران [۱۱]، یک بررسی عددی برای پیش‌بینی واماندگی دینامیکی در توربین بادی محور عمودی برای سرعت‌های نوک پایین انجام دادند. مطالعات دوبعدی، روی یک توربین بادی محور عمودی سه پره با پروفیل ناکا<sup>۵</sup> ۰۰۱۸ صورت گرفت و برای این بررسی، از مدل‌های آشفتگی مختلف استفاده کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که مدل انتقال تنش برشی با مبنای کی-امگا در مقایسه با

<sup>۱</sup> SST k- $\omega$

<sup>۲</sup> Reynolds Number

<sup>۳</sup> Vortex

<sup>۴</sup> Self-Start

<sup>۵</sup> NACA(National Advisory Committee for Aeronautics)

<sup>۶</sup> Fluent

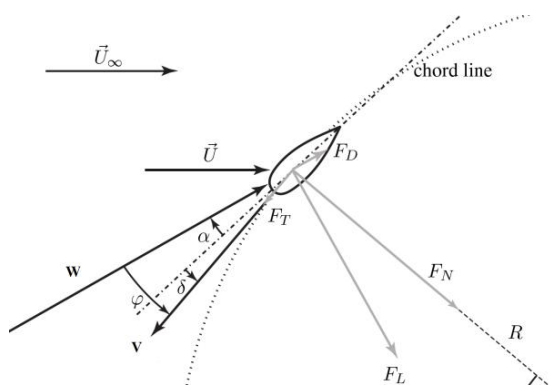
<sup>۷</sup> Solidity

<sup>۸</sup> Power Coefficient

بازدهی و ارتعاش) را کاهش دهد. استفاده از روش تغییر گام خودکار پره سبب می‌شود تا سینماتیک پره، رفتار بهینه نسبت به سرعت باد ورودی داشته باشد و سبب افزایش بازدهی کلی شود.

## ۲- معادلات حاکم

یکی از پیچیدگی‌های توربین داریوس، تغییر زاویه مابین وتر پره و جهت جریان باد در طی یک دور کامل است. به همین دلیل در یک دور، وتر پره از هم‌جهت بودن با جریان باد تا در خلاف جهت باد بودن قرار می‌گیرد. این تغییر زاویه موجب می‌شود تا سمت مکش ایرفویل در نیمه بالادست توربین، در نیمه پایین دست تبدیل به سمت پرفشار شود [۲۰]. در شکل ۲، بردارهای سرعت و نیروهای آئرو دینامیکی وارد بر پره توربین بادی داریوس در طول یک دور چرخش نمایش داده شده است.



شکل ۲- نمایش بردارهای سرعت و نیرو برای توربین بادی داریوس [۲۱]

معادله ۱، رابطه بین سرعت نسبی محلی پره  $W$  و سرعت جریان باد ورودی  $U$  را نشان می‌دهد [۵].

$$\left(\frac{W}{U}\right) = (\lambda + \cos \theta)^2 + (\sin \theta)^2 \quad (1)$$

در معادله ۱،  $\lambda$  سرعت نوک پره (نسبت سرعت نوک پره به سرعت باد) نامیده می‌شود و از رابطه ۲ محاسبه می‌شود.

$$\lambda = \frac{R\omega}{U} \quad (2)$$

مشکل است که این انتخاب به قابلیت راه‌اندازی کمک کرده، توان توربین را افزایش دهد؛ اما خوشبختانه بعضی نتایج قبلی نشان‌دهنده اینست که تنظیم زاویه گام اولیه پره، تأثیر زیادی روی عملکرد کلی توربین بادی محور عمودی دارد. پاراسچپو [۱۹]، عنوان کرد که فناوری زاویه گام متغیر به‌عنوان یک راه‌کار مناسب برای راه‌اندازی بهتر توربین بادی محور عمودی با پره‌های مستقیم بوده، حداکثر ضریب توان توربین را افزایش می‌دهد و باعث افزایش دامنه کاری توربین شده است و ارتعاشات وارد پره را کاهش می‌دهد که بر اثر واماندگی دینامیکی به وجود می‌آید. او در این مطالعه استفاده از تابع سینوسی برای تغییر زاویه گام پره را پیشنهاد کرد.

در مطالعه حاضر به منظور تقویت گشتاور راه‌انداز توربین و افزایش توان خروجی، به بررسی اثر استفاده از زاویه گام متغیر سینوسی با دو دامنه ۵ و ۱۰ درجه در سرعت‌های نوک مختلف پرداخته شده است. جریان سیال حول پره‌ها به‌وسیله نرم‌افزار تجاری انسیس فلونت ۱۵ و با استفاده از شبکه لغزشی<sup>۱</sup> شبیه‌سازی شده است. از آنجا که توربین‌های بادی محور عمودی در وضعیت‌های مختلف و زوایای چرخش مختلف، دارای زوایای حمله متفاوتی می‌باشند، در معرض بارهای آئرو دینامیکی سیکلی قرار می‌گیرند که نهایتاً منجر به مشکلات خستگی در توربین می‌شود [۱]. با روش تغییر زاویه گام متغیر پره که در این مقاله پیشنهاد شده، یک برنامه مشخص برای تغییر زاویه گام بر اساس تابعی از موقعیت مکانی پره تعریف می‌شود و حرکت نوسانی پره و تغییرات زاویه حمله در تمامی سرعت‌های نوک را کاهش می‌یابد؛ بنابراین، اثرات واماندگی در نیمه پستی توربین برای سرعت‌های نوک میانه و پایین کاهش یافته، پره توانایی پیدا می‌کند تا در سرعت‌های نوک پایین، با تغییر جهت خود، گشتاور لازم برای حرکت اولیه خود را ایجاد کند. پیش‌بینی می‌شود یک توربین بادی محور عمودی داریوس مجهز به فناوری زاویه گام متغیر، در مقایسه با توربین بادی گام ثابت می‌تواند مقدار و نرخ افزایش زاویه حمله پره را در طی یک دور چرخش تغییر دهد و اثرات منفی واماندگی دینامیکی پره (مثل کاهش

<sup>۱</sup> Moving Mesh

گشتاور محرک یک پره نیز از رابطه ۸ محاسبه می‌شود.

$$M_{\theta} = (OP + PA) \times F_A + M_A \quad (۸)$$

در رابطه ۸،  $A$  مرکز آئرودینامیکی و  $P$  مرکز چرخش پره بوده  $F_A$  و  $M_A$  نیروی آئرودینامیکی خاص و گشتاور مربوط به مرکز آئرودینامیکی است. مرکز آئرودینامیکی پره حدود ۰.۲۵ طول وتر است؛ بنابراین از گشتاور خروجی به‌وسیله تغییرات مرکز آئرودینامیکی زمانی که مرکز چرخش پره ۰.۲۵ وتر باشد، صرف‌نظر می‌شود.  $M_A$  تقریباً برابر با گشتاور  $M_p$  (گشتاور حول مرکز چرخش) بوده، جهت آن برخلاف جهت چرخش توربین بادی است. اگر پارامترهای ساختاری یک توربین و سرعت ورودی جریان شناخته شده باشد، رابطه ۸ به‌صورت رابطه ۱۰ تعریف می‌شود.

$$M_{\theta} = 0.5\rho V^2 CHR(\lambda^2 + K_{\theta}^2 + 2K_{\theta}\lambda \cos \Theta)C_t \quad (۹)$$

در معادله ۹،  $H$  و  $C$  بیان‌گر ارتفاع و طول وتر پره و  $K_{\theta}$  ضریب تصحیح روتور است. با توجه به این معادله گشتاور راه‌انداز در زاویه چرخش دلخواه شدیداً تحت تأثیر زاویه گام پره است. درنهایت ضریب توان  $C_p$  یک توربین‌محور عمودی با پره مستقیم، از رابطه ۱۰ محاسبه می‌شود.

$$C_p = \sigma \lambda \cdot \sum_{i=1}^m \frac{C_t \cdot (\lambda^2 + K_{\theta}^2 + 2\lambda K_{\theta} \cos \Theta)}{m} \quad (۱۰)$$

در معادله ۱۰،  $m$  تعداد تیوب‌های جریان و  $\sigma$  ضلبيت توربین است. به دلیل آن که ضریب توان توربین وابسته به ضریب نیروی مماسی پره است، می‌توان زاویه گام را طوری تنظیم کرد تا زاویه حمله بهینه شده، بیشینه توان خروجی به دست آید.

### ۳- مکانیزم زاویه گام متغیر پره

همان‌طور که گفته شد، معمولاً در ساخت توربین‌های داریوس کلاسیک با پره‌های عمودی، از ایرفویل‌های مقطع متقارن استفاده می‌شود [۲] و همین سبب می‌شود تا حداکثر زاویه حمله پره در این نوع توربین‌ها پایین باشد؛ بنابراین در زوایای حمله بحرانی، جریان از سطح کم‌فشار پره جدا شده، پره دچار واماندگی می‌شود. شکل ۴، نمودار

در رابطه ۲،  $\omega$  سرعت دورانی،  $R$  شعاع توربین و  $\theta$  زاویه چرخش<sup>۱</sup> پره است؛ همچنین با توجه به شکل ۳، زاویه وارد بر هر پره در طول چرخش از رابطه ۳ محاسبه می‌شود.

$$\begin{cases} \tan \varphi = \frac{\sin \theta}{\lambda + \cos \theta}, & 0 < \theta \leq 180 \\ \tan \varphi = \frac{-\sin \theta}{\lambda + \cos \theta}, & 180 < \theta \leq 360 \end{cases} \quad (۳)$$

در رابطه ۳،  $\varphi$  مجموع زاویه حمله و گام پره است و زاویه حمله محلی پره روتور به‌صورت رابطه ۴ بیان می‌شود.

$$\alpha = \varphi - \delta \quad (۴)$$

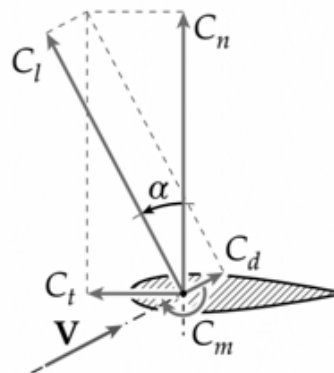
که در این معادله  $\delta$ ، زاویه گام پره است. با توجه به شکل ۳، ضریب نیروی عمود بر ایرفویل  $C_n$  و ضریب نیروی مماس بر ایرفویل  $C_t$ ، از روابط ۵ و ۶ محاسبه می‌شود.

$$C_n = C_L \cos \alpha + C_D \sin \alpha \quad (۵)$$

$$C_t = C_L \sin \alpha - C_D \cos \alpha \quad (۶)$$

که  $C_L$  و  $C_D$  به ترتیب، معرف ضریب برآ و ضریب پسای ایرفویل بوده، رابطه بین ضریب برآ و پسای با توجه به شکل ۳ از رابطه ۷ محاسبه می‌شود.

