



پاسخ آیرودالاستیک توربین بادی محور افقی در شرایط تغییر ناگهانی اندازه و جهت باد با روش ناپایای المان پره-مومنتوم

عباس ابراهیمی^{1*}، محمود سکندری²

1- استادیار، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

2- کارشناسی ارشد، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

* تهران، صندوق پستی 11155-1639، ebrahimi_a@sharif.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 27 فروردین 1395

پذیرش: 29 تیر 1395

ارائه در سایت: 31 مرداد 1395

کلید واژگان:

المان پره-مومنتوم

آیرودینامیک ناپایا

واماندگی دینامیکی

آیرودالاستیسیت

توربین باد

چکیده

در این پژوهش، تغییرات دینامیکی توان خروجی توربین باد محور افقی سه پره‌ای مگاواتی مرجع در شرایط تغییر ناگهانی اندازه‌ی سرعت باد و در زوایای یو مختلف بررسی شده است. پاسخ زمانی شامل پیش‌الاستیک نوک پره و توان تولیدی روتور در این شرایط ناپایا با حالت جریان پایای باد مقایسه شده است. سه پروفیل برای تغییر ناگهانی سرعت باد مابین 10 تا 12 متر بر ثانیه و همچنین توربین در شرایط زاویه‌ی یو صفر، 10 و 20 درجه در نظر گرفته شده است. با استفاده از روش ناپایای المان پره-مومنتوم و فرض نظریه تیر اویلر-برنولی برای پره، پیش‌الاستیک پره‌ی توربین محاسبه شده است. از الگوی آیرودینامیکی دنباله‌ای دینامیکی برای شبیه‌سازی تأخیر زمانی رسیدن نتایج به شرایط پایا پس از تغییر ناگهانی سرعت باد و برای به‌دست آوردن ضرایب آیرودینامیکی پس از واماندگی نیز از الگوی واماندگی دینامیکی اونا استفاده شده است. برای اعتبارسنجی روش پیشنهادی، نتایج حالت پایا با داده‌های منحنی عملکرد توربین مگاواتی مرجع ان.آر.آل. تا قبل از سرعت نامی و در حالت دینامیکی با توربین مرجع تجاربرگ مقایسه شده که تطابق خوبی را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد تغییرات ناگهانی سرعت باد باعث نوسانات شدید در پیش‌الاستیک پره شده و توان خروجی توربین را تحت تأثیر قرار می‌دهد. همچنین افزایش گرادین سرعت باد منجر به افزایش تأخیر زمانی رسیدن پاسخ روتور به شرایط پایای جدید می‌شود. وجود زاویه‌ی یو توربین نیز منجر به کاهش توان روتور و بارهای آیرودینامیکی متناوب می‌شود. از این نتایج و روش پیشنهادی می‌توان برای طراحی کنترلر مناسب توربین در شرایط ناپایای مشابه فوق استفاده کرد.

Aeroelastic response of horizontal-axis wind turbine in sudden wind gusts based on Unsteady Blade Element-Momentum method

Abbas Ebrahimi^{*}, Mahmood Sekandari

Department of Aerospace Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 11155-1639, Tehran, Iran, ebrahimi_a@sharif.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 15 April 2016
Accepted 19 July 2016
Available Online 21 August 2016

Keywords:

Blade element momentum
Unsteady aerodynamics
Stall dynamic
Aeroelasticity
Wind turbine

ABSTRACT

Wind turbines are subject to various unsteady aerodynamic effects. This includes the wind gust and the change of wind direction. In this work, the aeroelastic behavior of a reference horizontal axis wind turbine has been investigated under different wind gusts and yaw conditions. Unsteady blade element momentum (UBEM) theory and Euler-Bernoulli beam assumption were used for rotor power estimations. To take into account the time delay in aerodynamic loads due to a sudden change in inflow conditions, a dynamic wake model was implemented. The ONERA dynamic stall model was coupled into the BEM theory to improve the aerodynamic loads prediction in the unsteady inflow and yaw conditions. To verify this method, the results in the case of steady-state are compared with the NREL reference wind turbine and in the unsteady case are compared with the Tjaereborg test turbine. The results indicate that sudden change in wind speed causes sharp fluctuations in terms of elastic torsion of the blade and other parameters such as rotor power. Increase in wind gradient can lead to increasing time delay to a new equilibrium. The increase in yaw angle can be contributed to the rotor power and the reduction in periodic loads. The method presented here may facilitate improvements in the controller design for wind turbines.

1- مقدمه

سایر روش‌ها می‌باشد [1]. در این روش که توسط گلارت [2] معرفی شد، برای جریان‌های چسبیده اگر اطلاعات خوبی از ضرایب آیرودینامیکی مقاطع پره‌های توربین موجود باشد، نتایج رضایت‌بخشی حاصل می‌شود [3، 4]. گلارت تئوری مومنتوم و المان پره را ترکیب کرده و بارهای آیرودینامیکی

روش المان پره-مومنتوم¹ رایج‌ترین ابزار برای محاسبه‌ی بارهای آیرودینامیکی روی توربین باد به‌دلیل هزینه‌ی کم و سرعت زیاد نسبت به

¹ Blade Element Momentum (BEM)

هدف از پژوهش حاضر، بررسی عملکرد و پاسخ زمانی (شامل پیچش الاستیک نوک پره و توان تولیدی) توربین باد محور افقی سه پره‌ای مگاواتی مرجع ان.آر.ای.ال.⁵ [18] در شرایط جریان باد پایا و مقایسه با شرایط ناپایایی است که اندازه سرعت باد به‌طور ناگهانی تغییر می‌کند. برای تغییر ناگهانی سرعت باد سه پروپیل مابین 10 تا 12 متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. همچنین عملکرد توربین در شرایط زاویه‌ی یاو صفر، 10 و 20 درجه بررسی شده است. از این نتایج و روش پیشنهادی می‌توان برای طراحی کنترلر [19] مناسب توربین در شرایط ناپایایی مشابه فوق استفاده کرد.

2- تئوری المان پره- مومنتوم

شکل 1 دیاگرام سرعت‌ها در مقطع پره‌ی توربین باد را نشان می‌دهد. V_0 سرعت جریان قبل از رسیدن به صفحه‌ی روتور، W بردار سرعت القایی در صفحه‌ی روتور، θ زاویه‌ی پیچش محلی، ϕ زاویه‌ی جریان و α زاویه‌ی حمله است. a و a' به ترتیب ضرایب القایی سرعت محوری (در جهت عمود بر صفحه‌ی روتور) و مماسی (در صفحه‌ی روتور) هستند. کاهش سرعت باد عبوری از صفحه‌ی روتور به دلیل کاهش مومنتوم ناشی از نیروی محوری ایجاد شده روی روتور است. اگر برآ و گشتاور حاصل از دو روش مومنتوم و المان پره با یکدیگر برابر قرار داده شوند، ضرایب القایی سرعت‌های محوری و مماسی از روابط (1) و (2) با حل تکراری به دست می‌آیند [20].

