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

امیر ساغری چی'، محمدجواد مغربی ٔ و علیرضا عرب گلارچه ٔ

دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه فردوسی مشهد

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

چکیدہ

توربین داریوس توربین بادی محورعمودی بر پایه نیروی بر آ است که به دلیل طراحی ساده و عدم وابستگی به جهت باد مورد توجه محققان قرارگرفته 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 زاویـه 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 بهصورت غیردائمی و دوبعدی و با استفاده از CFD انجام شده و برای چرخش روتـور تـوربین از روش شبکهبنـدی متحرک استفاده شده است. با مقایسه پرههایی با زوایای گام ثابت تغییر داده و اثرات منفی واماندگی دینامیکی را از بین ببرد. در این مطالعه، شبیهسازیها بهصورت غیردائمی و دوبعدی و با استفاده از CFD انجام شده و برای چرخش روتـور تـوربین از روش شبکهبنـدی متحرک استفاده شده است. با مقایسه پرههایی با زوایای گام ثابت مختلف (^o۳± و⁰9± و⁰11±) نتیجهگیری شد که تنظیم گام در زاویه ^o۳–سبب میتفاده شده است. با مقایسه پرههایی با زوایای گام ثابت مختلف (^o۳± و⁰9± و⁰11±) نتیجهگیری شد که تنظیم گام در زاویه ^o۳–سبب میتواند در سرعتهای نوک کم جدایش جریان را روی پرهها از بین ببرد و با به تاخیر انداختن یا حذف واماندگی دینامیکی، سبب افزایش بازدهی میتواند در 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

amirsagharichi@yahoo.com - کارشناس ارشد:

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

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

۱– مقدمه

کاهش وابستگی به سوختهای فسیلی و جایگزینی انرژیهای تجدیدیذیر به طور گسترده در دهههای گذشته مطرح و بررسی شده است [۱]. انـرژی بـاد یکـی از منـابع انـرژی تجدیـدپـذیر می باشد. 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 نمی گردد. توربین های بادی از نظر جهت محور دوران به دو دسته کلی توربینهای بادی محور افقی و توربین های بادی محور عمودی تقسیم می شوند [۳ - ۲]. توربین های بادی محور افقی برای مدت های طولانی است که در مزارع بادی در مقیاس بزرگ مورد استفاده قرار می گیرند. در مورد این توربین ها می توان فرض کرد که زاويه حمله پره برحسب زاويه چرخش تغيير نمى كند، بنابراين امکان تنظیم زاویه چرخش پره^۳ در یک حالت بهینه برای تولید حداکثر توان در محدوده سرعت های مختلف باد امکان پذیر است. توربینهای محور عمودی، خود به دو دسته توربینهای مبتنی بر نیروی برآ، مثل توربین، ای داریوس و مبتنبی بر نیروی پسا، دستهبندی میشوند. در توربینهای داریوس، وقتی یرہ شروع به چرخش می کند، زاویہ حملہ پرہ باعث تولید گشتاوری در جهت چرخش توربین می شود. این گشتاور سبب حرکت یک ژنراتور شده و باعث تبدیل قسمتی از انرژی باد به الكتريسيته ميشـود [٢]. تـوربينهـاي بـادي داريـوس عمومـاً تشکیل شده از دو یا سه پره مستقیم یا منحنی شکل هستند. یکی از مزایای مهم و تفاوت اصلی توربین های 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 محورعمودی را برای استفاده در نواحی جغرافیایی دارای بادهای متلاطم (مثل مناطق شهری)، مناسب میسازد [۴]. در توربینهای بادی محورعمودی، اثر پسای شکلی روی پره در سرعتهای نوک پایین کمتر میباشد و نسبت به توربینهای بادی محورافقی، نویز و سروصدای کمتری تولید می گردد. ارتفاع پایین نصب این توربین ها، سبب سهولت نصب گیربکس و ژنراتور میشود. همچنین برای ساخت توربینهای بادی محور

1- Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT)

4- Darrieus Wind Turbine

عمودی (H-Rotor) عموماً از مقطعهای متقارن استفاده می شود که از لحاظ هزینه ساخت کم هزینه می باشند. 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 فنّاوری جدیدی می باشد تا توربین های بادی محورعمودی بتوانند بازدهی برابر یا نزدیک به توربین های بادی محور افقی داشته باشند. راه کار پیشنهادی برای این هدف استفاده از توربین هایی متشکل از پرههایی با زاویه گام متغیر⁴ می باشد [۲].