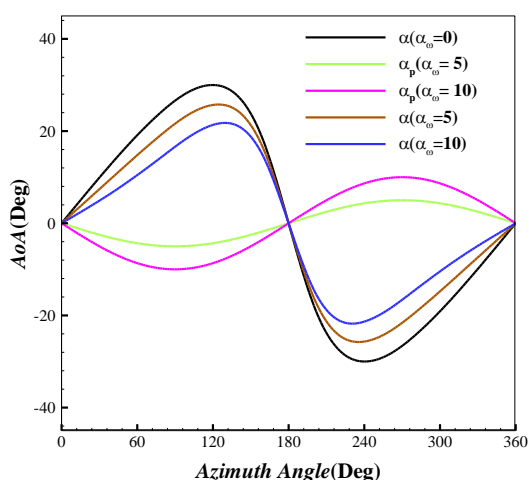
$$\phi = \text{Arc tan}\left(\frac{C_D}{C_L}\right) \quad (۷)$$



شکل ۳- ضرایب آئرودینامیکی وارد بر پره توربین بادی داریوس [۲۲]

<sup>۱</sup> Azimuth Angle

زاویه گام متغیر پره که در این مقاله پیشنهاد شده، یک برنامه مشخص برای تغییر زاویه گام پره بر اساس تابعی از موقعیت مکانی پره در طول یک سیکل چرخش تعریف می‌شود و حرکت نوسانی پره و تغییرات زاویه حمله را کاهش می‌دهد. با این تغییر زاویه حمله، اثرات واماندگی در نیمه پشتی توربین برای سرعت‌های میانه و پایین را کاهش یافته و پره توانایی پیدا می‌کند تا در سرعت‌های نوک پایین، با تغییر جهت خود، گشتاور لازم برای حرکت اولیه خود را ایجاد کند [۲۳].



شکل ۵- زاویه حمله یک پره بر حسب زاویه چرخش برای زوایای گام با دو دامنه ۵ و ۱۰ درجه و در سرعت نوک ۲

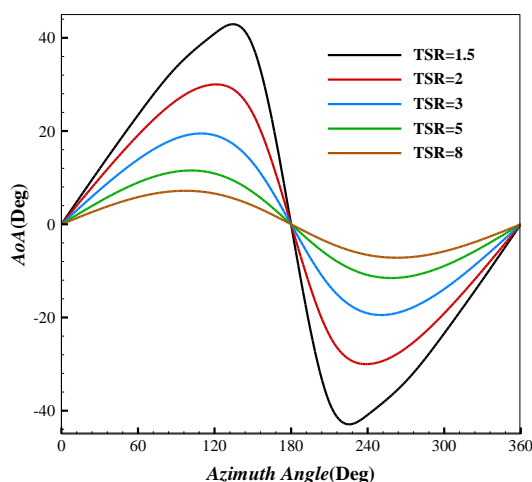
#### ۴- شبیه‌سازی عددی

##### ۴-۱- ناحیه محاسباتی و شرایط مرزی

بررسی دوبعدی توربین بادی محور عمودی ایجاب می‌کند تا دامنه محاسباتی به سه ناحیه مجزا تقسیم شود. دامنه پره، دامنه شامل روتور و دامنه خارجی. دامنه دربرگیرنده پره‌ها شامل، یک دامنه متحرک است که به وسیله دامنه شامل روتور که آن‌هم چرخان است، در برگرفته شده است. در دامنه خارجی روتور، یک محیط مستطیلی با ابعاد ۱۳×۲۱ قرار دارد. مرکز دامنه چرخان در مسافت ۷ متری از ورودی دامنه ثابت قرار گرفته است. برای اطمینان از ایجاد نشدن اثر انسداد مرزها،<sup>۱</sup> دامنه به اندازه کافی بزرگ در

تغییرات زاویه حمله در سرعت‌های نوک مختلف، بر حسب زاویه چرخش را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، در توربین‌های با زاویه گام ثابت و در طول یک سیکل چرخش، هر پره یک تغییر نوسانی در زاویه حمله را تجربه می‌کند. از طرفی زاویه حمله پره، شدیداً به سرعت باد ورودی و سرعت چرخش توربین وابسته است و پره در نسبت سرعت نوک بالاتر، زاویه حمله پایین‌تری تجربه می‌کند و هرچه سرعت نوک پره از سرعت باد بیشتر شود، تغییرات زاویه حمله ناچیز می‌شود و سبب می‌شود تا پره برای بیشتری تولید کند و برای مدت زمان بیشتری در زوایایی قرار بگیرد که برآ بالاتری تولید می‌شود. برعکس، در نسبت‌های سرعت نوک پایین، پره مدت‌زمان زیادی را در شرایطی سپری می‌کند که زاویه حمله خیلی زیاد است؛ بنابراین پدیده واماندگی رخ داده، در نهایت منجر به جدایش جریان و سبب تولید گردابه‌هایی می‌شود که به سمت پایین دست توربین حرکت می‌کنند. این گردابه‌ها در قسمت پایین دست جریان، با پره‌ها برخورد می‌کنند و مانع تولید برآ می‌شود، پس توربین گشتاوری در حد صفر تولید کرده، توربین توانایی خود را اندازی را از دست می‌دهد.

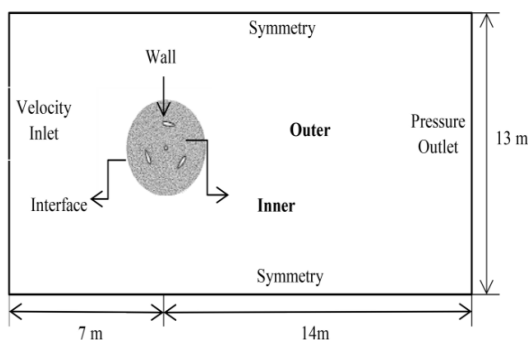
شکل ۵ تغییرات در زاویه حمله پره گام متغیر، برای زوایای گام با دو دامنه ۵ و ۱۰ درجه و در سرعت نوک ۲ را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با روش تغییر



شکل ۴- زاویه حمله یک پره بر حسب زاویه چرخش در سرعت‌های نوک مختلف

<sup>۱</sup> Solid Blockage

جدا کردن دامنه پره‌ها از دامنه روتور، استفاده از مکانیزم گام متغیر است که در طی آن توربین حول دو محور مجزا می‌چرخد. اولین چرخش حول محور Z با سرعت زاویه‌ای  $\omega$  و دومین چرخش حول  $0.25$  طول وتر با سرعت زاویه‌ای دلخواه، برای تغییر زاویه گام است. به‌علاوه وجود سه دامنه حول پره‌ها، راه ساده‌تری برای کنترل حجم و کیفیت شبکه‌بندی در مهم‌ترین قسمت میدان مورد مطالعه است. به منظور پیش‌بینی دقیق‌تر خواص جریان و محاسبه گرادینان‌ها، ریزترین شبکه غیر ساختاریافته در میان تمام ناحیه‌ها، در دامنه پره‌ها انتخاب شده است. چرخش چهار قسمت دامنه دینامیکی (سه دامنه شامل پره‌ها و دامنه روتور) به‌وسیله تابع تعریف شده که کد کاربری<sup>۶</sup> آن در محیط کد نویسی ++C نوشته شده است، به‌صورت جداگانه کنترل می‌شود. این کد وارد حل‌گر شده، برای هدایت چرخش پره‌ها از آن استفاده می‌شود. نمای شماتیک دامنه محاسباتی مورد استفاده، در شکل ۶ آورده شده است.



شکل ۶- دامنه محاسباتی و شرایط مرزی

جدول ۱- مشخصات هندسی توربین

مشخصات توربین	کمیت
پروفیل پره	ناکا ۰۰۲۱
طول وتر (mm)	۸/۵۸
قطر (mm)	۱۰۳۰
ارتفاع (mm)	۴/۱۴۵۶
مساحت ( $m^2$ )	۱/۲۳۶
صلبیت	۰/۵
تعداد پره	۳

<sup>۶</sup> UDF(User Defined Function)

نظر گرفته شده است؛ بدین معنی که تا حد امکان مرزها دور انتخاب شوند تا جریان به شرایط جریان آزاد برسد. مشخصات توربین مورد بررسی در جدول ۱ آورده شده است. سرعت جریان آزاد برابر ۹ متر بر ثانیه و چگالی هوا و ویسکوزیته<sup>۱</sup> به ترتیب برابر ۱/۲۲۵ کیلوگرم بر مترمکعب و ۰/۰۰۰۱۸۲ پاسکال ثانیه می‌باشند. شرایط مرزی متقارن<sup>۲</sup> در دو طرف بالایی و پایینی دامنه اعمال شده است. فشار خروجی به صورت یکنواخت و برابر فشار اتمسفر و جریان ورودی با شرط مرزی ورودی سرعت<sup>۳</sup> قرار داده شده است. برای اطمینان از پیوستگی حوزه جریان حول دامنه روتور و پره‌ها از شرط مرزی سطح رابط<sup>۴</sup> استفاده شده است. این سطح، رابط بین روتور و دامنه خارجی در شبکه لغزشی قرار گرفته و در هر گام زمانی مطابق با روند حل، این دو قسمت را با هم کوپل می‌کند. به دلیل متحرک بودن دامنه روتور نسبت به دامنه بیرونی، شبکه حول روتور نسبت به دامنه بیرونی در حال حرکت است؛ بنابراین با اعمال این شرط مرزی، نرم افزار این امکان را می‌یابد تا به روش میان‌یابی، خواص جریان را در مرز بین روتور و دامنه ثابت محاسبه کند. اندازه المان‌ها در مرز بین سطح رابط روتور و دامنه خارجی هم‌اندازه در نظر گرفته شده تا برای همگرایی حل مشکلی به وجود نیاید. به دلیل کارآمدتر بودن شبکه‌بندی غیر ساختار یافته برای هندسه‌های غیریکنواخت، از این نوع شبکه‌بندی برای دامنه روتور استفاده شده است [۷]. از روش شبکه متحرک در این شبیه سازی استفاده شده است. استفاده از روش شبکه متحرک این امکان را فراهم می‌سازد که ناحیه دوار که شامل، پره‌های روتور و شبکه دربرگیرنده آن است، با همان سرعت دورانی روتور دوران کند. شبکه دینامیک دور روتور و پره‌ها بر طبق نسبت سرعت نوک خواهد چرخید، درحالی‌که شبکه دامنه خارجی ثابت خواهد بود و حرکتی نخواهد داشت. روی سطوح پره‌های روتور از شرط مرزی دیواره همراه با شرط عدم لغزش<sup>۵</sup> استفاده شده است. انگیزه اصلی