$$a = \frac{1}{\frac{4F \sin^2 \phi}{\sigma(C_l \cos \phi + C_d \sin \phi)} + 1} \quad (1)$$

$$a' = \frac{1}{\frac{4F \sin \phi \cos \phi}{\sigma(C_l \sin \phi - C_d \cos \phi)} - 1} \quad (2)$$

در این روابط ضریب F ، تصحیح اثر کاهش بار نوک پره [5] و σ ضریب روتور (نسبت سطح اشغال شده توسط پره‌ها به سطح جاروب شده روتور) بوده و از روابط (3) و (4) محاسبه می‌شوند.

$$F = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left[\exp \left(-\frac{N R - r}{2 r \sin \phi} \right) \right] \quad (3)$$

$$\sigma = \frac{N c(r)}{2 \pi r} \quad (4)$$

که N تعداد پره، R شعاع روتور، c وتر ایرفویل هر مقطع پره و r فاصله‌ی هر مقطع پره از محور روتور هستند. ضرایب برآ (C_l) و پسا (C_d) از الگوهای آیرودینامیکی ناپایای پیشنهادی که در ادامه معرفی می‌شوند محاسبه خواهند شد. در صورت تجاوز مقدار a از مقدار بحرانی $a_c = 0.3$ ، تئوری معتبر نیست و در این شرایط از رابطه‌ی (5) و (6) استفاده می‌شود [20].

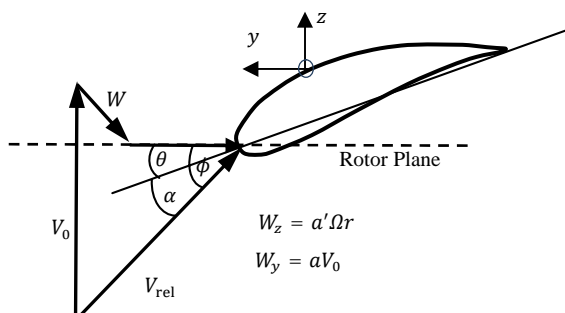


Fig. 1 Velocity diagram for a rotor blade section

شکل 1 دیاگرام سرعت‌ها در مقطع پره

روی پره را با فرض این‌که خواص جریان روی هر مقطع پره بر مقاطع کناری تأثیری ندارد، محاسبه کرد. گرچه این فرض زیاد درست به نظر نمی‌رسد اما بعدها با اعمال ضرایب تصحیح، از خطای ناشی از این فرض کاسته شد. یکی از این ضرایب اصلاحی، ضریب کاهش بار نوک بال پرنتل¹ بود [5]. این ضریب برای کاهش خطای ناشی از فرض تعداد پره‌ی نامحدود در نظریه‌ی مومنتوم بود. افراد دیگری نیز برای این مسأله ضرایبی پیشنهاد دادند که یکی از پژوهش‌های موفق در این زمینه توسط شن و همکارانش [6] انجام شد. تصحیح دیگری که در معادلات روش المان پره- مومنتوم پیشنهاد شد، برای مقادیر بزرگ ضریب القایی سرعت محوری بود که توسط اسپرا ارایه شد [7]. این ضریب بیان گر میزان کاهش اندازه حرکت جریان محوری عبوری از روتور توربین است.

پدیده‌های آیرودینامیکی ناپایایی، از جمله دنباله‌ی ناپایای جریان ورودی² و واماندگی دینامیکی³، وجود دارند که روی عملکرد توربین اثر گذاشته ولی برخی از آنها با روش‌هایی مانند گردابه قابل محاسبه نیستند [8]. در این حالت‌ها باید از روش ناپایای المان پره-مومنتوم با اعمال اصلاحاتی استفاده کرد [10,9]. به عنوان مثال، در شرایطی که اندازه‌ی سرعت و جهت باد به‌طور ناگهانی تغییر کند، بارهای آیرودینامیکی روی روتور با تأخیر زمانی به شرایط پایای خود می‌رسند که برای این منظور الگویی تحت عنوان دنباله‌ی دینامیکی توسط اسنل و چیپر [12,11] ارایه شده است. در مطالعه‌ی اخیر اثر زاویه‌ی سرعت باد نسبت به محور توربین (یائو) نیز بررسی شده است. وقتی باد نسبت به محور توربین زاویه دارد، در نیمی از سیکل چرخش توربین، مقاطع پره در جهت باد و در نیمی دیگر، مقاطع پره در خلاف جهت باد حرکت می‌کنند.

همچنین یکی دیگر از عوامل خطا در روش المان پره-مومنتوم، استخراج صحیح ضرایب آیرودینامیکی در شرایط واماندگی است. حفیظی‌راد و همکاران [13] نحوه رخ دادن جدایش جریان روی پره توربین باد را به کمک معادلات لایه مرزی برای یک پره‌ی چرخان و استخراج معادلات انتگرالی مومنتوم و استفاده از روش المان پره-مومنتوم بررسی کردند و مشخصه‌های هندسی موثر روی نقاط جدایش و ساختار واماندگی را نشان دادند. در عین حال الگوهای مختلفی هم براساس اطلاعات نیمه تجربی برای پیش‌بینی واماندگی و ضرایب آیرودینامیکی از جمله مدل بدوس-لیشمن [14] و مدل اونرا⁴ [15] پیشنهاد شده‌اند.

با افزایش اندازه‌ی توربین‌های تجاری، بررسی رفتار آیرودینامیک آنها اهمیت پیدا کرده است. از جمله فعالیت‌های اخیر، گیاهی و جعفریان در [16] برهم‌کنش سیال و سازه را به منظور بررسی اثرات جنس و ضخامت اجزای پره‌ی توربین بادی محور افقی بر تغییر شکل پره مطالعه کردند. همچنین صابر و جوارشکیان در [17] دو پره‌ی بهینه‌شده و مبنای توربین بادی محور افقی را از دیدگاه آیرودینامیک با استفاده از روش المان پره-مومنتوم، حل جریان لزج و الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی مقایسه کردند. در دو فعالیت اخیر برای الگوی آیرودینامیک در شبیه‌سازی آیرودینامیک از حل عددی سه بعدی معادلات کامل جریان لزج آشفته استفاده شده است که هزینه محاسباتی زیادی دارد ولی در تحقیق حاضر برای شبیه‌سازی آیرودینامیک ناپایا از الگوهای نیمه-تجربی دنباله‌ی دینامیکی و واماندگی دینامیکی و برای الگوی سازه از فرض تیر اویلر-برنولی استفاده شده است.

