

بررسی عددی تاثیر زاویه گام‌های ثابت و متغیر پره بر واماندگی دینامیکی جریان حول پره توربین بادی داریوس

امیر ساغری چی^۱، محمدجواد مغربی^۲ و علیرضا عرب گلارچه^۳

دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه فردوسی مشهد

(تاریخ دریافت: ۹۵/۵/۱۲؛ تاریخ پذیرش: ۹۵/۹/۲۰)

چکیده

توربین داریوس توربین بادی محور عمودی بر پایه نیروی برآ است که 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 دینامیکی، در اساس این توربین‌ها با مشکل خود راه‌اندازی مواجه بوده و بازدهی کم‌تری نسبت به توربین‌های بادی محور افقی دارند. در این مقاله، اثرات زاویه گام پره بر کاهش واماندگی دینامیکی این توربین بادی داریوس بررسی شده و یک سامانه تنظیم زاویه گام (با زاویه گام متغیر پره) پیشنهاد شده که می‌تواند دامنه و نرخ افزایش زاویه حمله در یک دور چرخش توربین را در مقایسه با توربین با زاویه گام ثابت تغییر داده و اثرات منفی واماندگی دینامیکی را از بین ببرد. در این مطالعه، شبیه‌سازی‌ها به صورت غیردائمی و دوبعدی و با استفاده از CFD انجام شده و برای چرخش روتور توربین از روش شبکه‌بندی متحرک استفاده شده است. با مقایسه پره‌هایی با زوایای گام ثابت مختلف ($\pm 3^\circ$ و $\pm 6^\circ$ و $\pm 9^\circ$ و $\pm 12^\circ$) نتیجه‌گیری شد که تنظیم گام در زاویه 3° - سبب به تأخیر افتادن جدایش جریان و کاهش واماندگی دینامیکی می‌شود. همچنین، مشاهده شد که یک توربین داریوس مجهز به زاویه گام متغیر می‌تواند در سرعت‌های نوک کم جدایش جریان را روی پره‌ها از بین ببرد و با به تأخیر انداختن یا حذف واماندگی دینامیکی، سبب افزایش بازدهی در طی تمامی سرعت‌های کاری توربین (در مقایسه با توربین با زاویه گام ثابت) شود.

واژه‌های کلیدی: توربین بادی داریوس، زاویه گام متغیر، جدایش جریان، ضریب توان

Numerical Investigation of the Effect of Fixed and Variable Pitch Angle Blade on Dynamic Stall of Flow Field Around Darrieus Wind Turbine Blade

A. Sagharichi, M.J. Maghrebi, and A. ArabGolarcheh

Mechanical Engineering Department

Ferdowsi University of Mashhad

(Received: 2/August/2016; Accepted: 10/December/2016)

ABSTRACT

The Darrieus lift-based VAWT has been studied by many scientists due to its simplicity of design and the wind direction independency. Due to increasing angle of attack and dynamic stall at low tip speed ratios, these wind turbines have the inherent problem of self-starting inability and produce less power's compared to that of horizontal axis wind turbines. In this study, the effects of variable blade pitch angle mechanism on decreasing dynamic stall have been investigated. Finally, a pitching system (variable pitch Darrieus-type wind turbine) has been proposed, which can reduce both the blades, oscillating motion and the magnitude of the angle of attack in one revolution, compared to that of conventional VAWT. In this study, unsteady two-dimensional simulation is conducted, using CFD with moving mesh the rotating rotor. Simulation of different preset pitch angles of $\pm 3^\circ$ and $\pm 6^\circ$, $\pm 9^\circ$ and $\pm 12^\circ$, it is concluded that adjustment of pitch angle about -3° , causes a delay in flow separation and control dynamic stall. It was also observed that a variable-pitch blade turbine can suppress flow separation on its blades at low tip speed ratios. This leads to delay or elimination of dynamic stall and results in a higher efficiency during the range of turbine operation compared to that of fixed-pitch blade Darrieus turbines.

Keywords: Darrieus Wind Turbine, Variable Pitch, Flow Separation, Power Coefficient

۱- کارشناس ارشد: amirsagharichi@yahoo.com

۲- استاد (نویسنده پاسخگو): mjmaghrebi@um.ac.ir

۳- کارشناس ارشد: alireza.arab@hotmail.com

۱- مقدمه

عمودی (H-Rotor) عموماً از مقطع‌های متقارن استفاده می‌شود که از لحاظ هزینه ساخت کم هزینه می‌باشند. با این وجود، این توربین‌ها فقط قادرند تا مقدار محدودی انرژی باد را به انرژی الکتریسیته تبدیل کنند. به منظور استفاده تمام و کمال از منابع انرژی باد نیاز به فناوری جدیدی می‌باشد تا توربین‌های بادی محور عمودی بتوانند بازدهی برابر یا نزدیک به توربین‌های بادی محور افقی داشته باشند. راه کار پیشنهادی برای این هدف استفاده از توربین‌هایی متشکل از پره‌هایی با زاویه گام متغیر^۵ می‌باشد [۲].

۱-۲- آبرودینامیک توربین بادی محور عمودی

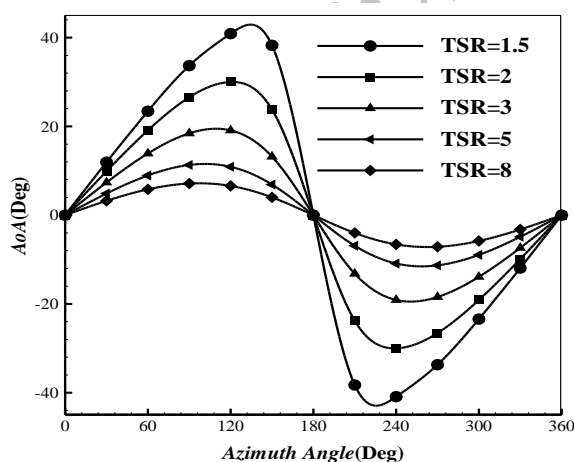
یکی از بزرگ‌ترین چالش‌ها و ویژگی‌های توربین‌های بادی محور عمودی دارای زاویه گام ثابت، تغییرات گسترده زاویه حمله می‌باشد که هر پره در طول سیکل چرخش خود آن را تجربه می‌کند. این پارامتر به صورت معادله (۱) بیان می‌شود [۵].

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

دومین پارامتر تأثیرگذار بر عملکرد توربین سرعت نوک پره^۶ است که به عنوان نسبت سرعت پره به سرعت جریان آزاد شناخته می‌شود و به صورت معادله (۲) بیان می‌شود:

$$\lambda = \frac{R \cdot \omega}{U_{\infty}} \quad (2)$$

تغییرات زاویه حمله برحسب زاویه چرخش پره در سرعت‌های نوک مختلف برای یک پره توربین داریوس در شکل ۱ نمایش داده شده است.



شکل (۱): زاویه حمله یک پره برحسب زاویه چرخش در سرعت‌های نوک مختلف.

کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و جایگزینی انرژی‌های تجدیدپذیر به طور گسترده در دهه‌های گذشته مطرح و بررسی شده است [۱]. انرژی باد یکی از منابع انرژی تجدیدپذیر می‌باشد. این انرژی از فراوانی و دسترسی بالایی برخوردار است و در فرایند تولید انرژی الکتریکی از آن به کمک توربین‌های بادی هیچ‌گونه گاز گلخانه‌ای منتشر نمی‌گردد. توربین‌های بادی از نظر جهت محور دوران به دو دسته کلی توربین‌های بادی محور افقی^۱ و توربین‌های بادی محور عمودی^۲ تقسیم می‌شوند [۳ - ۲]. توربین‌های بادی محور افقی برای مدت‌های طولانی است که در مزارع بادی در مقیاس بزرگ مورد استفاده قرار می‌گیرند. در مورد این توربین‌ها می‌توان فرض کرد که زاویه حمله پره برحسب زاویه چرخش تغییر نمی‌کند، بنابراین امکان تنظیم زاویه چرخش پره^۳ در یک حالت بهینه برای تولید حداکثر توان در محدوده سرعت‌های مختلف باد امکان‌پذیر است. توربین‌های محور عمودی، خود به دو دسته توربین‌های مبتنی بر نیروی برآ، مثل توربین‌های داریوس^۴ و مبتنی بر نیروی پسا، دسته‌بندی می‌شوند. در توربین‌های داریوس، وقتی پره شروع به چرخش می‌کند، زاویه حمله پره باعث تولید گشتاوری در جهت چرخش توربین می‌شود. این گشتاور سبب حرکت یک ژنراتور شده و باعث تبدیل قسمتی از انرژی باد به الکتریسیته می‌شود [۲]. توربین‌های بادی داریوس عموماً تشکیل شده از دو یا سه پره مستقیم یا منحنی شکل هستند. یکی از مزایای مهم و تفاوت اصلی توربین‌های بادی محور عمودی با توربین‌های بادی محور افقی این است که به دلیل عدم وابستگی به جهت باد ورودی به سامانه کنترل یاو که روتور را مانند توربین‌های محور افقی در راستای جهت جریان باد قرار می‌دهد نیاز ندارند. این ویژگی خاص، توربین‌های بادی محور عمودی را برای استفاده در نواحی جغرافیایی دارای بادهای متلاطم (مثل مناطق شهری)، مناسب می‌سازد [۴]. در توربین‌های بادی محور عمودی، اثر پسای شکلی روی پره در سرعت‌های نوک پایین کم‌تر می‌باشد و نسبت به توربین‌های بادی محورا فقی، نویز و سروصدای کم‌تری تولید می‌گردد. ارتفاع پایین نصب این توربین‌ها، سبب سهولت نصب گیربکس و ژنراتور می‌شود. همچنین برای ساخت توربین‌های بادی محور

1- Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT)

2- Vertical Axis Wind Turbine (VAWT)

3- Azimuthal Angle

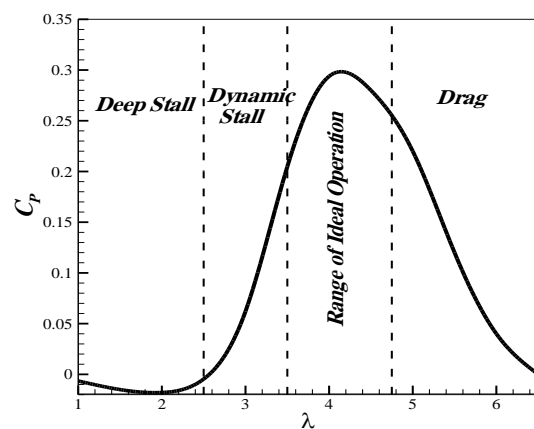
4- Darrieus Wind Turbine

5- Variable Pitch Turbine

6- Tip Speed Ratio (TSR)

