

## مقاله علمی - پژوهشی

# بهبود ضریب توان در یک توربین بادی مگاواتی بر پایه تعمیم عملکرد سیستم کنترل زاویه گام

سعید کریمیان علی‌آبادی<sup>۱\*</sup>، زهرا پیش‌بین<sup>۲</sup>

و ۲- گروه هوافضا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس

\*تهران، پل گیشا

Karimian@modares.ac.ir

توربین ۵ مگاواتی NREL توربین بادی محور افقی است که به دلیل طراحی مناسب، هندسه بهینه شده پره ها و راندمان مطلوب مورد توجه محققان بسیاری قرار گرفته است. بهره گیری از حضور زاویه گام در سرعت های مختلف وزش باد نقش مهمی در نحوه بهره برداری از توربین های باد دارد و به عنوان ابزاری برای دستیابی به شرایط عملکرد بهینه مورد استفاده قرار می گیرد. در این مقاله، الگوی نوینی از اعمال زاویه گام بر روی پره ها ارائه گردیده و از آن به عنوان عامل افزایش دهنده توان استفاده شده است. توان تولیدی توربین در سرعت های دورانی پایین تر از سرعت پیشنهادی NREL مورد بررسی قرار گرفته است و نقاط عملکردی به گونه ای انتخاب شده اند که توربین دارای حداقل سرعت دورانی روتور و حداقل میزان زاویه گام باشد و در عین حال بتوان توان نامی را از آن استخراج نمود. افزایش عمر مفید توربین و کاهش استهلاک مکانیزم ها از مزایای این الگوی پیشنهادی می باشد. بدین ترتیب برای بازه سرعت های ۱۳ تا ۱۷ متر بر ثانیه، سرعت دورانی ۹ دور بر دقیقه و برای سرعت های ۱۸ تا ۲۵ متر بر ثانیه، سرعت دورانی ۷ دور بر دقیقه به عنوان نقاط عملکردی بهینه مشخص شده اند و زوایای گام متناسب با هر سرعت وزش باد نیز محاسبه شده است.

واژه‌های کلیدی: توربین بادی محور افقی، زاویه گام، ضریبتوان، شرایط بهینه، سیستم کنترل

## مقدمه

افزایش میزان مصرف انرژی در جهان و همچنین محدودیت منابع فسیلی، اهمیت انرژی‌های تجدیدپذیر را دوچندان کرده است [۱]. انرژی باد یکی از منابع تجدیدپذیر است که از فراوانی و دسترسی بالایی برخوردار است. توربین‌های بادی فرایند تولید انرژی الکتریکی از جریان باد را انجام می‌دهند و امروزه شاهد افزایش روز افزون

کاربرد آن‌ها در نقاط مختلف دنیا می‌باشیم. توربین‌های بادی از نظر جهت محور دوران به دو دسته کلی توربین‌های بادی محور افقی<sup>۳</sup> و توربین‌های بادی عمود محور<sup>۴</sup> تقسیم می‌شوند. توربین‌های بادی با محور افقی قدمت بیشتری داشته و امروزه پرکاربردترین توربین‌ها جهت تولید برق می باشند که عموماً دارای دو یا سه پره می‌باشند. روتور و ژنراتور الکتریکی در بالای یک برج بلند قرار گرفته‌اند و برای بهره‌گیری مطلوب از توربین باید این مجموعه در راستای جهت وزش باد قرار گیرند و از نظر موقعیت قرارگیری روتور نسبت به برج، به دو

۱. استادیار (نویسنده مخاطب)

۲. کارشناس ارشد

3. Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT)