1-۲- آئرودینامیک 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 می شود [۵]. $\alpha = \tan^{-1}(\frac{\sin \theta}{\cos \theta + \lambda})$ (۱)

دومین پارامتر تأثیرگذار بر عملکرد توربین سرعت نوک پره^{⁷ است که به عنوان نسبت سرعت پره به سرعت جریان آزاد شناخته می شود و به صورت معادله (۲) بیان می شود:}

 $\lambda = \frac{R.\omega}{U_{\infty}}$ (۲) تغییب رات زاویه حمله بر حسب زاویه چـرخش پـره در سرعتهای نوک مختلف برای یک پره توربین داریوس در شکل ۱ نمایش داده شدهاست.



5- Variable Pitch Turbine

6- Tip Speed Ratio (TSR)

²⁻ Vertical Axis Wind Turbine (VAWT)

³⁻ Azimuthal Angle

همانطور که از شکل ۱ مشاهده می شود، هـر پـره تـوربین بادی در طول چرخش خود یک تغییر نوسانی در زاویه حمله را تجربه می کند به طوری که در سرعتهای نوک پایین، زاویه حمله پره از زاویه واماندگی تجاوز می کند. این دو عامل (نوسان بیش از حد زاویه حمله همراه با افزایش یا کاهش سریع مقدار زاویه حمله)، سبب می شود تا لایه مرزی از سطح پره جدا شده و يره اصطلاحاً واماندگی ديناميکی را تجربه کند. واماندگی ديناميكي سبب كاهش توان توليدي، وارد شدن بارهاي نوساني 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 می کند [۶]. همان طور که در شکل ۱ مشاهده می شود، هرچه سرعت نوک افزایش یابد، زاویـه حملـه کاهش یافته و محدوده ای که در بالادست توربین (زوایای چرخش ۰ تا ۱۸۰ درجه) واماندگی را تجربه می کند، کاهش می یابد. البته در سرعتهای نوک خیلی زیاد به دلیل کاهش بیش از حد زاویه حمله، بر میزان پسای وارد بر پره نیز افزوده می شود [۶]. به همین دلیل در طراحی توربین های بادی محور عمودی هدف کاهش هر دو مقدار واماندگی و پسا به منظور دست یابی به بهترین عملکرد توربین می باشد. 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. همان طور که از این شکل مشاهده می گردد، در سرعتهای نوک پایین (۸/۳/۵) به دلیل افزایش زاویه حمله (شکل ۱)، پره مدت زمان زیادی را در شرایطی طی میکند که زاویه حمله خیلی زیاد است.



¹⁻ Dynamic Stall

بنابراین، پدیده واماندگی رخ میدهد و در نهایت منجر به جدایش جریان از سطح پره می شود و توان کاهش می یابد. همچنین این شکل نشان میدهد که در سرعتهای نوک میانه ($\lambda < \lambda$) زاویه حمله پره در محدوده کمتر از زاویه ($\pi/\Delta < \lambda < 0$) واماندگی پره قرار گرفته و حداکثر توان توربین به دست میآید. ویژگی دیگر آئرودینامیکی توربینهای بادی محور عمودی این است که در نیمه بالادست توربین، در مناطقی که واماندگی رخ داده است، گردابههایی (با نواحی کمفشار) تولید می شوند. این گردابه ها از مسیر داخل روتور عبور کرده و با پرههای قرار گرفته در نیمه پاییندست برخورد میکنند که این اثر منجر به کاهش تولید توان توربین در نیمه پاییندست توربین می شود [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 ً قادر بهادامه 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 ، 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 جداشده برای آگاهی از شرایط آئروديناميكي وكاهش اثرات آن حول يره مهم و اساسي می باشد. بنابراین در ادامه به دلیل ایجاد واماندگی دینامیکی و مراحل شكل گيرى اين پديده پرداخته مى شود. اولين تجسم واماندگی دینامیکی برای توربین های بادی محور عمودی توسط بروچیر و همکاران در سال ۱۹۸۶ صورت گرفت [۹]. این تجسم با استفاده از کانال آب، و توسط ال 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. لیشمن [۱۰] در سال ۲۰۰۶ یک توصیف کلی از مراحل شکل گیری پدیده واماندگی دینامیکی ارائه داد. همانطور که از شکل ۳ مشاهده می شود، در طی رخداد واماندگی دینامیکی، در ابتدا زاویه حمله پره از

