



## مطالعه اثرات اغتشاش دورانی سکوی شناور بر عملکرد آیرودینامیکی توربین باد فراساحلی در حضور سیستم کنترل زاویه گام

سعید کریمیان علی آبادی\*، سپهر راسخ

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۳۰  
بازنگری: ۱۳۹۷/۰۴/۱۶  
پذیرش: ۱۳۹۷/۰۶/۱۶  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷/۰۶/۱۹

### کلمات کلیدی:

توربین باد فراساحلی  
سکوی شناور  
سیستم کنترل زاویه گام  
روش مومنتوم المان پره  
نسبت سرعت نوک پره

**خلاصه:** در این تحقیق، به بررسی اثرات دوران سکوی توربین باد فراساحلی شناور ۵ مگاواتی بر روی عملکرد آیرودینامیکی آن در حضور سیستم کنترل زاویه گام پرداخته می‌شود. برای مدل سازی آیرودینامیکی از روش مومنتوم المان پره ناپایا استفاده شده است. ابتدا این مدل آیرودینامیکی بر اساس داده‌های مرجع توربین باد نمونه اعتبارسنجی شده و نتایج مطلوب حاصل شده است. در ادامه به منظور اعمال سیستم کنترل تثبیت توان، مقدار زاویه گام بعنوان پارامتر کنترلی بر اساس یک کنترل کننده تناسبی انتگرال‌گیر استخراج گردیده است. حرکت اغتشاشی وارد به توربین باد شناور در سه جهت پیچ، رول و یاو مطالعه شده که این جابجایی‌های دورانی با استفاده از تابع سینوسی تقریب زده شده است. نتایج نشان می‌دهد که از میان سه حرکت مورد بررسی، حرکت پیچ بیشترین اثر را بر روی پارامترهای عملکردی توربین باد شناور دارد. این حرکت باعث می‌شود تا مقدار ضریب توان میانگین نسبت به حالت مینا یا توربین باد ثابت در نسبت‌های سرعت نوک پره کمتر از ۷ کاهش یابد و در نسبت‌های سرعت نوک پره بیشتر از ۷ افزایش ضریب توان نتیجه شود. این روند برای حرکت‌های رول و یاو بصورت خفیف‌تر دیده می‌شود. علاوه بر این مقدار زاویه گام میانگین همواره در حالت شناور افزایش می‌یابد که به معنای تلاش بیشتر سیستم کنترلی برای تثبیت توان می‌باشد. از این بستر با توجه به قابلیت تحلیل ناپایا می‌توان در مطالعه پارامتری و نیز در بهینه سازی توربین‌های بادی شناور استفاده نمود.

### ۱- مقدمه

امروزه به علت فواید زیاد توربین‌های بادی فراساحلی<sup>۱</sup>، استفاده از آن‌ها در حال افزایش می‌باشد. اگرچه هزینه ساخت و نصب این نوع توربین‌ها بیشتر از توربین‌های بادی نصب شده در خشکی می‌باشد، اما به علت فضای بیشتر و همچنین وجود پتانسیل بیشتر انرژی در دریاها، استفاده از این نوع توربین بسیار مورد استقبال قرار گرفته است [۱]. آمار مربوط به استفاده از توربین‌های بادی فراساحلی نشان می‌دهد که ظرفیت این نوع توربین به میزان ۶۲ درصد افزایش یافته است [۲ و ۳]. توربین‌های بادی نصب شده در دریا و اقیانوس یا همان توربین‌های بادی فراساحلی به دو صورت ثابت و شناور قابل نصب می‌باشند. توربین‌های بادی شناور در مکان‌هایی نصب می‌شوند که عمق دریا زیاد (معمولاً بیشتر از ۵۰ متر) باشد زیرا در این مناطق ایجاد سکوی ثابت بسیار سخت و پرهزینه می‌باشد. سه نوع سکوی پلتفرم برای شناور سازی توربین‌های بادی فراساحلی مورد استفاده می‌گیرد. نوع اول به پایا ساز شناور<sup>۲</sup>

، نوع دوم به پایاساز با وزنه تعادلی<sup>۳</sup> و نوع سوم به پایاساز با لنگر مهارگر<sup>۴</sup> معروف می‌باشد. از تفاوت‌های اصلی این سه نوع سکوی، محل مرکز دوران آن‌ها می‌باشد. به طور مثال مرکز دوران نوع اول بسیار نزدیک به سطح دریا می‌باشد، در حالی که در نوع دوم مرکز دوران توربین باد زیر سطح آب قرار دارد. هر سه نوع یاد شده با استفاده از طناب‌های محکم به کف دریا متصل شده‌اند تا از حرکت بیش از اندازه آن‌ها جلوگیری شود.

به علت وجود جریانات جوی مانند امواج، توربین‌های بادی شناور می‌توانند در ۶ جهت حرکت کنند. این حرکات اغتشاشی به دو صورت دورانی و انتقالی می‌باشند، که سه تای آن به صورت انتقالی و سه تای دیگر به صورت دورانی می‌باشند. حرکات ناشی از شناور بودن توربین باعث می‌شود تا بررسی آیرودینامیکی این نوع توربین‌ها مشکل شود و همچنین این حرکات بر روی عملکرد توربین بادی تأثیر می‌گذارند. از این رو بررسی عملکرد توربین‌های بادی شناور اهمیت بسیار زیادی دارد. در شکل ۱ هر کدام از این حرکات و نام‌گذاری آن‌ها برای یک توربین باد شناور نشان داده شده

- 1 Offshore wind turbine
- 2 Buoyancy stabilized (barge)

- 3 Ballast stabilized (spar buoy)
- 4 Mooring line stabilized (tension leg)

\*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: karimian@modares.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.



را به منظور بررسی دقت روش بررسی کردند. نتایج نشان داد که این روش دقت مناسبی برای بررسی توربین‌های بادی شناور دارد. همچنین نشان داده شد که استفاده از مدل دنباله دینامیکی به منظور اعمال اثرات ناپایای آیرودینامیکی الزامی می‌باشد.

خسروی و همکاران [۸] به صورت آزمایشگاهی بررسی اثر حرکت انتقالی را بر روی عملکرد یک توربین باد نمونه مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان دهنده مقدار کمی افزایش توان توربین در این حالت می‌باشد.

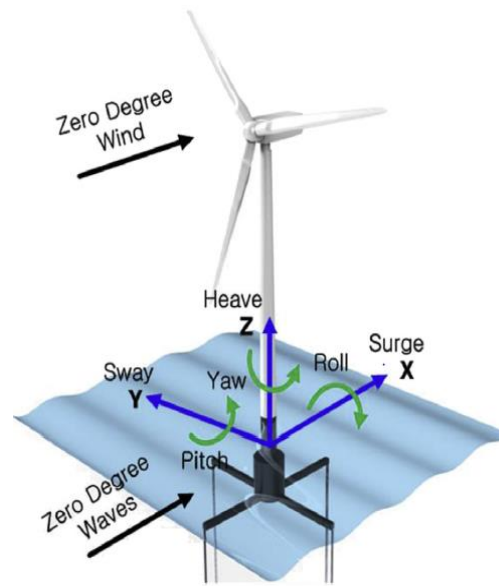
از منظر سیستم کنترل زاویه گام، می‌توان به کار نامیک و استول [۹] و [۱۰] اشاره نمود که دو نوع سیستم کنترلی را برای استفاده در توربین‌های بادی شناور مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که سیستم کنترل زاویه گام باعث کاهش نیروهای خستگی می‌شود.

با توجه به تحقیقات انجام شده در زمینه مطالعه اثرات اغتشاش دورانی سکوی شناور بر عملکرد آیرودینامیکی توربین باد فراساحلی، دو خلأ مهم احساس شد. اول اینکه، اثرات حرکت‌های یاو و رول بررسی نشده بودند و موارد مورد بررسی حرکت پیچ به صورت جامع در نسبت سرعت نوک پره‌های متفاوت بررسی نشده بود. دومین مورد احساس شده، عدم لحاظ نمودن اثر سیستم کنترل زاویه گام به عنوان یک سیستم فعال در توربین‌های بادی می‌باشد.

از این رو، برای شبیه سازی آیرودینامیکی از روش مومنتوم المان پره ناپایا استفاده شده است. توربین باد مینا مورد بررسی، توربین ۵ مگاواتی آزمایشگاه ملی انرژی تجدید پذیر<sup>۴</sup> می‌باشد که از سیستم کنترل زاویه گام برای کنترل توان توربین باد استفاده می‌کند. با توجه به اینکه حرکت سکو با استفاده از یک تابع از پیش تعیین شده تعریف شده است، از اثرات هیدرودینامیکی صرف نظر شده است. شبیه‌سازی‌های انجام شده در محیط کوپل شده متلب-سیمولینک انجام شده است.

## ۲- توربین باد مینا

توربین مورد استفاده در این تحقیق هم به صورت ثابت و هم به صورت شناور در دریاها و اقیانوس‌ها قابل نصب می‌باشد. توان نامی این توربین در سرعت باد ۱۱/۴ متر بر ثانیه به دست می‌آید. دور نامی روتور توربین باد ۱۲/۱ دور در دقیقه می‌باشد [۱۱]. مشخصات دیگر این توربین در جدول ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: توربین باد فراساحلی شناور

Fig. 1. Offshore floating wind turbine

است. همان طور که مشاهده می‌شود، حرکت‌های دورانی در سه جهت جهت پیچ<sup>۱</sup>، یاو<sup>۲</sup> و رول<sup>۳</sup> می‌باشند.