4. Vertical Axis Wind Turbine (VAWT)

دسته‌ی بادسو<sup>۱</sup> و پادباسو<sup>۲</sup> تقسیم می‌شوند [۲]. قابلیت بکارگیری توربین‌های محور افقی در زمین‌های ناهموار و دور از ساحل و شروع خودکار آن‌ها از جمله مزایای این توربین‌هاست. در طی سال‌های اخیر تلاش‌های متعددی در راستای پیشرفت و بهبود ساختار توربین‌های بادی صورت گرفته است که غالباً به افزایش توان تولیدی منجر شده است که مهمترین پارامتر مد نظر در توربین‌هاست. یکی از موضوعاتی که اخیراً در توربین‌های بادی اهمیت یافته است، استفاده از سیستم کنترل توان یا تثبیت توان بر مبنای تغییر در زاویه گام<sup>۳</sup> پره‌های توربین می‌باشد. این سیستم کنترلی در شرایط تغییر قابل توجه در سرعت وزش باد تلاش می‌کند زاویه گام پره‌ها که عبارت است از میزان چرخش پره‌های توربین حول محور خود پره، را به گونه‌ای تغییر می‌دهد که توان خروجی مطلوب کسب شود [۳]. این فرایند همچنان سبب می‌گردد تا ایمنی افزایش یافته و استهلاک مکانیزم‌ها کاهش یابد. از سوی دیگر بررسی دقیق عملکرد مجموعه توربین باد در حضور چنین مکانیزم کنترلی به نوبه خود فعالیتی است که جنبه‌های نوین متعدد دارد.

### مشخصات توربین مبن

در راستای انجام این پژوهش از نرم‌افزاری کاربردی در زمینه طراحی و شبیه‌سازی توربین‌های بادی به نام کیوبلید<sup>۴</sup> بهره گرفته شده است که بدلیل سادگی و دقت مناسب در مراجع نیز از آن به تعدد استفاده شده است. در این محیط می‌توان تحلیل عملکرد توربین‌های بادی را در قالب یک الگوریتم ساخت یافته اجرا نمود. این نرم افزار در سال ۲۰۱۰ به عنوان ابزاری برای تحلیل و بررسی توربین‌های بادی محور افقی و عمودی ارائه شد [۴].

از مزیت‌های آن، استفاده از تئوری تکانه المان پره<sup>۵</sup> در حل معادلات توربین و همچنین اتصال به نرم‌افزار معتبر و استاندارد ایکس‌فویل<sup>۶</sup> است که در قالب گزینه‌ای در نرم‌افزار کیوبلید قابل دسترس بوده و می‌توان برای محاسبه ضرایب نیروهای برآ و پسا که لازمه تئوری تکانه المان پره می‌باشد، از آن بهره گرفت.

روش تکانه المان پره، روش تحلیلی ساده برای محاسبه نیروهای آیرودینامیکی وارد به توربین باد محور افقی و استخراج توان تولیدی روتور است که در سال ۱۹۲۶ توسط فیزیکدان آلمانی به نام آلبرت بتز<sup>۷</sup> ارائه گردید [۵]. این روش بر اساس تئوری پیشران<sup>۸</sup> بنا شده است که در ابتدا به وسیله گلوآرت<sup>۹</sup> معرفی شد [۶].

تئوری BEM از ترکیب دو روش تئوری تکانه و تئوری المان پره حاصل شده است. فرض می‌شود که می‌توان پره را به تعدادی المان

جدول ۱- مشخصات توربین

مشخصه توربین	کمیت
تعداد پره	۳
توان خروجی	۵ مگا وات
قطر روتور	۱۲۶ متر
قطر هاب	۳ متر
کمینه، بهینه و بیشینه سرعت مجاز باد	۳، ۱۱/۴ و ۲۵ متر بر ثانیه
بهینه سرعت نوک پره	۸۰ متر بر ثانیه
کمینه و بهینه سرعت دورانی روتور	۶/۹ و ۱۲/۱ دور در دقیقه
جهت گیری روتور	بادسو
سیستم کنترل توان	کنترل زاویه گام

1. Upwind
2. Downwind
3. Pitch Angle
4. Q-blade
5. Blade Element Momentum Theory (BEM)
6. X-foil
7. Albert Betz
8. Propeller theory
9. Glauert