¹ Prandtl's tip-loss factor

² Dynamic inflow

³ Dynamic stall

⁴ ONERA dynamic stall model

⁵ NREL

عبارت مشتق در روابط فوق نسبت به زمان بی بعد $s = 2V_0 t/c$ هستند. ΔC_l اختلاف ضریب برای استاتیکی و ضریب برای پتانسیل ($C_{l,pot}$) بوده و e_L و r_L در رابطه‌ی (10) از روابط (12) تا (14) محاسبه می‌شوند.

$$r_L = [r_0 + r_2(\Delta C_l)^2] \quad (12)$$

$$a_L = a_0 + a_2(\Delta C_l)^2 \quad (13)$$

$$e_L = e_2(\Delta C_l)^2 \quad (14)$$

ثابت‌های $\lambda_L, S_L, \sigma_L, a_0, a_2, e_2, r_0$ و r_2 تنها تابعی از زاویه حمله بوده و برای هر ایرفویل از آزمایش تونل باد به دست می‌آیند که در این پژوهش از ضرایب ایرفویل مشابه استفاده شده است (جدول 1). این ضرایب در [22] استفاده شده و پاسخ قابل قبولی به دست آمده است. شرایط مرزی در معادلات دیفرانسیل (9) و (10) به صورت رابطه (15) هستند.

$$\begin{aligned} C_{l,1}(t=0) &= C_{l,stat} \\ C_{l,1}(t=0) &= 0 \\ \frac{dC_{l,2}}{dx}(t=0) &= 0 \end{aligned} \quad (15)$$

3-3- الگوی انحراف زاویه‌ی باد

در صورتی که جهت باد با محور توربین زاویه داشته باشد، سرعت نسبی عمود بر صفحه‌ی روتور در نیمی از سیکل حرکت، افزایش یافته و در نیم-سیکل دیگر کاهش می‌یابد. ضمن آن که سرعت مماسی وارد بر هر مقطع نیز در یک سیکل تغییر می‌کند. در این شرایط برای بررسی اثر زاویه‌ی یاءو، سرعت نسبی باد در روابط به صورت رابطه‌ی (16) اصلاح می‌شود که در آن زاویه‌ی جریان (θ_{yaw}) و زاویه‌ی پره $(\theta_{azimuth})$ در شکل 2 نشان داده شده است.

$$\begin{pmatrix} V_{0,y} \\ V_{0,z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_0 \sin \theta_{yaw} \sin \theta_{azimuth} \\ V_0 \cos \theta_{yaw} \end{pmatrix} \quad (16)$$

4- روش حل مسئله

روش حل به صورت تکراری است که در دیاگرام شکل 3 نمایش داده شده است. در مرحله‌ی تکرار اول برای هر مقطع پره بردار سرعت القایی (W) و پیش‌الاستیک $(\theta_{elastic})$ حدس زده می‌شوند. بردار سرعت القایی با روابط (7) و (8) برای شرایط دینامیکی اصلاح می‌شود. با معلوم بودن هندسه‌ی پره، سرعت باد و سرعت چرخش روتور، از روابط (17) تا (19)، زاویه‌ی جریان و زاویه‌ی حمله محاسبه می‌شوند.

$$\begin{pmatrix} V_{rel,y} \\ V_{rel,z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{0,y} \\ V_{0,z} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -\Omega x \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} W_y \\ W_z \end{pmatrix} \quad (17)$$

$$\alpha = \phi - \theta + \theta_{elastic} \quad (18)$$

$$\tan \phi = \frac{V_{rel,z}}{-V_{rel,y}} \quad (19)$$

با تعیین زاویه‌ی حمله‌ی هر مقطع، ضرایب آیرودینامیکی از معادلات (9) تا (11) محاسبه می‌شوند. در این روابط ضرایب آیرودینامیکی از [18] برداشت می‌شوند. حل این معادلات دیفرانسیل به ترتیب به صورت تحلیلی و عددی (با استفاده از تفاضل پس‌رو) به شکل روابط (20) و (21) انجام می‌شود.

جدول 1 ضرایب مدل واماندگی اونرا

Table 1 ONERA stall dynamic coefficient

λ_L	S_L	σ_L	a_0	a_2	e_2	r_0	r_2
0.17	π	2π	0.3	0.2	-2.86	0.2	0.2

$$a = \frac{\frac{1}{2}[2 + K(1 - 2a_c) - \sqrt{[K(1 - 2a_c) + 2]^2 + 4(Ka_c^2 - 1)}]}{4F \sin^2 \phi} \quad (5)$$

$$K = \frac{4F \sin^2 \phi}{\sigma(C_{l,\cos \phi} + C_{d,\sin \phi})} \quad (6)$$

3- الگوهای آیرودینامیکی ناپایا

در این پژوهش برای شبیه‌سازی تأخیر زمانی رسیدن بارهای آیرودینامیکی به شرایط پایا، ناشی از تغییرات ناگهانی سرعت باد از الگوی دنباله‌ی دینامیکی و برای تصحیح ضرایب آیرودینامیکی در شرایط واماندگی از الگوی واماندگی دینامیکی استفاده شده است.

1-1- الگوی دنباله‌ی دینامیکی

با تغییر ناگهانی اندازه و جهت باد، پاسخ آیرودینامیک عملکرد روتور با تأخیر زمانی به شرایط پایای جدید می‌رسد. برای محاسبه‌ی این تأخیر زمانی از یک الگوی جریان ناپایای ورودی باید استفاده کرد. در این پژوهش، برای بررسی این تأثیر از روش اسنل و چیپر [12,11] برای محاسبه سرعت القایی (W) استفاده شده است. ابتدا با داشتن مقادیر a و a' ، بردار سرعت‌های القایی به عنوان سرعت‌های القایی شبه‌استاتیکی (W_{qs}) به دست آمده و سپس طی دو مرحله برای شرایط دینامیکی به کمک دو معادله دیفرانسیل مرتبه اول (7) و (8) تصحیح می‌شوند.

$$W_{int} + \tau_1 \frac{dW_{int}}{dt} = W_{qs} + k\tau_1 \frac{dW_{qs}}{dt} \quad (7)$$

$$W + \tau_2 \frac{dW}{dt} = W_{int} \quad (8)$$

در روابط فوق با استفاده از سرعت القایی شبه‌استاتیکی و حل معادله دیفرانسیل اول (رابطه‌ی 7) مقدار میانی سرعت القایی (W_{int}) و پس از حل معادله دیفرانسیل دوم (رابطه‌ی 8) مقدار نهایی و اصلاح شده‌ی سرعت القایی به دست می‌آید. ثابت‌های τ_1 و τ_2 و k به صورت تجربی یا عددی قابل تخمین‌اند که در اینجا از پیشنهاد اسنل و چیپر استفاده شده است [12,11].