²⁻ Flow Separation

³⁻ Dead Band

⁴⁻ Mach Number

زاویه واماندگی استاتیکی تجاوز میکند اما در جریان روی ایرفویل تغییر خاصی مشاهده نمیشود و لایهمرزی نازک باقی میماند و جریان برگشتی در آن ملاحظه نمی گردد. هرچه زاویه حمله ایرفویل بیشتر می گردد، جریان لایهمرزی روی سطح پره شروع به حرکت معکوس میکند. در مرحله دوم گردابههای بزرگتر و جریان کاملاً برگشتی در لبه فرار پره شکل می گیرد و به سمت لبه حمله حرکت میکند. وقتی جریان برگشتی به لبه حمله می رسد، یک گردابه قوی در لبه حمله پره شکل می گیرد.



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 می یابد و مرکز فشار به انتهای پره انتقال می یابد. در مرحله آخر وقتی که گردابه لبه حمله از لبه فرار دور شود، یک افت ناگهانی در ضریب برآ رخ مي دهد. پس از اين مرحله جريان روي پره كاملاً جدا مي شود و گردابههای کوچکتر شروع به تشکیل می کنند و از لبه فرار پره جاری می شوند. چنین شرایطی نایایداری در شرایط جریان حول پره را تشدید می کند و هرچه پره بیشتر نوسان کند جریان بیشتری از لبه حمله جدا می شود. بسته به نرخ یے پی شر، فرايند اتصال دوباره جريان ممكن است تا زماني كه زاويه 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 می گردد. بنابراین هر عاملی که به کاهش محدود زاویه حمله کمک نماید، سبب بهبود عملکرد توربین داریوس میگردد و در

سرعتهای نوک مختلف باید از وقوع این پدیده جلوگیری و از ایجاد اثرات آن حتی الامکان 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 توربین های بادی محورعمودی 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 می شود و حرکت نوسانی پره و تغییرات زاویه حمله در تمامی سرعتهای نوک کاهش می یابد. پیش بینی می شود یک توربین بادی محور عمودی داریوس مجهز به فنّاوری زاویه گام متغیر، در مقایسه با توربین بادی گام ثابت، می تواند اثرات منفی واماندگی دینامیکی پره (مثل کاهش بازدهی و ارتعاش) را کاهش و سبب بهبود توان توربین گردد. این پیش بینی براساس مقایسه ضریب توان و گشتاور توربین انجام میگرد که ضریب توان C_p و ضریب گشتاور C_m یک توربین بادی محور عمودی به صورت زیر تعریف می شود:

$C_P = \frac{P}{I}$,	(٣)
$\frac{1}{2}\rho A V^3$	
$C_m = \frac{C_P}{1}$.	(۴)
λ	

برای یک توربین محور عمودی مساحت روتور A از حاصلظرب 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 شده است. نمایی از این توربین در شکل ۴ و مشخصات توربین مورد بررسی در جدول ۱ نشان دادهشده است.



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

كميت	N .:	مشخصات
	تماد	توربين
ناکا۲۰۱	-	پروفیل پرہ
$\Lambda\Delta/\Lambda$	С	طول وتر پره (mm)
۱۰۳۰	R	شعاع توربين (mm)
$\chi/\chi\chi\chi$	Н	ارتفاع <i>(mm</i>)
1/238	А	مساحت
•/۵	σ	صلبيت
٣	Ν	تعداد پره

جدول (۱): مشخصات هندسی توربین [۱۴].