## معادلات حاکم و شیوه حل جریان

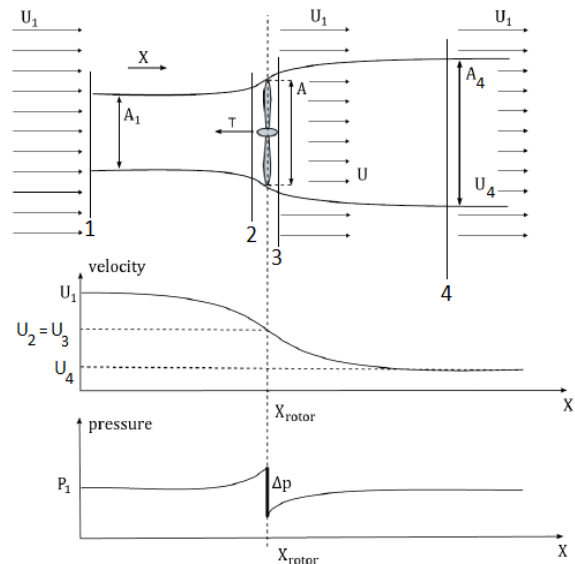
نیروهای وارد بر یک هوابر را می‌توان به دو مولفه‌ی در جهت جریان (نیروی برآ) و عمود بر جهت جریان (نیروی پسا) تقسیم نمود. این نیروها ارتباط نزدیکی با لایه مرزی تشکیل شده در مجاورت دیواره‌ی هوابر دارند. ضریب پسا برابر نسبت نیروی پسا به حاصل ضرب فشار دینامیکی در مساحت تصویر هوابر است [۸].

$$C_d = \frac{D'}{q_\infty c} \quad (1)$$

ضریب برآ نسبت نیروی برآ به حاصل ضرب فشار دینامیکی در مساحت تصویر هوابر است.

$$C_l = \frac{L'}{q_\infty c} \quad (2)$$

تئوری تکانه بدین گونه است که حجم کنترلی را مطابق شکل (۱) در اطراف روتور در نظر می‌گیرد. صفحه روتور باعث ایجاد ناپیوستگی در فشار درون حجم کنترل می‌شود و می‌توان با استفاده از معادلات بقای تکانه و در نظر گرفتن فرضیات مناسبی به استخراج توان و نیروی پیشران پرداخت.



شکل ۱- آنالیز یک بعدی جریان گذرنده از صفحه روتور توربین [۸].

با اعمال قانون بقای تکانه خطی بر روی حجم کنترل نشان داده شده در شکل (۱) می‌توان نیروی پیشران را محاسبه کرد.

$$T = U_1 (\rho A U)_1 - U_4 (\rho A U)_4 \quad (3)$$

که در آن  $A$  مساحت مقطع،  $\rho$  چگالی و  $U$  سرعت جریان هواست.

برای جریان پایا،  $(\rho A U)_1 = (\rho A U)_4 = m$  که  $m$  نرخ

$$T = m (U_1 - U_4) \quad (4)$$

انتقال جرمی است. بنابراین:

نیروی پیشران مثبت است بنابراین سرعت  $U_4$  باید کمتر از سرعت جریان آزاد ( $U_1$ ) باشد. عدم انجام کار بر هیچ یک از طرفین روتور توربین نشان می‌دهد که می‌توان از قانون برنولی در

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho U_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho U_2^2 \quad (5)$$

طرفین روتور استفاده کرد. پس در بالادست روتور داریم:  
و در پایین دست جریان:

$$P_3 + \frac{1}{2} \rho U_3^2 = P_4 + \frac{1}{2} \rho U_4^2 \quad (6)$$

فشارهای استاتیکی در بالادست و پایین دست جریان را یکسان تصور می‌کنیم ( $P_1 = P_4$ ) و همچنین به دلیل عدم وجود پسای اصطکاکی  $U_2 = U_3$  می‌باشد. پس می‌توان نیروی پیشران را به گونه‌ی زیر نمایش داد:

$$T = A_2 (P_2 - P_3) = \frac{1}{2} \rho A_2 (U_1^2 - U_4^2) \quad (7)$$

وجود توربین باد به عنوان یک مانع بر سر راه جریان آزاد باد باعث کاهش مقدار مولفه در جهت جریان سرعت باد در نزدیکی صفحه روتور نسبت به بالادست خواهد شد. این کاهش سرعت را می‌توان به صورت ضریبی از سرعت جریان آزاد هوا بیان کرد. به این ضریب ( $a$ )، فاکتور القای محوری<sup>۱</sup> می‌گویند.

$$a = \frac{U_1 - U_2}{U_1} \Rightarrow U_2 = U_1 (1 - a) \quad (8)$$

پارامترهای مهم در عملکرد یک توربین بادی محور افقی عبارتند از نسبت سرعت نوک پره،  $\lambda$ ، ضریب توان،  $C_p$ ، و ضریب نیروی پیشران  $C_T$  که در طی معادلات (۹) تا (۱۲) به بیان آن‌ها پرداخته شده است.