بنابراین، پدیده واماندگی رخ می‌دهد و در نهایت منجر به جدایش جریان^۲ از سطح پره می‌شود و توان کاهش می‌یابد. همچنین این شکل نشان می‌دهد که در سرعت‌های نوک میانه ($0.5 < \lambda < 3$) زاویه حمله پره در محدوده کم‌تر از زاویه واماندگی پره قرار گرفته و حداکثر توان توربین به دست می‌آید. ویژگی دیگر آئودینامیکی توربین‌های بادی محور عمودی این است که در نیمه بالادست توربین، در مناطقی که واماندگی رخ داده است، گردابه‌هایی (با نواحی کم‌فشار) تولید می‌شوند. این گردابه‌ها از مسیر داخل روتور عبور کرده و با پره‌های قرار گرفته در نیمه پایین دست برخورد می‌کنند که این اثر منجر به کاهش تولید توان توربین در نیمه پایین دست توربین می‌شود [۶]. جدایش این گردابه‌ها سبب کاهش گشتاور تولیدی حتی عدم تولید گشتاور در بعضی زوایای چرخش شده و توربین به دلیل قرار گرفتن در ناحیه‌ای به نام ناحیه مرده^۳ قادر به ادامه چرخش نخواهد بود [۳]. از بررسی دو نمودار ۱ و ۲ می‌توان نتیجه گرفت که مهم‌ترین ضعف توربین‌های بادی داریوس، واماندگی دینامیکی به دلیل افزایش زاویه حمله و افت توان در سرعت‌های نوک پایین پره می‌باشد. فرایند واماندگی دینامیکی وابسته به فاکتورهای فراوانی از قبیل عدد ماخ^۴، عدد رینولدز، نرخ تغییر زاویه گام و شکل پره می‌باشد [۸]. در این پژوهش به بررسی اثر زاویه گام و شکل پره بر واماندگی دینامیکی پرداخته می‌شود. فهم درست و کافی از واماندگی دینامیکی و گردابه‌های جدا شده برای آگاهی از شرایط آئودینامیکی و کاهش اثرات آن حول پره مهم و اساسی می‌باشد. بنابراین در ادامه به دلیل ایجاد واماندگی دینامیکی و مراحل شکل‌گیری این پدیده پرداخته می‌شود. اولین تجسم واماندگی دینامیکی برای توربین‌های بادی محور عمودی توسط بروچیر و همکاران در سال ۱۹۸۶ صورت گرفت [۹]. این تجسم با استفاده از کانال آب، و توسط آل دی وی و لامپ‌های هیدروژنی در عدد رینولدز ۱۰,۰۰۰ و در سرعت‌های نوک ۱ تا ۸ روی یک توربین بادی داریوس دو پره شامل ایرفویل‌های NACA۰۰۱۸ صورت پذیرفت. لیثمن [۱۰] در سال ۲۰۰۶ یک توصیف کلی از مراحل شکل‌گیری پدیده واماندگی دینامیکی ارائه داد. همان‌طور که از شکل ۳ مشاهده می‌شود، در طی رخداد واماندگی دینامیکی، در ابتدا زاویه حمله پره از

همان‌طور که از شکل ۱ مشاهده می‌شود، هر پره توربین بادی در طول چرخش خود یک تغییر نوسانی در زاویه حمله را تجربه می‌کند به طوری که در سرعت‌های نوک پایین، زاویه حمله پره از زاویه واماندگی تجاوز می‌کند. این دو عامل (نوسان بیش از حد زاویه حمله همراه با افزایش یا کاهش سریع مقدار زاویه حمله)، سبب می‌شود تا لایه مرزی از سطح پره جدا شده و پره اصطلاحاً واماندگی دینامیکی^۱ را تجربه کند. واماندگی دینامیکی سبب کاهش توان تولیدی، وارد شدن بارهای نوسانی و سیکلی به اجزای مکانیکی و نویز و ارتعاش توربین شده و رفتار منحنی های برآ و پسای پره نسبت به مقدار متناظر آن در حالت استاتیکی تغییر می‌کند [۶]. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، هرچه سرعت نوک افزایش یابد، زاویه حمله کاهش یافته و محدوده‌ای که در بالادست توربین (زوایای چرخش ۰ تا ۱۸۰ درجه) واماندگی را تجربه می‌کند، کاهش می‌یابد. البته در سرعت‌های نوک خیلی زیاد به دلیل کاهش بیش از حد زاویه حمله، بر میزان پسای وارد بر پره نیز افزوده می‌شود [۶]. به همین دلیل در طراحی توربین‌های بادی محور عمودی هدف کاهش هر دو مقدار واماندگی و پسای به منظور دست‌یابی به بهترین عملکرد توربین می‌باشد. در شکل ۲ منحنی ضریب توان توربین برحسب سرعت نوک برای یک توربین بادی داریوس به همراه اثرات غالب بر توربین در طول شرایط کاری نشان داده شده است. همان‌طور که از این شکل مشاهده می‌گردد، در سرعت‌های نوک پایین ($0.5 < \lambda < 1$) به دلیل افزایش زاویه حمله (شکل ۱)، پره مدت زمان زیادی را در شرایطی طی می‌کند که زاویه حمله خیلی زیاد است.



شکل (۲): منحنی عملکرد توربین بادی داریوس برحسب سرعت نوک پره.

2- Flow Separation
3- Dead Band
4- Mach Number

1- Dynamic Stall

سرعت‌های نوک مختلف باید از وقوع این پدیده جلوگیری و از ایجاد اثرات آن حتی‌الامکان جلوگیری به عمل آید. در مطالعه حاضر به منظور افزایش توان خروجی، به بررسی اثر استفاده از زاویه گام متغیر و زوایای گام ثابت مثبت و منفی مختلف بر کاهش یا حذف واماندگی توربین‌های بادی محور عمودی پرداخته شده‌است. با روش تغییر زاویه گام متغیر پره که در این مقاله پیشنهاد شده، یک برنامه مشخص برای تغییر اندازه و نرخ تغییرات زاویه گام بر اساس تابعی از موقعیت مکانی پره تعریف می‌شود و حرکت نوسانی پره و تغییرات زاویه حمله در تمامی سرعت‌های نوک کاهش می‌یابد. پیش‌بینی می‌شود یک توربین بادی محور عمودی داریوس مجهز به فناوری زاویه گام متغیر، در مقایسه با توربین بادی گام ثابت، می‌تواند اثرات منفی واماندگی دینامیکی پره (مثل کاهش بازدهی و ارتعاش) را کاهش و سبب بهبود توان توربین گردد. این پیش‌بینی براساس مقایسه ضریب توان و گشتاور توربین انجام می‌گردد که ضریب توان C_p و ضریب گشتاور C_m یک توربین بادی محور عمودی به صورت زیر تعریف می‌شود:

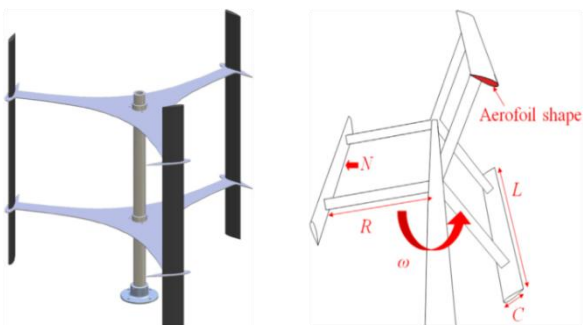
$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho A V^3} \quad (3)$$

$$C_m = \frac{C_p}{\lambda} \quad (4)$$

برای یک توربین محور عمودی مساحت روتور A از حاصلضرب ارتفاع توربین در قطر روتور به دست می‌آید.

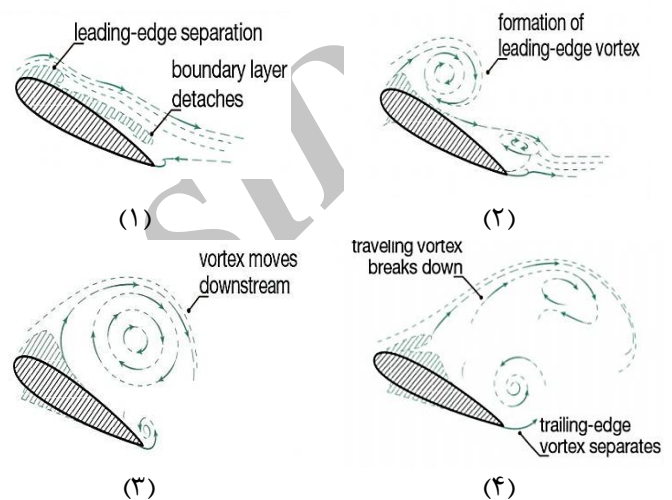
۲- مدل‌سازی عددی

در این پژوهش برای اعتبارسنجی و مطالعه پارامترهای مختلف طراحی و بررسی اثرات زاویه گام، توربین بادی طراحی شده توسط کاستلی و همکاران [۱۴] انتخاب شده‌است. نمای از این توربین در شکل ۴ و مشخصات توربین مورد بررسی در جدول ۱ نشان داده شده‌است.



شکل (۴): توربین مورد استفاده برای اعتبارسنجی نتایج [۱۴].

زاویه واماندگی استاتیکی تجاوز می‌کند اما در جریان روی ایرفویل تغییر خاصی مشاهده نمی‌شود و لایه مرزی نازک باقی می‌ماند و جریان برگشتی در آن ملاحظه نمی‌گردد. هرچه زاویه حمله ایرفویل بیشتر می‌گردد، جریان لایه مرزی روی سطح پره شروع به حرکت معکوس می‌کند. در مرحله دوم گردابه‌های بزرگ‌تر و جریان کاملاً برگشتی در لبه فرار پره شکل می‌گیرد و به سمت لبه حمله حرکت می‌کند. وقتی جریان برگشتی به لبه حمله می‌رسد، یک گردابه قوی در لبه حمله پره شکل می‌گیرد.



شکل (۳): رفتار جریان روی ایرفویل در طی فرآیند واماندگی [۷].

در مرحله سوم با بیشتر شدن زاویه حمله، گردابه‌های لبه حمله رشد پیدا کرده و در امتداد وتر پره حرکت می‌کنند و در نتیجه میزان برآ در لبه حمله پره کاهش می‌یابد و مرکز فشار به انتهای پره انتقال می‌یابد. در مرحله آخر وقتی که گردابه لبه حمله از لبه فرار دور شود، یک افت ناگهانی در ضریب برآ رخ می‌دهد. پس از این مرحله جریان روی پره کاملاً جدا می‌شود و گردابه‌های کوچک‌تر شروع به تشکیل می‌کنند و از لبه فرار پره جاری می‌شوند. چنین شرایطی ناپایداری در شرایط جریان حول پره را تشدید می‌کند و هرچه پره بیشتر نوسان کند جریان بیشتری از لبه حمله جدا می‌شود. بسته به نرخ پیچش، فرایند اتصال دوباره جریان ممکن است تا زمانی که زاویه حمله کاهش نیابد، شکل نگیرد [۷]. از این تفاسیر می‌توان نتیجه گرفت که افزایش بیش از حد زاویه حمله به عنوان یک عامل مخرب سبب کاهش توان و عدم راه‌اندازی توربین بادی داریوس می‌گردد. بنابراین هر عاملی که به کاهش محدود زاویه حمله کمک نماید، سبب بهبود عملکرد توربین داریوس می‌گردد و در

جدول (۱): مشخصات هندسی توربین [۱۴].