در زمینه بررسی اثر حرکت سکوی توربین بادی بر روی عملکرد آیرودینامیکی، می‌توان به پژوهش جئون و همکاران [۴] اشاره نمود. در این تحقیق، اثر حرکت پیچ در شرایط سرعت باد کم و دامنه حرکت پیچ ۳ درجه با استفاده از روش‌های گردابه‌ای انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که این حرکت باعث پیچیده شدن جریان ناحیه روتور می‌شود و همچنین حرکت سکو در نسبت سرعت نوک کم باعث می‌شود تا ناحیه ویک آشفته شود، که این پدیده می‌تواند بر روی عملکرد توربین باد شناور اثرگذار باشد. ترن و کیم [۵] نیز اثر حرکت پیچ را با استفاده از روش‌های عددی و مومنتوم المان پره در نسبت سرعت نوک پره برابر ۷ بررسی کردند. نتایج نشان داد که حرکت پیچ باعث نوسان شدید نیروهای آیرودینامیکی اعمال شده به روتور می‌شود. از دیگر کارهای انجام شده می‌توان به کار فاروگا و همکاران [۶] اشاره نمود که اثر حرکت سکوی توربین باد شناور را به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که توان توربین باد شناور در این حالت افزایش می‌یابد. وال و همکاران [۷] اثر حرکت جابجایی سکوی شناور را بر روی عملکرد آیرودینامیکی یک توربین باد فراساحلی با استفاده از روش مومنتوم المان پره

- |   |       |
|---|-------|
| 1 | Pitch |
| 2 | Yaw   |
| 3 | Roll  |

Table 1. Properties of baseline wind turbine

جدول ۱: مشخصات توربین باد مبنا

مشخصه	مقدار
توان نامی	۵ مگاوات
تعداد پره	۳
قطر روتور و تویی	۳۱۲۶ و ۳ متر
نسبت جعبه دنده	۹۷:۱
ارتفاع تویی	۹۰ متر
اینرسی روتور، اینرسی ژنراتور	۵۳۴/۱۱۶ و ۱۱۷۷۶۰۴۷
	(kg/m <sup>2</sup> )

### ۳- مبانی مدل‌سازی آیرودینامیکی

۳-۱- روش مومنتوم المان پره ناپایا

در این تحقیق، از روش‌های موجود برای بررسی آیرودینامیکی توربین باد شناور استفاده شده است. روش اصلی مورد استفاده، روش تکانه المان پره ناپایا می‌باشد. این روش ترکیبی از تئوری تکانه المان پره با روش‌های ناپایای آیرودینامیکی از قبیل مدل دنباله دینامیکی و روش واماندگی دینامیکی می‌باشد. تئوری تکانه المان پره یکی از روش نیمه تحلیلی می‌باشد که به علت سادگی و هزینه محاسباتی پایین، مورد توجه بسیاری از محققان می‌باشد. این روش از ترکیب تئوری تکانه و روش نواری به دست می‌آید. بر اساس تئوری تکانه، جریان هنگام عبور از روتور توربین دچار افت سرعت می‌شود که این افت سرعت باعث ایجاد توان در توربین و همچنین افزایش فشار در نزدیکی روتور (به علت کاهش سرعت) می‌شود (بر اساس رابطه برنولی). بعد از عبور جریان، فشار به حالت عادی برمی‌گردد و افت فشار رخ داده جبران می‌شود، اما برای سرعت جریان این بازیابی وجود ندارد به این معنی که سرعت برخلاف فشار به مقدار اولیه خود باز نمی‌گردد و کمتر از مقدار خود در مجاورت روتور می‌شود. در این تئوری، برای به دست آوردن این کاهش سرعت در نزدیکی روتور و همچنین در ناحیه ویک، از پارامتری استفاده می‌شود که به ضریب القای محوری  $a$  معروف می‌باشد. این ضریب رابطه‌ای میان سرعت جریان قبل از روتور و سرعت جریان در نزدیکی روتور ایجاد می‌نماید که این رابطه به صورت زیر بیان می‌شود:

$$u = (1-a)V_0 \quad (1)$$

$V_0$  سرعت جریان آزاد قبل از ورود به روتور می‌باشد و  $u$  سرعت در مجاورت روتور می‌باشد. اما فرض اساسی‌ای که کار را برای استفاده از روش مومنتوم سهولت می‌بخشد این است که کاهش سرعت محوری در ناحیه ویک دو برابر کاهش سرعت در مجاورت روتور توربین می‌باشد. بنابراین سرعت محوری در پایین دست جریان  $u_1$  در ناحیه ویک از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$u_1 = (1-2a)V_0 \quad (2)$$

همچنین برای اعمال اثرات چرخشی در ناحیه ویک پارامتری تعریف می‌شود که ضریب القای دورانی  $a'$  نام دارد. این ضریب نیز رابطه‌ای میان سرعت دورانی توربین و سرعت دورانی جریان در ناحیه ویک ایجاد می‌کند که به صورت رابطه زیر بیان می‌شود [۱۲].

$$a' = \omega / 2\Omega \quad (3)$$

در این رابطه  $\omega$  سرعت دورانی در ناحیه ویک و  $\Omega$  سرعت دورانی روتور می‌باشد. در صورت به دست آمدن این دو ضریب، توان توربین نیز قابل اندازه‌گیری می‌باشد. مقدار این دو ضریب در روابط زیر نشان داده شده است:

$$a = \frac{1}{\frac{4F_0 \sin^2 \phi}{\sigma C_n} + 1} \quad (4)$$

$$a' = \frac{1}{\frac{4F_0 \sin \phi \cos \phi}{\sigma C_t} + 1} \quad (5)$$

در روابط (۴) و (۵)،  $F$  ضریب افت نوک پره،  $C_n$  ضریب نیروی عمودی بر بالواره،  $C_t$  ضریب نیروی مماسی بر بالواره،  $\sigma$  ضریب صلبیت و  $\phi$  زاویه بین سرعت نسبی در هر مقطع با صفحه چرخش روتور توربین باد می‌باشد. برای به دست آوردن ضریب افت نوک پره روش‌های مختلفی وجود دارد که می‌توان از روش پرانتل [۱۳] استفاده نمود که به صورت زیر بیان می‌شود:

### ۳-۲- مدل دنباله دینامیکی

برای اعمال اثرات تأخیر در اعمال سرعت القایی ناشی از ناحیه ویک در زمان‌هایی که توربین باد تغییر ناگهانی در زاویه گام پره، سرعت روتور و سرعت باد را تجربه می‌کند، بایستی از یک مدل مناسب استفاده شود. علت اصلی این تأخیر، ایجاد گردابه‌های لبه فرار از پره‌های توربین می‌باشد. این گردابه‌ها بعد از ایجاد شدن با سرعت جریان حرکت کرده و در ناحیه ویک از روتور دور می‌شوند. بدیهی است که با دور شدن این گردابه‌ها از روتور، اثر آن‌ها نیز کمتر می‌گردد.

برای اعمال اثرات ناشی از این گردابه‌ها از مدل اسنل [۱۵] استفاده شده است. در این مدل فیلتری برای سرعت القایی تعریف شده است که شامل دو معادله دیفرانسیل مرتبه اول می‌باشد که می‌بایست حل شوند:

$$W_{int} + \tau_1 \frac{dW_{int}}{dt} = W_{qs} + k \tau_1 \frac{dW_{qs}}{dt} \quad (11)$$

$$W + \tau_2 \frac{dW}{dt} = W_{int}$$

در رابطه (۱۱) همان سرعت القایی در حالت شبه پایا می‌باشد که در قسمت‌های قبل به دست آورده شد.  $W_{int}$  و  $W$ ، به ترتیب سرعت القایی میانی و سرعت القایی نهایی محاسبه شده با استفاده از مدل دنباله دینامیکی می‌باشند. در این فیلتر، ابتدا سرعت القایی میانی به دست آورده می‌شود و سپس سرعت القایی نهایی که مقدار مورد نهایی می‌باشد به دست آورده می‌شود. همچنین در روابط بالا ثوابتی وجود دارند که برای اطلاع بیشتر از این ثوابت و همچنین روش حل معادلات یاد شده می‌توان به مرجع [۱۲] مراجعه نمود.

### ۳-۳- مدل واماندگی دینامیکی

زمانی که یک ایرفویل تحت تغییرات زاویه حمله متغیر بزمان قرار می‌گیرد به شرطی که زاویه حمله از زاویه حمله واماندگی بیشتر باشد، جدایی جریان خود را به صورت واماندگی دینامیکی نشان می‌دهد [۱۶]. این پدیده بعد از بی رمق شدن جریان با تشکیل گردابه در لبه حمله ایرفویل شروع شده که با گذشت زمان این ساختار گردابه‌ای از سمت لبه فرار می‌رود. در این حالت نیروی برآ بیشینه از حالت استاتیکی بیشتر می‌باشد. برای تحلیل آیرودینامیکی توربین‌های بادی بایستی از یک مدل واماندگی دینامیکی مناسب استفاده شود. به این منظور از روش نیمه تحلیلی لیشمن-بدووس

$$F_0 = \frac{2}{B} \cos^{-1} \left( e^{-\left( \frac{B(R-r)}{2 \sin(\varnothing)} \right)} \right) \quad (6)$$

ضریب صلبیت نیز به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\sigma(r) = \frac{c(r)B}{2\pi r} \quad (7)$$

که  $R$  طول پره،  $B$  تعداد پره‌ها و  $c$  طول وتر در شعاع  $r$  می‌باشد. در روش تکانه المان پره ناپایا، برای اعمال اثرات سرعت‌های القایی در راستای مماس و عمود بر هر المان از بال در هر گام زمانی از روابط زیر استفاده می‌شود:

$$W_z = \frac{-BL \cos(\varnothing)}{4\pi\rho r F_0 |V_0 + f_g n(nW)|} \quad (8)$$

$$W_y = \frac{-BL \sin(\varnothing)}{4\pi\rho r F_0 |V_0 + f_g n(nW)|} \quad (9)$$