2-2- الگوی واماندگی دینامیکی

برای توربین‌های پیچ-ثابت (یا با کنترل واماندگی¹) و حتی توربین‌های با کنترل پیچ²، که جهت و اندازه باد تغییر می‌کند، اثرات آیرودینامیک ناپایا و واماندگی روی بارگذاری‌های پره و عملکرد توربین اهمیت دارد. الگوهای واماندگی دینامیکی نیمه-تجربی متفاوتی براساس نتایج تجربی ایرفویل دوبعدی نوسانی ارائه شده‌اند [21]. در این پژوهش، از الگوی اونرا جهت پیش‌بینی ضرایب آیرودینامیکی در شرایط واماندگی استفاده شده است [15]. در این الگو، مشابه بسیاری از الگوهای دیگر، ضرایب آیرودینامیکی به صورت مجموع دو مولفه‌ی خطی $(C_{l,1})$ ، که در آن جریان چسبیده به سطح است و مولفه‌ی غیرخطی $(C_{l,2})$ ، که ناشی از جدایش جریان است، در نظر گرفته می‌شوند. هر بخش با استفاده از معادله‌های دیفرانسیل (9) و (10) محاسبه شده و در نهایت با یکدیگر جمع می‌شوند (رابطه 11).

$$\dot{C}_{l,1} + \lambda_L C_{l,1} = \lambda_L C_{l,pot} + (\lambda_L S_L + \sigma_L) \dot{\alpha} + S_L \ddot{\alpha} \quad (9)$$

$$\dot{C}_{l,2} + a_L \dot{C}_{l,2} + r_L C_{l,2} = -(r_L \Delta C_l + e_L \Delta \dot{C}_l) \quad (10)$$

$$C_{l,dyn} = C_{l,1} + C_{l,2} \quad (11)$$

¹ Stall-controlled wind turbines

² Pitch-controlled wind turbines

$$C_{l,2}^{n+1} = \frac{(\Delta S^2)^n}{1 + a_L^n \Delta S^n} \left[-r_L^n \Delta C_{l,1}^n - r_L^n \Delta C_{l,2}^n + a_L^n \frac{C_{l,2}^n}{\Delta S^n} + \frac{2C_{l,2}^n}{(\Delta S^2)^n} - \frac{C_{l,2}^{n-1}}{(\Delta S^2)^n} \right] \quad (21)$$

در رابطه‌ی (20)، R به صورت رابطه‌ی (22) تعریف می‌شود.

$$R = \lambda_L C_{l,pot} + (\lambda_L S_L + \sigma_L) \dot{\alpha} + S_L \ddot{\alpha} \quad (22)$$

به کمک روابط (1) و (2) ضرایب القایی و در نتیجه بردار سرعت القایی به روزرسانی می‌شود و همچنین با داشتن ضرایب آیرودینامیکی، توزیع برآ (L) و پسا (D) و گشتاور پیچشی آیرودینامیکی (M_{ac}) بر روی هر مقطع پره، گشتاور دینامیکی (M_{dyn}) به دست آمده و با استفاده از رابطه‌ی (23) پیچش الاستیک پره محاسبه می‌شود. در این رابطه فرض می‌شود سازه‌ی پره به صورت تیر اوپلر-برنولی و پیچش الاستیک تنها ناشی از گشتاور پیچشی اعمالی به مقطع پره است.

$$M_{dyn} = Le_x - De_y + M_{ac} = \frac{d}{dx} \left(GJ \frac{d\theta_{elastic}}{dx} \right) \quad (23)$$

در این رابطه e_x و e_y فاصله‌ی محور الاستیک تا مرکز آیرودینامیکی هر مقطع به ترتیب در جهت وتر و عمود بر آن است. با مقادیر به روز شده‌ی سرعت القایی و پیچش الاستیک، فرایند تکرار تا حصول همگرایی ادامه می‌یابد.

5- اعتبارسنجی

برای بررسی اعتبار نتایج، منحنی توان تولیدی روتور در حالت پایا و برای شرایط کاری توربین مرجع [23] محاسبه شده و با نتایج این مرجع در شکل 4 مقایسه شده است. پره‌ی روتور موردنظر دارای شش ایرفویل متفاوت است و فرایند حل تکراری شکل 3 برای هر مقطع انجام می‌شود. مشاهده می‌شود که تا رسیدن توربین به توان 6 مگاوات، نتایج با مرجع تطابق خوبی دارد. وقتی توربین به توان نامی 6 مگاوات می‌رسد، با مکانیزمی کنترلی، زاویه حمله‌ی پره‌ها را طوری تنظیم می‌کنند که توان ثابت بماند. از آنجا که در پژوهش حاضر از این سیستم کنترلی استفاده نشده است، توان با افزایش سرعت باد همچنان افزایش می‌یابد. سرعت باد نامی برای این توربین برابر 12 متر بر ثانیه است و بنابراین در ادامه، نتایج برای حالتی که تغییرات ناگهانی سرعت باد در محدوده‌ی کمتر از 12 متر بر ثانیه است بررسی شده است. همچنین برای اعتبارسنجی روش دینامیکی از مقایسه نتایج با داده‌های تجربی توربین آزمون تجاربورگ¹ [24] در شرایط تغییر ناگهانی زاویه پیچ پره استفاده شده است.

شکل 5 مقایسه داده‌های تجربی مرجع [11] و نتایج محاسبه شده‌ی پاسخ گشتاور محور روتور توربین تجاربورگ برای تغییر ناگهانی زاویه پیچ پره را نشان می‌دهد که تطابق خوبی دارند. در $t = 2 \text{ sec}$ زاویه پیچ پره ناگهان از 0.1° به 3.7° افزایش می‌یابد و طی 30 ثانیه در این وضعیت باقی می‌ماند و سپس مجدداً بطور ناگهانی به مقدار اولیه برمی‌گردد. در این شرایط سرعت باد ورودی پایا به صفحه روتور برابر 8.7 m/s و نسبت سرعت نوک پره برابر 8.1 است. با افزایش زاویه پیچ پره، زاویه حمله محلی کاهش پیدا می‌کند و بنابراین ابتدا گشتاور روتور از 260 kNm تا کمتر از 150 kNm افت می‌کند و طی حدود 10 ثانیه به مقدار تعادل جدید می‌رسد. در $t = 32 \text{ sec}$ زاویه پیچ مجدداً بطور ناگهانی به مقدار اولیه خود برمی‌گردد و رفتار مشابهی در پاسخ گشتاور روتور دیده می‌شود. شبیه‌سازی این رفتار تنها با یک الگوی دنباله دینامیکی امکان‌پذیر است و بنابراین چنین الگویی برای توربین‌های پیچ-کنترل بسیار اهمیت دارد.