۲-۱ تنظیمات کلی حلگر برای شبیهسازی عددی

در این مطالعه به دلیل لزوم پیش بینی دقیق تغییرات رفتار جریان به دلیل تغییر زاویه گام، از روش دینامیک سیالات محاسباتی و نرمافزار تجاری انسیس فلوئنت' ۱۵ به کمک معـادلات ^۲URANS بـرای شـبیهسـازی اسـتفاده شـده ا معادلات حاكم براى جريان آشفته و تراكم ناپذير اطراف توربين داريوس، معادلات دوبعدى متوسط رينولدز ناويراستوكس هستند. این معادلات بر اساس روش حجم محدود در نـرمافـزار انسیس فلوئنت نسخه ۱۵ گسسته سازی شدهاند. جریان به صورت گذرا فرض شده است. برای شبیه سازی حرکت توربین با استفاده از شبکه متحرک، از مدل شبکه لغزان استفاده شده است. در این روش ناحیه خارجی روتور ثابت فرض می شود و ناحیه روتور با یک سرعت زاویه ای مشخص می چرخد. برای دستیابی به دقت بالای حل برای گسسته سازی معادلات شامل تـرمهای انتقال (از قبیل مومنتوم و انـرژی و آشـفتگی) از الگوریتم گسسته سازی مرتبه دوم بالادست و از الگوریتم ضمنی کراندار برای گسسته سازی ترم زمانی استفاده شدهاست. در نهايت مجموع معادلات گسسته شده توسط الگوريتم پيزو اجرا، و طرح ضمنی پس رو مرتبه دو^۳ برای ترمهای نایایا استفاده شده است. بسیاری از محققان استفاده از گام زمانی متناسب با چـرخش تـوربین بـه انـدازه ۱ درجـه را بـرای کاربردهـای شبیهسازی عددی توربین بادی داریوس پیشنهاد دادهاند [۱۴].

1-ANSYS FLUENT

2-Unsteady Reynolds average Navier-Stokes

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.

شبیه سازی دوبعدی توربین بادی محور عمودی ایجاب می کند تا دامنه محاسباتی به سه ناحیه مجزا تقسیم شود: یک ناحیه خارجی مستطیلی ثابت که تعیین کننده محدوده کلی دامنه می باشد. یک ناحیه متحرک داخلی دایروی شامل روتور که توسط ناحیه ثابت مستطیلی در بر گرفته شده است و ناحیه متحرک داخلی دایروی شامل پره ها که توسط ناحیه روتور در برگرفته شده اند. 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 نمایش داده شده است. در دامنه ثابت قرارگرفته است. برای مستطیلی با ابعاد ۲۱×۲۱ قرار دارد. مرکز دامنه چرخان روتور 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.



³⁻ Second order Backward Implicit Scheme

بیشتر در نظر گرفته شده تا شرایط بهتری برای نقاطی که گرادیانهای 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 گرفتهشده 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 لزج ً 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. همان طور که ملاحظه می شود گشتاور به دست آمده از دو شبکه ریز و متوسط، بسیار به هم نزدیک می باشند. بنابراین، از شبکه بندی متوسط، به دلیل هزینه محاسباتی پایین و دقت بالا برای انجام شبیهسازی استفاده می شود. در جدول ۲ جزییات شبکه بندی های مختلف مطالعه را آورده است. همه اطلاعات دادهشـده در جـدول بـرای ایرفویل NACA۰۰۲۱ و در سرعت نوک ۱/۵ می باشد.



۱/۵

انگیزه اصلی جدا کردن دامنه یرهها از دامنه روتور، توانایی شبیه سازی مکانیزم گام متغیر می باشد که در طی آن پره حول دو محور مجزا خواهند چرخید. اولین چرخش حول محور z و با سرعت زاویه ای ω و دومین چرخش حول 1/10 طول وتر از لبه حمله با سرعت زاویهای مناسب، برای تغییر زاویه گام میباشد. چرخش چهار قسمت دامنه دینامیکی (سه دامنه شامل پره ها 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 می شود. این کد وارد حلگر شده و برای هدایت چرخش پره ها از آن استفاده می شوند. شرایط مرزی در شکل ۵ نشان داده شده است. شبیهسازیها تا زمانی ادامه پیدا می کند 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 دستيابي مي باشد. بنابراين، تمام نتايج بهدست 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 می کشد 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

مهم ترین شاخص موفقیت یک شبکه بندی مناسب در مسائل مهندسی، توانایی پیش بینی درست زمان و مکان جدایش جریان حول پرههای توربین توسط حلگر می باشد. شبکه بندی به وسیله نرمافزار گمبیت^۲ نسخه ۲/۴/۶ صورت گرفته و به دلیل کارآمدتر بودن شبکه بندی غیر ساختاریافته برای هندسه های غیرمتقارن، از این نوع شبکه بندی استفاده شده است [16]. به منظور پیش بینی دقیق تر خواص جریان و محاسبه گرادیان ها، ریز ترین شبکه غیر ساختاریافته در دامنه پرهها انتخاب شده است. در لبه حمله و فرار پره، تراکم نقاط