در این روابط  $L$  نیروی برآ،  $V_0$  سرعت جریان باد و  $n$  بردار عمود بر هر مقطع از پره در هر گام زمانی می‌باشد. طبق تئوری تکانه، رابطه یاد شده برای ضریب القای محوری، این رابطه فقط برای  $a$  های کمتر از  $0.2$  معتبر می‌باشد که برای تصحیح این پارامتر در مقادیر بیشتر از  $0.2$  از ضریب اصلاح گلوئارت  $f_g$  استفاده می‌شود [۱۴] که با توجه به توضیحات یاد شده به صورت زیر بیان می‌شود.

$$f_g = \begin{cases} 1 & a < a_c \\ \frac{a_c}{a} \left( 2 - \frac{a_c}{a} \right) & a > a_c \end{cases} \quad (10)$$

در این رابطه  $a_c$  برای  $0.2$  می‌باشد. برای به دست آوردن نیروی برآ در حالت ناپایا لازم است از روش لیشمن-بدووس که در ادامه به آن پرداخته می‌شود، استفاده نمود.

$$C_{nor}^{nc} = \left( K_{\alpha_n} - \dot{K}_{\alpha_n} \right) \frac{4k_{\alpha} T_I}{M} + \left( K_{q_n} - \dot{K}_{q_n} \right) \frac{k_q T_I}{M} \quad (17)$$

در رابطه (۱۷) ضرایب  $K$  و  $\dot{K}$  با استفاده از روابط (۱۸) تا (۲۱) به دست می‌آیند.  $T_I$  برابر نسبت طول وتر ایرفویل به سرعت صوت و  $q$  نرخ تغییر زاویه پیچ بالواره می‌باشد. لازم به ذکر می‌باشد که زیرنویس  $n$  نشان از گام زمانی مورد بررسی می‌باشد. بدیهی است که زیرنویس  $n-1$  به معنی گام زمانی قبل می‌باشد.

$$K_{\alpha_n} = \frac{\alpha_n - \alpha_{n-1}}{\Delta t} \quad (18)$$

$$K_{q_n} = \frac{q_n - q_{n-1}}{\Delta t} \quad (19)$$

$$k'_{\alpha_n} = \exp\left(-\frac{\Delta t}{2d_{\alpha} T_I}\right) \times (k'_{\alpha_{n-1}} + K_{\alpha_n} - K_{\alpha_{n-1}}) \quad (20)$$

$$k'_{q_n} = \exp\left(-\frac{\Delta t}{2d_q T_I}\right) \times (k'_{q_{n-1}} + K_{q_n} - K_{q_{n-1}}) \quad (21)$$

در روابط (۱۸) تا (۲۱) داریم:

$$d_{\alpha} = 0.75 \times \left[ (1-M) + \pi \beta^2 M^2 (A_1 b_1 - A_2 b_2) \right]^{-1} \quad (22)$$

$$d_q = 0.75 \left[ (1-M) + 2\pi \beta^2 M^2 (A_1 b_1 - A_2 b_2) \right]^{-1} \quad (23)$$

در مرحله دوم، با استفاده از داده‌های قسمت قبل نیروهای آیرودینامیکی با اضافه شدن اثرات ناپایای جدایش جریان به دست می‌آیند. به این منظور، با استفاده از تئوری هلمهولتز-کرشهوف، که رابطه بین محل جدایش جریان

[۱۷] استفاده می‌شود. این روش مدل سازی واماندگی دینامیکی را بر اساس تقسیم مدل به سه قسمت مرتبط به هم انجام می‌دهد. در ابتدا جریان به صورت چسبیده فرض شده و با استفاده از روش پاسخ واحد ضریب نیروی عمود بر سطح بالواره  $C_{nor}^{pot}$  به دست آورده می‌شود. با توجه به روش پاسخ واحد، این ضریب از جمع نیروهای چرخشی  $C_{nor}^c$  و غیر چرخشی  $C_{nor}^{nc}$  وارده بر بالواره به دست آورده می‌شود که به صورت رابطه زیر بیان می‌شود:

$$C_{nor}^{pot} = C_{nor}^c + C_{nor}^{nc} \quad (12)$$

قسمت چرخشی با استفاده از انتگرال گیری دوهامل به صورت رابطه زیر تعریف شده است.

$$C_{nor}^c = C_{nor\alpha} \alpha_e(s, M) \quad (13)$$

در رابطه (۱۳)،  $\alpha_e$  که زاویه حمله معادل نام دارد به صورت رابطه (۱۴) تعریف می‌شود:

$$\alpha_e(s, M) = \alpha(s) - X(s) - Y(s) \quad (14)$$

در رابطه (۱۴) برای  $X(s)$  و  $Y(s)$  داریم:

$$X(s) = X(s - \Delta s) \exp(-b_1 \beta^2 \Delta s) + A_1 \Delta \alpha \exp\left(-\frac{b_1 \beta^2 \Delta s}{2}\right) \quad (15)$$

$$Y(s) = Y(s - \Delta s) \exp(-b_2 \beta^2 \Delta s) + A_2 \Delta \alpha \exp\left(-\frac{b_2 \beta^2 \Delta s}{2}\right) \quad (16)$$

در روابط قبل و پیشرو  $M$  عدد بی بعد ماخ،  $\beta = \sqrt{1-M^2}$ ،  $S$  زمان بی بعد و  $\Delta \alpha$  تغییر زاویه حمله می‌باشند.

در روابط (۱۵) و (۱۶)، ضرایب  $A_1$ ،  $A_2$ ،  $b_1$  و  $b_2$ ، ضرایب تابع پاسخ واحد می‌باشند که به ترتیب برابر با  $0.3$ ،  $0.7$ ،  $0.14$  و  $0.53$  می‌باشند. سهم غیر چرخشی نیروی آیرودینامیکی از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$D_{f_n} = D_{f_{n-1}} \exp\left(-\frac{\Delta s}{T_f}\right) + (f'_n - f'_{n-1}) \exp\left(-\frac{\Delta s}{2T_f}\right) \quad (29)$$

حال با به دست آمدن  $\ddot{f}$  که اصلاح شده  $f$  می‌باشد، ضرایب نیروی عمود و مماس بر سطح ایرفویل  $C_{axial_n}$  در حالت ناپایا با استفاده از روابط (۳۰) و (۳۱) به دست می‌آیند.  $\alpha_0$  نیز معادل زاویه حمله  $C_{nor}$ . برابر صفر می‌باشد.

$$C_{nor_n}^f = C_{nor_\alpha} \left(\frac{1 + \sqrt{f}}{2}\right)^2 \sin(\alpha_e - \alpha_0) \quad (30)$$

$$C_{axial_n} = C_{nor_\alpha} \sqrt{\ddot{f}} (\alpha - \alpha_0) \sin(\alpha_e - \alpha_0) \quad (31)$$

در مرحله آخر برای اعمال اثر گردابه ایجاد شده در لبه حمله لازم است اختلاف بین ضریب نیروی عمودی خطی شده قسمت چرخشی در حالت ناپایا را از قسمت خیر خطی آن با استفاده از تئوری کرشهوف محاسبه نمود، که به صورت روابط (۳۲) و (۳۳) تعریف می‌شود:

$$C_{v_n} = C_{nor_n}^c (1 - K_{nor_n}) \quad (32)$$

$$K_{nor_n} = \left(\frac{1 + \sqrt{f}}{2}\right)^2 \quad (33)$$

تا زمانی که این گردابه از ایرفویل کاملاً دور نشده است، هنوز اثر افزایشی در ضریب نیروی عمود بر ایرفویل دارد. رابطه (۳۴) اثر این گردابه را بر روی ضرایب آیرودینامیکی ایرفویل نشان می‌دهد.

$$C_{nor_n}^v = C_{nor_{n-1}}^v \exp\left(-\frac{\Delta s}{T_v}\right) + (C_{v_n} - C_{v_{n-1}}) \exp\left(-\frac{\Delta s}{2T_v}\right) \quad (34)$$

و ضریب نیروی عمود بر سطح ایرفویل را بیان می‌سازد، برای به دست آوردن نیروی عد بر سطح ایرفویل در حالت جدایش استفاده می‌کند. این تئوری به صورت زیر رابطه زیر بیان می‌شود.

$$C_{nor}(\alpha, f) = C_{nor_\alpha} \left(\frac{1 + \sqrt{f}}{2}\right)^2 \sin(\alpha) \quad (24)$$

در این رابطه  $C_{nor_\alpha}$  برابر شیب منحنی ضریب نیروی عمود با ایرفویل بحسب زاویه حمله می‌باشد. لازم به ذکر است که این رابطه برای حالت پایا مورد استفاده قرار می‌گیرد و برای استفاده در حالت ناپایا باید اصلاح شود. برای اصلاح این رابطه کافی است تا تأخیر به وجود آمده در حالت ناپایا به صت زیر تعریف شود:

$$C'_{nor_n} = C_{nor_n}^{pot} - D_{p_n} \quad (25)$$

که در رابطه (۲۵) داریم:

$$D_{p_n} = D_{p_{n-1}} \exp\left(-\frac{\Delta s}{T_p}\right) + (C_{nor_n}^{pot} - C_{nor_{n-1}}^{pot}) \exp\left(-\frac{\Delta s}{2T_p}\right) \quad (26)$$

حال با استفاده از رابطه‌های (۲۵) و (۲۶) زاویه حمله مؤثر به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\alpha_{eff}(t) = \frac{C'_{nor_n}}{C_{nor_\alpha}} \quad (27)$$

با استفاده از زاویه حمله مؤثر، نقطه جدایش مؤثر  $f$  نیز با استفاده از رابطه (۲۴) به دست می‌آید. در این روش بایستی برای اعمال اثر لایه مرزی ناپایا مقدار  $f'$  اصلاح شود. برای این کار  $\ddot{f}$  به صورت رابطه (۲۸) تعریف شده است:

$$\ddot{f} = f' - D_{f_n} \quad (28)$$



انتگرال گیر کنترل کننده می‌باشند. لازم به ذکر است که سیستم کنترلی مورد استفاده در این تحقیق، همان سیستم مورد استفاده در توربین اصلی می‌باشد که توسط مرجع [۱۱] ارائه شده است.