¹ Tjaereborg

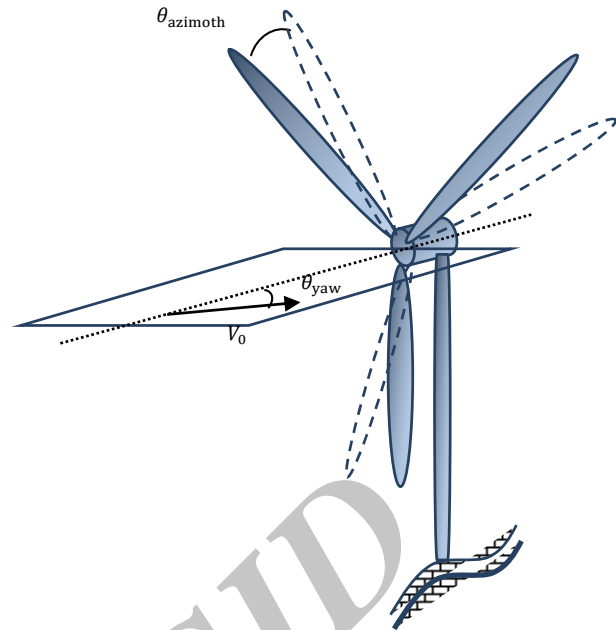


Fig. 2 Wind turbine at yaw condition

شکل 2 توربین در شرایط وجود زاویه‌ی یاء

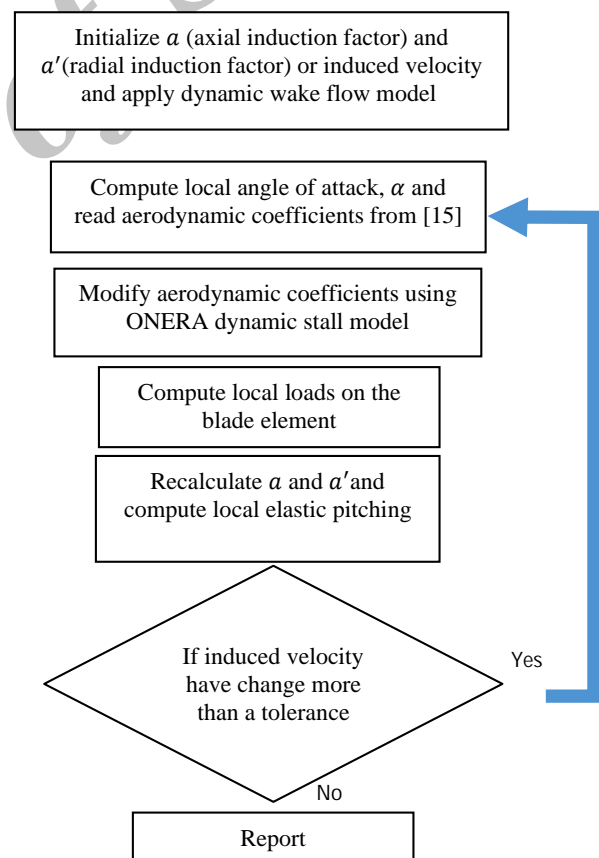


Fig. 3 Solving flowchart

شکل 3 الگوریتم حل مسأله

$$C_{l,1} = \frac{1}{\lambda_L} \left[R - (R - \lambda_L C_{l,stat}) e^{-\lambda_L S} \right] \quad (20)$$

توربین شرایط پایای خود را تجربه می‌کند که در آن افزایش ضریب القایی محوری موجب کاهش سرعت باد در راستای محور روتور شده و زاویه‌ی حمله را در مقاطع پره کاهش می‌دهد. بنابراین به تدریج بارهای آیرودینامیکی کاهش یافته و توان خروجی روی 6 مگاوات ثابت می‌شود. پدیده‌ی مشابهی پس از کاهش ناگهانی سرعت باد از 12 به 10 متر بر ثانیه رخ می‌دهد. در این حالت نیز پس از کاهش ناگهانی بارهای آیرودینامیکی، توان خروجی ابتدا تا حدود 2 مگاوات کاهش پیدا کرده و سپس طی حدود 0.4 ثانیه به مقدار پایای 3 مگاوات می‌رسد.

6-2- بررسی عملکرد توربین در شرایط تغییر ناگهانی سرعت باد به کمک

الگوی واماندگی دینامیکی

در بخش قبل از ضرایب آیرودینامیکی استاتیکی استفاده شده بود زیرا گرادیان شدید سرعت در شکل 6 استفاده از الگوی واماندگی دینامیکی را دچار مشکل می‌کند. چرا که گرادیان زاویه‌ی حمله در این شرایط نامحدود شده و مقادیر به‌دست آمده از رابطه‌ی (21) غیرواقعی خواهند بود. بنابراین

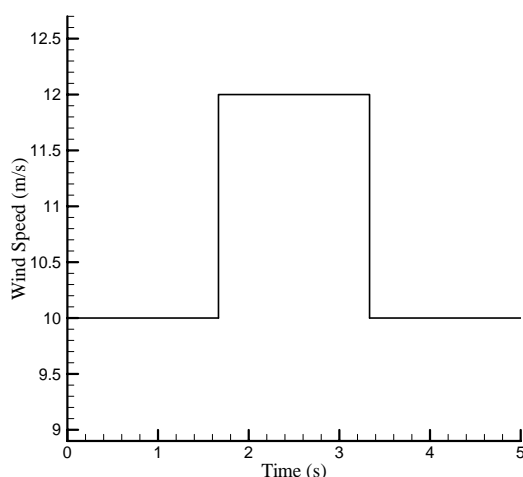


Fig. 6 First wind speed function

شکل 6 تابع تغییر سرعت باد 1

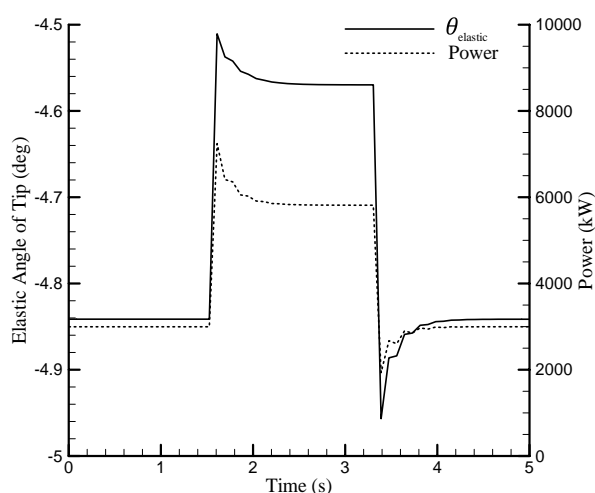


Fig. 7 Elastic torsion of blade tip and rotor power, rotational speed 20 rpm with suddenly change in wind speed

شکل 7 پیچش الاستیک نوک پره و توان توربین، سرعت چرخش پره 20 rpm با تغییر ناگهانی سرعت باد

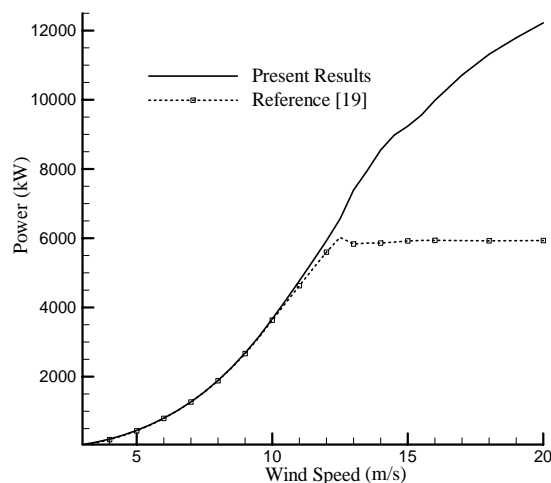


Fig. 4 Comparison of the calculated and reference power [23]

شکل 4 مقایسه‌ی توان محاسبه شده و مرجع [23]