<sup>۱</sup> Viscosity

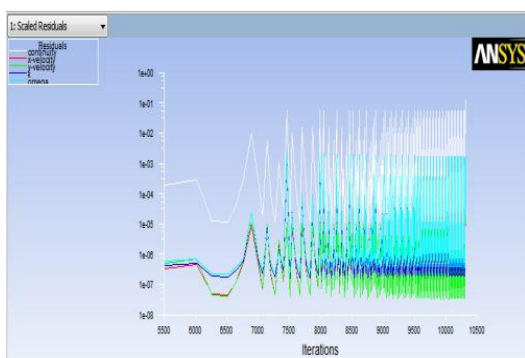
<sup>۲</sup> Symmetry

<sup>۳</sup> Velocity Inlet

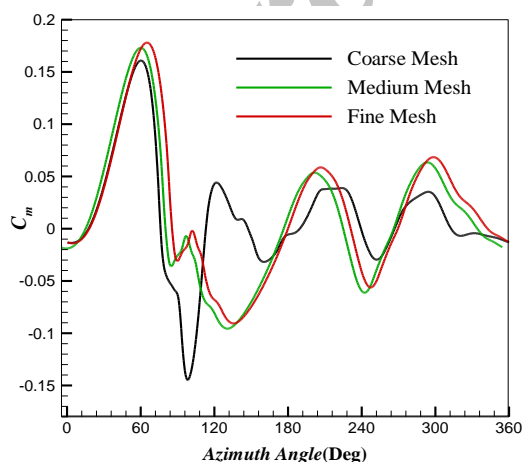
<sup>۴</sup> Interface

<sup>۵</sup> No-Slip

تولیدی پره برای هر سه شبکه‌بندی استفاده شده، برحسب زاویه چرخش و برای یک دور چرخش توربین را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، گشتاور به دست آمده از دو شبکه ریز و متوسط بسیار به هم نزدیک می‌باشند؛ بنابراین از شبکه‌بندی متوسط، به دلیل هزینه محاسباتی پایین و دقت بالا برای انجام شبیه‌سازی استفاده می‌شود. گفتنی است که تمامی مطالعات استقلال از شبکه برای سرعت نوک  $1/5$  صورت گرفته است. برای شبکه‌بندی متوسط، مکان قرارگیری اولین گره از سطح پره  $0.000002$  متر است، به طوری که مقدار  $Y+$  برای هر سه پره، در طول چرخش پره حدود کمتر از ۱ است. در جدول ۲، جزییات شبکه‌بندی‌های مختلف و در شکل ۹ نیز، نمایی از شبکه متوسط آورده شده است.



شکل ۷- روند کاهش باقیمانده‌ها در فرایند شبیه‌سازی عددی توربین داریوس



شکل ۸- تأثیر اندازه شبکه بر ضریب گشتاور در سرعت نوک  $1/5$

#### ۴-۲- روش حل عددی

جریان حول پره‌های توربین بادی محور عمودی، ذاتاً ناپایدار است. این شرایط، به دلیل تغییرات پیوسته زاویه حمله پره در طی یک دوران به وجود می‌آید [۳]. در این مطالعه نیز به دلیل لزوم پیش‌بینی دقیق‌تر، از روش ناپایا از حل معادلات ناویر استوکس با استفاده از نرم افزار انسیس فلونتت برای شبیه‌سازی استفاده شده است. با توجه به اینکه سرعت ورودی ۹ متر بر ثانیه است، جریان ورودی تراکم ناپذیر فرض شده است. از الگوریتم پیزو<sup>۱</sup> برای کوپلینگ سرعت و فشار در معادلات ناویر - استوکس<sup>۲</sup> استفاده شده است. برای حل معادلات فشار و مومنتوم و آشفتگی از الگوریتم گسسته‌سازی مرتبه دوم بالادست و برای محاسبه و شبیه‌سازی حوزه جریان تراکم ناپذیر، از حل گر مبتنی بر فشار استفاده شده است. در این شبیه‌سازی، ناحیه چرخان بر اساس شرایط کاری و مقدار نسبت سرعت نوک، با یک سرعت زاویه‌ای مشخص می‌چرخد. شبیه‌سازی تا زمانی ادامه پیدا می‌کند تا رفتار جریان به صورت شبه پایا<sup>۳</sup> دربیاید و رفتار گشتاور تولیدی از دو دور چرخش متوالی توربین، شبیه به هم گردد. این حالت با رسم گشتاور متوسط زمانی تولید شده براساس زاویه چرخش دو دور متوالی چرخش توربین، قابل درک است. قبل از ورود به گام زمانی بعدی، حل گر به طور میانگین حدود ۳۰ تکرار بر گام زمانی انجام می‌دهد. در شکل ۷، نمایی از روند کاهش باقیمانده‌ها در طی فرایند همگرا شدن حل نشان داده شده است. زاویه چرخش  $\theta$  نیز، زاویه ایجاد شده توسط بازوی متصل به پره اول با محور چرخش توربین در جهت پادساعت‌گرد است.

#### ۵- اعتبار سنجی مدل

##### ۵-۱- مطالعه استقلال از شبکه

کیفیت و اندازه شبکه تأثیر زیادی روی نتایج حل عددی دارد؛ بنابراین برای اطمینان از استقلال نتایج از اندازه شبکه و برای صرفه‌جویی در هزینه محاسباتی شبیه‌سازی با سه شبکه متفاوت انجام شده است. شکل ۸، گشتاور

<sup>۱</sup> PISO

<sup>۲</sup> Navier-Stokes

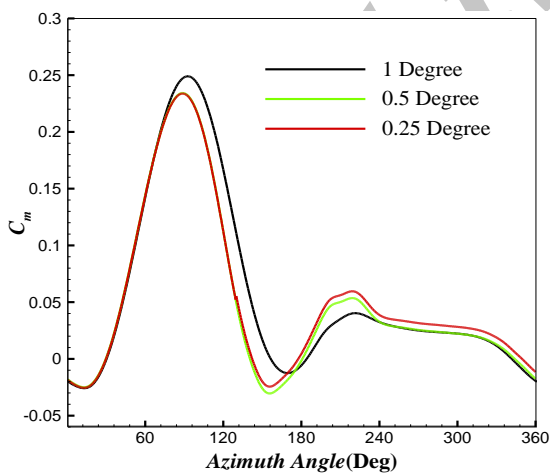
<sup>۳</sup> Stationary State



زمانی متناسب با زوایای چرخش ۰/۵ و ۰/۲۵ درجه به هم نزدیک است؛ بنابراین استفاده از گام زمانی بزرگ‌تر، دقت محاسبات را کاهش نمی‌دهد. به همین دلیل گام زمانی متناسب با چرخش توربین به اندازه ۰/۵ درجه برای کلیه شبیه‌سازی انتخاب می‌شود.

### ۳-۵- اعتبار سنجی و انتخاب مدل آشفتگی

به منظور اعتبارسنجی نتایج، منحنی ضریب عملکرد توربین برحسب نسبت سرعت نوک تهیه شده و با نتایج آزمایشگاهی و عددی ارائه شده توسط کاستلی و همکاران [۲۴] مقایسه شده است. مشخصات توربین مورد بررسی توسط کاستلی در جدول ۱ آورده شده است. دقت مناسب محاسبات برای تحلیل یک توربین باد محور عمود، انتخاب مناسب مدل توربولانس را می‌طلبد. با استفاده از مدل‌های آشفتگی می‌توان عوامل آشفتگی را بدون حل مستقیم تمام نوسانات (که مقیاس کوچکی هم دارند) مدل کرد. شکل ۱۱، پیش‌بینی ضریب توان توربین گام ثابت توسط کد عددی و برای سه مدل آشفتگی اسپالارت آلماراس<sup>۱</sup>، مدل انتقالی<sup>۲</sup> SST و مدل انتقال تنش برشی با مبنای کی-امگا را نشان می‌دهد. از آنجا که در شبکه‌بندی متوسط انتخاب شده مقدار  $\gamma^+$  برای هر سه پره، در طول چرخش



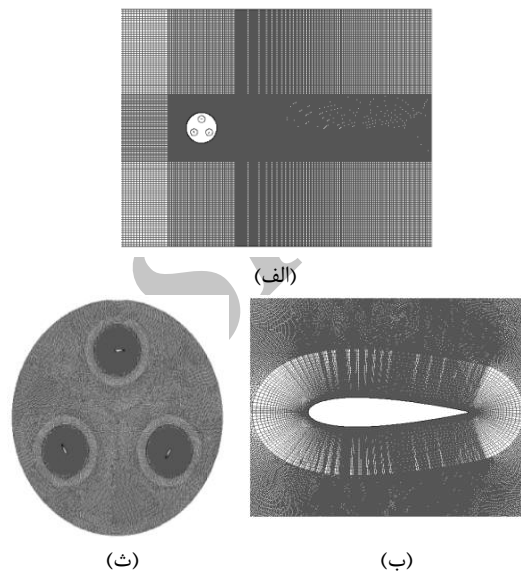
شکل ۱۰- تأثیر اندازه گام زمانی بر دقت حل در سرعت نوک ۲/۵

<sup>۱</sup> SA(Spalart allmaras)

<sup>۲</sup> SST Transition

جدول ۲- شبکه‌بندی مورد استفاده در سرعت نوک ۱/۵ و سرعت باد ۹ متر بر ثانیه

شبکه	تعداد سلول	$\gamma^+$
درشت	۱۵۰۴۶۷	۰/۱۸۸۶۷
متوسط	۴۸۲۹۶۰	۰/۹۵۲۳
ریز	۹۵۱۴۷۱	۰/۶۴۳۱



شکل ۹- الف) شبکه‌بندی دامنه محاسباتی،

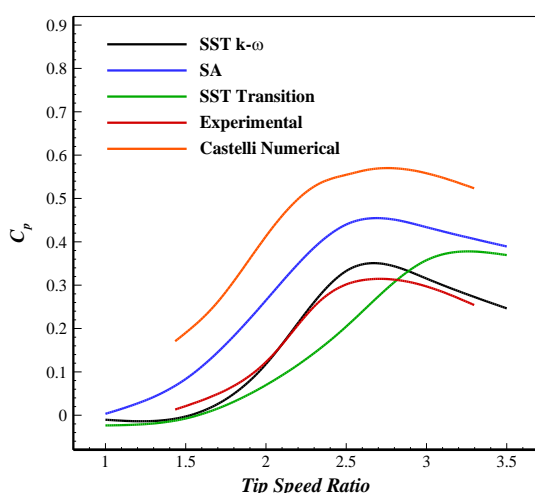
ب) شبکه‌بندی نزدیک پره و ث) شبکه‌بندی دامنه داخلی

### ۲-۵- مطالعه استقلال حل از زمان

برای بررسی اثر گام زمانی روی ضریب گشتاور توربین، مطالعه استقلال از زمان محاسبات در سه گام زمانی متناسب با زمان لازم برای چرخش توربین به اندازه ۰/۲۵ و ۰/۵ و ۱ درجه صورت پذیرفته است. با توجه به دقت و شرایط مورد نیاز در جهت کاهش فرایند محاسباتی، بررسی در یک سرعت میانه انجام شده است. برای مطالعه در این قسمت، از شبکه نوع متوسط با مشخصات گفته شده در جدول ۲ استفاده شده است.