#### ۵- روش حل مسئله

نتایج حاصل از شبیه سازی با استفاده کوپل مدل آیرودینامیکی مومنتوم المان پره ناپایا با سیستم کنترل زاویه گام به دست آورده می‌شوند. روش مومنتوم المان پره ناپایا با استفاده از روند تکراری اقدام به بدست آوردن نیروهای آیرودینامیکی می‌کند. بعد از به دست آوردن نیروهای آیرودینامیکی و یا همان گشتاور وارده به روتور، با استفاده از مدل دینامیکی توربین سرعت دورانی روتور به دست آورده می‌شود. سیستم کنترلی در صورت وجود اختلاف بین سرعت دانی مبنا و سرعت دورانی توربین اقدام به تغییر زاویه گام می‌کند تا سرعت دورانی روتور به مقدار مورد نظر که همان مقدار ما می‌باشد برسد. اثر حرکت سکوی توربین باد شناور با استفاده از اعمال اثر تغییر سرعت ناشی از این حرکت  $V_{ind}$  به بردار سرعت نسبی وارده بر هر مقطع پره‌های توربین باد اعمال می‌شود. بنابراین بردار سرعت نسبی  $V_{rel}$  برای هر مقطع پره توربین باد از رابطه زیر به دست آورده می‌شود:

$$V_{rel} = \begin{pmatrix} V_{0x} \\ V_{0y} \\ V_{0z} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ -r\Omega \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ w_y \\ w_z \end{pmatrix} + V_{ind} \quad (38)$$

در سمت راست معادله، عبارت اول بردار سرعت باد در مختصات چسبیده به روتور توربین، عبارت دوم سرعت ناشی از دوران روتور و عبارت سوم بردار سرعت‌های القایی می‌باشد. مقدار  $V_{ind}$  با توجه به نوع حرکت سکو قابل محاسبه می‌باشد که در ادامه به آن اشاره خواهد شد. برای فهم بهتر روند حل شکل ۲ که الگوریتم روش حل می‌باشد، ارائه شده است.

#### ۶- نتایج و بحث

در ادامه به بررسی اثر حرکت دورانی سکوی توربین باد شناور ۵ مگاواتی در حضور سیستم کنترل زاویه گام پرداخته می‌شود. به این منظور، سه حرکت پیچ، رول و یاو هر کدام به صورت جداگانه بررسی می‌شوند. نتایج حاصل از میانگین گیری مشخصه‌های آیرودینامیکی توربین باد شناور با حالت توربین باد ثابت برای نسبت‌های سرعت نوک پره مختلف مقایسه خواهند شد. مشخصه‌های آیرودینامیکی مورد نظر ضریب توان و ضریب پیشران

حال برای به دست آوردن ضریب نیروی عمودی بر ایرفویل کافی است تا روابط (۱۷)، (۳۰) و (۳۴) با هم جمع شوند که به صورت رابطه (۳۵) به دست می‌آید:

$$C_{nor} = C_{nor}^v + C_{nor}^f + C_{nor}^{nc} \quad (35)$$

مقدار ضریب برا و ضریب پسا با ترکیب روابط (۳۱) و (۳۵) در هر زاویه حمله به دست آورده می‌شود. در روابط یاد شده ثوابت  $T_p$ ،  $T_v$  و  $T_f$  برابر با ۱/۷، ۳ و ۶ می‌باشند.

#### ۴- سیستم کنترل زاویه گام

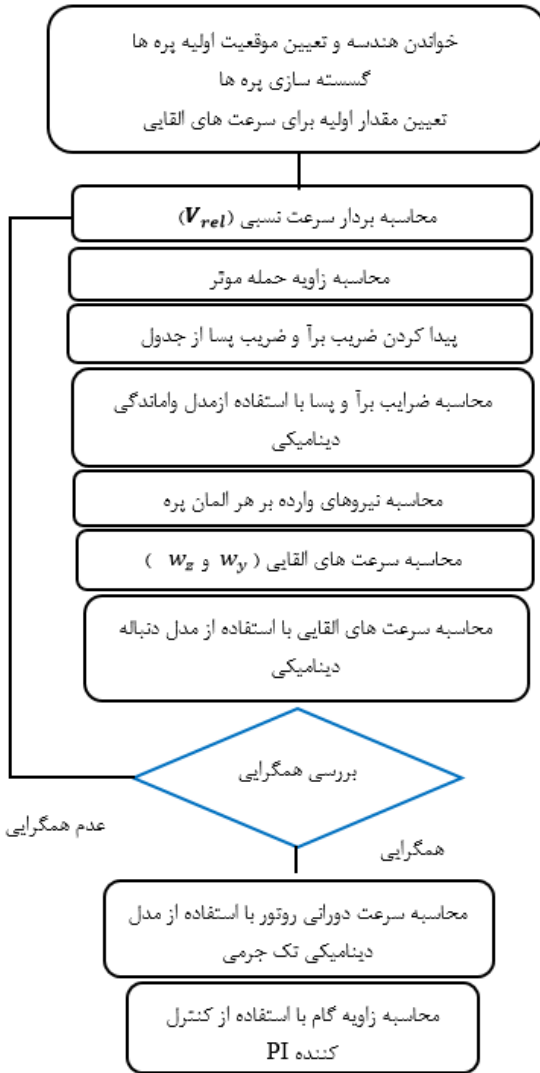
استفاده از ژنراتورهای دور متغیر به جای استفاده از ژنراتورهای دور ثابت و همچنین محدودیت‌های سازه‌ای و ضرورت استفاده بیشینه توان در شرایط مختلف جوی محققان ربر این داشته است تا با استفاده از سیستم‌های کنترلی متفاوت به اهداف خود برسند. یکی از سیستم‌های کرلی مل در توربین‌های امروزی سیستم کنترل زاویه گام پره توربین بادی می‌باشد. این سیستم با تغییر زاویه گام پره‌های توربین باعث می‌شود تا توان توربین باد زمانی که سرعت باد بیشتر از سرعت باد نامی می‌باشد، به مقدار نامی نزدیک باشد. در این تحقیق نیز از این سیستم برای کنترل توان توربین استفاده شده است. برای این کار ابتدا کل توربین به صورت یک جرم مدل شده است تا بتوان اثرات اینرسی روتور و ژنراتور را در نظر گرفت و برای کنترل زاویه گام از کنترلر انتگرال گیر [۱۸] در محیط نرم افزار سیمولینک استفاده شده است که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\theta_{pitch}(t) = K_P (\theta_{pitch}) e(t) + K_I (\theta_{pitch}) \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (36)$$

در این رابطه:

$$e(t) = \omega_{gen} - \omega_{rated} \quad (37)$$

که در این رابطه  $\omega_{gen}$  سرعت دورانی ژنراتور و  $\omega_{rated}$  سرعت دورانی مبنا می‌باشد. همچنین ضرایب  $K_p$  و  $K_i$ ، به‌های تناسبی و



شکل ۲: الگوریتم حل مسأله

Fig. 2. Solution algorithm overview

نوسانات ۲ درجه و فرکانس ۰/۱ هرتز می باشد.

مرکز دوران توربین برای همه حالات محل تقاطع محور برج توربین با سطح دریا می باشد. سرعت القایی ناشی از حرکت توربین در حالت های پیچ، رول و یاو به صورت زیر تعریف می شود:

$$V_{ind, pitch} = \begin{pmatrix} \dot{\theta} R_{pitch} \sin(\theta) \\ 0 \\ \dot{\theta} R_{pitch} \cos(\theta) \end{pmatrix} \quad (46)$$

می باشند. ضریب توان، ضریب پیشران و نسبت سرعت نوک پره به ترتیب به صورت زیر تعریف می شوند:

$$C_p = \frac{Power}{0.5 \rho V_0^3 \pi R^2} \quad (39)$$

$$C_T = \frac{Trust}{0.5 \rho V_0^2 \pi R^2} \quad (40)$$

$$\lambda = \frac{R \Omega}{V_0} \quad (41)$$

همچنین میانگین ضرایب یاد شده در فاصله زمانی از ۰ تا T به صورت زیر می باشد.

$$C_{p,ave} = \frac{1}{T} \int_0^T C_p(\tau) d\tau \quad (42)$$

$$C_{T,ave} = \frac{1}{T} \int_0^T C_T(\tau) d\tau \quad (43)$$

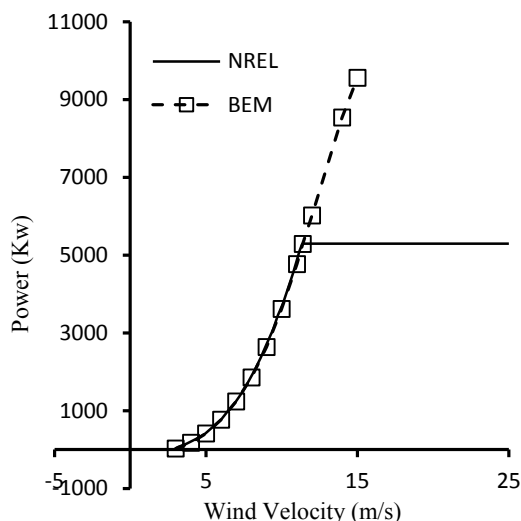
$$\lambda_{ave} = \frac{1}{T} \int_0^T \lambda(\tau) d\tau \quad (44)$$