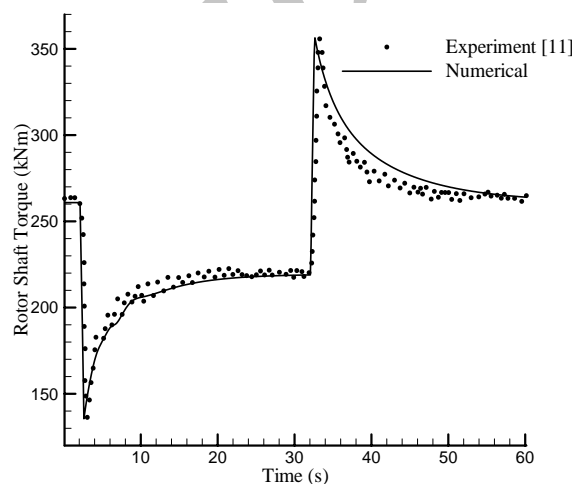


Fig. 5 Comparison of rotor shaft torque between present study and Tjærborg wind turbine [24] during a pitch step change from 0.1° to 3.7° and back

شکل 5 مقایسه‌ی نتایج گشتاور محور روتور توربین تجاربورگ با مرجع [24]

6- نتایج

6-1- بررسی عملکرد توربین در شرایط تغییر ناگهانی سرعت باد به-

کمک الگوی دنباله‌ی دینامیکی

در شرایطی که سرعت باد مطابق منحنی شکل 6 طی 5 ثانیه تغییر می‌کند، شکل 7 نتایج تغییرات پیچش الاستیک نوک پره و توان خروجی توربین را نشان می‌دهد. سرعت چرخش پره 20 دور در دقیقه بوده و محور توربین در راستای باد است. این نتایج در حضور الگوی دنباله‌ی دینامیکی استخراج شده است و تأخیر رسیدن به شرایط پایا پس از تغییر ناگهانی سرعت باد در عملکرد توربین مشاهده می‌شود. با افزایش سرعت باد از 10 به 12 متر بر ثانیه، در ابتدا که هنوز سرعت القایی محوری به مقدار پایای خود افزایش پیدا نکرده، طبق شکل 1 مؤلفه‌ی محوری سرعت بزرگتر شده و مؤلفه‌ی مماسی تغییری نمی‌کند، این امر موجب می‌شود تا زاویه‌ی حمله در ابتدا بیشتر از مقدار پایا بوده و بنابراین بارهای آیرودینامیکی و به تناسب آن توان و تغییر شکل الاستیک بیشتر می‌شوند. بنابراین ابتدا توان خروجی از حدود 3 مگاوات تا 7.2 مگاوات افزایش پیدا کرده و پس از مدتی (حدود 0.6 ثانیه)،

شکل 11 توان خروجی توربین را برای این سه پروفیل نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد وجود گرادیان شدیدتر منجر به تغییرات بیشتر توان نسبت به حالت پایا و همچنین تأخیر زمانی بیشتر رسیدن منحنی عملکرد توربین به حالت پایا می‌شود. از طرفی هرچند بلافاصله پس از افزایش سرعت باد، توان نیز افزایش یافته است، ولی در شرایط واقعی، میرایی سازه‌ای و همچنین اینرسی دورانی مانع از چنین رخدادی می‌شوند و افزایش توان نیز با تأخیر زمانی انجام می‌شود. به عبارتی در رابطه‌ی (23) از اثرات اینرسی و میرایی سازه‌ای در برابر میرایی آیرودینامیکی صرف‌نظر شده است.

4-6- بررسی اثر تغییر زاویه‌ی یاو

وجود زاویه‌ی یاو منجر به کاهش قابل توجه میزان انرژی باد در دسترس صفحه‌ی روتور شده و به‌طور کلی توان خروجی توربین کاهش می‌یابد. این موضوع در شکل 12 برای دو سرعت باد 10 و 12 متر بر ثانیه در سرعت دورانی 20 دور در دقیقه نشان داده شده است. مشاهده می‌شود، در سرعت باد 10 متر بر ثانیه توان خروجی توربین در زاویه یاو 45 درجه به صفر می‌رسد و در سرعت باد 12 متر بر ثانیه به حدود یک پنجم توان نسبت به زاویه‌ی یاو صفر درجه کاهش پیدا کرده است.

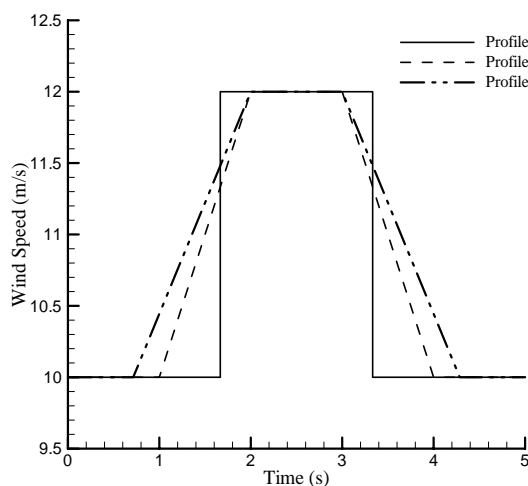


Fig. 10 Wind speed profiles

شکل 10 پروفیل‌های سرعت باد

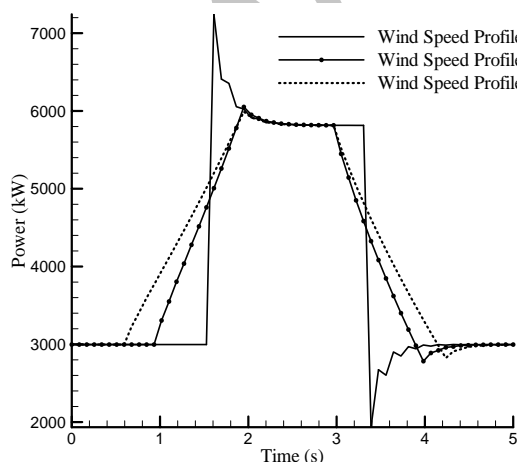


Fig. 11 Different wind speed profile effect on wind turbine power

شکل 11 تأثیر گرادیان‌های سرعت باد مختلف بر توان خروجی توربین

برای بررسی اثر ضرایب آیرودینامیکی در شرایط واماندگی دینامیکی از تابع سرعت باد شکل 8 استفاده شده است. سرعت چرخش پره در این حالت 10 دور در دقیقه در نظر گرفته شده است. شکل 9 تغییرات پیچش الاستیک نوک پره و توان توربین را در این شرایط، طی 5 ثانیه نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که وجود این گرادیان‌های شدید در سرعت باد، نوسانات چشم‌گیر در تغییر شکل پره و توان خروجی توربین را سبب می‌شود. گرچه مدل‌سازی دقیق این نوسانات مستلزم بهره‌گیری از روش‌های عددی کامل‌تر و پایدارتر است، اما ماهیت نوسانی پارامترهای عملکردی توربین باد در صورت عدم وجود سیستم کنترل توان، غیرقابل چشم‌پوشی است.

6-3- بررسی اثر گرادیان سرعت باد بر عملکرد توربین

در این بخش با بهره‌گیری از الگوی دنباله‌ی دینامیکی، اثر وجود سه پروفیل سرعت باد بر روی توان خروجی توربین باد بررسی شده است. این پروفیل‌ها با سه شیب متفاوت در شکل 10 نشان داده شده است.