سرعت روتور در این مطالعه برابر ۴۳ رادیان بر ثانیه در نظر گرفته شده که معادل  $\lambda$  برابر ۲/۵ است. نتایج گشتاور تولیدی پره توربین برحسب زاویه چرخش برای گام‌های زمانی مختلف، در شکل ۱۰ آورده شده است. ملاحظه می‌شود که نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها برای گام‌های

دوبعدی کفایت می‌کند [۲۰ و ۱۹]. با این حال یک مدل دوبعدی خوب، می‌تواند یک بینش مناسب برای درک عوامل مؤثر بر عملکرد یک توربین بادی داریوس را ارائه دهد. با توجه به این که هدف، بررسی اثر زاویه گام و پیش‌بینی راه‌اندازی توربین است و اینکه مدل‌های انتقالی نیاز به شبکه بسیار ریز دارند، برای کاهش زمان محاسبات، شبیه‌سازی به صورت دوبعدی انجام شده است.



شکل ۱۱- نمودارهای ضرایب میانگین توان بر حسب سرعت نوک

## ۶- نتایج

### ۶-۱- اثر زاویه‌ی گام متغیر بر روی ضریب گشتاور

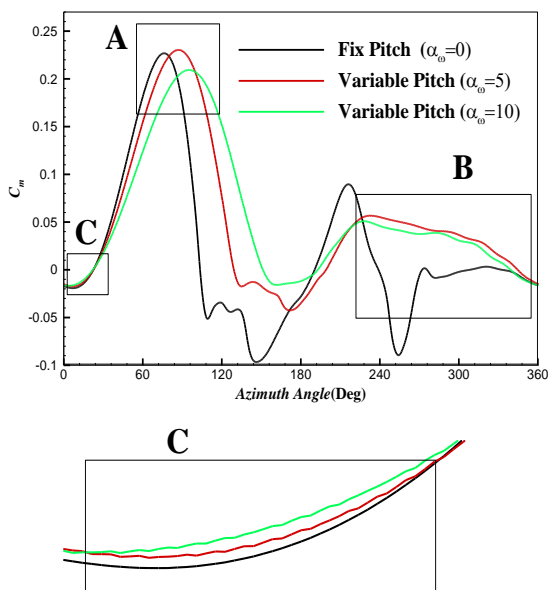
گشتاور تولیدی توربین محور عمودی با پره مستقیم، به وسیله حرکت آبی پره‌های چرخان توربین ایجاد می‌شود که برآیند مؤلفه مماسی برآ و پسا روی ایرفویل است. تولید نیروی سیال روی پره توربین، بستگی به سرعت نسبی جریان هوای ورودی و زاویه حمله دارد که آن هم بسته به زاویه قرارگیری توربین  $\theta$  است. تغییرات ضریب گشتاور  $C_m$  برای یک پره با دامنه‌های مختلف زاویه گام در سرعت نوک ۲ بر حسب زاویه چرخش  $\theta$ ، در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، در نسبت سرعت نوک ۲، بیشینه گشتاور برای توربین گام متغیر با دامنه زاویه گام ۵ درجه و در  $\theta=90^\circ$  درجه تولید شده است. استفاده از توربین با زاویه گام متغیر بر میزان حداکثر

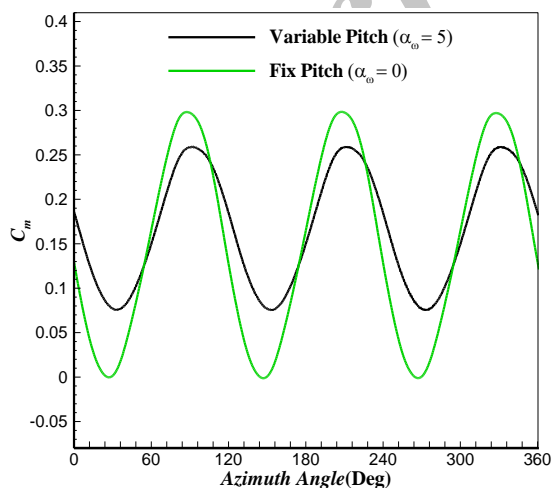
حدود کمتر از ۱ است، از این شبکه برای مقایسه مدل‌های توربولانسی استفاده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، ضریب توان پیش‌بینی شده به وسیله مدل اسپالارت آلماراس، بیشتر از مدل‌های دیگر است و مدل انتقالی SST، شروع جدایش جریان را با تاخیر پیش‌بینی کرده است.

در تصدیق مطالعات وانگ و همکاران [۹] و نوبیل و همکاران [۱۱]، شکل ۱۱ نشان می‌دهد که مدل توربولانسی انتقالی بر مبنای کی - امگا به خوبی توانایی پیش‌بینی رفتار جریان را داراست؛ بنابراین در این بررسی، اثر مقدار زاویه گام روی عملکرد توربین بادی محور عمودی به وسیله این مدل صورت گرفته است. با استفاده از این مدل آشفتگی، نسبت سرعت نوک بهینه به خوبی توسط کد عددی پیش‌بینی شده است. به صورتی که نتایج حاصل از شبیه‌سازی با کمک این مدل آشفتگی، به علت کیفیت شبکه‌بندی خوب و انتخاب مدل آشفتگی مناسب‌تر، بسیار بهتر از نتایج عددی ارائه شده توسط کاستلی و همکاران و نتایج اعتبارسنجی مطالعات محمد و همکاران [۲۵]، نوبیل و همکاران [۲۶] و سان و همکاران [۲۷] که به اعتبارسنجی عددی روی همین توربین پرداخته‌اند، رفتار جریان را پیش‌بینی می‌کند. نمودار توزیع ضریب توان نشان می‌دهد که تفاوت کمی در ضریب توان در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی وجود دارد و حل عددی توانسته که به خوبی ضرایب توان را تخمین بزند. بدیهی است که اعتبارسنجی مطرح شده دقیقاً نمی‌تواند بر اطلاعات آزمایشگاهی منطبق باشد؛ زیرا شبیه‌سازی عددی دوبعدی بوده و به عبارتی ارتفاع توربین نامحدود در نظر گرفته می‌شود. در صورتی که اصل مساله سه‌بعدی بوده، اتلاف انرژی در نوک تیغه‌ها بوجود خواهد آمد. اگرچه شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی طبیعتاً نسبت به شبیه‌سازی دوبعدی از دقت بالاتری برخوردار می‌باشند، ولی معمولاً شبیه‌سازی سه‌بعدی توربین بادی داریوس، از لحاظ محاسباتی زمان‌بر است و استفاده از شبکه‌های درشت نیز، سبب کاهش دقت محاسبات می‌شود. علی‌رغم اینکه در شبیه‌سازی‌های دوبعدی از اثرات دوبعدی و اثرات نوک پره صرف‌نظر می‌شود، اما تحقیقات اخیر نشان داده است که برای پیش‌بینی عملکرد توربین بادی داریوس، شبیه‌سازی

افزایش داده، نهایتاً سبب افزایش بازدهی توربین بادی می‌گردد. نکته دیگری که از نمودار قابل برداشت است، این‌که در هیچ زاویه چرخشی در توربین با زاویه گام متغیر، گشتاور صفر یا منفی تولید نشده است. این در حالی است که در توربین با زاویه گام ثابت به‌طور متوسط در هر ۱۲۰ درجه، یک‌بار گشتاور مجموع صفر شده است.



شکل ۱۲- اثر دامنه زاویه گام بر ضریب گشتاور یک پره دارای زاویه گام متغیر و ثابت در سرعت نوک ۲



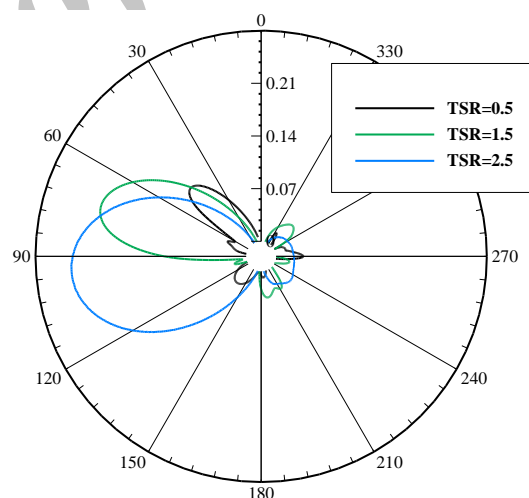
شکل ۱۳- اثر دامنه زاویه گام بر ضریب گشتاور روتور دارای زاویه گام متغیر و ثابت در سرعت نوک ۲/۵

گشتاور تولیدی تأثیر چندانی نداشته، اما با گسترش دامنه مؤثر تولید گشتاور (ناحیه‌ای که حداکثر گشتاور توربین استخراج می‌شود)، میزان گشتاور خروجی توربین را افزایش داده و هرچه دامنه زاویه گام بیشتر می‌شود، ناحیه مؤثر بیشتر گسترش می‌یابد. تغییرات ضریب گشتاور برای یک سیکل چرخش، به دو ناحیه بالادست و پایین‌دست تقسیم می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اکثر گشتاور و در نتیجه توان توربین در نیمه بالادست توربین تولید می‌شود و از ناحیه B شکل می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از مکانیزم زاویه گام متغیر سبب شده برخلاف توربین با زاویه گام صفر، توربین توانایی بیشتری در تولید توان در نیمه پایین‌دست جریان را داشته باشد.