3- Viscose Sub Layer

¹⁻ User Defined Function (UDF)

²⁻ Gambit

جدول (۲): شبکهبندی مورداستفاده در سرعت نوک ۱/۵ و

	سرعت باد ۹ متر بر ثانیه.	•
\mathbf{Y}^{+}	تعداد سلول	شبکه
۰/۸۸۶۷	10.484	درشت
•/9577	47180	متوسط
•/۶۴۳١	961471	ريز

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 پرداخته اند، رفتار جریان را پیشبینی می کند. در جدول ۲ به بررسی فرضیات و روشهای اعمال شده به حل عددی حاضر و حل عددی صورت گرفته توسط کاستلی به مکاران 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

همان طور که در جدول ۳ نشان داده شده، کاستلی و همکـاران در حـل عـددی خـود از مـدل آشـفتگی ٤-K بـرای شبیهسازی استفاده کردهاند. این مدل آشفتگی، توانایی پیشبینی جدایشهای بزرگ جریان را نداشته و مناسب برای شبیه سازی هایی است که جریان کاملاً به سطح جسم چسبیده است [۱۳]. پس می توان دلیل اصلی پیش بینی بیش از حد توان در مدل سازی عددی به کمک مدل K-E 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 شدهاست. این در حالی است که در حل عـددی حاضـر این مقدار ۵/۵ درجه می باشد. 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@ سبب شده تا حل عددی حاضر بهتر بتواند شرایط جریان حول پره (مثل جدایش گردابهها) را شبیهسازی کند.

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- اعتبار سنجی

به منظور اعتبارسنجی نتایج، منحنی ضریب عملکرد توربین برحسب نسبت سرعت نوک تهیه شده و با نتایج آزمایشگاهی و عددی ارائهشده توسط کاستلی و همکاران [۱۴] مقایسه شده است. برای اعتبارسنجی در شبیهسازی عددی از مدل آشفتگی دو معادلهای ۵۵-۲K استفاده شدهاست. شکل ۹ پیشبینی ضریب توان توربین گام ثابت توسط کد عددی برای سرعتهای نوک مختلف را نشان میدهد. همان طور که شکل ۸ نشان می دهد، کد عددی به کمک این مدل آشفتگی توانایی تکرار شکل منحنی ضریب توان آزمایشگاهی را دارا میباشد و می تواند به طور دقیق مقدار سرعت نوکی را که حداکثر ضریب توان بدست میآید را پیشبینی نماید. به طوری که نتایج حاصل از شبیه سازی عددی حاضر، به علت کیفیت شبکه بندی و

www.SID.ir

كاستلى و همكاران.					
ابعاد دامنه حل(m)	\mathbf{Y}^+	کوپلینگ سرعت و فشار	مدل آشفتگی	گام زمانی (درجه)	
14*11	•/•٣	Piso	SST- Kω	•/۵	حل عددی حاضر
4*14	۵	-	К-е	١	حل عددی کاستلی

جدول (۳): تنظیمات حلگر در حل عددی حاضر و حل عددی

٣- بهبود عملكرد توربين

در توربین های بادی داریوس با مقدار صلبیت بالا، زاویه حمله جریان در طول خط وتر پره تغییرات قابل ملاحظهای دارد. به این خاطر دستیابی به مقدار مناسب گام اولیه پرهها به منظور بهبود عملکرد این توربین ها امری ضروری مے باشد [۱۶] در این قسمت، اثـرات زوایـای گـام مثبـت و منفـی روی عملکـرد توربین مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آن در نمودار ۱۰ نشان داده شدهاست. از آنجا که جریان روی قسمت کـمفشـار پـره 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 پـره و خـط ممـاس بـر مسـیر دوران تعريف مي شود (شكل ٩).