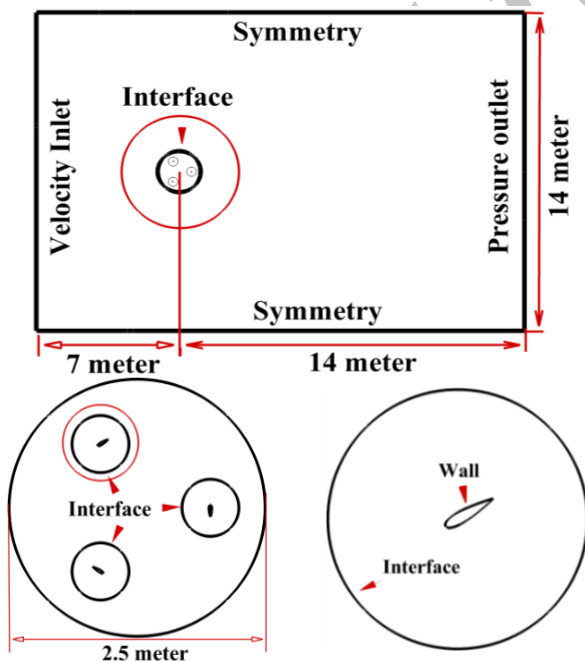
مشخصات توربین	نماد	کمیت
پروفیل پره	-	۰۰۲۱کا
طول وتر پره (mm)	C	۸۵/۸
شعاع توربین (mm)	R	۱۰۳۰
ارتفاع (mm)	H	۲/۷۲۸
مساحت	A	۱/۲۳۶
صلبیت	σ	۰/۵
تعداد پره	N	۳

۱-۲ تنظیمات کلی حلگر برای شبیه‌سازی عددی

در این مطالعه به دلیل لزوم پیش‌بینی دقیق تغییرات رفتار جریان به دلیل تغییر زاویه گام، از روش دینامیک سیالات محاسباتی و نرم‌افزار تجاری انسیس فلوئنت^۱ ۱۵ به کمک معادلات URANS^۲ برای شبیه‌سازی استفاده شده است. معادلات حاکم برای جریان آشفته و تراکم‌ناپذیر اطراف توربین داریوس، معادلات دوبعدی متوسط رینولدز ناویراستوکس هستند. این معادلات بر اساس روش حجم محدود در نرم‌افزار انسیس فلوئنت نسخه ۱۵ گسسته سازی شده‌اند. جریان به صورت گذرا فرض شده است. برای شبیه‌سازی حرکت توربین با استفاده از شبکه متحرک، از مدل شبکه لغزان استفاده شده است. در این روش ناحیه خارجی روتور ثابت فرض می‌شود و ناحیه روتور با یک سرعت زاویه ای مشخص می‌چرخد. برای دستیابی به دقت بالای حل برای گسسته سازی معادلات شامل ترم‌های انتقال (از قبیل مومنتوم و انرژی و آشفتگی) از الگوریتم گسسته سازی مرتبه دوم بالادست و از الگوریتم ضمنی کران‌دار برای گسسته سازی ترم زمانی استفاده شده‌است. در نهایت مجموع معادلات گسسته شده توسط الگوریتم پیزو اجراء و طرح ضمنی پس‌رو مرتبه دو^۳ برای ترم‌های ناپایا استفاده شده است. بسیاری از محققان استفاده از گام زمانی متناسب با چرخش توربین به اندازه ۱ درجه را برای کاربردهای شبیه‌سازی عددی توربین بادی داریوس پیشنهاد داده‌اند [۱۴].

اما در این پژوهش به دلیل لزوم دقت بیش‌تر در شبیه‌سازی و پیش‌بینی دقیق رفتار جریان از گام زمانی متناسب با چرخش توربین به اندازه ۰/۵ درجه برای تمامی شبیه‌سازی‌ها استفاده شده‌است و حلگر قبل از ورود به گام زمانی بعدی، برای حل معادلات ۳۰ تکرار انجام خواهد داد.

شبیه‌سازی دوبعدی توربین بادی محور عمودی ایجاب می‌کند تا دامنه محاسباتی به سه ناحیه مجزا تقسیم شود: یک ناحیه خارجی مستطیلی ثابت که تعیین‌کننده محدوده کلی دامنه می‌باشد. یک ناحیه متحرک داخلی دایروی شامل روتور که توسط ناحیه ثابت مستطیلی در بر گرفته شده است و ناحیه متحرک داخلی دایروی شامل پره‌ها که توسط ناحیه روتور در بر گرفته شده‌اند. نمای شماتیک دامنه محاسباتی و شرایط مرزی اعمال شده در دامنه ثابت و روتور و پره‌ها در شکل ۵ نمایش داده شده است. در دامنه خارجی روتور یک محیط مستطیلی با ابعاد ۲۱×۱۴ قرار دارد. مرکز دامنه چرخان روتور در مسافت ۷ متری از ورودی دامنه ثابت قرار گرفته است. برای اطمینان از ایجاد نشدن اثر انسداد مرزها، دامنه به اندازه کافی بزرگ در نظر گرفته شده تا گردابه‌های^۴ ایجاد شده بتوانند به شرایط جریان آزاد برسند.



شکل (۵): دامنه محاسباتی و شرایط مرزی.

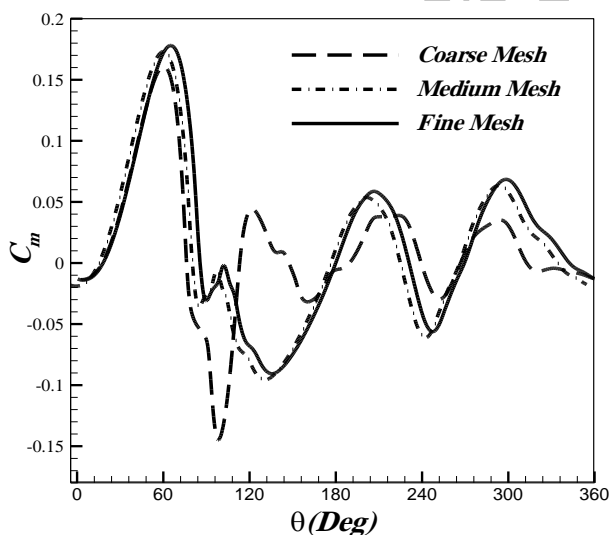
1-ANSYS FLUENT

2-Unsteady Reynolds average Navier-Stokes

3- Second order Backward Implicit Scheme

4-Vortex

بیشتر در نظر گرفته شده تا شرایط بهتری برای نقاطی که گردادیان‌های فشار و جریان بیشتر است، وجود داشته باشد. به منظور کاهش هزینه محاسباتی سه نوع شبکه‌بندی ریز و درشت و متوسط انتخاب گردید. برای شبکه‌بندی متوسط و ریز به ترتیب ۲۵ و ۴۳ لایه‌مرزی روی هر ایرفویل در نظر گرفته شده است و مکان قرارگیری اولین گره از سطح پره برای شبکه متوسط و ریز به ترتیب ۰/۰۰۰۰۲ و ۰/۰۰۰۰۵ متر می‌باشد، به طوری که مقدار y^+ برای هر سه پره، در طول چرخش پره حدود کمتر از ۱ می‌باشد و شبکه در لایه زیرین لرج^۳ قرار گرفته و شرایط مورد نیاز برای مدل آشفتگی بوجود می‌آید تا کد عددی شرایط داخل لایه‌مرزی را به خوبی مدل کند. شکل ۶ گشتاور تولیدی پره برای هر سه شبکه‌بندی استفاده شده، برحسب زاویه چرخش و برای یک دور چرخش توربین در شرایط پایدار 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. در جدول ۲ جزئیات شبکه‌بندی‌های مختلف مطالعه را آورده است. همه اطلاعات داده شده در جدول برای ایرفویل NACA ۰۰۲۱ و در سرعت نوک ۱/۵ می‌باشد.



شکل (۶): تأثیر اندازه شبکه بر ضریب گشتاور در سرعت نوک

۱/۵

انگیزه اصلی جدا کردن دامنه پره‌ها از دامنه روتور، توانایی شبیه‌سازی مکانیزم گام متغیر می‌باشد که در طی آن پره حول دو محور مجزا خواهند چرخید. اولین چرخش حول محور Z و با سرعت زاویه‌ای ω و دومین چرخش حول $0/25$ طول وتر از لبه حمله با سرعت زاویه‌ای مناسب، برای تغییر زاویه گام می‌باشد. چرخش چهار قسمت دامنه دینامیکی (سه دامنه شامل پره‌ها و دامنه روتور) به وسیله توابع سرعت برحسب زاویه چرخش پره که کد کاربری^۱ آن در محیط کد نویسی C++ نوشته شده است، به صورت جداگانه کنترل می‌شود. این کد وارد حلگر شده و برای هدایت چرخش پره‌ها از آن استفاده می‌شوند. شرایط مرزی در شکل ۵ نشان داده شده است. شبیه‌سازی‌ها تا زمانی ادامه پیدا می‌کند تا رفتار جریان حالت شبه پایا به خود بگیرد و اختلاف بین ضرایب گشتاور در دو دور متوالی کمتر از ۰,۰۰۵ گردد و بازدهی توربین یک عدد ثابت گردد. نتایج نشان داد که در حالت‌های مختلف، این رفتار پس از دور پنجم قابل دستیابی می‌باشد. بنابراین، تمام نتایج به دست آمده مربوط به دور ششم چرخش توربین می‌باشد. در این مقاله شبیه‌سازی دو بعدی به وسیله کامپیوتر ۶ هسته‌ای XEON E5 2.6 GHZ صورت گرفته و هر دور کامل چرخش توربین در یک سرعت نوک، حدود ۱۲ ساعت طول می‌کشد و با توجه به این که برای پیش‌بینی دقیق میزان توان خروجی میانگین توربین باید ۶ دور بچرخد حداقل ۷۲ ساعت زمان لازم است تا تنها برای یک حالت و در یک سرعت نوک خروجی دریافت شود.