در توربین با زاویه گام ثابت صفر درجه، در زوایای چرخش ۰ تا ۳۰ درجه و ۱۹۰ تا ۲۴۰ درجه گشتاور منفی ایجاد می‌شود و حداکثر گشتاور مثبت در زاویه چرخش ۸۰ درجه اتفاق می‌افتد. ناحیه A در شکل ۱۲، نمایان‌گر این است که برای توربین با زاویه گام متغیر با دامنه ۵ و ۱۰، حداکثر گشتاور تولیدی به ترتیب در زاویه چرخش ۹۰ و ۱۰۵ درجه اتفاق می‌افتد که اندکی نسبت به توربین با زاویه گام ثابت، تولید حداکثر توان به تأخیر افتاده است. تفاوت در زاویه چرخش که حداکثر گشتاور تولیدی پره در آن اتفاق می‌افتد، به دلیل تفاوت در زاویه چرخشی است که در آن زاویه حمله بهینه (زاویه‌ای که حداکثر ضریب برآ تولید می‌شود) اتفاق می‌افتد. در این بررسی برای ایرفویل ناکا ۰۰۲۱، زاویه حمله بهینه در عدد رینولدز ۳۰۰۰۰ حدود ۱۶ درجه است؛ بنابراین در توربین گام ثابت، این زاویه حمله بهینه در زاویه چرخش ۸۰ و برای توربین با زاویه گام متغیر با دامنه‌های ۵ و ۱۰ در زوایای ۹۰ و ۱۰۵ درجه اتفاق می‌افتد. شکل ۱۳، نمایان‌گر مجموع ضرایب گشتاور سه پره توربین برای دو زاویه گام ثابت با دامنه صفر و زاویه گام متغیر با دامنه ۵ درجه در سرعت نوک ۲/۵ برحسب زاویه چرخش توربین است. همان‌طور که از مقایسه دو نمودار شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، میزان نوسانات گشتاور تولیدی در زاویه گام متغیر، کمتر از توربین با زاویه گام ثابت است؛ بنابراین استفاده از سیستم گام متغیر پیشنهاد شده، سبب کاهش تنش‌های دینامیکی روی پره شده و چرخه عمر توربین و اجزای مکانیکی آن را

## ۶-۲- اثر سرعت نوک روی ضریب گشتاور

شکل ۱۴ اثر سرعت نوک روی ضریب گشتاور، برای یک سیکل توربین با زاویه گام متغیر با دامنه ۵ را نمایش می‌دهد. در این شکل، تغییرات ضریب گشتاور یک پره، در سه سرعت نوک ۰/۵ و ۱/۵ و ۲/۵ نشان داده شده است. همانطور که از شکل مشاهده می‌شود، برای سرعت نوک ۰/۵ بیشینه ضریب گشتاور در زاویه چرخش ۵۰ درجه اتفاق افتاده است. زاویه چرخشی که حداکثر ضریب گشتاور در آن اتفاق می‌افتد با تغییر اندازه سرعت نوک تغییر می‌کند و هرچه سرعت نوک بیشتر گردد با گسترش دامنه مؤثر توربین، بیشینه گشتاور در زوایای چرخش بالاتر اتفاق می‌افتد. افزایش زاویه چرخش مربوط به بیشینه ضریب گشتاور، مربوط به زاویه حمله بهینه پره است؛ همچنین افزایش سرعت نوک، سبب تأخیر در واماندگی دینامیکی پره شده، هرچه سرعت نوک بیشتر می‌شود، میزان دریافت انرژی از بالادست جریان افزایش می‌یابد.



شکل ۱۴- اثر سرعت نوک بر روی ضریب گشتاور پره با زاویه گام متغیر با دامنه ۵ درجه

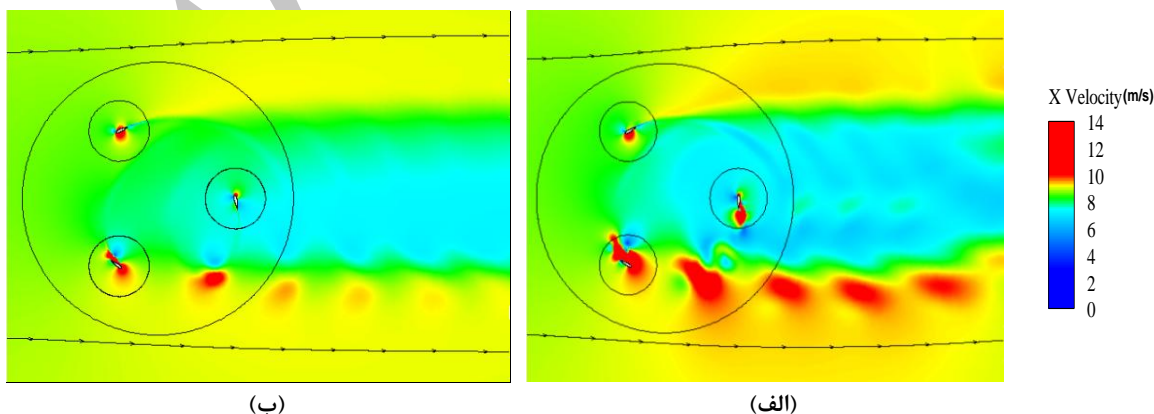
## ۶-۳- بررسی شرایط جریان حول توربین

میزان توان خروجی از هر پره توربین بادی محور عمودی، شدیداً به شرایط مؤثر بر جریان حول پره‌های چرخان وابسته است. این شرایط مؤثر شامل، سرعت و زاویه حمله حول پره است. وقتی به دنبال روش‌هایی برای بهبود بازدهی توربین با استفاده از تغییر زاویه گام پره باشیم، فهم

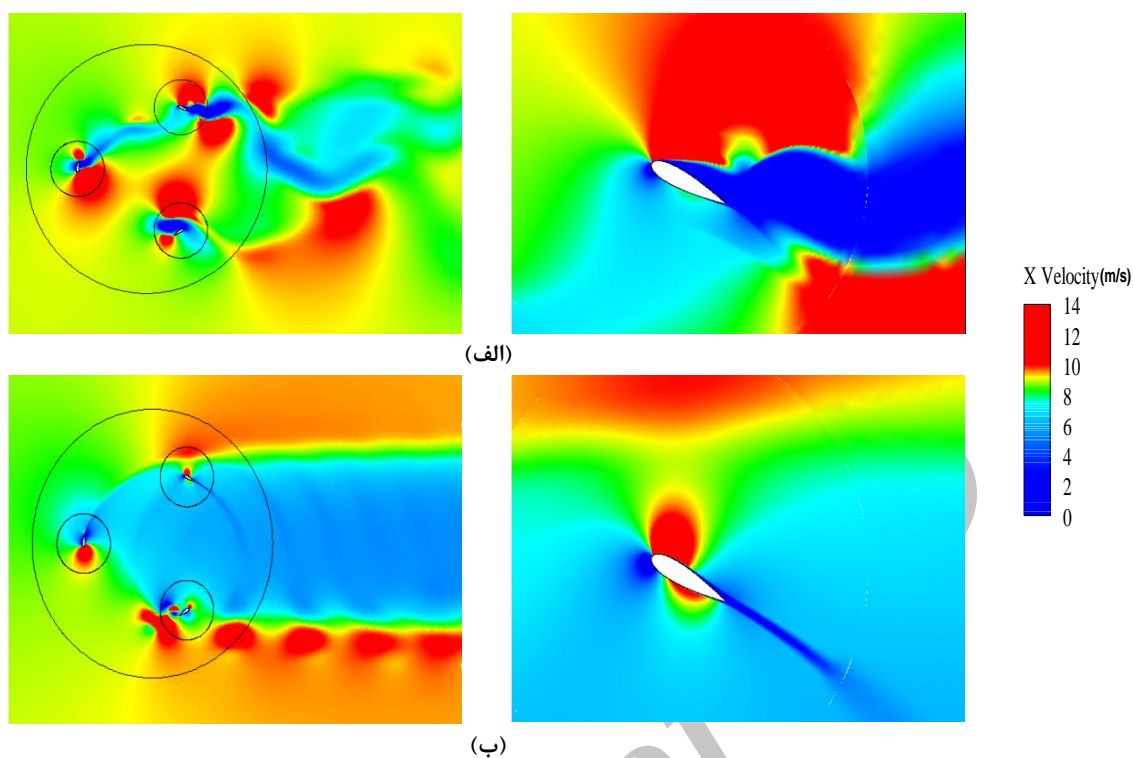
خوب از جریان رخ داده حول هر پره مهم و اساسی است. از این رو در این قسمت به بررسی رفتار جریان حول روتور پرداخته و ارتباط این رفتار با نمودارهای توان و گشتاور نشان داده شده در قسمت‌های قبلی را بررسی می‌کنیم. عبور جریان از روتور توربین همراه با شکل‌گیری دو ناحیه حول روتور است. در ناحیه اول (ناحیه بالادست)، بیشترین انرژی توربین استخراج می‌شود و سبب می‌شود تا انرژی جنبشی و سرعت در ناحیه دوم (جریان پایین‌دست) توربین کاهش می‌یابد [۲۸]. شکل ۱۵، کانتورهای سرعت حول روتور توربین برای زاویه گام ثابت و زاویه گام متغیر با دامنه ۵ درجه در  $\lambda=2$  را نمایش می‌دهد. همان‌طور که از شکل‌ها مشاهده می‌شود، کاهش سرعت در هردو روتور یکسان نبوده و در روتور دارای پره با زاویه گام متغیر، ناحیه کم‌سرعت ایجاد شده پشت توربین، منطقه بیشتری را پوشش می‌دهد. با توجه به بیشتر بودن توان تولیدی توسط روتور با پره‌های گام متغیر با دامنه ۵ درجه نسبت به توربین با زاویه گام ثابت که در شکل ۲۳ نمایش داده خواهد شد، می‌توان نتیجه گرفت که کاهش مقدار سرعت جریان حول روتور، در حالت‌هایی بیشتر است که روتور انرژی بیشتری تولید می‌کند، به این معنی وقتی پره دچار واماندگی می‌شود، کاهش مقدار سرعت قابل‌توجهی در پایین‌دست ملاحظه نمی‌شود. در حالت کلی، اگر پره به‌وسیله زاویه گام متغیر نوسان کند، زاویه حمله کاهش می‌یابد و واماندگی کم می‌شود، در این حالت توربین در مرحله اول بیشتر انرژی تولید می‌کند و نهایتاً یک ناحیه کم‌سرعت به‌اندازه روتور توربین می‌سازد. شکل‌ها همچنین نشان می‌دهد که کانال جریان عبوری از بالادست به پایین‌دست توربین به‌تدریج گسترش می‌یابد. این عمل سبب ایجاد جریان معکوس در توربین شده که نهایتاً سبب ایجاد تأثیر روی زاویه حمله حتی در قسمت بالادست توربین می‌شود. شکل ۱۶، حوزه سرعت برای توربین گام متغیر با دامنه ۵ و برای سرعت‌های نوک ۰/۵ و ۲/۵ در زاویه چرخش ۳۳۰ درجه را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل بزرگنمایی شده پره مشاهده می‌شود، گردابه‌های جدا شده از پره برای  $\lambda=0.5$  در مقایسه با سرعت‌های نوک  $\lambda=2.5$  بیشتر بوده، اثر بیشتری در قسمت پایین‌دست روی پره می‌گذارد. به همین دلیل همان‌طور که در شکل ۱۵