زاویه گام ۳- درجه، توربین دارای بیشترین و در زاویه گام

۱۲ درجه دارای کمترین ضریب توان خود می باشد. زوایای گام بیشتر 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- درجـه را مـی تـوان این طور بیان کرد که یک تغییر کوچک زاویه گام پره به سـمت 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 میدهند که تغییرات توان توربین در اثر تغییر زاویه گام در سرعتهای 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 تـوربین بـیشتـر میباشد. به طور مثال در سرعت نوک برابر با ۵ زاویه حمله بین · تا حداکثر ۱۰± درجه نوسان می کند و تغییر ۹ درجه یعنی تغییر ۹۰ درصدی زاویه حمله. این در حالی است که در سرعتهای نوک پایین سرعت نوک برابر با ۱ تغییرات زاویه حمله بین صفر تا حداکثر ۹۰± درجه نوسان میکند و تغییر ۹ درجهای یعنی یک تغییر ۱۰ درصدی زاویه حمله که موجب تأثیر کمتر بر عملکرد توربین می شود [۱۷]. برای بررسی این مشاهدات، رفتار نیروهای وارد بر پرهها که مسئول ایجاد گشتاور روی پرهها 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 نيروهاي فشاري ناچيز به نظر مي آيند. بنابراين، مي توان نتيجـه گرفت که گشتاور روی پرهها به دلیل نیرویی است که به سـبب وجود اختلاف فشار در بالا و پایین پره به وجود میآید. کانتورهای فشار حول پره به همراه خطوط جریان برای زوایای گام ۳ و ۰ و ۳- و در زوایای چارخش ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ درجه به ترتیب در شکلهای ۱۳– ۱۱ نشان داده شدهاند.

زوایای چرخش پایین، جریان متصل به سطح پره سبب تولید براً می شود. با افزایش زاویه چرخش توربین جریان از سطح لبه فرار پره شروع به جدایش می کند و منجر به کاهش نیروی برآ و کاهش گشتاور تولیدی می گردد. هرچه پره در مسیر حرکت خود با جریان پیش میرود پره پسای بیشتر و برآی کمتر تولید می کند و بنابراین گشتاور کمی تولید می شود. زیرا مقدار زیادی از انرژی جنبشی جریان ورودی به انرژی جنبشی گردابه ها تبدیل می شود و به پرهها منتقل نمی شود. اما برای زاویه گام ۳- درجه جریان برای مدت زیادی به صورت خطوط جریان باقی میماند و بنابراین پره برای محدوده زیادی از زوایای چرخش گشتاور مثبت تولید می کند و جدایشی رخ نمی دهد. برای زاویه گام صفر درجه نیز جدایش جریان ملاحظه می گردد. برای زاویه گام ۳ درجه همان طور که ملاحظه می شود یک گردابه در لبه فرار قبل از ورود پره در زاویه چرخش ۹۰ درجه شکل می گیرد و رشد می کند و نسبت به دیگر زوایای گام این گردابه بیشتر رشد می کند. بنابراین گشتاور برای زاویه گام ۳-درجه و سپس برای صفر و پس برای ۳ درجه بیشترین می باشد. همان طور که در مطالعه بالا نشان داده شد، مشکلات مربوط به واماندگی دینامیکی روی توربین بادی محور عمودی را می توان با تغییر زاویه گام اولیه کاهش داد. در این روش، با تغییر زاویه گام، منحنی زاویه حمله در نیمه بالادست توربین کاهش می یابد، اما پیک منفی در زاویه حمله در نیمه پاييندست توربين افزايش مىيابد.



همانطور که مشاهده می شود، 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.

www.SID.ir



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** نمودار ضریب گشتاور یک پره را برحسب زاویه چرخش در زوایای گام ۳- و ۹+ درجه در سرعت نوک ۲/۵ و نشاندهنده اثر زاویه گام روی واماندگی دینامیکی پره می باشد. این نمودار نشان میدهد که افزایش محدود زاویه گام منفی، سبب افزایش زاویه چرخشی میشود که حداکثر توان توربین به دست میآید. 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 سروع به افزایش می کند و بنابراین، پره زوایای گام منفی، حداکثر ضریب توان در زاویه چرخش بالاتری زوایای گام منفی، حداکثر ضریب توان در زاویه چرخش بالاتری اتفاق می افتد و زاویه چرخشی که حداکثر ضریب توان به دست مییابد، افزایش مییابد.