علت میانگین گیری از نسبت سرعت نوک پره این است که مقدار سرعت دورانی روتور متغیر می باشد. قبل از ارائه نتایج، روش های مورد استفاده صحت سنجی می شوند که نتایج مربوط به اعتبار سنجی در بخش بعد آورده شده اند. همان طور که گفته شد سرعت ناشی از حرکت سکو  $V_{ind}$  باید با توجه به نوع حرکت تعیین شود. به این منظور ابتدا فرض بر آن است که حرکت توربین به صورت یک تابع از پیش تعیین شده به صورت زیر می باشد:

$$\theta = Amp \cdot \sin(2\pi Ft) \quad (45)$$

همان طور که مشاهده می شود این تابع سینوسی بر حسب فرکانس حرکت F و دامنه حرکت Amp می باشد. در شکل ۳ جابجایی و سرعت توبی توربین باد شناور برای حرکت پیچ نشان داده شده است، در این شکل دامنه





شکل ۴: تغییرات توان با سرعت باد بدون سیستم کنترل زاویه گام

Fig. 4. Variation of power with wind velocity without control system

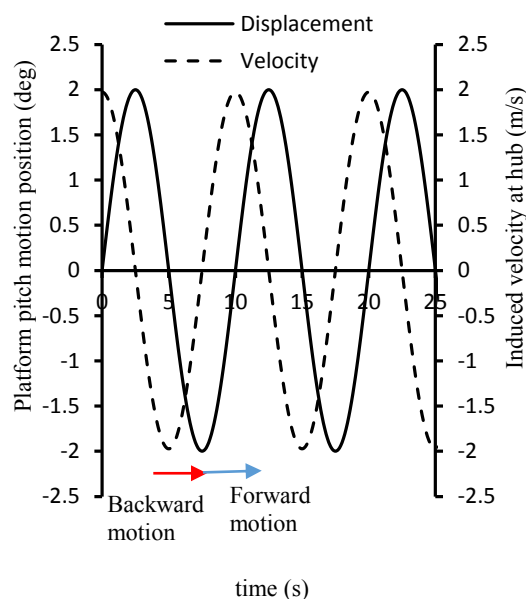
ابتدا روش مونتوم المان پره در حالی که سیستم کنترل زاویه گام غیر فعال می‌باشد با نتایج مرجع [۱۱] مقایسه می‌شوند. نتایج این بخش در شکل ۴ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود برای سرعت باد کمتر از ۱۱/۴ متر بر ثانیه نتایج شبیه سازی با این مرجع مطابقت دارد. برای سرعت‌های باد بیشتر از ۱۱/۴ نیاز است تا سیستم کنترل زاویه گام فعال باشد تا مقدار توان نامی به دست آید.

در مرحله دوم مدل واماندگی دینامیکی لیشمن-بدووس با استفاده از داده آزمایشگاهی مرجع [۱۸] که برای ایرفویل در حال نوسان پیچ می‌باشد، صحت سنجی خواهد شد. ایرفویل مورد نظر S۸۱۵ می‌باشد که بیشتر در پره های توربین‌های بادی مورد استفاده قرار می‌گیرد. نتایج مربوط به مدل واماندگی دینامیکی در شکل ۵ با فرکانس کاسته ۰/۰۶۱ و رینولدز ۱۰۶ نشان داده شده است. در این شکل زاویه حمله بال‌واره مورد نظر با توجه به رابطه زیر تغییر می‌کند.

$$\alpha(t) = \alpha_{mean} + \alpha_{amp} \sin(\omega_{pitch} t) \quad (49)$$

در این رابطه،  $\alpha_{amp}$  و  $\alpha_{mean}$  که مقدار میانگین زاویه حمله و دامنه تغییرات هستند به ترتیب برابر ۱۴ و ۱۰ درجه می‌باشند.  $\omega_{pitch}$  نیز در این رابطه فرکانس نوسان بال‌واره می‌باشد.

در مرحله آخر، عملکرد سیستم کنترل زاویه گام مورد نظر مورد بررسی



شکل ۳: جابجایی و سرعت توپی توربین باد شناور برای حرکت پیچ

Fig. 3. Displacement and velocity of hub at pitch motion

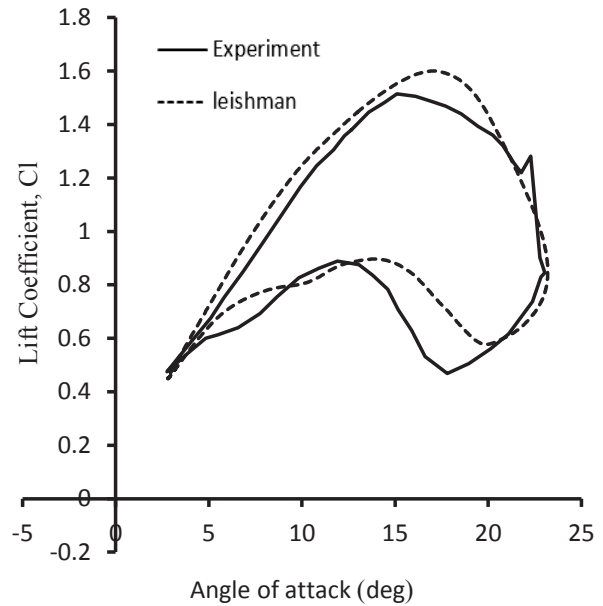
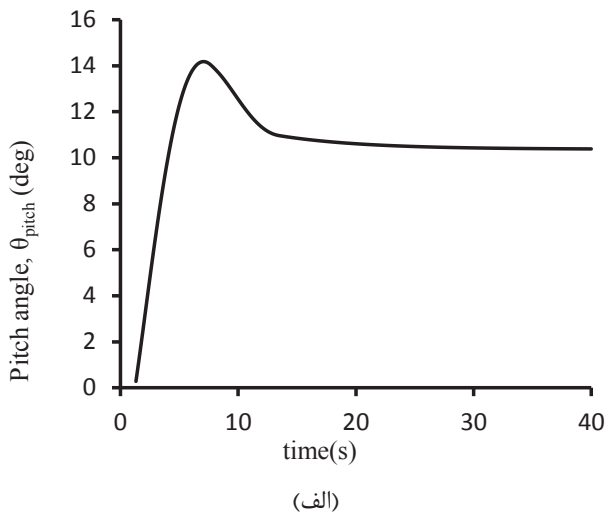
$$V_{ind, roll} = \begin{pmatrix} \dot{\theta} R_{roll} \sin(\theta) \\ \dot{\theta} R_{roll} \cos(\theta) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (47)$$

$$V_{ind, yaw} = \begin{pmatrix} 0 \\ \dot{\theta} R_{yaw} \sin(\theta) \\ \dot{\theta} R_{yaw} \cos(\theta) \end{pmatrix} \quad (48)$$

در این روابط  $\dot{\theta}$  مشتق رابطه (۱۶) نسبت به زمان می‌باشد.  $R_{pitch}$ ،  $R_{roll}$  و  $R_{yaw}$  به ترتیب برابر فاصله مرکز دوران توربین باد شناور تا هر المان از پره برای حالت پیچ، فاصله مرکز دوران توربین باد شناور تا هر المان از پره برای حرکت رول و فاصله مرکز توپی توربین باد که همان مرکز دوران توربین در حالت یابو می‌باشد، تا هر المان پره می‌باشند.

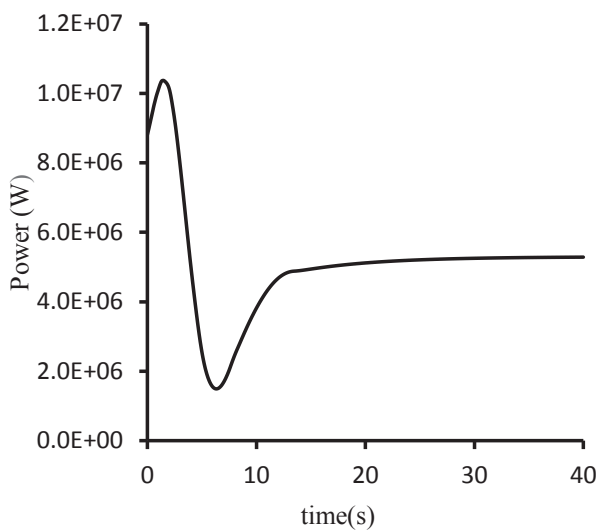
#### ۶-۱- اعتبار سنجی

صحت سنجی روش‌های استفاده شده در سه مرحله انجام خواهد شد.