نشان داده شد، در نسبت‌های سرعت نوک پایین  $\lambda=0.5$  در قسمت پایین دست گشتاوری تولید نشده است. نوبیل [۱۱] در سال ۲۰۱۱ تأیید کرد که گردابه‌های ایجادشده در توربین محور عمودی در قسمت بالادست، در ناحیه پایین دست توسعه می‌یابد و با پره‌های توربین در پایین دست، یک تداخل گسترده روی می‌گردد و سبب کاهش توان تولیدی پره می‌شود. شکل ۱۷، حوزه ضریب فشار برای سرعت‌های نوک ۰/۵ و ۲/۵ و برای زوایای چرخش ۹۰ و ۲۱۰ و ۳۳۰ درجه برای توربین گام متغیر با دامنه ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل‌ها نشان داده شده است، در زاویه چرخش ۹۰ درجه، تفاوت ضریب فشار بین مناطق کم فشار و پرفشار پره برای سرعت نوک ۲/۵، بیشتر از سرعت نوک ۰/۵ است. بیشتر بودن اختلاف فشار حول پره، سبب تولید نیروی برای بیشتر و در نهایت گشتاور تولیدی بیشتر شده که در سرعت نوک پره ۲/۵ نسبت به سرعت نوک ۰.۵ مشاهده شده است؛ بنابراین دلیل بیشتر بودن گشتاور تولیدی در سرعت نوک ۲/۵، نسبت به سرعت نوک ۰/۵ که در نمودار ۱۴ نشان داده شده است، بدین روش اثبات می‌شود. در شکل ۱۸، حوزه ضریب فشار حول پره در سرعت نوک ۲ و ۱۸، دامنه‌های گام ۰ و ۱۰ در زوایای چرخش ۱۵ و ۱۳۵ و ۲۵۵ درجه نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تفاوت ضریب فشار بین مناطق کم و پرفشار حول پره، در زاویه چرخش ۱۵ درجه برای توربین با زاویه گام متغیر، بیشتر از اختلاف فشار حول پره با زاویه گام صفر

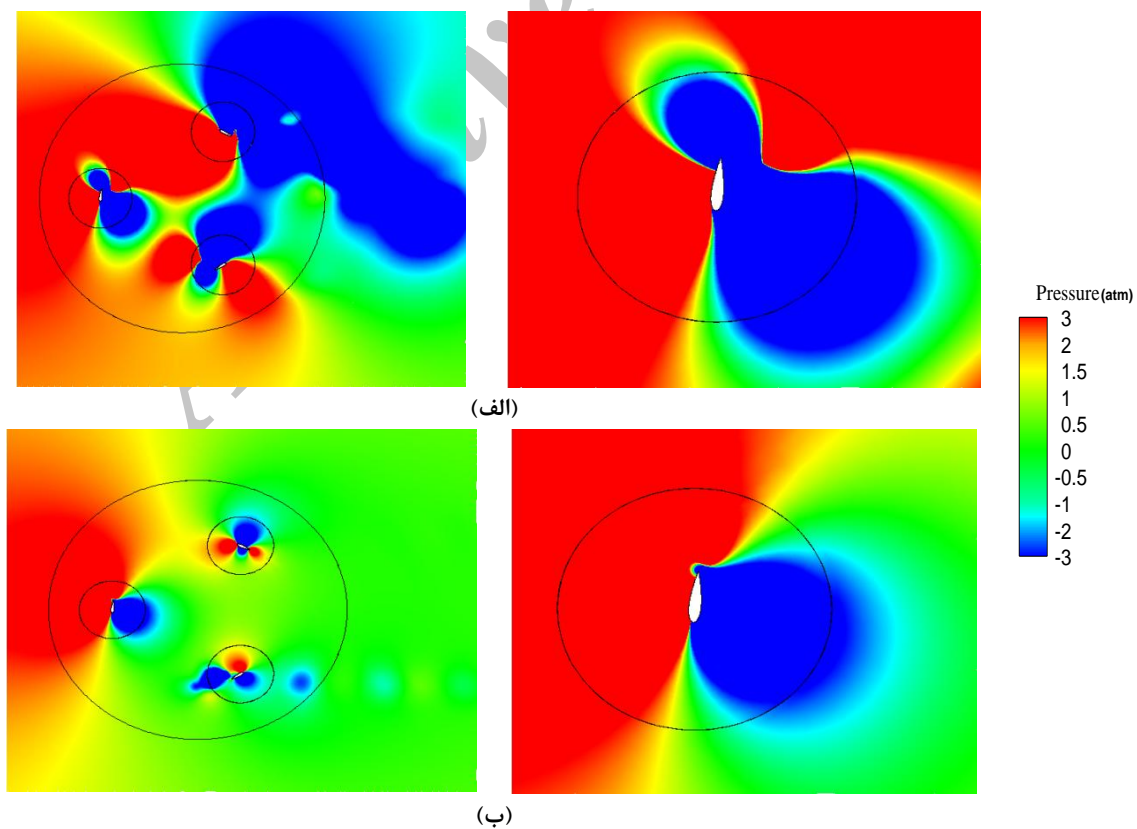
است؛ بنابراین همان‌طور که شکل ۱۲ ناحیه C نشان داده شده، گشتاور راه‌انداز پره با زاویه گام متغیر نسبت به حالت گام ثابت افزایش یافته و با این روش می‌توان یکی از بزرگ‌ترین مشکلات توربین‌های بادی محور عمودی یعنی راه‌اندازی اولیه توربین را حل نمود. در شکل ۱۹، کانتور فشار در سرتاسر دامنه حلی به ترتیب برای توربین با دامنه گام ثابت و متغیر نشان داده شده است. مقایسه این دو شکل نشان می‌دهد که ناحیه کم فشار پشت روتور که به ناحیه و یک مشهور است، برای توربین گام متغیر در مقایسه با توربین گام ثابت، به طور قابل ملاحظه‌ای کمتر است. شکل‌های ۲۰ و ۲۱ به ترتیب، نمایانگر کانتورهای گردابه حول پره برای توربین با زاویه گام ثابت و متغیر با دامنه ۵، در زوایای چرخش ۶۰ و ۱۸۰ و ۳۰۰ درجه و در سرعت‌های نوک ۰/۵ و ۲ است. در سرعت‌های نوک پایین ۰/۵ و ۲ روی پره‌های توربین با زاویه گام ثابت گردابه‌هایی مشاهده می‌شود. تفاوت بین وجود و عدم وجود گردابه روی پره‌های توربین با گام زاویه‌ای ثابت و متغیر در سرعت‌های نوک یکسان به دلیل بزرگی و افزایش نرخ زاویه حمله پره است. همان‌طور که در شکل ۲۱ مشاهده می‌شود، مکانیزم زاویه گام متغیر این توانایی را دارد که تشکیل گردابه روی حول پره‌ها را از بین ببرد؛ بنابراین یک توربین محور عمودی با پره مستقیم دارای زاویه گام متغیر می‌تواند در سرعت‌های نوک پایین، جدایش جریان حول لبه فرار و حمله را سرکوب کند و سبب افزایش توان خروجی توربین شود.



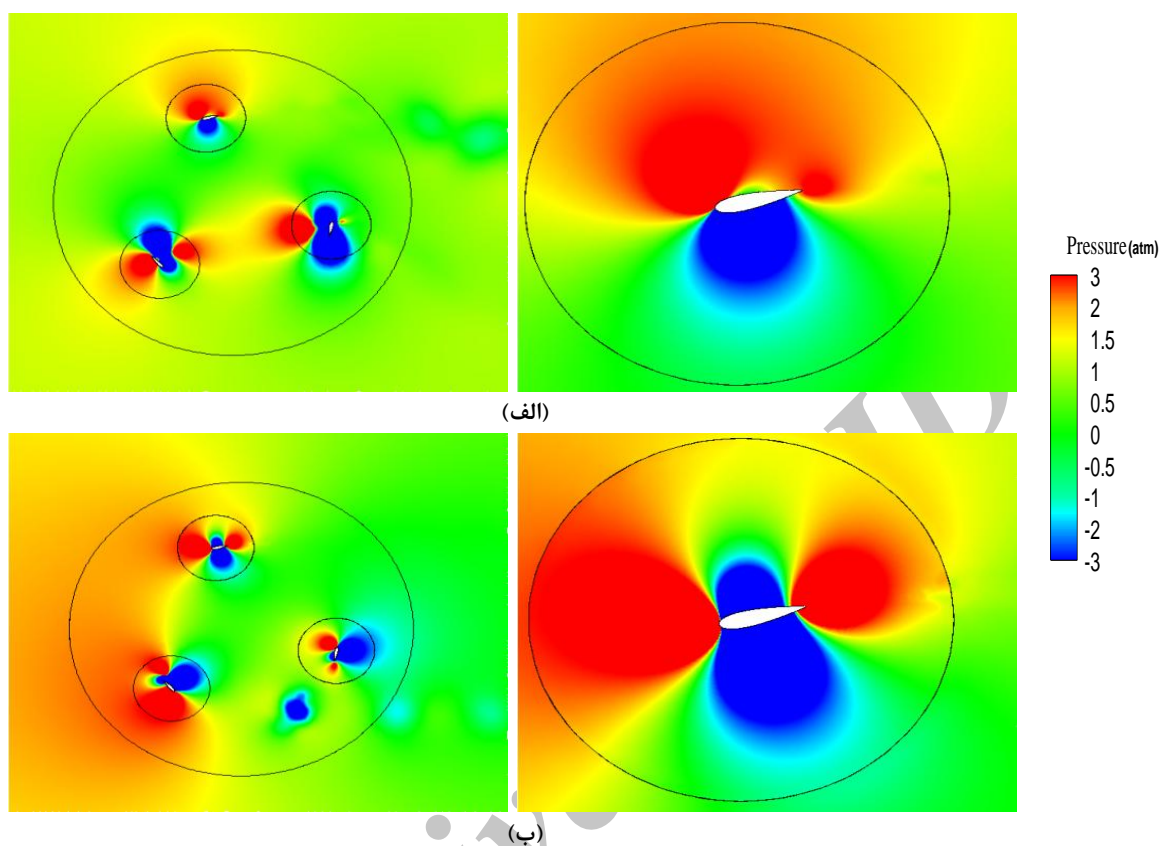
شکل ۱۵- سرعت حول روتور در سرعت نوک ۲ حول روتور برای (الف) پره با دامنه  $\alpha_0=5$  و (ب) پره با دامنه  $\alpha_0=0$