$$\lambda = \frac{R \Omega}{U_\infty} \quad (9)$$

که در آن،  $R$  شعاع روتور،  $\Omega$  سرعت دورانی روتور و  $U_\infty$  سرعت جریان آزاد باد است. عملکرد یک توربین بادی عموماً بر اساس ضریب توان آن مطرح می‌گردد که رابطه‌ی نهایی آن به شرح زیر است:

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho A U_\infty^3} = \frac{2P}{\rho U_\infty^3 \pi R^2} \quad (10)$$

در نهایت نیروی پیشران محوری بر روی روتور را می‌توان طبق رابطه (۱۱) بیان کرد:

1. axial induction factor

ضخامت  $dr$  که در شعاع  $r$  از مرکز قرار دارد، به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$dT = B dF_N \quad (18)$$

$$dQ = B dF_p r \quad (19)$$

که در آن،  $B$  تعداد پره های توربین باد است. در روش تکانه المان پره، نیروی پیش‌ران و گشتاور وارده به هر مقطع، از تئوری تکانه و تئوری المان پره به دست آمده و باهم برابر قرار داده می‌شوند. قبل از این کار، نیاز است که تصحیحاتی صورت گیرد که این تصحیحات شامل ضریب تصحیح پرناتل و ضریب تصحیح برای دنباله آشفته است. پس از بدست آوردن ضرایب تصحیح و اعمال آن‌ها بر روی معادلات مربوطه، روابط زیر برای نیروی پیش‌ران ( $T$ )، گشتاور ( $Q$ ) و توان ( $P$ ) بدست می‌آید:

$$T = B \sum_{i=1}^N F_{N_i} \quad (20)$$

$$Q = B \sum_{i=1}^N F_{N_i} r_i \quad (21)$$

$$P = \Omega B \sum_{i=1}^N F_{N_i} r_i \quad (22)$$

### مدل سازی هندسه توربین

همانطور که بیان شد، هندسه توربین ۵ مگاواتی NREL اساس مطالعات قرار داده شده است. ایرفویل های سازنده و مشخصات هندسه پره‌های این توربین در جدول (۲) آورده شده است که پایه مدل سازی توربین در کیوبلید می باشد.

جدول ۲- اجزای سازنده پره توربین [۷]

هواپر	زاویه پیش (درجه)	طول وتر (متر)	مکان روی پره (متر)	
Circular Foil 1	۱۳.۰۸	۳.۲۰۰	۰.۰۰	۱
Circular Foil 1	۱۳.۰۸۰	۳.۵۴۰	۱.۳۶	۲
Circular Foil 1	۱۳.۰۸۰	۳.۸۵۰	۴.۱۰	۳
Circular Foil 2	۱۳.۰۸۰	۴.۱۶۷	۶.۸۳	۴
DU99W405LM	۱۳.۰۸۰	۴.۵۵۰	۱۰.۲۵	۵
DU99W350LM	۱۱.۴۸۰	۴.۶۵۲	۱۴.۳۵	۶
DU99W350LM	۱۰.۱۶۰	۴.۴۵۸	۱۸.۴۵	۷
DU97W300LM	۹.۰۱۱	۴.۲۴۹	۲۲.۵۵	۸
DU91W2250LM	۷.۷۹۵	۴.۰۰۷	۲۶.۶۵	۹
DU91W2250LM	۶.۵۴۴	۳.۷۴۸	۳۰.۷۵	۱۰
DU93W210LM	۵.۳۶۱	۳.۵۰۲	۳۴.۸۵	۱۱

$$T = \frac{1}{2} \rho A U^2 (4a)(1-a) \quad (11)$$

و مشابه توان :

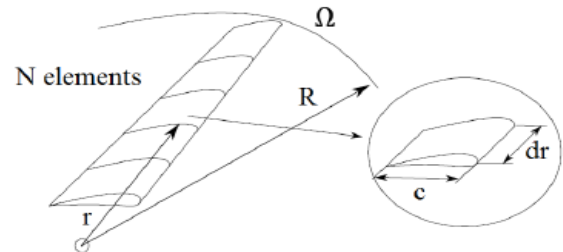
$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho A U^2} \Rightarrow C_T = 4a(1-a) \quad (12)$$