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

۲-۳- روش زاویه گام متغیر

در روش زاویه گام متغیر، پرهها به کمک توابع سینوسی بر طبق زوایای گامی که برحسب زاویه چرخش پره تعریف می گردند، تنظیم می شوند. برای این مطالعه از توابع گام متغیر سینوسی دارای دامنههای ۳ و ۱۰ و ۲۰ و ۳۶ درجه برای كاهش مقدار زاويه حمله استفاده شدهاست. زاويه حمله بهينه 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 پادساعت گرد و زاویه گام منفی در جهت چرخش ساعتگرد تعیین شده است. در شکل 1۵ طرح وارهای از نوع چرخش پرهها به کمک سیستم تنظیم زاویه گام به کمک مکانیزم ۴ میلهای پیشنهاد شده در مرجع [۲] آورده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می گردد، در روش گام متغیر، مقدار زاویه گام در بالادست توربین منفی می شود (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 می شود). در نیمه پایین دست، به کمک سیستم گام متغیر، لبه حمله پره به سمت داخل مسیر دایروی چرخش، تغییر جهت میدهد و بنابراین مقادیر زاویه گام مثبت می شود. از آنجا که در این نیمه، مقدار زاویه حمله منفی می باشد، این تنظیم گام سبب افزایش مقدار زاویه حمله در پاييندست مى گردد. به دليل جابهجايى قسمت كمفشار و پرفشار پره در محل تغییر زاویه حمله بین بالادست و پاییندست در زاویه گام ثابت، توربین گشتاور کمی تولید می کند. 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 می باشد. 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

۹۰ و ۲۷۰ درجه که زاویه حمله مقادیر زیادی دارد، زاویه حمله را کاهش داده و به زوایای گام بهینه رساند تا حداکثر توان استخراج گردد. هدف این کار این است که پسا در زوایای چرخش ۰ و ۱۸۰ درجه کاهش یابد و درحالی که همزمان واماندگی کاهش مییابد، تولید توان به نیمه پشتی توربین کشیده شود. به علاوه نوسان زاویه حمله در ناحیه گذار از بالادست به پایین دست نیز کاهش یافته تا یکی از عوامل اصلی ایجاد واماندگی دینامیکی از بین برود.



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:

(۵)

(6)

 $\theta = \omega. t\beta(\theta) = A. \sin(\theta),$ $\alpha_{New} = \alpha_{old} - \beta(\theta).$

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. همان طور که در این جدول ملاحظه بیشتر از توربین دارای زاویه گام متغیر میباشد و اگر در توربین میگردد، مقدار زاویه گام متغیر میباشد و اگر در توربین داریوس از روش گام متغیر استفاده شود، مقدار دامنه زاویه تابت صفر درجه و سرعت نوک ۱/۲۵، زاویه حمله هندسی بین دمله 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 زاویه حمله به ترتیب بین ۲۲/۲۹± و ۱۸/۷۹± و ۱۳/۷۹± و ۱۳/۹

. $\theta = 10^{-1} e^{-1/1}$ و $\lambda = 0$.					
زاويه	مالا مرما:	ما مح مرما:	زاويه حمله	دامنەگام	
چرخش	(د. حه)	راوید حمد ثانوبه (د. حه)	اوليه	سينوسى	
(درجه)	(,)-/		(درجه)	(درجه)	
	•	۲۳/۷۹		٣	زاویه گام ثابت
۱۵۰	$-1/\Delta$	TT/T9	۲۳/۷۹	٣	
	-۵	۱۸/۲۹		١٠	زاويهگام
	-1•	۱۳/۷۹		۲۰	متغير
	-18	۵/۷۹		۳۶	

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

۳-۳- تأثير زاويه گام سينوسي بر ضريب عملكرد توربين

شکل ۱۶ نشان دهنده مقایسه نمودار ضریب عملکرد برحسب سرعت نوک برای زاویه گام متغیر سینوسی در دامنههای گام مختلف میباشد. همان طور که در این نمودار مشاهده می شود ضریب توان توربین گام متغیر با دامنه ۳ درجه در همه سرعتهای نوک، بیشتر از ضریب توان در زاویه گام ثابت صفر درجه می باشد. استفاده از توربین با دامنه های 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.

نکته قابلتوجه اینکه در تمامی حالتهای با گام متغیر، راهاندازی اولیه توربین بهبود یافته است. در سرعتهای نوک بیشتر از ۲، ضریب توان توربین با دامنه ۱۰درجه 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 ۱۰درجه تولید میکند. در شکل ۱۷ نمودار قطبی توزیع گشتاور آنی پره برای زاویه گام ثابت و متغیر با دامنه ۱۰ درجه برای تابع سینوسی در سرعت نوک ۲ به همراه زاویه حمله واماندگی 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.