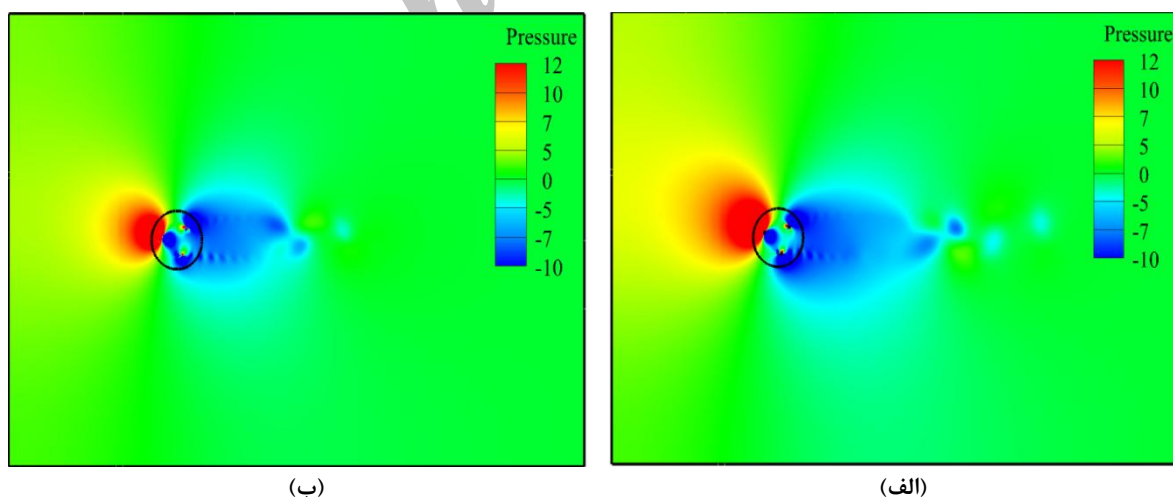
شکل ۱۶- سرعت حول پره در زاویه چرخش ۳۳۰ درجه حول پره با دامنه گام ۵ درجه در الف) سرعت نوک ۰/۵ و ب) سرعت نوک ۲/۵



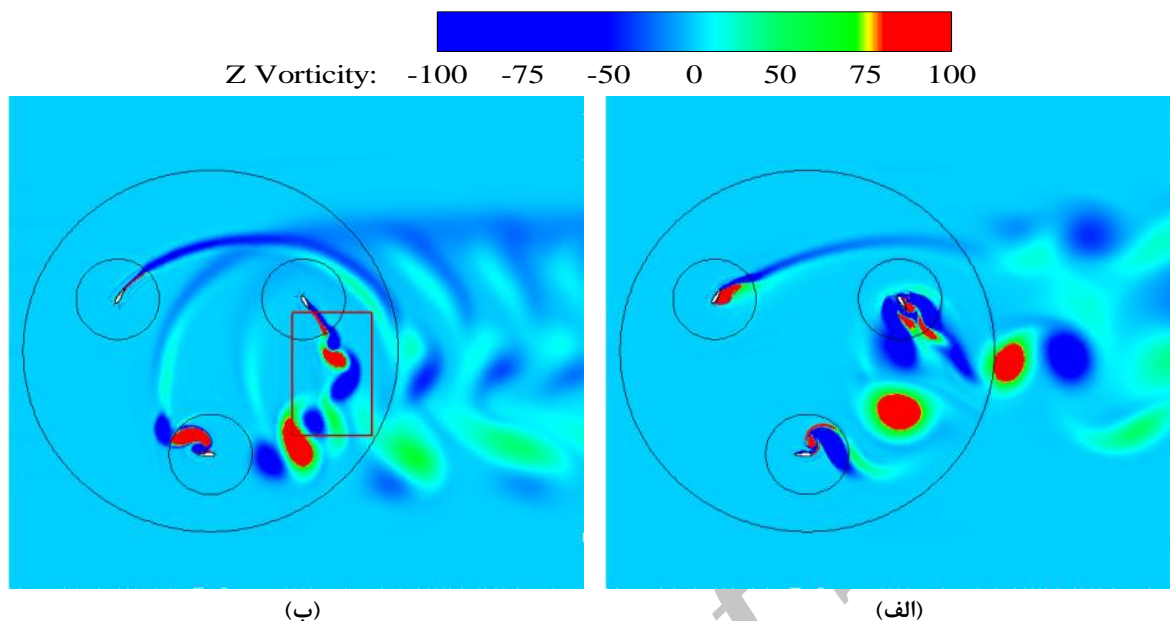
شکل ۱۷- فشار حول پره در زاویه چرخش ۹۰ درجه حول پره با دامنه گام ۵ درجه در الف) سرعت نوک ۰/۵ و ب) سرعت نوک ۲/۵



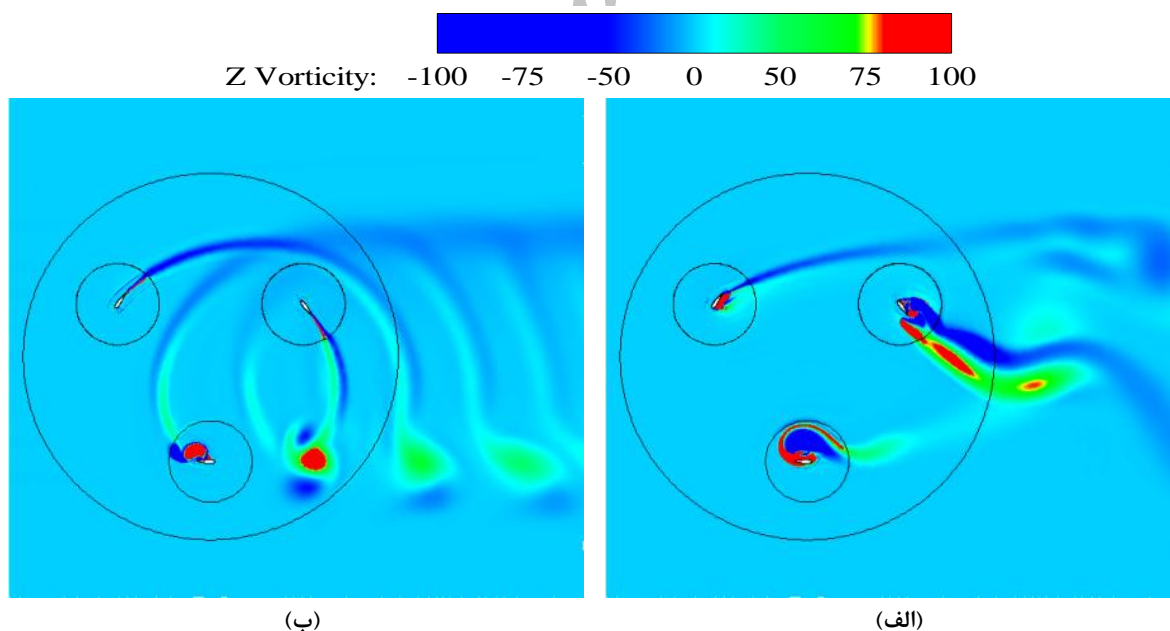
شکل ۱۸- فشار حول پره در زاویه چرخش ۱۵ درجه در سرعت نوک ۲ حول پره با الف) دامنه  $\alpha_w = 10^\circ$  و ب) دامنه  $\alpha_w = 0^\circ$



شکل ۱۹- کانتور فشار در سرتاسر دامنه حل در نسبت سرعت نوک ۲/۵ الف) گام ثابت و ب) گام متغیر



شکل ۲۰- کانتورهای گردابه حول توربین بادی محور عمودی با زاویه گام ثابت و دامنه ۰ در (الف) سرعت نوک ۰/۵ و (ب) سرعت نوک ۲



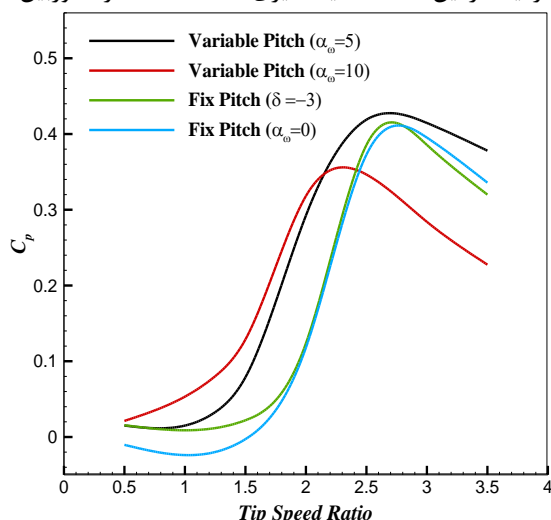
شکل ۲۱- کانتورهای گردابه حول توربین بادی محور عمودی با زاویه گام متغیر و دامنه ۵ در (الف) سرعت نوک ۰/۵ و (ب) سرعت نوک ۲

۴-۶- اثر زاویه گام روی توان خروجی توربین

تاکنون مطالعاتی صورت گرفته و نشان داده شده است که حداقل برای توربین‌های با صلبیت بالا، تغییر زاویه گام از



اثر زاویه گام متغیر، سرعت نوک و مدل آشفته‌گی روی عملکرد یک توربین محور عمودی به‌وسیله شبیه‌سازی عددی دوبعدی و به وسیله تکنیک شبکه‌بندی متحرک بررسی گردید. در این مطالعه، نتیجه‌گیری شد که عملکرد توربین