۲-۲- شبکه‌بندی حوزه حل

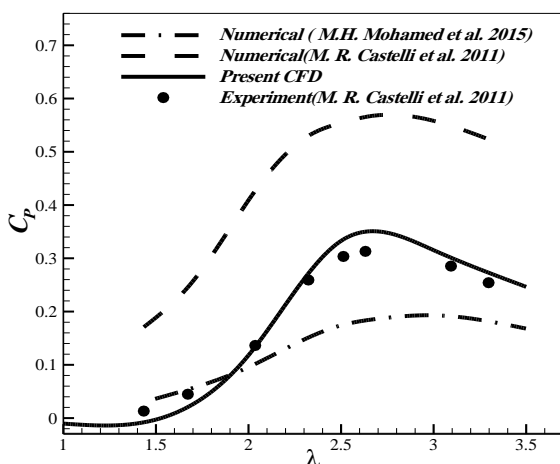
مهم‌ترین شاخص موفقیت یک شبکه‌بندی مناسب در مسائل مهندسی، توانایی پیش‌بینی درست زمان و مکان جدایش جریان حول پره‌های توربین توسط حلگر می‌باشد. شبکه‌بندی به وسیله نرم‌افزار گمبیت^۲ نسخه ۲/۴/۶ صورت گرفته و به دلیل کارآمدتر بودن شبکه‌بندی غیر ساختاریافته برای هندسه‌های غیرمستقرن، از این نوع شبکه‌بندی استفاده شده است [۱۵]. به منظور پیش‌بینی دقیق‌تر خواص جریان و محاسبه گردادیان‌ها، ریزترین شبکه غیر ساختاریافته در دامنه پره‌ها انتخاب شده است. در لبه حمله و فرار پره، تراکم نقاط

1- User Defined Function (UDF)

2- Gambit

3- Viscose Sub Layer

انتخاب مدل آشفتگی مناسب تر، بسیار بهتر از نتایج عددی ارائه شده توسط کاستلی و همکاران [۱۴] و نتایج اعتبارسنجی مطالعات محمد و همکاران [۱۷] که به اعتبارسنجی عددی روی همین توربین پرداخته‌اند، رفتار جریان را پیش‌بینی می‌کند. در جدول ۲ به بررسی فرضیات و روش‌های اعمال شده به حل عددی حاضر و حل عددی صورت گرفته توسط کاستلی و همکاران پرداخته شده است. هدف از این کار، بررسی دلایل پیش‌بینی ضعیف رفتار جریان در حل عددی کاستلی و همکاران [۱۴] بوده است.



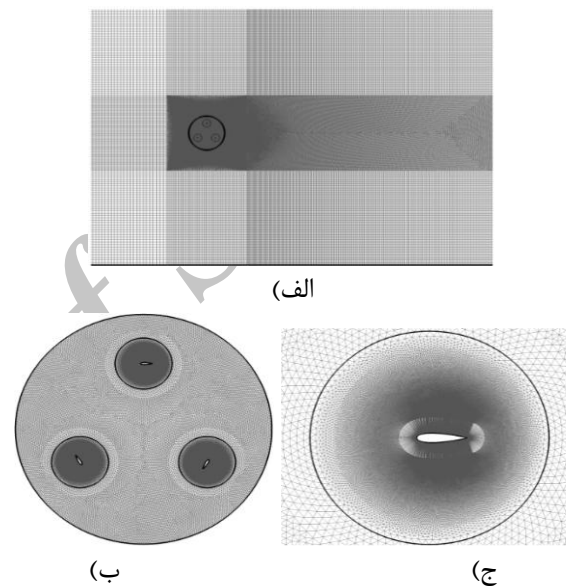
شکل (۸): اعتبارسنجی نتایج حاضر با نتایج آزمایشگاهی و عددی

همان‌طور که در جدول ۳ نشان داده شده، کاستلی و همکاران در حل عددی خود از مدل آشفتگی K-ε برای شبیه‌سازی استفاده کرده‌اند. این مدل آشفتگی، توانایی پیش‌بینی جدایش‌های بزرگ جریان را نداشته و مناسب برای شبیه‌سازی‌هایی است که جریان کاملاً به سطح جسم چسبیده است [۱۳]. پس می‌توان دلیل اصلی پیش‌بینی بیش از حد توان در مدل‌سازی عددی به کمک مدل K-ε را این مسئله اعلام کرد. اما نکته دیگر در حل عددی کاستلی این است که از میزان گام زمانی متناسب با چرخش توربین به اندازه ۱ درجه استفاده شده است. این در حالی است که در حل عددی حاضر این مقدار ۰/۵ درجه می‌باشد. در حل عددی حاضر که از شبکه‌بندی به میزان Y^+ خیلی پایین بهره می‌برد. استفاده از شبکه‌بندی با Y^+ پایین هم‌زمان با استفاده از مدل آشفتگی مناسب SST-K ω سبب شده تا حل عددی حاضر بهتر بتواند شرایط جریان حول پره (مثل جدایش گردابه‌ها) را شبیه‌سازی کند.

جدول (۲): شبکه‌بندی مورد استفاده در سرعت نوک ۱/۵ و سرعت باد ۹ متر بر ثانیه.

شبکه	تعداد سلول	Y^+
درشت	۱۵۰۴۶۷	۰/۸۸۶۷
متوسط	۴۸۲۹۶۰	۰/۹۵۲۳
ریز	۹۵۱۴۷۱	۰/۶۴۳۱

در شکل ۷ نیز نمایی از شبکه متوسط آورده شده است.



شکل (۷): الف) شبکه‌بندی دامنه محاسباتی.

ب) شبکه‌بندی دامنه داخلی. ج) شبکه‌بندی نزدیک به پره.

۲-۳- اعتبارسنجی

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 [۱۴] مقایسه شده است. برای اعتبارسنجی در شبیه‌سازی عددی از مدل آشفتگی دو معادله‌ای SST-K ω استفاده شده است. شکل ۹ پیش‌بینی ضریب توان توربین گام ثابت توسط کد عددی برای سرعت‌های نوک مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که شکل ۸ نشان می‌دهد، کد عددی به کمک این مدل آشفتگی توانایی تکرار شکل منحنی ضریب توان آزمایشگاهی را دارا می‌باشد و می‌تواند به طور دقیق مقدار سرعت نوکی را که حداکثر ضریب توان بدست می‌آید را پیش‌بینی نماید. به طوری که نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی حاضر، به علت کیفیت شبکه‌بندی و

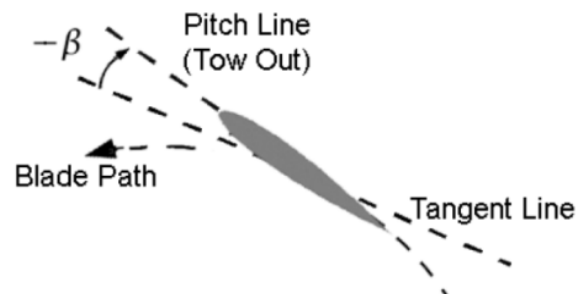
۱۲ درجه دارای کمترین ضریب توان خود می باشد. زوایای گام بیش تر و کمتر از ۳- درجه جدایش جریان را به تأخیر نخواهد انداخت و در واقع به دلیل افزایش پسای روی پره، سبب کاهش عملکرد توربین حتی در مقایسه با زاویه گام صفر درجه می شود. علت افزایش توان در زاویه گام ۳- درجه را می توان این طور بیان کرد که یک تغییر کوچک زاویه گام پره به سمت داخل مسیر دایروی چرخش، سبب کاهش زاویه حمله در ناحیه بالادست و افزایش آن در پایین دست جریان می شود. هر دو حالت پیش آمده برای عملکرد توربین داریوس مفید می باشد. زیرا در بالادست جریان زاویه حمله زیاد و برای پایین دست به دلیل کاهش سرعت جریان، زاویه حمله کم می باشد. این نمودارها همچنین نشان می دهند که تغییرات توان توربین در اثر تغییر زاویه گام در سرعت های نوک بالاتر قابل ملاحظه تر است. زیرا در سرعت های نوک پایین نسبت به سرعت های نوک بالا، تغییرات زاویه حمله در یک دور چرخش توربین بیش تر می باشد. به طور مثال در سرعت نوک برابر با ۵ زاویه حمله بین ۰ تا حداکثر ± 10 درجه نوسان می کند و تغییر ۹ درجه یعنی تغییر ۹۰ درصدی زاویه حمله. این درحالی است که در سرعت های نوک پایین سرعت نوک برابر با ۱ تغییرات زاویه حمله بین صفر تا حداکثر ± 90 درجه نوسان می کند و تغییر ۹ درجه ای یعنی یک تغییر ۱۰ درصدی زاویه حمله که موجب تأثیر کم تر بر عملکرد توربین می شود [۱۷]. برای بررسی این مشاهدات، رفتار نیروهای وارد بر پره ها که مسئول ایجاد گشتاور روی پره ها هستند باید بررسی شوند. وقتی پره در معرض وزش جریان باد قرار می گیرد به دلیل اختلاف فشار در بالا و پایین پره نیروهایی به پره وارد می شود که ناشی از ویسکوزیته و گرادیان سرعت هوا می باشد. از آنجا که ویسکوزیته هوا خیلی پایین است، نیروهای برشی در مقایسه با نیروهای فشاری ناچیز به نظر می آیند. بنابراین، می توان نتیجه گرفت که گشتاور روی پره ها به دلیل نیرویی است که به سبب وجود اختلاف فشار در بالا و پایین پره به وجود می آید. کانتورهای فشار حول پره به همراه خطوط جریان برای زوایای گام ۳ و ۰ و ۳- و در زوایای چرخش ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ درجه به ترتیب در شکل های ۱۳- ۱۱ نشان داده شده اند.

جدول (۳): تنظیمات گلگر در حل عددی حاضر و حل عددی کاستلی و همکاران.

ابعاد	کوپلینگ	مدل	گام	زمانی	حل عددی
دامنه	سرعت و فشار	آشفستگی	مدل آشفتگی	(درجه)	حاضر
حل (m)					حاضر
۱۴*۲۱	۰/۰۳	Piso	SST-K ω	۰/۵	حل عددی حاضر
۴*۲۴	۵	-	K- ϵ	۱	حل عددی کاستلی

۳- بهبود عملکرد توربین

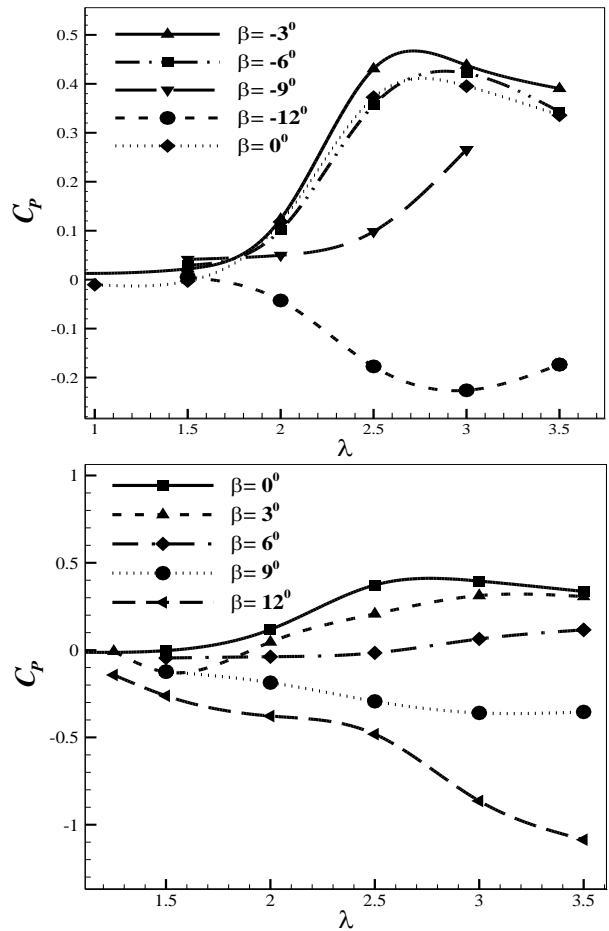
در توربین های بادی داریوس با مقدار صلبیت بالا، زاویه حمله جریان در طول خط وتر پره تغییرات قابل ملاحظه ای دارد. به این خاطر دستیابی به مقدار مناسب گام اولیه پره ها به منظور بهبود عملکرد این توربین ها امری ضروری می باشد [۱۶]. در این قسمت، اثرات زوایای گام مثبت و منفی روی عملکرد توربین مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آن در نمودار ۱۰ نشان داده شده است. از آنجا که جریان روی قسمت کم فشار پره در طول چرخش توربین کاملاً از سطح جدا می شود، زاویه گام باید طوری تنظیم گردد که حداکثر مقدار زاویه حمله در نیمه بالادست توربین کاهش یابد و مقدار این زاویه به کمتر از زاویه واماندگی کاهش یابد. در توربین های محور عمودی، زاویه گام پره به صورت زاویه بین خط وتر پره و خط مماس بر مسیر دوران تعریف می شود (شکل ۹).