کارایی کلی یک توربین تابعی از ضریب توان روتور و همچنین بازده مکانیکی توربین است و توان خروجی توربین در قالب رابطه زیر محاسبه می گردد :

$$P_{out} = \frac{1}{2} \rho A U^3 (\eta_{mech} C_P) \quad (13)$$

### تئوری المان پره

به منظور در نظر گرفتن مشخصات هندسی پره، از تئوری المان پره استفاده می شود. در این روش، پره روتور به  $N$  المان در راستای دهانه بال مطابق شکل (۲) تقسیم می شود. معمولاً ۱۵ تا ۲۰ المان مناسب است. سپس، نیرو و ممان کل که بر پره عمل می کند، از انتگرال گیری در دهانه پره بدست می آید.



شکل ۲- تقسیم پره به  $N$  المان متساوی دارای وتر به طول  $c$ ، عرض  $dr$  و شعاع  $r$  از مرکز [۹].

نیرو های برآ و پسا به صورت دیفرانسیلی برای المان پره که اندازه  $dr$  (در راستای دهانه بال) قرار دارد، عبارتند از:

$$dL = C_L \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 (cdr) \quad (14)$$

$$dD = C_D \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 (cdr) \quad (15)$$

که در آن،  $c$  طول وتر،  $C_L$  ضریب برآ و  $C_D$  ضریب پسا است. همچنین مولفه های نیرو در شکل دیفرانسیلی به صورت زیر بیان می شوند:

$$dF_N = dL [\cos(\phi)] + dD [\sin(\phi)] \quad (16)$$

$$dF_p = dL [\sin(\phi)] - dD [\cos(\phi)] \quad (17)$$

نیروی پیش‌ران و گشتاور نیز در قالب دیفرانسیلی برای حلقه‌ای به

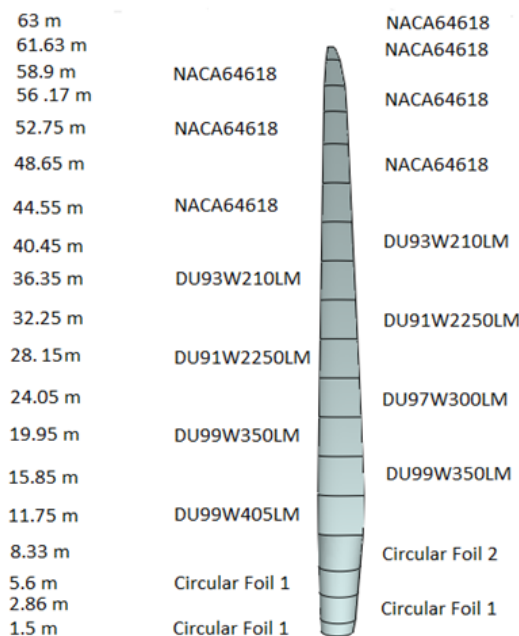
تولیدی توربین به ۱۷.۵۹ مگاوات می رسد که فاصله زیادی با توان نامی ۵ مگاوات دارد و به همین دلیل اعمال زاویه گامی به میزان ۲۳/۴۷ درجه الزامی است که مقدار قابل توجهی می باشد.

جدول ۳- مقادیر زاویه گام اعمالی بر اساس [NREL ۷].

زاویه گام (درجه)	سرعت دورانی روتور (دور بر دقیقه)	سرعت وزش باد (متر بر ثانیه)
۰/۰۰	۱۲/۱	۱۱/۴
۳/۸۳	۱۲/۱	۱۲
۶/۶۰	۱۲/۱	۱۳
۸/۷۰	۱۲/۱	۱۴
۱۰/۴۵	۱۲/۱	۱۵
۱۲/۰۶	۱۲/۱	۱۶
۱۳/۵۴	۱۲/۱	۱۷
۱۴/۹۲	۱۲/۱	۱۸
۱۶/۲۳	۱۲/۱	۱۹
۱۷/۴۷	۱۲/۱	۲۰
۱۸/۷۰	۱۲/۱	۲۱
۱۹/۹۴	۱۲/۱	۲۲
۲۱/۱۸	۱۲/۱	۲۳
۲۲/۳۵	۱۲/۱	۲۴
۲۳/۴۷	۱۲/۱	۲۵