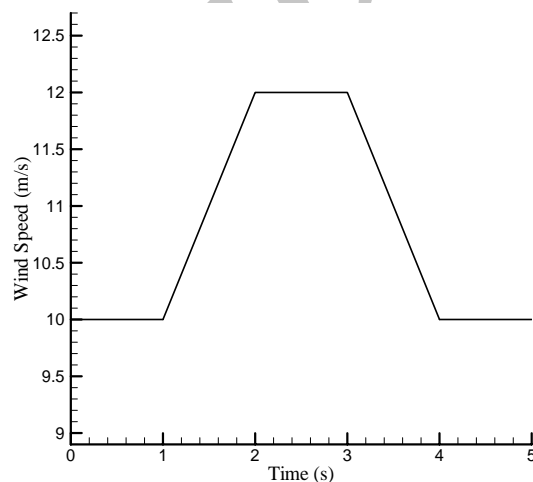


Fig. 8 Second wind speed function

شکل 8 تابع تغییر سرعت باد 2

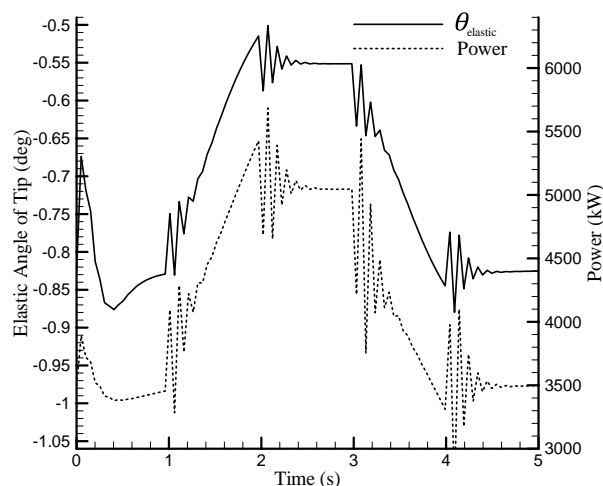


Fig. 9 Elastic torsion of blade tip and rotor power, rotational speed 10 rpm, with dynamic stall model

شکل 9 پیچش الاستیک نوک پره و توان توربین، سرعت چرخش پره 10 rpm، با مدل واماندگی دینامیکی

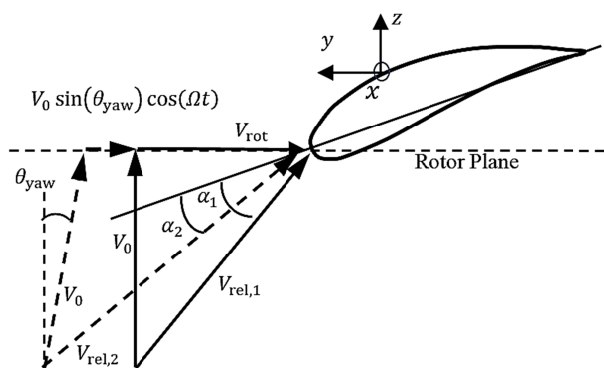


Fig. 14 Velocity diagram for a rotor blade section in yaw condition

شکل 14 مقطع پره در شرایط یاو

روتور و در نتیجه سرعت‌های القایی در صفحه‌ی روتور نیز دچار تغییر شده و با یک تأخیر زمانی به شرایط تعادل جدید می‌رسند. در این مقاله برای شبیه‌سازی این اثر در عملکرد توربین از کوپل کردن یک الگوی دنباله دینامیکی با روش BEM استفاده شده است. همچنین روش المان پره-مومنتوم با اعمال اصلاحاتی از جمله در نظر گرفتن اثرات تأخیر زمانی پاسخ و واماندگی دینامیکی و زاویه‌ی یاو توربین برای بررسی عملکرد توربین مرجع پیشنهاد شد. نتایج نشان می‌دهد تغییرات ناگهانی اندازه‌ی سرعت باد باعث بارهای آیرودینامیکی ناپایا روی پره و در نتیجه نوسانات شدید در پیچش الاستیک پره و تأخیر زمانی توان خروجی توربین تا رسیدن به شرایط پایای جدید می‌شود. همچنین افزایش گرادین سرعت باد منجر به افزایش بیشتر تأخیر زمانی پاسخ روتور می‌شود. شبیه‌سازی تأخیر زمانی پاسخ روتور تنها با الگوی ناپایای دنباله‌ی دینامیکی قابل مشاهده است و بنابراین این الگو برای توربین‌های باد با کنترل پیچ دارای اهمیت است. همچنین عدم هم‌راستا بودن جهت جریان باد با محور توربین منجر به کاهش توان خروجی روتور و همچنین ایجاد بارهای آیرودینامیکی متناوب روی پره می‌شود. محاسبه‌ی این بارهای متناوب در تخمین عمر و خستگی سازه‌ی پره اهمیت دارد. هرچند اضافه‌جوش‌های به وجود آمده در پاسخ روتور به تغییرات ناگهانی جریان ورودی در مرتبه‌ی زمانی چند ثانیه اتفاق می‌افتد ولی مجموع این زمان‌ها و اضافه‌جوش‌ها در پاسخ، برای توربین‌های یک مزرعه بادی که باید خروجی یکپارچه‌ی را به شبکه تحویل دهد قابل توجه خواهد بود و براساس روش پیشنهادی این مقاله می‌توان کنترل‌های مناسب [19] را طراحی کرد.

8- تقدیر و تشکر

از زحمات و هدایت‌های جناب آقای دکتر حدادپور، عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی شریف نهایت تشکر و قدردانی صورت می‌گیرد.

9- مراجع

- [1] M. O. L. Hansen, J. N. Sorensen, S. Voutsinas, N. Sorensen, H. A. Madsen, State of the art in wind turbine aerodynamics and aeroelasticity, *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 42, No. 4, pp. 285-330, 2006.
- [2] H. Glauert, W. F. Durand, *Aerodynamic Theory*, pp. 316-318, New York Dover Publication, 1963.
- [3] M. H. Hansen, Improved modal dynamics of wind turbines to avoid stall-induced vibrations, *Wind Energy*, Vol. 6, No. 2, pp. 179-195, 2003.
- [4] J. R. P. Vaz, J. T. Pinho, A. L. A. Mesquita, An extension of BEM method applied to horizontal-axis wind turbine design, *Renewable Energy*, Vol. 36, No. 6, pp. 1734-1740, 2011.
- [5] J. F. Manwell, J. G. McGowan, A. L. Rogers, *Wind Energy*

تغییرات توان توربین، در حالتی که باد با محور توربین زاویه صفر، 10 و 20 درجه دارد و در شرایط حضور پروفیل سرعت باد شکل 8 در شکل 13 رسم شده است. شکل 14 دیاگرام بردارهای سرعت در زاویه‌ی یاو توربین را نشان می‌دهد. با دوران پره به سمت باد، مؤلفه‌ی اول سرعت در رابطه‌ی (16) در خلاف جهت سرعت مماسی در شکل 14 بوده و پس از گذشت نیمی از سیکل این دو سرعت هم‌جهت می‌شوند. این اثر موجب افزایش و کاهش پیوسته‌ی توان خروجی هر پره می‌شود. با افزایش سرعت باد، توان افزایش یافته و با گذشت زمان، افزایش مضاعف سرعت نسبی باد در پره‌ای که به سمت باد حرکت می‌کند موجب افزایش بیشتر توان شده است.