شکل (۹): جهت منفی زاویه گام پره β یک توربین بادی محور عمودی.

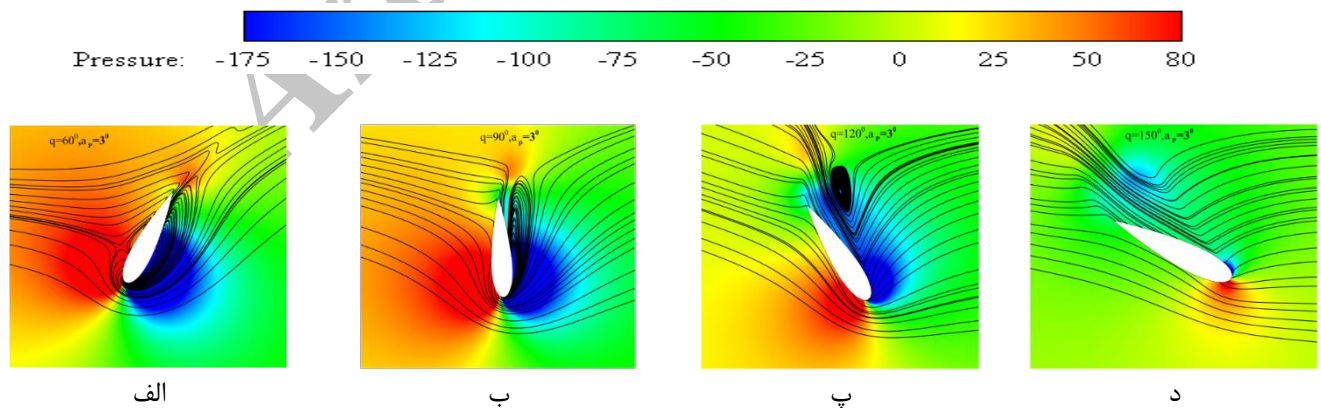
همانطور که از مقایسه نمودارهای شکل ۱۰ مشخص است، در زاویه گام ۳- درجه، توربین دارای بیشترین و در زاویه گام

زویایای چرخش پایین، جریان متصل به سطح پره سبب تولید برآ می‌شود. با افزایش زاویه چرخش توربین جریان از سطح لبه فرار پره شروع به جدایش می‌کند و منجر به کاهش نیروی برآ و کاهش گشتاور تولیدی می‌گردد. هرچه پره در مسیر حرکت خود با جریان پیش می‌رود پره پسای بیشتر و برآی کمتر تولید می‌کند و بنابراین گشتاور کمی تولید می‌شود. زیرا مقدار زیادی از انرژی جنبشی جریان ورودی به انرژی جنبشی گردابه‌ها تبدیل می‌شود و به پره‌ها منتقل نمی‌شود. اما برای زاویه گام ۳- درجه جریان برای مدت زیادی به صورت خطوط جریان باقی می‌ماند و بنابراین پره برای محدوده زیادی از زویایای چرخش گشتاور مثبت تولید می‌کند و جدایشی رخ نمی‌دهد. برای زاویه گام صفر درجه نیز جدایش جریان ملاحظه می‌گردد. برای زاویه گام ۳ درجه همان‌طور که ملاحظه می‌شود یک گردابه در لبه فرار قبل از ورود پره در زاویه چرخش ۹۰ درجه شکل می‌گیرد و رشد می‌کند و نسبت به دیگر زویایای گام این گردابه بیشتر رشد می‌کند. بنابراین گشتاور برای زاویه گام ۳- درجه و سپس برای صفر و پس برای ۳ درجه بیشترین می‌باشد. همان‌طور که در مطالعه بالا نشان داده شد، مشکلات مربوط به واماندگی دینامیکی روی توربین بادی محور عمودی را می‌توان با تغییر زاویه گام اولیه کاهش داد. در این روش، با تغییر زاویه گام، منحنی زاویه حمله در نیمه بالادست توربین کاهش می‌یابد، اما پیک منفی در زاویه حمله در نیمه پایین دست توربین افزایش می‌یابد.

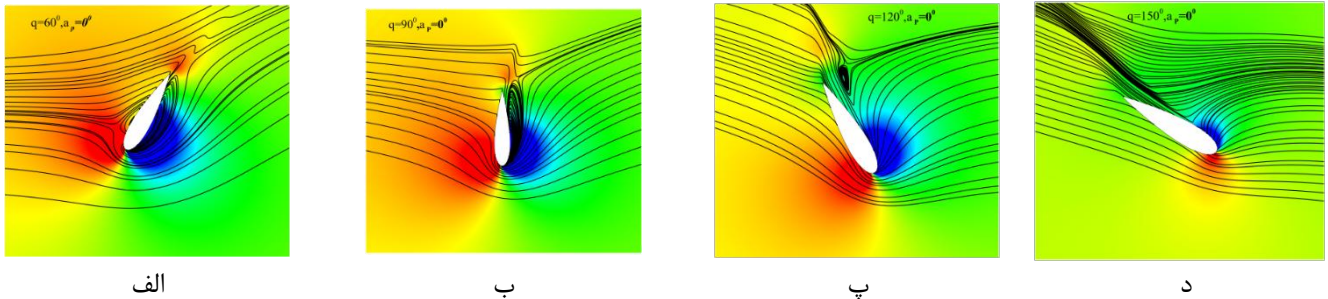
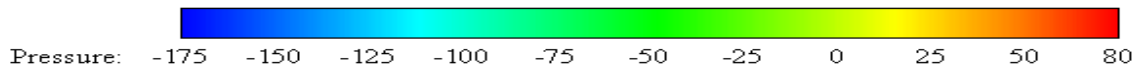


شکل (۱۰): منحنی ضریب توان بر حسب سرعت نوک برای زویایای گام ثابت منفی و مثبت.

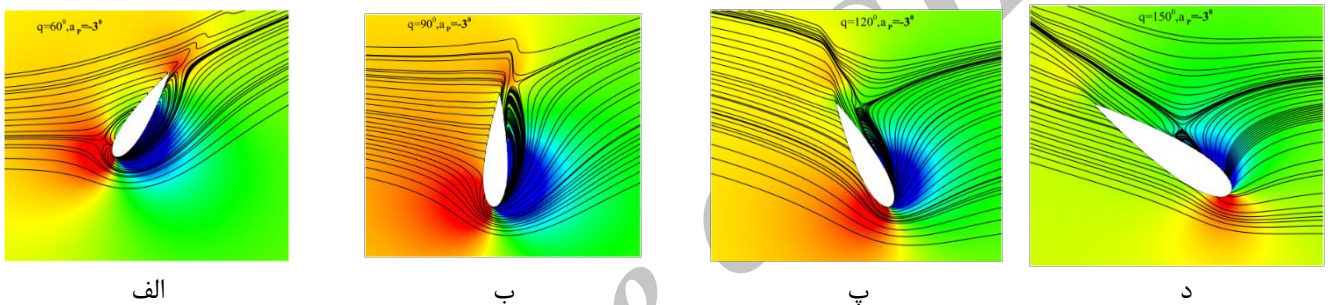
همان‌طور که مشاهده می‌شود، در زاویه گام ۳ درجه در



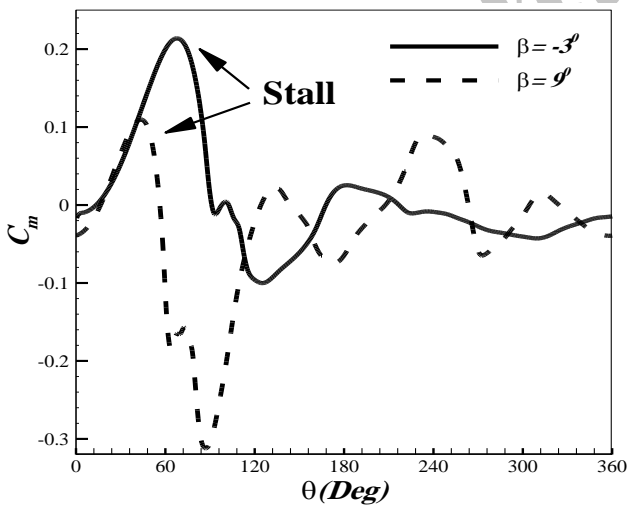
شکل (۱۱): توزیع فشار همراه با خطوط جریان حول پره با زاویه گام ۳ درجه در زاویه چرخش، الف) ۶۰ درجه، ب) ۹۰ درجه، پ) ۱۲۰ درجه، د) ۱۵۰ درجه.



شکل (۱۲): توزیع فشار همراه با خطوط جریان حول پره با زاویه گام ۰ درجه در زاویه چرخش، الف) ۶۰ درجه، ب) ۹۰ درجه، پ) ۱۲۰ درجه، د) ۱۵۰ درجه.



شکل (۱۳): توزیع فشار همراه با خطوط جریان حول پره با زاویه گام -۳ درجه در زاویه چرخش، الف) ۶۰ درجه، ب) ۹۰ درجه، پ) ۱۲۰ درجه، د) ۱۵۰ درجه.



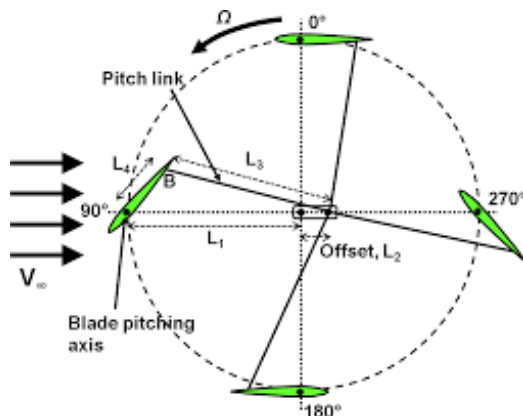
شکل (۱۴): منحنی ضریب گشتاور بر حسب زاویه چرخش.