شکل ۲۲- اثر دامنه زاویه گام روی ضریب توان

محور عمودی تحت تأثیر بزرگی و نرخ افزایش زاویه حمله است و در سرعت‌های نوک پایین به دلیل جدایش جریان حول پره و واماندگی، توربین گام ثابت توانایی تولید گشتاور راه‌انداز پایینی دارد، اما توربین دارای گام متغیر با کاهش زاویه حمله در طول یک دور چرخش پره، واماندگی دینامیکی را ملایم و یا حذف می‌سازد و توان را بهبود می‌بخشد. همچنین با مقایسه منحنی عملکرد توربین در سرعت‌های نوک بین ۱ تا ۳/۵ نتیجه‌گیری شد که توربین مجهز به زاویه گام متغیر با دامنه ۵ درجه در همه سرعت‌های نوک نسبت به توربین با زاویه گام صفر، توان بیشتری تولید می‌کند. افزایش دامنه گام متغیر به ۱۰ درجه هرچند توان تولیدی در سرعت‌های نوک پایین را افزایش می‌دهد، اما در سرعت‌های نوک بالاتر، توان سریع افت می‌کند و دامنه عملکرد توربین کاهش می‌یابد. با مقایسه منحنی‌های گشتاور پره مشاهده شد که زاویه گام متغیر میزان توان خروجی از بالادست پره را افزایش می‌دهد و هرچه دامنه زاویه گام متغیر بیشتر می‌شود، توان بیشتری از بالادست پره استخراج می‌شود. استفاده از سیستم گام متغیر پیشنهاد شده، سبب کاهش قابل توجه در نوسانات زاویه حمله سبب کاهش

صفر درجه به مقدار کمی به سمت ساعت‌گرد، باعث افزایش بازدهی توربین می‌شود [۲۸،۸]. این تنظیم گام، اثرات مثبتی روی عملکرد توربین داریوس می‌گذارد؛ زیرا در بالادست، به علت سرعت بالای جریان آزاد، زاویه حمله بالا بوده و در پایین دست به دلیل کاهش سرعت، زاویه حمله خیلی پایین و یا حتی دارای مقادیر منفی است؛ بنابراین تنظیم زاویه گام به صورت گفته‌شده سبب کاهش واماندگی و افزایش توان توربین می‌گردد. در این مطالعه برای بررسی عملکرد توربین با زاویه گام متغیر، با یک حالت با زاویه گام ثابت ۳- درجه مقایسه شده است. شکل ۲۲، نشان دهنده اثرات دامنه زاویه گام بر توان خروجی توربین داریوس است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ضریب توان توربین گام متغیر با حداکثر دامنه ۵ درجه در همه سرعت‌های نوک، بیشتر از ضریب توان در زوایای گام ثابت است؛ همچنین حداکثر ضریب توان توربین گام متغیر با دامنه ۵ درجه و توربین با زاویه گام ثابت ۳-، در سرعت‌های نوک بالاتری در مقایسه با توربین بادی با زاویه گام متغیر با حداکثر دامنه ۱۰ درجه رخ می‌دهد. اگرچه توانایی توربین برای تولید توان در زاویه گام ۳- درجه در سرعت‌های نوک پایین بهبود می‌یابد، اما در عملکرد توربین در سرعت‌های نوک بالا تغییر قابل توجهی ایجاد نکرده است و تأثیر آن بر عملکرد توربین در مقایسه با توربین با زاویه گام متغیر با دامنه ۵ درجه، قابل توجه نمی‌باشد. در سرعت‌های نوک پایین (کمتر از ۲)، مقدار ضریب توان برای یک توربین با دامنه حرکتی بالا (دامنه ۱۰ درجه)، کمی بیش‌تر از همان توربین با دامنه زاویه گام پایین‌تر (دامنه ۵ درجه) است، ولی در این سرعت‌های نوک، ضریب توان توربین‌های دارای زاویه گام متغیر بیشتر از توربین با زاویه گام ثابت است؛ بنابراین راه‌اندازی اولیه توربین با استفاده از مکانیزم گام متغیر بهبود یافته است. در سرعت‌های نوک بیشتر از ۲، ضریب توان توربین با دامنه ۱۰ درجه در مقایسه با دامنه‌های دیگر با شیب بیشتری افت می‌کند، به طوری که در این سرعت‌های نوک، توربین در زوایای گام ثابت و متغیر با دامنه ۵ درجه، توان بیشتری در مقایسه با توربین با دارای زاویه گام ۱۰ درجه تولید می‌کند.

## ۷- نتیجه‌گیری

- Mechanical Engineers, Part A: J Pow Energ 221(1): 111-120.
- [11] Nobile R, Vahdati M, Barlow J, Mewburn-Crook A (2011) Dynamic stall for a vertical axis wind turbine in a two-dimensional study. World Renew Energ Congr 4225-4232.
- [12] Qin N, Howell R, Durrani N, Hamada K, Smith T (2011) Unsteady flow simulation and dynamic stall behaviour of vertical axis wind turbine blades. Wind Eng 35(4): 511-528.
- [13] Howell R, Qin N, Edwards J, Durrani N (2010) Wind tunnel and numerical study of a small vertical axis wind turbine. Renew Energ 35(2): 412-422.
- [14] Hill N, Dominy R, Ingram G, Dominy J (2009) Darrieus turbines: the physics of self-starting. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: J Pow Energ 223(1): 21-29.
- [15] Islam M, Ting DS, Fartaj A (2007) Desirable airfoil features for smaller-capacity straight-bladed VAWT. Wind Eng 31(3): 165-196.
- [16] Kirke BK (1998) Evaluation of self-starting vertical axis wind turbines for stand-alone applications (Doc diss, GRIFFITH UNIVERSITY GOLD COAST).
- [17] Tao WYYCZ (2006) Numerical investigation of dynamic stall vortex movement of different-thickness airfoils. J Beij Un Aero Astron 2, 006.
- [18] Beri H, Yao Y (2011) Effect of camber airfoil on self starting of vertical axis wind turbine. J Environ Sci Technol 4(3): 302-312.
- [19] Paraschivoiu I (2002) Wind turbine design: with emphasis on Darrieus concept. Presses inter Polytechnique.
- [20] Amet E, MaÅžtre T, Pellone C, Achard JL (2009) 2D numerical simulations of blade-vortex interaction in a darrieus turbine. J fluids Eng 131(11): 103-113.
- [21] Dyachuk E, Rossande M, Goude A, Bernhoff H (2015) Measurements of the aerodynamic normal forces on a 12-kW straight-bladed vertical axis wind turbine. Energ 8(8): 8482-8496.
- [22] Bos R (2012) Self-starting of a small urban Darrieus rotor. Delft University of Technology.
- [23] Xisto CM, Páscoa JC, Leger JA, Trancossi M (2014) Wind energy production using an optimized variable pitch vertical axis rotor. ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress and Exposition 1: V001T01A007-V001T01A007.
- [24] Castelli MR, Englaro A, Benini E (2011) The Darrieus wind turbine: Proposal for a new performance prediction model based on CFD. Energ 36(8): 4919-4934.
- تنش‌های دینامیکی روی پره شده و چرخه عمر آن را افزایش می‌دهد. در نهایت با بررسی شکل‌های حوزه سرعت و فشار و گردابه حول پره حول توربین با زاویه گام ثابت و متغیر مشاهده شد که مکانیزم زاویه گام متغیر این توانایی را دارد که تشکیل گردابه روی حول پره‌ها را از بین ببرد و واماندگی را کاهش داده و سبب افزایش توان تولیدی توربین گردد.

## ۸- منابع

- [1] Paraschivoiu I, Trifu O, Saeed F (2009) H-Darrieus wind turbine with blade pitch control. Int J Rot Mach 2009:1-7.
- [2] Kiwata T, Yamada T, Kita T, Takata S, Komatsu N, Kimura S (2010) Performance of a vertical axis wind turbine with variable-pitch straight blades utilizing a linkage mechanism. J Environment Eng 5(1): 213-225.
- [3] ArabGolarche A, Moghiman M, Javadi MalAbad SM (2015) Numerical simulation of Darrieus wind turbine using interaction. Modarres Mech Eng 15(12): 143-152. (in Persian)
- [4] Firdaus R, Kiwata T, Kono T, Nagao K (2015) Numerical and experimental studies of a small vertical-axis wind turbine with variable-pitch straight blades. J Fluid Sci Tech 10(1): 11-21.
- [5] Zhang LX, Liang YB, Liu XH, Guo J (2014) Effect of blade pitch angle on aerodynamic performance of straight-bladed vertical axis wind turbine. J Central South University 21: 1417-1427.
- [6] Bhutta MMA, Hayat N, Farooq AU, Ali Z, Jamil SR, Hussain Z (2012) Vertical axis wind turbine—A review of various configurations and design techniques. Renew Sust Energ Rev 16(4): 1926-1939.
- [7] Elkhoury M, Kiwata T, Aoun E (2015) Experimental and numerical investigation of a three-dimensional vertical-axis wind turbine with variable-pitch. J Wind Eng Ind Aerodyn 139: 111-123.
- [8] ArabGolarche A, Moghiman M, Javadi MalAbad SM (2015) Investigation of effective parameters on darrieus wind turbine efficiency with aerodynamics models. Modarres Mech Eng 15(5): 295-301. (in Persian)
- [9] Wang S, Ingham DB, Ma L, Pourkashanian M, Tao Z (2010) Numerical investigations on dynamic stall of low Reynolds number flow around oscillating airfoils. Comput Fluids 39(9): 1529-1541.
- [10] Dominy R, Lunt P, Bickerdyke A, Dominy J (2007) Self-starting capability of a Darrieus turbine. Proceedings of the Institution of

- characteristic of vortex structures for Darrieus wind turbine. I. Numerical method and aerodynamic performance. *J Renew Sus Energ* 6(4): 043134.
- [28] Armstrong S, Fiedler A, Tullis S (2012) Flow separation on a high Reynolds number, high solidity vertical axis wind turbine with straight and canted blades and canted blades with fences. *Renew Energ* 41: 13-22.
- [25] Mohamed MH, Ali AM, Hafiz AA (2015) CFD analysis for H-rotor Darrieus turbine as a low speed wind energy converter. *Eng Sci Tech* 18(1): 1-13.
- [26] Nobile R, Vahdati M, Barlow JF, Mewburn-Crook A (2014) Unsteady flow simulation of a vertical axis augmented wind turbine: a two-dimensional study. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 125: 168-179.
- [27] Sun X, Wang Y, An Q, Cao Y, Wu G, Huang D (2014) Aerodynamic performance and

Archive of SID