همان طور که ملاحظه می شود، حداکثر مقدار گشتاور در نیمه بالادست چرخش و برای مکان هایی که پره دارای زاویه حمله نسبی بالا (حتی پس از محدوده استال پره) تولید می شود. در دامنه ۱۰ درجه، به جز زاویه چرخش ۶۵ تا ۱۲۵ درجه که زاویه حمله اندکی از زاویه واماندگی تجاوز کرده، زاویه حمله در سراسر زاویه چرخش به زیر زاویه واماندگی نگه داشته است. بنابراین، پره در طول چرخش دچار واماندگی نمی شود. 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

چرخش ۹۰ تا ۱۸۰ درجه، جایی که پره آماده می شود تا از بالادست به پاییندست حرکت کند، مشاهده می شود. 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 می باشد، 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 می توان 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 آئرودینامیک پره مفید میباشد. این افزایش توان در پاییندست توربین نیز ادامه داشته است و على رغم اين كه زاويه حمله در روش گام متغير در پاییندست اندکی افزایش داشته است اما از آنجا که توان تولید شده در این ناحیه بهشدت به شرایط آئرودینامیکی پره در بالادست وابسته است و ازآنجا که در توربین با زاویه گام ثابت، گردابههای ناشی از جدایش جریان از بالادست به سمت پاییندست 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 جداشده از پرههای بالادست شدیداً کاهش می یابد بنابراین، در پاییندست تداخل گردابهها با پرهها بهوجود 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 شدهاست. همانطورکه 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

زوایای چرخش ۹۰ تا ۱۸۰ درجه اتفاق می افتد. این در حالی است که استفاده از توربین گام متغیر به خوبی اثر خود را برای توربین گام متغیر گذاشته و خطوط جریان در پره NACA۰۲۲۱ به سطوح چسبیده است. همچنین اختلاف فشار بین سطح کم فشار و پرفشار پره در حالت گام متغیر نسبت به حالت گام ثابت با زاویه گام صفر بیشتر بوده که نشان از بیشتر بودن برآی تولیدی و درنتیجه توان بیشتر در حالت گام متغیر می باشد.

بنابراین، می توان 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 می کند 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 می باشد که سه قرقره متحرک بر روی آن قرار گرفته و می چرخند (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 می شود. مرکز روتور و بادامک به کمک میلههای رابط به پرهها متصل می گردد. این میلهها به دو بخش تقسیم می شود. یکی از این قسمتها متحرک و دیگری ثابت می باشد. میله ثابت از یک سمت به قسمت لبه حمله و به ثابت می باشد. میله ثابت از یک سمت به قسمت لبه حمله و به رخش روتور پین می گردد. 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 می شود.

با توجه به افزایش حدودا 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 اقزایش سالیانه تولید انرژی الکتریسیته شده و راه را برای ورود انرژی الکتریسیته تولیدی از باد به بازارهای جهانی هموارتر سازد.



شکل (۱۸): کانتور فشار حول پره ناکا۰۰۲ در توربین گام ثابت در طول یک دور چرخش و درسرعت نوک ۱/۵.



شکل (۱۹): کانتور فشار حول پره ناکا۰۰ ۲ در توربین گام متغیر در طول یک دور چرخش و درسرعت نوک ۱/۵.

www.SID.ir



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

- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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 می باشد و در سرعتهای نوک پایین به دلیل جدایش جریان حول بره و واماندگی، توربین گام ثابت توانایی تولید توان و راهاندازی پایینی دارد. با روش تنظیم خودکار زاویه گام بره 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، یره می تواند با تغییر جهت خود گشتاور لازم برای حرکت توربین ایجاد کند. مدل آشفتگی SST ko به خوبی توانایی پیشبینی گردابههای روی پرههای روتور در سرعتهای نوک پایین را دارا میباشد. نتایج همچنین نشان داد که توربین دارای پره هایی با زاویه گام ۳- درجه بیشترین توان خروجی و بهترین عملکرد خود راهاندازی را دارا هست. همچنین توربین مجهز به زاویه گام متغیر سینوسے، با دامنه ۳ درجه در همه سرعتهای نوک نسبت به توربین با زاویه گام صفر توان بیشتری تولید میکند.

6- مراجع

 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.

- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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).

rchi