شکل ۱۴ نمودار ضریب گشتاور یک پره را بر حسب زاویه چرخش در زوایای گام ۳- و ۹+ درجه در سرعت نوک ۲/۵ و نشان دهنده اثر زاویه گام روی واماندگی دینامیکی پره می باشد. این نمودار نشان می دهد که افزایش محدود زاویه گام منفی، سبب افزایش زاویه چرخشی می شود که حداکثر توان توربین به دست می آید. برای زاویه گام مثبت، ضریب قدرت آنی در زوایای چرخش پایین تر شروع به افزایش می کند و بنابراین، پره در زوایای چرخش پایین تر به پیک توان خود می رسد و واماندگی دینامیکی تسریع می یابد. این در حالی است که برای زوایای گام منفی، حداکثر ضریب توان در زاویه چرخش بالاتری اتفاق می افتد و زاویه چرخشی که حداکثر ضریب توان به دست می یابد، افزایش می یابد.

همچنین، مشاهده می‌شود که زاویه چرخش مربوط به حداکثر توان تولیدی و نواحی مؤثر تولید توان (نواحی که حداکثر توان از آن استخراج می‌شود) با تغییر زاویه گام پره از مقادیر مثبت به مقادیر منفی، افزایش می‌یابد.

۳-۲- روش زاویه گام متغیر

در روش زاویه گام متغیر، پرها به کمک توابع سینوسی بر طبق زوایای گامی که برحسب زاویه چرخش پره تعریف می‌گردند، تنظیم می‌شوند. برای این مطالعه از توابع گام متغیر سینوسی دارای دامنه‌های ۳ و ۱۰ و ۲۰ و ۳۶ درجه برای کاهش مقدار زاویه حمله استفاده شده‌است. زاویه حمله بهینه پره در این روش از مجموع زاویه حمله مؤثر اولیه (زاویه حمله هندسی) و زاویه گام به دست می‌آید. گفتنی است که جهت مثبت زاویه گام پره در جهت چرخش پادساعت‌گرد و زاویه گام منفی در جهت چرخش ساعت‌گرد تعیین شده است. در شکل ۱۵ طرح واره‌ای از نوع چرخش پرها به کمک سیستم تنظیم زاویه گام به کمک مکانیزم ۴ میله‌ای پیشنهاد شده در مرجع [۲] آورده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌گردد، در روش گام متغیر، مقدار زاویه گام در بالادست توربین منفی می‌شود (لبه حمله پره در حال گام متغیر به سمت خارج از دایره مسیر چرخش حرکت می‌کند، این سبب منفی شدن زاویه گام شده و سبب کاهش زاویه حمله در بالادست می‌شود). در نیمه پایین‌دست، به کمک سیستم گام متغیر، لبه حمله پره به سمت داخل مسیر دایروی چرخش، تغییر جهت می‌دهد و بنابراین مقادیر زاویه گام مثبت می‌شود. از آنجا که در این نیمه، مقدار زاویه حمله منفی می‌باشد، این تنظیم گام سبب افزایش مقدار زاویه حمله در پایین‌دست می‌گردد. به دلیل جابه‌جایی قسمت کم‌فشار و پرفشار پره در محل تغییر زاویه حمله بین بالادست و پایین‌دست در زاویه گام ثابت، توربین گشتاور کمی تولید می‌کند. بنابراین، برای تنظیم زاویه گام پره، منحنی زاویه گام تعریف شده باید به نحوی تعیین شود تا تغییر زاویه حمله در این نواحی گذار، صاف و هموار باشد. در این پژوهش استفاده از تابع گام سینوسی روش مناسبی برای استفاده در توربین گام متغیر می‌باشد. زاویه حمله مؤثر در این پژوهش به صورتی انتخاب شده که از تغییرات ناگهانی جلوگیری شده و از اثرات واماندگی جلوگیری شود. با استفاده از تابع سینوسی می‌توان در مناطقی مثل انتهای نیمه بالادست توربین که تولید گشتاور اندک است، زاویه حمله را به صفر رساند و در زوایای چرخش



شکل (۱۵): نحوه تغییر زاویه گام پره زاویه گام متغیر [۲].

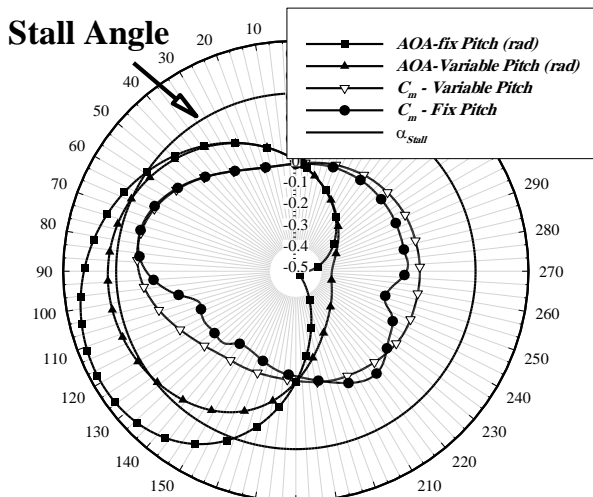
تابع منحنی زاویه گام متغیر از تفاضل زاویه حمله مؤثر از زاویه حمله بهینه به صورت زیر دست می‌آید:

$$\theta = \omega \cdot t \beta(\theta) = A \cdot \sin(\theta), \quad (5)$$

$$\alpha_{New} = \alpha_{Old} - \beta(\theta). \quad (6)$$

در جدول ۴ مقادیر زوایای گام و حمله اولیه و ثانویه برای تابع سینوسی و در دامنه‌های ۳ و ۱۰ و ۲۰ و ۳۶ درجه و برای زاویه چرخش ۱۵۰ درجه، در سرعت نوک ۱/۲۵ نشان داده شده است. در این جدول منظور از زاویه حمله اولیه، زاویه حمله در حالت زاویه گام صفر و منظور از زاویه حمله ثانویه، زاویه حمله پره گام متغیر می‌باشد. همان‌طور که در این جدول ملاحظه می‌گردد، مقدار زاویه حمله هندسی توربین دارای گام ثابت بیشتر از توربین دارای زاویه گام متغیر می‌باشد و اگر در توربین داریوس از روش گام متغیر استفاده شود، مقدار دامنه زاویه حمله هندسی کوچک خواهد شد. به طور مثال در زاویه گام ثابت صفر درجه و سرعت نوک ۱/۲۵، زاویه حمله هندسی بین دامنه‌های ۳ و ۱۰ و ۲۰ و ۳۶ درجه این نوسان خواهد کرد که با اعمال زاویه گام با ترتیب بین ۲۲/۲۹ ± و ۱۸/۷۹ ± و ۱۳/۷۹ ± و ۵/۷۹ ± درجه خواهد بود.

نکته قابل توجه این که در تمامی حالت‌های با گام متغیر، راه‌اندازی اولیه توربین بهبود یافته است. در سرعت‌های نوک بیشتر از ۲، ضریب توان توربین با دامنه ۱۰ درجه در مقایسه با دامنه‌های ۰ و ۳ درجه با شیب بیشتری افت می‌کند به طوری که در این سرعت‌های نوک، توربین در زوایای گام ثابت و متغیر با دامنه ۳ درجه، توان بیشتری در مقایسه با توربین با دارای دامنه زاویه گام ۱۰ درجه تولید می‌کند. در شکل ۱۷ نمودار قطبی توزیع گشتاور آبی پره برای زاویه گام ثابت و متغیر با دامنه ۱۰ درجه برای تابع سینوسی در سرعت نوک ۲ به همراه زاویه حمله و اماندگی پره در عدد رینولدز ۳۰۰,۰۰۰ و زاویه حمله‌ای که پره در حالت گام ثابت و متغیر نمایش داده شده است.



شکل (۱۷): اثر زاویه گام روی ضریب گشتاور و زاویه حمله.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، حداکثر مقدار گشتاور در نیمه بالادست چرخش و برای مکان‌هایی که پره دارای زاویه حمله نسبی بالا (حتی پس از محدوده استال پره) تولید می‌شود. در دامنه ۱۰ درجه، به جز زاویه چرخش ۶۵ تا ۱۲۵ درجه که زاویه حمله اندکی از زاویه و اماندگی تجاوز کرده، زاویه حمله در سراسر زاویه چرخش به زیر زاویه و اماندگی نگه داشته است. بنابراین، پره در طول چرخش دچار و اماندگی نمی‌شود. در زاویه چرخش ۰ تا ۵۰ درجه زاویه حمله برای حالت گام متغیر، تفاوت خیلی کمی با زاویه حمله قدیمی دارد. بنابراین، در توان خروجی بین این دو حالت تفاوتی حاصل نشده است. اما بیشتر تفاوت در توان خروجی در بالادست در زوایای

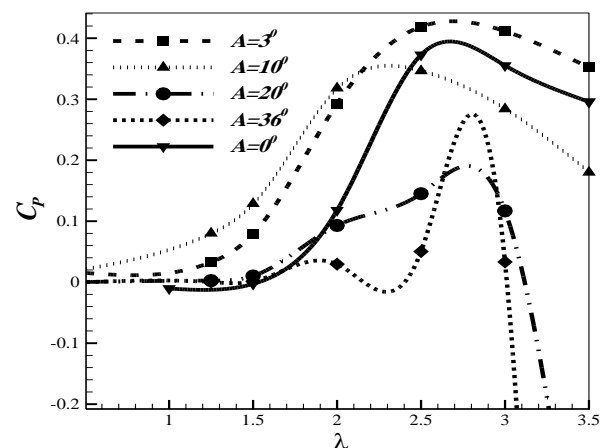
جدول (۴): مقادیر زوایای گام و حمله اولیه و ثانویه برای تابع

سینوسی و در $\lambda=1/25$ و $\theta=150$.

زاویه چرخش (درجه)	زاویه حمله اولیه (درجه)	زاویه حمله ثانویه (درجه)	زاویه گام سینوسی (درجه)	دامنه گام (درجه)
۰	۰	۲۳/۷۹	۳	زاویه گام ثابت
۱۵۰	-۱/۵	۲۲/۲۹	۳	زاویه گام متغیر
	-۵	۱۸/۷۹	۱۰	
	-۱۰	۱۳/۷۹	۲۰	
	-۱۸	۵/۷۹	۳۶	

۳-۳- تأثیر زاویه گام سینوسی بر ضریب عملکرد توربین

شکل ۱۶ نشان‌دهنده مقایسه نمودار ضریب عملکرد بر حسب سرعت نوک برای زاویه گام متغیر سینوسی در دامنه‌های گام مختلف می‌باشد. همان‌طور که در این نمودار مشاهده می‌شود ضریب توان توربین گام متغیر با دامنه ۳ درجه در همه سرعت‌های نوک، بیشتر از ضریب توان در زاویه گام ثابت صفر درجه می‌باشد. استفاده از توربین با دامنه‌های گام بیشتر از ۲۰ درجه نتیجه عکس داشته و توان توربین در تمامی سرعت‌های نوک نسبت به زاویه گام صفر درجه کاملاً افت کاهش یافته است. در سرعت‌های نوک پایین (کمتر از ۲)، مقدار ضریب توان برای یک توربین با دامنه حرکتی ۱۰ درجه، کمی بیشتر از همان توربین با دامنه زاویه گام کمتر ۳ درجه می‌باشد، ولی به هر حال در این سرعت‌های نوک، ضریب توان توربین‌های دارای زاویه گام متغیر با دامنه‌های ۳ و ۱۰ درجه بیشتر از توربین با زاویه گام ثابت می‌باشد.