7- نتیجه‌گیری

هدف از پژوهش حاضر مطالعه تغییرات دینامیکی توان خروجی توربین در شرایط تغییر ناگهانی جریان ورودی به صفحه روتور است که می‌تواند ناشی از تندباد، تغییر جهت باد، قرارگرفتن روتور در حالت گذرای زاویه یاو، قرارگرفتن روتور در دنباله ناشی از توربین‌های جلویی و غیره باشد. وقتی روتور یک تغییر ناگهانی در جریان ورودی را تجربه می‌کند، دنباله‌ی جریان

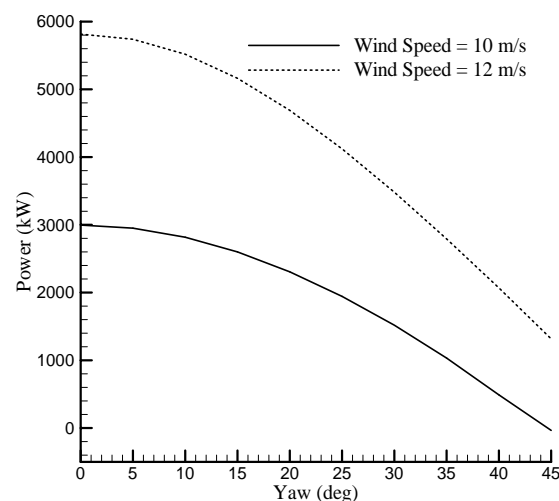


Fig. 12 Yaw effect on wind turbine power in steady condition

شکل 12 تأثیر زاویه‌ی یاو بر توان توربین در شرایط پایا

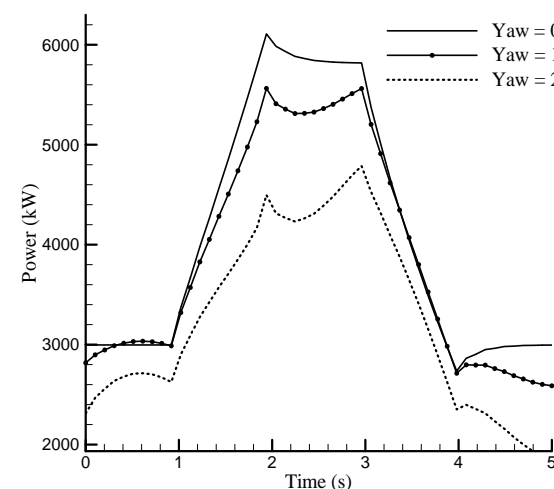


Fig. 13 Yaw effect on wind turbine power in steady condition

شکل 13 تأثیر زاویه‌ی یاو بر توان توربین در شرایط ناپایا

- airfoils in view of the application to the calculation of responses of a helicopter blade in forward flight, *Vertica*, Vol. 5, No. 1, pp. 35-53, 1981.
- [16] M. H. Giah, A. Jafarian Dehkordi, FSI simulation of a small size horizontal axis wind turbine to investigate the effects of blade thickness and material on blade deformation, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 5, pp. 145-152, 2015. (in Persian فارسی)
- [17] M. R. Saber, M. H. Djavareshkian, Comparison of aeroelastic performance base and optimized blades of horizontal axis wind turbine, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 6, pp. 283-290, 2015. (in Persian فارسی)
- [18] J. Jonkman, S. Butterfield, W. Musial, G. Scott, *Definition of a 5MW reference wind turbine for offshore system development*, NREL, Colorado, 2009.
- [19] M. H. Baloch, J. Wang, G. S. Kaloi, Stability and nonlinear controller analysis of wind energy conversion system with random wind speed, *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 79, No. 1, pp. 75-83, 2016.
- [20] M. O. L. Hansen, *Aerodynamics of Wind Turbines*, Second Edition, pp. 54-56, London, Earthscan Publication, 2008.
- [21] J. G. Leishman, Challenges in modeling the unsteady aerodynamics of wind turbines, *ASME Wind Energy Symposium*, Reno, Nevada, USA, January 14-17, 2002.
- [22] J. G. Holierhoek, J. B. De Vaal, A. H. Van Zuijlen, H. Bijl, Comparing different dynamic stall models, *Wind Energy*, Vol. 16 No. 1, pp. 139-158, 2013.
- [23] C. Lindenburg, *Aeroelastic modelling of the LMH64-5 blade*, Energy Research Center of the Netherlands, Technical Report No. DOWEC-02-KL-083/0, 2002.
- [24] S. Øye, *Tjæreborg wind turbine (Esbjerg) geometric and operational data*, Technical Report VK-184, Department of Fluid Mechanics, DTH, Lyngby, 1990.
- Explained: Theory, Design and Application*, Second Edition, pp. 118-119, New York, John Wiley & Sons, 2009.
- [6] W. Z. Shen, R. Mikkelsen, J. N. Sørensen, C. Bak, Tip loss corrections for wind turbine computations, *Wind Energy*, Vol. 8, No. 4, pp. 457-475, 2005.
- [7] D. A. Spera, *Wind Turbine Technology: Fundamental Concepts of Wind Turbine Engineering*, Second Edition, pp. 301-305, New York: ASME Press, 2009.
- [8] L. Eliassen, *Aerodynamic loads on a wind turbine rotor in axial motion*, PhD Thesis, University of Stavanger, Norway, 2015.
- [9] B. F. Xu, T. G. Wang, Y. Yuan, J. F. Cao, Unsteady aerodynamic analysis for offshore floating wind turbines under different wind conditions, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, London, England, 2015.
- [10] M. R. Luhur, J. Peinke, M. Kühn and M. Wächter, Stochastic model for a Aerodynamic force dynamics on wind turbine blades in unsteady wind inflow, *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, Vol. 10, No. 4, pp. 410-419, 2015.
- [11] H. Snel, J. G. Schepers, *Joint investigations of dynamic inflow effects and implementation of an engineering method*, Technical Report ECN-C-94-107, Netherlands, pp. 29-35, 1995.
- [12] J. G. Schepers, H. Snel, *Dynamic inflow: yawed conditions and partial span pitch control*, Technical Report ECN-C-95-056, Netherlands, pp. 37-45, 1995.
- [13] H. Hafizi-Rad, M. Behbahani-Nejad, S. S. Bahrainian, P. Tabibi, 3D analysis of the boundary layer on wind turbine blades, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 3, pp. 119-128, 2014. (in Persian فارسی)
- [14] J. G. Leishman, T. S. Beddoes, A semi-empirical model for dynamic stall, *Journal of the American Helicopter Society*, Vol. 34, No. 3, pp. 3-17, 1989.
- [15] C. T. Tran, D. Petot, Semi-empirical model for the dynamic stall of

Archive of SID