در این پژوهش توان تولیدی توربین در سرعت های دورانی پایین تر از ۱۲.۱ دور بر دقیقه ارزیابی شده و الگوی عملکرد توربین بدین صورت اصلاح گردیده است که آن سرعت دورانی که دارای نزدیکترین توان تولیدی به توان نامی است را به عنوان سرعت عملکردی توربین در آن سرعت وزش باد مشخص، اعلام می‌دارد و سپس از سیستم اعمال زاویه گام به عنوان عامل افزایش دهنده توان استفاده کرده تا با اعمال زاویه گام مختصری به توان نامی برسد. بدین ترتیب گام بسیار مهمی در کاهش زوایای گام اعمالی و همچنین سرعت دورانی روتور برداشته شده است. مطالعات انجام شده حاکی از آن است که برای محدوده سرعت‌های وزش ۱۸ تا ۲۵ متر بر ثانیه، می‌توان سرعت دورانی ۷ دور بر دقیقه را جایگزین سرعت دورانی پیشنهادی NREL کرد و با استفاده از تابع چندجمله ای درجه ۵ به مقادیر زوایای گام متناسب برای کسب توان نامی رسید. شکل (۴) نمودار توان تولیدی توربین را در بازه سرعت‌های وزش باد ۱۸ تا ۲۵ متر بر ثانیه در سرعت دورانی پیشنهادی NREL و شکل (۵) توان تولیدی را در سرعت دورانی ۷ دور بر دقیقه نشان می دهد.

هواپر	زاویه پیمایش (درجه)	طول وتر (متر)	مکان روی پره (متر)	
DU93W210LM	۴.۱۸۸	۳.۲۵۶	۳۸.۹۵	۱۲
NACA64618	۳.۱۲۵	۳.۰۱۰	۴۳.۰۵	۱۳
NACA64618	۲.۳۱۹	۲.۷۶۴	۴۷.۱۵	۱۴
NACA64618	۱.۵۲۶	۲.۵۱۸	۵۱.۲۵	۱۵
NACA64618	۰.۸۶۳	۲.۳۱۳	۵۴.۶۷	۱۶
NACA64618	۰.۳۷۰	۲.۰۸۶	۵۷.۴۰	۱۷
NACA64618	۰.۱۶۰	۱.۴۰۰	۶۰.۱۳	۱۸
NACA64618	۰.۰۰۰	۰.۷۰۰	۶۱.۵۰	۱۹



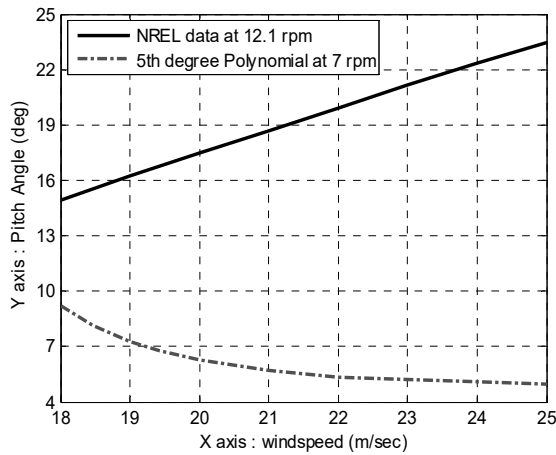
شکل ۳- پره توربین به همراه هواپرهای سازنده و محل قرارگیری آن‌ها بر روی پره

## نتایج و بحث

روند عملکردی پیشنهادی NREL برای توربین ۵ مگاواتی بدین صورت است که پس از رسیدن سرعت وزش باد به سرعت بهینه (حدود ۱۱/۴ متر بر ثانیه)، سرعت دورانی روتور بر روی ۱۲.۱ دور بر دقیقه ثابت می شود. از آن جا که توان تولیدی توربین با افزایش سرعت وزش باد افزایش می یابد و از طرفی سرعت دوران روتور ثابت است، بنابراین به عاملی جهت کاهش توان خروجی و تثبیت آن بر روی توان نامی نیاز است که آن زاویه گام پره ها می باشد. در جدول (۳) زوایای گام متناسب با هر سرعت وزش باد آورده شده است.