شکل (۱۶): اثر دامنه زاویه گام بر عملکرد توربین داریوس.

چرخش ۹۰ تا ۱۸۰ درجه، جایی که پره آماده می‌شود تا از بالادست به پایین دست حرکت کند، مشاهده می‌شود. در این زوایای چرخش، زاویه حمله پره با استفاده از روش گام متغیر نوسان خیلی کمتری نسبت به پره گام ثابت داشته و فاکتور اساسی ایجاد واماندگی که تغییر ناگهانی زاویه حمله می‌باشد، از بین رفته است. در زوایای چرخش ۸۵ تا ۱۲۵ درجه زاویه حمله با استفاده از روش گام متغیر کاهش داشته ولی هنوز اندکی بیشتر از زاویه حمله واماندگی می‌باشد اما در این زوایا نیز توان با استفاده از روش گام متغیر، توان افزایش نشان داده است. پس می‌توان نتیجه گرفت که کاهش زاویه حمله پره‌ای که دچار واماندگی شده حتی اگر این کاهش زاویه حمله پره را دوباره به زیر واماندگی نرساند، برای آئرو دینامیک پره مفید می‌باشد. این افزایش توان در پایین دست توربین نیز ادامه داشته است و علی‌رغم این که زاویه حمله در روش گام متغیر در پایین دست اندکی افزایش داشته است اما از آنجا که توان تولید شده در این ناحیه به شدت به شرایط آئرو دینامیکی پره در بالادست وابسته است و از آنجا که در توربین با زاویه گام ثابت، گردابه‌های ناشی از جدایش جریان از بالادست به سمت پایین دست حرکت کرده و به پره‌های قرار گرفته در این ناحیه برخورد می‌کند، توان در روش گام ثابت کم‌تر می‌باشد. برخلاف این، در پره گام متغیر گردابه‌های جدا شده از پره‌های بالادست شدیداً کاهش می‌یابد بنابراین، در پایین دست تداخل گردابه‌ها با پره‌ها به وجود نمی‌آید و توان افزایش می‌یابد.

بنابراین، می‌توان مشاهده نمود که توربین دارای زاویه گام متغیر توانسته به خوبی واماندگی دینامیکی را از بین ببرد و بدین ترتیب مدت زمانی را که توربین در ناحیه واماندگی طی می‌کند را کاهش یا حذف نماید.

۴- مکانیزم پیشنهادی برای توربین مجهز به زاویه گام متغیر

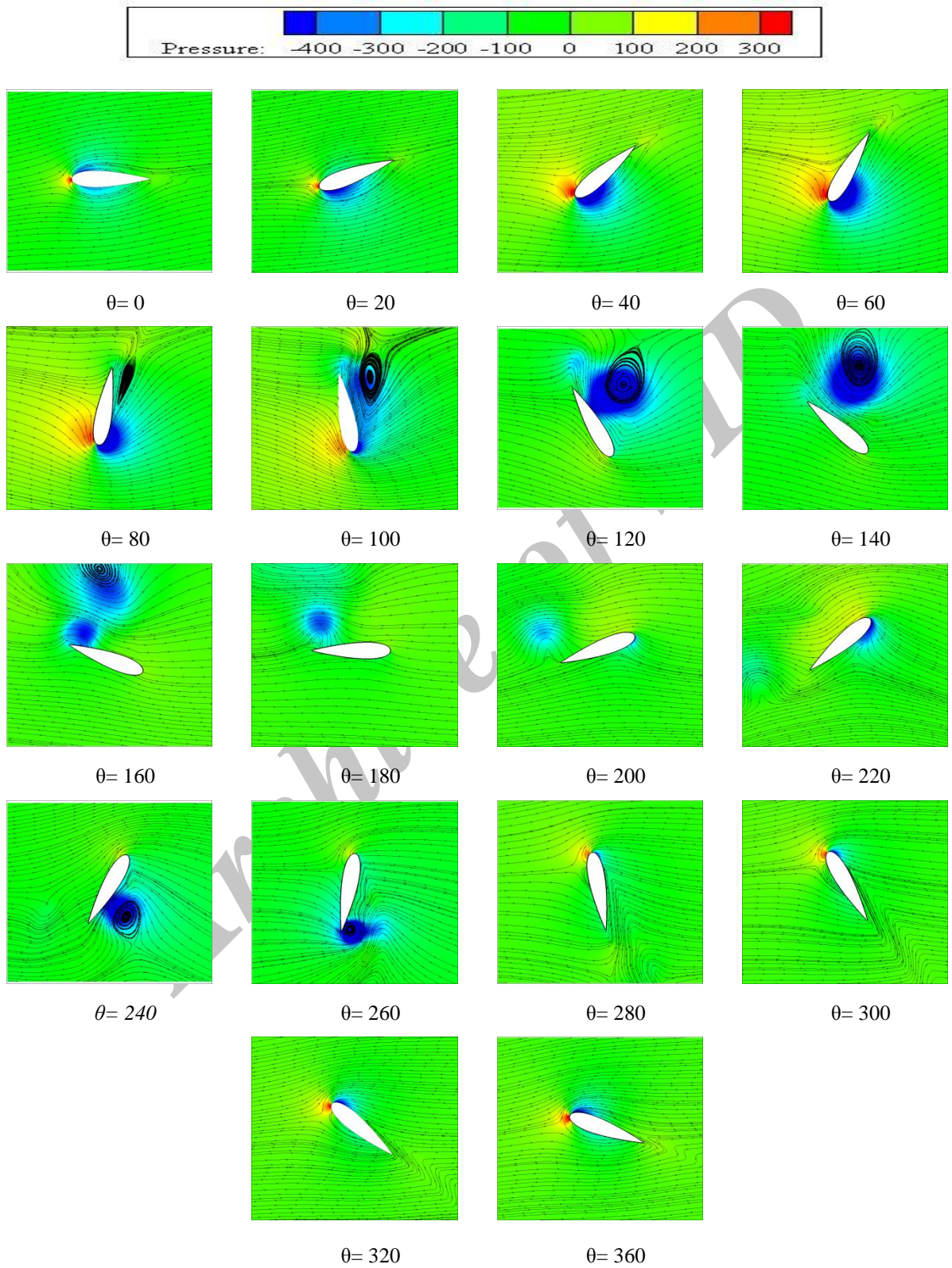
شکل ۲۰ نمایی از توربین مجهز به زاویه گام متغیر پیشنهادی را نشان می‌دهد. این مکانیزم شامل یک بادامک یا خروج از مرکزی می‌باشد که سه قرقره متحرک بر روی آن قرار گرفته و می‌چرخند (برای سادگی، شفت مرکزی مدل نشده است). با چرخش روتور این سیستم زاویه گام پره را کنترل و تغییر می‌دهد. زاویه گام هم بر طبق خروج از مرکزی بین محور چرخش و مرکز بادامک تعیین می‌شود. مرکز روتور و بادامک به کمک میله‌های رابط به پره‌ها متصل می‌گردد. این میله‌ها به دو بخش تقسیم می‌شود. یکی از این قسمت‌ها متحرک و دیگری ثابت می‌باشد. میله ثابت از یک سمت به قسمت لبه حمله و به فاصله ۰/۲۵ طول وتر از لبه حمله پره و از سمت دیگر به مرکز چرخش روتور پین می‌گردد. قسمت کلیدی این مکانیزم میله رابط متحرک بوده که از یک سمت به قرقره‌ای متصل است که روی بادامک خروج از مرکزی قرار گرفته و از سمت دیگر به مرکز یا لبه فرار پره لولا می‌شود.

با توجه به افزایش حدوداً ۴۰ درصدی توان در توربین داریوس گام متغیر نسبت به توربین با زاویه گام ثابت، می‌توان انتظار داشت که تولید انبوه این توربین‌ها با زاویه گام متغیر می‌تواند سبب افزایش سالیانه تولید انرژی الکتریسیته شده و راه را برای ورود انرژی الکتریسیته تولیدی از باد به بازارهای جهانی هموارتر سازد.