شکل ۵: تغییرات ضریب برآ با زاویه حمله برای ایرفویل S815

Fig. 5. Variation of lift coefficient for S815 airfoil



شکل ۶: تغییرات زاویه گام و توان با زمان برای سرعت باد ۱۵ متر بر ثانیه (سیستم کنترل فعال)

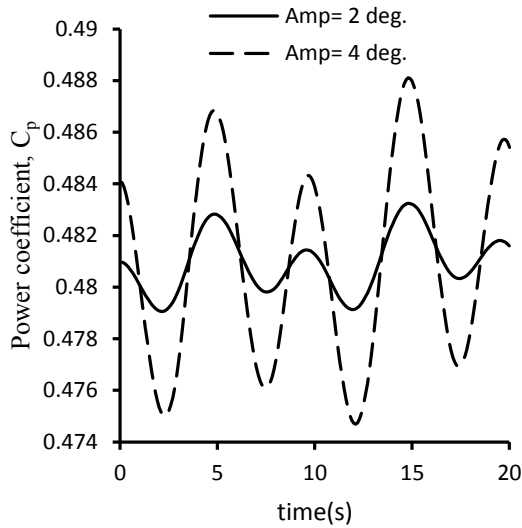
Fig. 6. Variation of power and pitch angle with time at wind velocity of 15 m/s

قرار می‌گیرد. به این منظور سرعت باد را بیشتر از مقدار نامی قرار داده و عملکرد سیستم مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. برای این کار سرعت باد ۱۵ متر بر ثانیه انتخاب شده است که از سرعت باد نامی بیشتر می‌باشد. همان طور که از شکل ۶ مشاهده می‌شود به علت افزایش سرعت باد از مقدار نامی، زاویه گام  $\theta_{pitch}$  طوری تغییر می‌کند تا مقدار توان به مقدار ۵ مگاوات که توان نامی می‌باشد برسد. در صورت افزایش سرعت باد، مقدار زاویه گام نهایی نیز افزایش می‌یابد.

#### ۶-۲- اثرات لحظه‌ای حرکت دورانی

در این بخش به ارائه درک اولیه از اثر حرکت سکو بر روی عملکرد آیرودینامیکی توربین باد شناور پرداخته می‌شود. برای این منظور نمودار ضرایب عملکردی توربین باد به صورت لحظه‌ای با حرکت سکو برای سه حرکت مورد نظر نشان داده می‌شوند. در شکل ۷ نمودار تغییرات ضریب توان، ضریب پیشران و زاویه گام پره توربین با زمان برای حرکت پیچ نشان داده شده است. در این شکل فرکانس نوسان حرکت توربین باد شناور حول مرکز دوران کل توربین باد ۰٫۱ هرتز، دامنه نوسان ۲ و ۴ درجه و مقدار نسبت سرعت نوک پره میانگین برابر ۷ می‌باشد. به منظور مقایسه با حالت توربین باد ثابت مقدار این سه پارامتر در حالت سکوی ثابت نیز نشان داده شده است. در این شکل  $Amp = \text{deg}$  نشان دهنده نتایج توربین باد

ثابت می‌باشد. همان طور که مشاهده می‌شود، هر سه پارامتر در این حالت نسبت به حالت ثابت تغییرات چشم‌گیری دارند. نوسان سکو باعث می‌شود تا ضرایب عملکردی توربین نیز نوسان کنند. تغییرات به این چنین باعث می‌شود تا نیروهای وارده به پره توربین نیز نوسان کند که این باعث افزایش نیروهای خستگی وارد به پرها می‌شود. همان طور که مشاهده می‌شود حرکت سکو باعث منفی شدن ضریب توان نیز می‌شود که انتهای کورس عقب گرد اتفاق افتاده است. در شکل ۳ دیده می‌شود، زمان بین ۲/۵ ثانیه تا ۷/۵ ثانیه توربین حرکت عقب گرد را تجربه می‌کند. با توجه به تغییرات ضریب توان و پیشران دیده می‌شود که در حالت عقب گرد، هر دو ضریب نسبت به مقدار بیشینه خود، کاهش می‌یابند اما این روند برای حرکت رو به جلو برعکس می‌باشد. در حالت عقبگرد، برآیند سرعت وارده به روتور کم



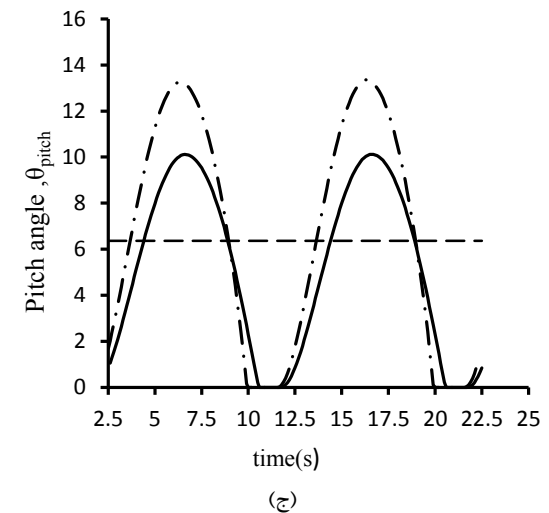
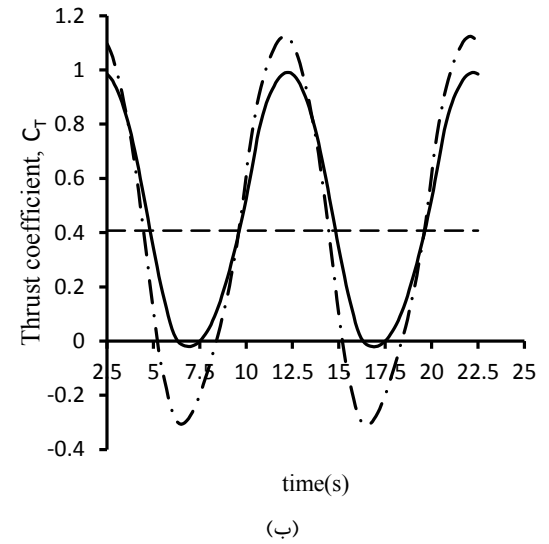
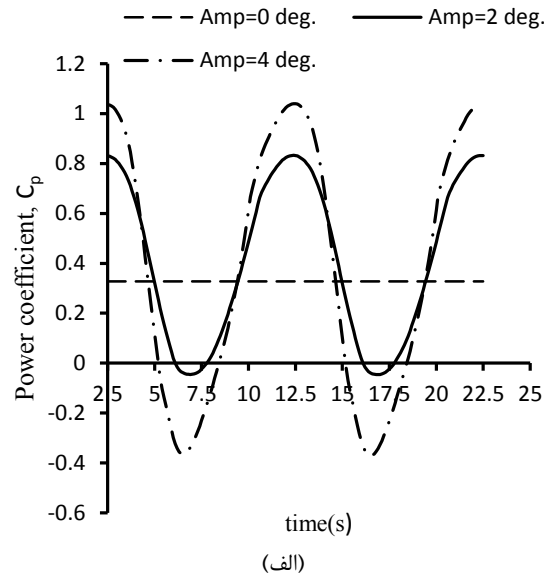
شکل ۸: تغییرات ضریب توان با زمان برای حرکت یاء  
 $(\lambda_{ave} = 7/0.3, F = 0.1 \text{ Hz}, Amp = 2 \text{ deg})$

Fig. 8. Variation of power coefficient with time for yaw motion ( $\lambda_{ave}=7.03$ ,  $F=0.1 \text{ Hz}$ ,  $Amp=2 \text{ deg}$ )

می‌شود که این باعث می‌شود تا ضریب توان کاهش بیابد. با توجه به تغییرات زاویه گام این نکته باید اشاره شود که باید در مدل‌سازی توربین‌های بادی شناور از یک مدل واماندگی دینامیکی مناسب استفاده نمود که بتواند هم اثر تأخیر نیروهای آیرودینامیکی و هم اثرات واماندگی دینامیکی را در صورت رخداد لحاظ کند. همچنین باید به اهمیت سیستم کنترلی برای محدود کردن تغییرات نیروهای آیرودینامیکی اشاره نمود، بنابراین باید از سیستم کنترلی بهینه استفاده کرد.

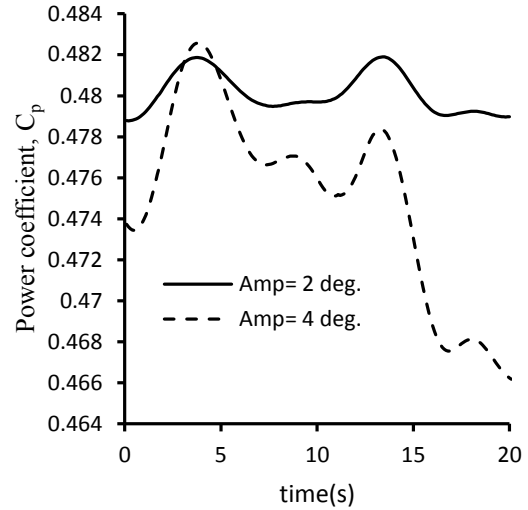
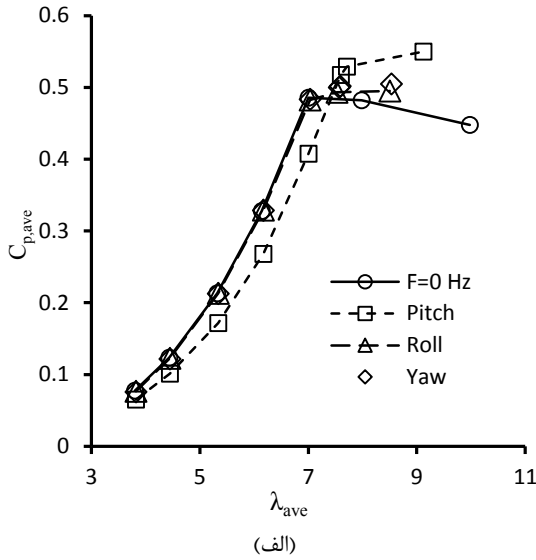
با افزایش دامنه نوسان سکو برای حرکت پیچ مشاهده می‌شود که دامنه نوسان تغییر ضریب توان و پیشران افزایش می‌یابد. این افزایش دامنه باعث می‌شود تا مقدار ضریب توان در لحظاتی منفی هم شود، که باعث می‌شود عملکرد توربین در دامنه‌های بیشتر، تضعیف شود. این موضوع برای ضریب پیشران نیز مشاهده می‌شود. مقدار لحظه‌ای زاویه گام نیز وابسته به مقدار دامنه نوسان می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار بیشینه زاویه گام با افزایش دامنه نوسانات افزایش یافته است که این افزایش در حدود ۳۰ درصد می‌باشد.