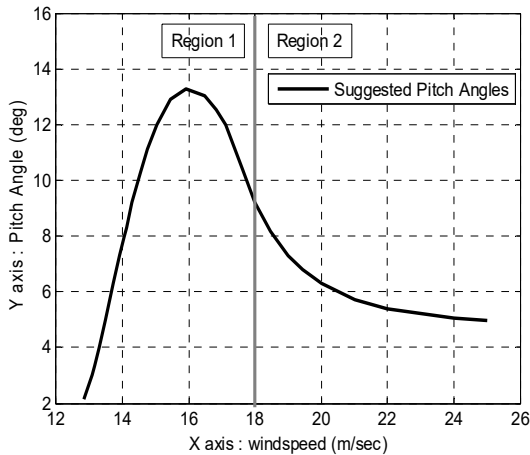
واضح است که با افزایش سرعت وزش باد، زاویه گام اعمالی نیز افزایش می یابد. به طور مثال در سرعت ۲۵ متر بر ثانیه، توان

بنابراین با کاهش سرعت عملکردی روتور می‌توان کاهش چشمگیری در زوایای گام اعمالی ایجاد کرد و همانطور که در نمودار شکل (۵) نیز واضح است، توان‌های تولیدی در آن شرایط اختلاف بسیار کمتری تا توان نامی دارند. نکته دیگر حائز توجه، سیر نزولی زوایای گام با سرعت وزش باد می‌باشد که این امر استفاده هرچه بیشتر از ظرفیت‌های توربین و افزایش عمر مفید آن را به دنبال خواهد داشت. شکل (۷) این تفاوت را بهتر بیان می‌کند.

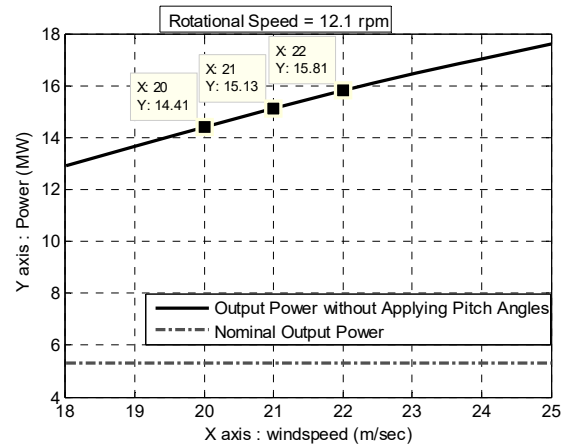


شکل ۷- مقایسه زوایای گام اعمال شده بر روی پره

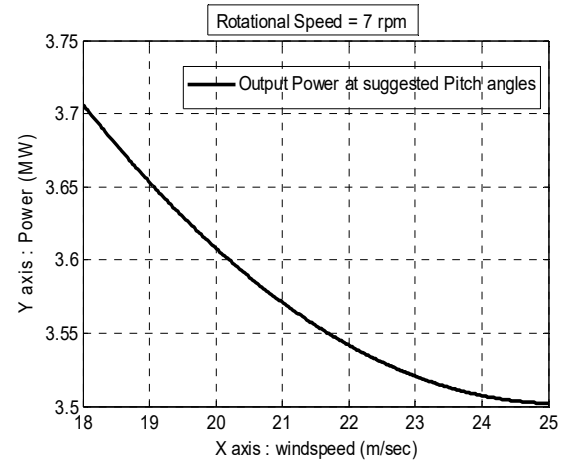
بدین ترتیب برای بازه سرعت های ۱۸ تا ۲۵ متر بر ثانیه، سرعت دورانی ۷ دور بر دقیقه و برای بازه ۱۳ تا ۱۷ متر بر ثانیه سرعت دورانی ۹ دور بر دقیقه به عنوان الگوی عملکردی پیشنهاد می‌شود. شکل (۸) نمودار زوایای گام اعمال شده بر روی پره‌ها را نشان می‌دهد. ناحیه ۱ دارای سرعت دورانی ۹ دور بر دقیقه و ناحیه ۲ سرعت دورانی ۷ دور بر دقیقه است.