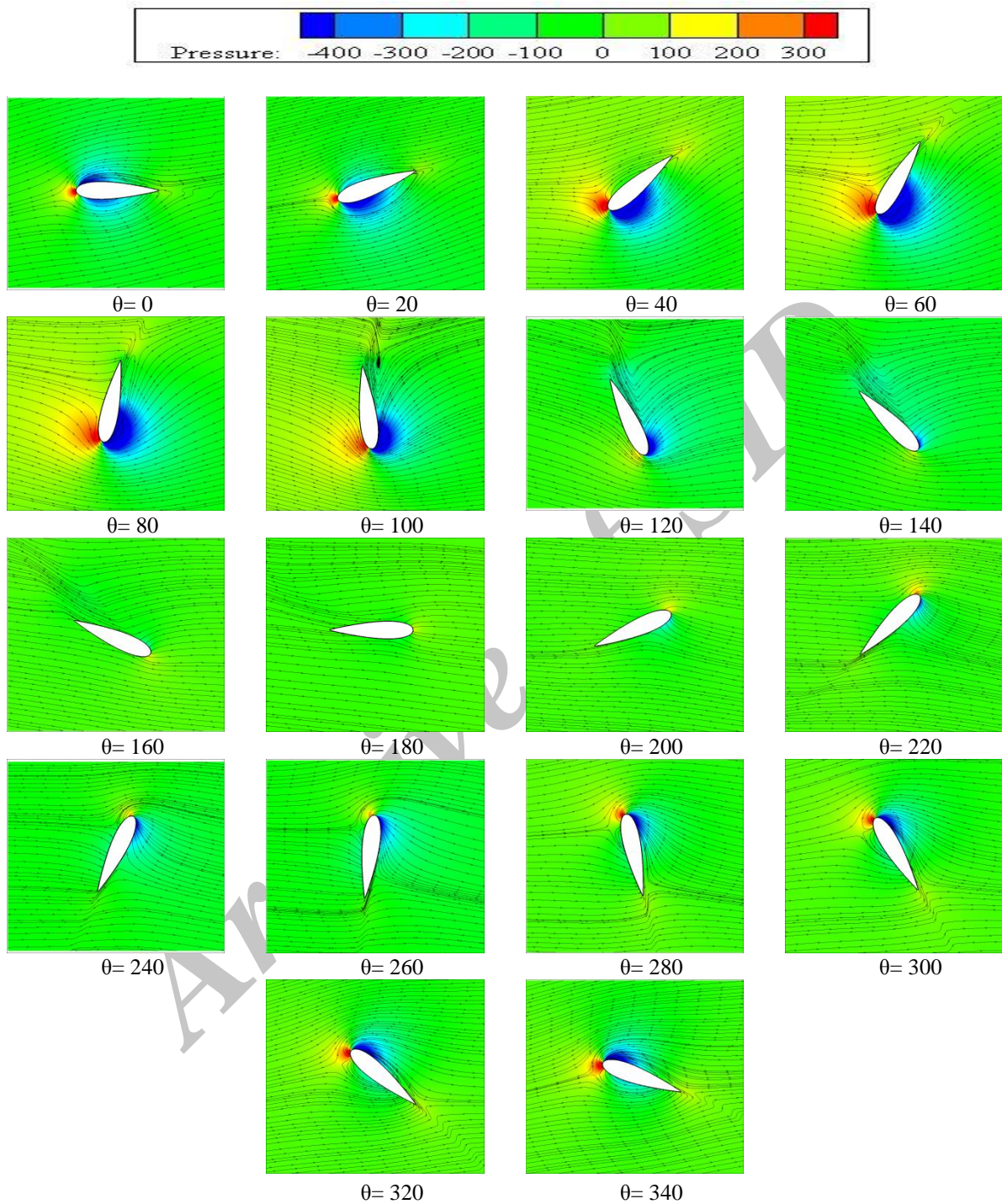
چرخش ۹۰ تا ۱۸۰ درجه، جایی که پره آماده می‌شود تا از بالادست به پایین دست حرکت کند، مشاهده می‌شود. در این زوایای چرخش، زاویه حمله پره با استفاده از روش گام متغیر نوسان خیلی کمتری نسبت به پره گام ثابت داشته و فاکتور اساسی ایجاد واماندگی که تغییر ناگهانی زاویه حمله می‌باشد، از بین رفته است. در زوایای چرخش ۸۵ تا ۱۲۵ درجه زاویه حمله با استفاده از روش گام متغیر کاهش داشته ولی هنوز اندکی بیشتر از زاویه حمله واماندگی می‌باشد اما در این زوایا نیز توان با استفاده از روش گام متغیر، توان افزایش نشان داده است. پس می‌توان نتیجه گرفت که کاهش زاویه حمله پره‌ای که دچار واماندگی شده حتی اگر این کاهش زاویه حمله پره را دوباره به زیر واماندگی نرساند، برای آئرو دینامیک پره مفید می‌باشد. این افزایش توان در پایین دست توربین نیز ادامه داشته است و علی‌رغم این که زاویه حمله در روش گام متغیر در پایین دست اندکی افزایش داشته است اما از آنجا که توان تولید شده در این ناحیه به شدت به شرایط آئرو دینامیکی پره در بالادست وابسته است و از آنجا که در توربین با زاویه گام ثابت، گردابه‌های ناشی از جدایش جریان از بالادست به سمت پایین دست حرکت کرده و به پره‌های قرار گرفته در این ناحیه برخورد می‌کند، توان در روش گام ثابت کم‌تر می‌باشد. برخلاف این، در پره گام متغیر گردابه‌های جدا شده از پره‌های بالادست شدیداً کاهش می‌یابد بنابراین، در پایین دست تداخل گردابه‌ها با پره‌ها به وجود نمی‌آید و توان افزایش می‌یابد.

۳-۴ اثر زاویه گام متغیر سینوسی بر ساختار جریان حول روتور توربین

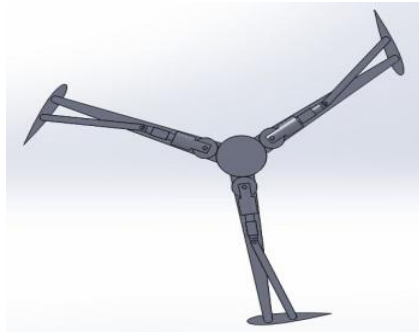
شکل‌های ۱۹-۱۸ به ترتیب نمایانگر خطوط جریان و توزیع فشار اطراف توربین بادی داریوس برای زاویه گام ثابت و متغیر در سرعت نوک پایین ۱/۵ می‌باشد. در هر زاویه چرخشی مقدار زاویه حمله پره در حالت گام ثابت و متغیر نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل‌ها مشخص است، برای زاویه گام متغیر تغییرات خطوط جریان حول روتور کم‌تر می‌باشد. به عبارتی شکل خطوط جریان اطراف پره در مکانیزم گام متغیر در مقایسه با مکانیزم گام ثابت منظم‌تر و پایدارتر بوده و در زوایای گام ثابت، بیشترین جدایش از بالادست توربین و در



شکل (۱۸): کانتور فشار حول پره ناکا ۰۰۱۲ در توربین گام ثابت در طول یک دور چرخش و در سرعت نوک ۱/۵.



شکل (۱۹): کانتور فشار حول پره ناکا ۰۰۱۲ در توربین گام متغیر در طول یک دور چرخش و در سرعت نوک ۱/۵.



شکل (۲۰): طرحی از توربین بادی داریوس مجهز به مکانیزم گام متغیر.

2. Xisto, C. M., Páscoa, J.C., Leger, J.A., and Trancossi, M., "Wind Energy Production, Using an Optimized Variable Pitch Vertical Axis Rotor", American Society of Mechanical Engineers, Vol. 1, pp. 1-7, 2014.
3. Zamani, M., Maghrebi, M.J., and Varedi, S.R. "Starting Torque Improvement Using J-Shaped Straight-Bladed Darrieus Vertical Axis Wind Turbine by Means of Numerical Simulation", Renewable Energy, Vol. 95, pp. 109-126, 2016.
4. Kiwata, T., Yamada, T., Kita, T., Takata, S., Komatsu, N., and Kimura, S. "Performance of a Vertical Axis Wind Turbine with Variable-Pitch Straight Blades, Utilizing a Linkage Mechanism", Journal of Environment and Engineering", Vol. 5, No. 1, pp. 213-225, 2010.
5. Javadi, M., Golshani, A., Ghasemi, A.M., Anbarsooz, M., and Moghiman, M., "Improving Power Plant Efficiency, Using Water Droplet Injection in Air Condensers", World Academy of Sciences, Engineering and Technology, Vol. 62, pp. 619-623, 2010.
6. ArabGolarche, A., Moghiman, M., and Javadi MalAbad, S.M. "Numerical simulation of Darrieus Wind Turbine, Using Interaction", Modares Mechanical Engineering, Vol. 15, No. 12, pp. 143-152, 2015 (in Persian).
7. Bos, R. "Self-Starting of a Small Urban Darrieus Rotor", Master of Science Thesis, Aerospace Engineering, Delft university of technology, Delft, 2012.
8. Carr, L.W., McAlister, K.W., and McCroskey, W.J. "Analysis of the Development of Dynamic Stall, Based on Oscillating Airfoil Experiments", AMES Research Center, Technical Report, 1977.
9. Fraunie, P., Beguier, C., Paraschivoiu, I., and Brochier, G., "Water Channel Experiments of Dynamic Stall on Darrieus Wind Turbine Blades", Journal of Propulsion and Power, Vol. 2, No. 5, pp. 445-449, 1986.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر زاویه گام متغیر، زوایای گام ثابت مثبت و منفی در بهبود عملکرد یک توربین محور عمودی به وسیله شبیه‌سازی عددی دوبعدی و به‌وسیله شبکه‌بندی دینامیکی متحرک بررسی گردیدند. در این مطالعه، نتایج زیر به‌دست آمد: عملکرد توربین محور عمودی تحت تأثیر بزرگی و نرخ افزایش زاویه حمله می‌باشد و در سرعت‌های نوک پایین به دلیل جدایش جریان حول پره و واماندگی، توربین گام ثابت توانایی تولید توان و راه‌اندازی پایینی دارد. با روش تنظیم خودکار زاویه گام پره که در این مقاله پیشنهاد شد، یک برنامه مشخص برای تغییر زاویه گام پره بر اساس تابعی از موقعیت مکانی پره در طول سیکل چرخشی پره تعریف شده و اندازه و تغییرات زاویه حمله کاهش می‌یابد. بنابراین اثرات واماندگی در نیمه پشتی توربین برای سرعت‌های میانه کاهش یافته و در سرعت‌های نوک پایین، پره می‌تواند با تغییر جهت خود گشتاور لازم برای حرکت توربین ایجاد کند. مدل آشفستگی SST $k\omega$ به خوبی توانایی پیش‌بینی گردابه‌های روی پره‌های روتور در سرعت‌های نوک پایین را دارا می‌باشد. نتایج همچنین نشان داد که توربین دارای پره‌هایی با زاویه گام ۳- درجه بیشترین توان خروجی و بهترین عملکرد خود راه‌اندازی را دارا هست. همچنین توربین مجهز به زاویه گام متغیر سینوسی با دامنه ۳ درجه در همه سرعت‌های نوک نسبت به توربین با زاویه گام صفر توان بیشتری تولید می‌کند.

۶- مراجع

1. Ghasemi, A., Olinger, D.J., and Tryggvason, G., "Computational Simulation of the Tethered Undersea Kites for Power Generation", The ASME 2015 International Mechanical Engineering Congress & Exposition, IMECE 2015, pp. 43-051, Houston, USA, 2015.

10. Leishman, G.J. "Principles of Helicopter Aerodynamics with CD Extra", 2nd Edition, Cambridge University Press: Cambridgeshire 2006.
11. Versteeg, H.K. and Malalasekera, W. "An Introduction to Computational Fluid Dynamics: the Finite Volume Method", Pearson Education, Upper Saddle River, United States, 2007.
12. Ismail, M., "Aerofoil Profile Modification Effects for Improved Performance of a Vertical Axis Wind Turbine Blade", Master of Science Thesis, Computer Science Engineering, Bangladesh University of Engineering and Technology, Dhaka, 2014.
13. Mohamed, M.H., Ali, A.M., and Hafiz, A.A. "CFD Analysis for H-Rotor Darrieus Turbine as a Low Speed Wind Energy Converter", Engineering Science and Technology, An International Journal, Vol. 18, No. 1, pp. 1-13, 2015.
14. Castelli, M.R., Englaro, A., and Benini, E. "The Darrieus Wind Turbine: Proposal for a New Performance Prediction Model Based on CFD", Energy, Vol. 36, No. 8, pp. 4919-4934, 2011.
15. Elkhoury, M., Kiwata, T. and Aoun, E., "Experimental and Numerical Investigation of a Three-dimensional Vertical Axis Wind Turbine with Variable-Pitch", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 139, pp. 111-123, 2015.
16. Fiedler, A.J. and Tullis, S. "Blade Offset and Pitch Effects on a High Solidity Vertical Axis Wind Turbine", Wind Engineering, Vol. 33, No. 3, pp. 237-246, 2009.
17. ArabGolarche, A., Moghiman, M., and S.M. Javadi MalAbad, "Investigation of Effective Parameters on Darrieus Wind Turbine Efficiency with Aerodynamics Models", Modarres Mechanical Engineering, Vol. 15, No. 5, pp. 295-301, 2015 (In Persian).