شکل‌های ۸ و ۹ نیز تغییرات ضریب توان را با حرکت سکو برای حالت‌های رول و یاء نشان می‌دهد. در این شکل فرکانس نوسان ۰/۱ هرتز و مقدار نسبت سرعت نوک پره میانگین برابر ۷/۰۳ می‌باشد. دامنه نوسان نیز، ۲ و ۴ درجه انتخاب شده است. در این دو حالت نیز نوسان ضریب توان دیده می‌شود اما این نوسانات با دامنه بسیار کمتر از حرکت پیچ رخ می‌دهند.



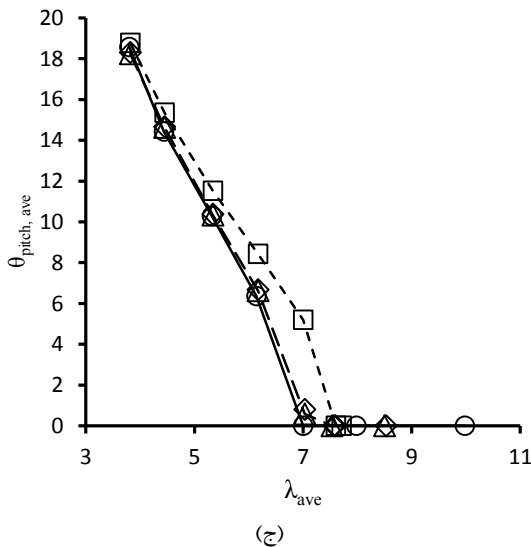
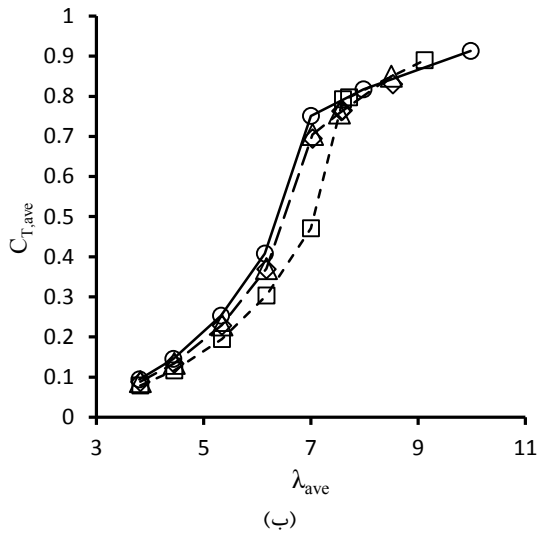
شکل ۷: تغییرات ضریب توان، پیشران و زاویه گام با زمان برای حرکت پیچ  
 $(F = 0.1 \text{ Hz}$  و  $\lambda_{ave} = 7)$

Fig. 7. Variation of power coefficient, thrust coefficient and pitch angle with time for pitch motion ( $\lambda_{ave}=7$ ,  $F=0.1 \text{ Hz}$ )



شکل ۹: تغییرات ضریب توان با زمان برای حرکت رول  
( $\lambda_{ave} = 7/3, F = 0.1 \text{ Hz}$ )

Fig. 9. Variation of power coefficient with time for roll motion ( $\lambda_{ave}=7.03, F=0.1 \text{ Hz}$ )



شکل ۱۰: تغییرات ضریب توان، پیشران و زاویه گام میانگین برای هر سه حرکت  
( $F = 0.1 \text{ Hz}, \text{Amp} = 2 \text{ deg}$ )

Fig. 10. Variation of averaged power, thrust and pitch angle for all motions ( $\lambda_{ave}=7, \text{Amp}=2 \text{ deg}$ )

از مقایسه شکل ۷ با نتایج شکل های ۸ و ۹ می توان نتیجه گرفت که حرکت پیچ نسبت به دو حرکت دیگر اثر بیشتری بر روی ضرایب عملکردی توربین باد شناور دارند. به این منظور برای کاهش نوسانات نیروهای وارده به روتور باید سکوی توربین باد به شکلی طراحی شود که حرکت پیچ کمینه شود. افزایش دامنه نوسانات برای این دو حرکت نیز باعث می شود تا مقدار ضریب توان نسبت به حالت دامنه کمتر تغییر کند. همان طور که از شکل ۸ مشاهده می شود، مقادیر بیشینه و کمینه ضریب توان به ترتیب افزایش و کاهش یافته است.

#### ۶-۳- اثرات متوسط حرکت دورانی بر عملکرد توربین باد شناور

در این بخش اثر حرکات دورانی پیچ، رول و یاو بر روی ضریب توان میانگین، ضریب پیشران میانگین و زاویه گام میانگین توربین باد شناور بررسی می شود و با حالت توربین باد ثابت مقایسه خواهد شد. به این منظور برای همه حرکات فرکانس ۰.۱ و دامنه ۲ درجه انتخاب شده است. مقدار نسبت نوک پره میانگین بین ۳ تا ۹ انتخاب شده است که مقدار ۳ مربوط به سرعت باد ۲۲ متر بر ثانیه و مقدار ۹ مربوط به سرعت باد ۵ متر بر ثانیه می باشد. نتایج مربوط به مقادیر میانگین گیری شده و مقایسه با حالت توربین باد ثابت در شکل ۱۰ نشان داده شده است. در این شکل حالت توربین باد ثابت با عبارت  $F = 0 \text{ Hz}$  نشان داده شده است. با مقایسه نتایج مربوط به حرکت پیچ با توربین باد ثابت دیده می شود که در ضرایب سرعت نوک پره

**Table 3. Percentage of changes in power and thrust coefficients with respect to fixed-wind turbine (roll motion)**

**جدول ۳:** درصد تغییرات ضریب توان و پیشران میانگین نسبت به حالت ثابت (حرکت رول)

ضریب توان	ضریب پیشران	نسبت سرعت نوک پره
-۱/۱۴	-۵/۴۱	۳/۸۲
-۰/۶۴	-۷/۴۹	۴/۴۵
-۰/۰۶	-۹/۱۹	۵/۳۴
-۰/۰۱	-۹/۲۰	۶/۱۷
-۰/۶۱	-۶/۰۹	۷/۰۳
۱/۰۵	-۳/۵۶	۷/۵۷
۲/۴۲	-۰/۳۵	۸/۵۳

**Table 2. Percentage of changes in power and thrust coefficients with respect to fixed-wind turbine (pitch motion)**

**جدول ۲:** درصد تغییرات ضریب توان و پیشران میانگین نسبت به حالت ثابت (حرکت پیچ)

ضریب توان	ضریب پیشران	نسبت سرعت نوک پره
-۱۶/۴۱	-۱۵/۷۳	۳/۸۲
-۱۸/۱۸	-۱۹/۵۸	۴/۴۵
-۱۹/۴۷	-۲۲/۹۱	۵/۳۴
-۱۸/۱۹	-۲۵/۵۹	۶/۱۷
-۱۵/۹	-۳۷/۳	۷
۷/۱۸	-۰/۷	۷/۷۱
۱۷/۷	۰/۲	۹/۱۲

توربین و در نتیجه کاهش ضریب القای محوری می‌شود. اینکه در حالت پیچ مقدار ضریب پیشران کاهش می‌یابد می‌تواند باعث کاهش نوسانات توربین شود زیرا نیروی معادل وارد شده به روتور در راستای جریان کاهش یافته است. مقایسه مقدار زاویه گام میانگین نیز نشان دهنده افزایش تلاش سیستم کنترلی در حالت حرکت پیچ می‌باشد. مشاهده می‌شود که بیشترین افزایش زاویه گام در نسبت سرعت نوک پره ۷ رخ داده است که این مقدار همان نسبت سرعت نوک پره منبای توربین باد می‌باشد. در جدول ۲ میزان درصد تغییر ضریب توان و پیشران میانگین نسبت به توربین باد ثابت برای حرکت پیچ در نسبت‌های مختلف سرعت نوک بال آورده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، بیشترین کاهش ضریب پیشران مربوط به نسبت نوک بال ۷ می‌باشد. تغییرات ضریب توان نیز بین ۲۰- درصد و ۱۸ درصد متغیر می‌باشد.