شکل ۸- زوایای گام اعمال شده بر پره در سرعت های دورانی پیشنهادی

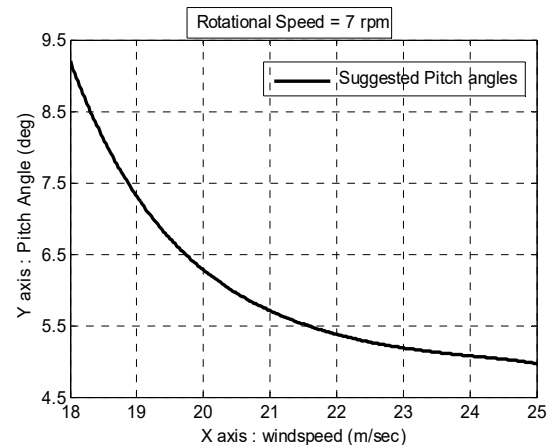


شکل ۴- توان تولیدی در سرعت دورانی ۱۲.۱ دور بر دقیقه



شکل ۵- توان تولیدی در سرعت دورانی ۷ دور بر دقیقه

همانگونه که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، توان های تولیدی در سرعت دورانی ۷ دور بر دقیقه نسبت به سرعت دورانی ۱۲.۱ دور بر دقیقه، اختلاف بسیار کمتری با توان نامی دارد و این امر نیل به توان مطلوب را آسان تر می‌نماید. زوایای گام متناسب با سرعت دورانی ۷ دور بر دقیقه برای سرعت های وزش ۱۸ تا ۲۵ متر بر ثانیه در شکل (۶) آورده شده است.



شکل ۶- زوایای گام اعمالی در سرعت دورانی ۷ دور بر دقیقه

## نتیجه گیری و جمع بندی

پس از مطالعات انجام شده بر روی توربین محور افقی ۵ مگاواتی NREL به این مهم می توان دست یافت که استفاده از سیستم کنترلی زاویه گام قدمی عظیم در تحول تحلیل توربین های بادی محسوب می گردد و در همین راستا، در این پژوهش زوایای گام متناظر با کسب توان بیشینه در هر سرعت باد و هر سرعت دورانی مجاز با کمک نرم افزار کیوبلید استخراج گردیده و استخراج توان نامی با سرعت دورانی پایین تر و زاویه گام کمتر میسر شده است که این امر باعث افزایش راندمان توربین و بهره گیری هرچه بیشتر از آن و همچنین افزایش عمر مفید توربین و کاهش استهلاک مکانیزم های عملکردی می شود. بدین ترتیب راهنمای کاملی در خصوص بهینه کردن خروجی توربین مورد نظر با اعمال زوایای گام استخراج شده مهیا شده است که مجال دستیابی به توان بیشینه مجاز در هر پروفیل سرعتی را فراهم می نماید.

در ادامه این فعالیت می توان به تحلیل شرایط ناپایا در تحولات سرعت باد پرداخت که مستلزم بکارگیری مدل های ایرودینامیک ناپایا خواهد بود. بعلاوه می توان پیشنهاداتی در خصوص تکنیک های کنترل فعال جریان به مدلسازی حاضر افزود و نتایج آن را بر عملکرد و راندمان بررسی کرد.

## مراجع

- [1] C. van Dam, D. E. Berg, and S. J. Johnson, "Active load control techniques for wind turbines," tech. rep., Sandia National Laboratories, 2008.
- [2] P. J. Schubel and R. J. Crossley, "Wind Turbine Blade Design," *Energies* ISSN 1996-1073, PP. 3425-3449, 2012.
- [3] National Instrument, "Wind Turbine Control Methods," 2008.
- [4] D. Marten, J. Wendler, G. Pechlivanoglou, C. N. Nayeri and C. O. Paschereit, "Qblade: An Open Source Tool for Design and Simulation of Horizontal and Vertical Axis Wind Turbines." *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, Vol. 3, pp. 264-269, 2013.
- [5] Dong L, Lao M, Li Y, Song x, Xu K. Study on Aerodynamic Design of Horizontal Axis Wind Turbine Generator System. *International Conference on Energy and Environment Technology*, 2009, IEEE-conference; DOI 10.1109/ICEET.2009.208; P.841-4.
- [6] H. Glauert, "Airplane Propellers," in *Aerodynamic theory*, pp.169-360, Springer, 1935.
- [7] J. Jonkman, S. Butterfield, W. Musial and G. Scott, "Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development," Technical Report NREL/TP-500-38060, National Renewable Energy Laboratory, 2009.
- [8] M. O. L. Hansen, "Aerodynamics of Wind Turbines," 2<sup>nd</sup> Edition, London, earthscan, 2008.
- [9] G. Ingram, "Wind Turbine Blade Analysis using the Blade Element Momentum Method," Version 1.1, 2011.