از دلایل مؤثر بر تفاوت بین عملکرد توربین باد شناور و ثابت می‌توان به تغییر ضریب القای محوری، تفاوت مقدار میانگین زاویه گام و همچنین تأخیر آیرودینامیکی ایجاد شده هنگام تغییر زاویه گام ناشی از سیستم کنترلی اشاره نمود. همان طور که در بخش قبل ذکر شد، حرکت‌های رول و یاو اثر کمتری بر روی عملکرد توربین باد دارند. این موضوع در شکل ۱۰ نیز مشهود می‌باشد. برای درک بهتر این دو حرکت، جداول ۳ و ۴ قابل استفاده می‌باشند. در این دو جدول درصد تغییرات ضریب توان و پیشران میانگین نسبت به حالت توربین باد ثابت به ترتیب برای حرکت‌های رول و یاو نشان داده شده است. این دو حرکت بیشتر بر روی ضریب پیشران میانگین اثر می‌گذارند. اگرچه تغییرات اندکی برای ضریب توان دیده می‌شود، اما قابل صرف نظر

کمتر از ۷، حرکت پیچ باعث کم شدن ضریب توان میانگین نسبت به حالت ثابت می‌شود اما برای مقادیر نسبت نوک بال بیشتر از ۷ با افزایش ضریب توان میانگین مواجه می‌شویم. همان طور که مشاهده می‌شود در نسبت‌های سرعت نوک بال بیشتر از ۷ افزایش استخراج انرژی از باد نسبت به حالت توربین باد ثابت رخ داده است

که می‌تواند مفید باشد. با توجه به این که در نسبت سرعت نوک پره بیشتر از ۷ سرعت جریان آزاد بسیار کم می‌باشد (بین ۵ تا ۷ متر بر ثانیه)، حرکت سکو باعث افزایش سرعت باد معادل وارد بر روتور می‌گردد، که این باعث افزایش توان در این حالات می‌باشد. اگرچه در باقی حالات نیز این اتفاق رخ می‌دهد، اما با توجه به اینکه سیستم کنترلی باعث کنترل توان می‌شود، این افزایش رخ نمی‌دهد. لازم به ذکر است که در نسبت‌های سرعت نوک پره بیشتر از ۷، سیستم کنترلی با توجه به این که توان از مقدار نامی بیشتر نمی‌شود، تقریباً بدون تغییر می‌باشد، همان طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

همچنین مقایسه نتایج ضریب پیشران میانگین با حالت توربین باد ساکن نشان می‌دهد که در اکثر ضرایب سرعت نوک پره مقدار ضریب پیشران میانگین کاهش یافته است. مشاهده می‌شود که این کاهش در مقادیر نسبت سرعت نوک پره بیشتر از ۷ کمتر می‌باشد. ضریب پیشران به خودی خود اثری بر روی عملکرد توربین باد ندارد اما این ضریب معادل نیروی وارده به توربین باد در راستای باد می‌باشد. در توربین باد ثابت کاهش ضریب پیشران باعث می‌شود تا نیروی وارده به سازه نگه دارنده توربین باد کمتر شود. علاوه بر این کاهش ضریب پیشران باعث کاهش انبساط ناحیه ویک پشت

**Table 4. Percentage of changes in power and thrust coefficients with respect to fixed-wind turbine (yaw motion)**

**جدول ۴:** درصد تغییرات ضریب توان و پیشران میانگین نسبت به حالت ثابت (حرکت یاو)

نسبت سرعت نوک پره	ضریب پیشران	ضریب توان
۳/۸۲	-۶/۶۳	-۲/۵۳
۴/۴۵	-۸/۳۰	-۱/۴۸
۵/۳۴	-۹/۶۵	-۰/۳۹
۶/۱۷	-۹/۹۵	-۰/۳۰
۷/۰۳	-۷/۵۱	-۰/۴۴
۷/۵۷	-۳/۲۷	۲/۳۲
۸/۵۳	-۰/۲۱	۳/۲۴

می‌باشند. همچنین می‌توان مشاهده نمود که برای نسبت سرعت نوک بال کمتر از ۷ کاهش ضریب توان میانگین رخ داده است اما برای نسبت سرعت نوک بال بیشتر از ۷ اندکی افزایش توان دیده می‌شود.

#### ۷- نتیجه گیری

هدف از این پژوهش، بررسی اثرات حرکت دورانی سکوی توربین باد شناور فراساحلی بر روی عملکرد آیرودینامیکی آن در حضور سیستم کنترلی می‌باشد. نوع سکوی مورد بررسی از نوع پایا ساز شناور می‌باشد که استفاده از این سکو مرکز دوران کل توربین را در نزدیکی سطح دریا قرار می‌دهد. توربین باد مورد بررسی توربین ۵ مگاواتی این آر ای ال می‌باشد که قابلیت نصب بر روی سکوی شناور را دارد. مدل مورد استفاده برای تحلیل آیرودینامیکی از کوپل روش مومنتوم المان پره ناپایا با سیستم کنترل زاویه گام با کنترلر تناسبی انتگرال‌گیر به دست می‌آید که در محیط کوپل شده متلب-سیمولینک شبیه سازی شده است. برای به دست آوردن سرعت

دورانی روتور از مدل تک جرمی استفاده شده است. حرکت سکو نیز به صورت یک تابع سینوسی تعریف شده است که مقدار فرکانس نوسانات ۰/۱ می‌باشد.

در قسمت نتایج ابتدا اثر لحظه‌ای هر سه حرکت بر روی ضریب توان، ضریب پیشران و زاویه گام پره‌ها بیان شده است و سپس نتایج حاصل از شبیه سازی توربین باد شناور میانگین گیری شده‌اند و نتایج به دست آمده با نتایج حاصل از توربین باد ثابت مقایسه شده‌اند. نتایج لحظه‌ای نشان می‌دهد که در حرکت پیچ، نوسانات ضرایب یاد شده نسبت به حالت توربین باد ثابت بسیار شدید می‌باشد. اگر چه برای حرکات رول و یاو نیز نوسان دیده می‌شود اما دامنه نوسانات بسیار کمتر از حرکت پیچ می‌باشد. با توجه به نوسان شدید پارامترهای عملکردی در هنگام حرکت پیچ، اثر خستگی بر روی سازه روتور قابل توجه می‌باشد. زاویه گام ایجاد شده توسط سیستم کنترلی نیز متناسب با شرایط حرکت سکوی توربین باد تغییر می‌کند که این اهمیت استفاده از سیستم کنترلی بهینه به منظور کم کردن نوسانات نیروهای وارده به روتور را نشان می‌دهد. از مقایسه نتایج به دست آمده از میانگین گیری با حالت توربین ثابت مشاهده می‌شود از میان این سه حرکت، حرکت پیچ بیشترین اثر را بر روی عملکرد توربین باد شناور دارد. این حرکت باعث می‌شود تا مقدار ضریب توان نسبت به حالت توربین باد ثابت در نسبت های سرعت نوک پره کمتر از ۷ کاهش یابد که این روند برای سرعت نوک پره بیشتر از ۷ برعکس می‌باشد. ضریب پیشران میانگین نیز در اکثر سرعت نوک پره‌های مورد بررسی نسبت به حالت توربین باد ثابت کاهش یافته است که این می‌تواند باعث کاهش نیروی معادل وارده به روتور توربین در راستای جریان باد شود. روند به دست آمده برای حرکت پیچ برای حرکت‌های رول و یاو نیز با شدت بسیار کمتر دیده می‌شود. علاوه بر این مشاهده می‌شود که مقدار زاویه گام میانگین در حالت شناور افزایش می‌یابد که این به معنای افزایش تلاش میانگین سیستم کنترلی برای تثبیت توان می‌باشد.

## ۸- فهرست علائم

## منابع

- [1] X. Sun, D. Huang, G. Wu, The current state of offshore wind energy technology development, *Energy*, 41(1) (2012) 298-312
- [2] W. Europe, Wind in Power: 2016 European Statistics, Wind Europe: Brussels, Belgium, (2016)
- [3] A. Ho, A. Mbistrova, The European offshore wind industry-key trends and statistics 1st half 2015, A report by the European Wind Energy Association, (2015)
- [4] M. Jeon, S. Lee, S. Lee, Unsteady aerodynamics of offshore floating wind turbines in platform pitching motion using vortex lattice method, *Renewable Energy*, 65 (2014) 207-212.
- [5] T.-T. Tran, D.-H. Kim, The platform pitching motion of floating offshore wind turbine: a preliminary unsteady aerodynamic analysis, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 142 (2015) 65-81
- [6] R. Farrugia, T. Sant, D. Micallef, Investigating the aerodynamic performance of a model offshore floating wind turbine, *Renewable Energy*, 70 (2014) 24-30.
- [7] J.d. Vaal, M. Hansen, T. Moan, Effect of wind turbine surge motion on rotor thrust and induced velocity, *Wind Energy*, 17(1) (2014) 105-121.
- [8] M. Khosravi, P. Sarkar, H. Hu, An Experimental Investigation on the Performance and the Wake Characteristics of a Wind Turbine Subjected to Surge Motion, in: 33rd Wind Energy Symposi, (2015) 1-18.
- [9] H. Namik, K. Stol, Performance analysis of individual blade pitch control of offshore wind turbines on two floating platforms, *Mechatronics*, 21(4) (2011) 691-703
- [10] H. Namik, K. Stol, Individual blade pitch control of floating offshore wind turbines, *Wind energy*, 13(1) (2010) 74-85.

دامنه نوسانات (deg)	<i>Amp</i>
تعداد پره	<i>B</i>
طول وتر (m)	<i>C</i>
ضریب برآ	<i>C<sub>l</sub></i>
ضریب توان	<i>C<sub>p</sub></i>
ضریب توان میانگین	<i>C<sub>p,ave</sub></i>
ضریب پیشران	<i>C<sub>T</sub></i>
ضریب پیشران میانگین	<i>C<sub>T,ave</sub></i>
ضریب نیروی عمود بر ایرفویل	<i>C<sub>n</sub></i>
ضریب نیروی مماس بر ایرفویل	<i>C<sub>t</sub></i>
فرکانس نوسانات (Hz)	<i>F</i>
ضریب افت پرانتل	<i>F<sub>0</sub></i>
فرکانس کاسته	<i>K</i>
نیروی برآ (N)	<i>L</i>
عدد بی بعد ماخ	<i>M</i>
توان (W)	<i>Power</i>
زمان (s)	<i>t</i>
نیروی پیشران (N)	<i>Thrust</i>
سرعت جریان آزاد ( $m\ s^{-1}$ )	<i>V<sub>0</sub></i>
سرعت القایی	<i>W</i>
<b>علائم یونانی</b>	
چگالی ( $kg\ m^{-3}$ )	$\rho$
نسب سرعت نوک پره	$\lambda$
زاویه حمله	$\alpha$
فرکانس نوسان ( $rad\ s^{-1}$ )	$\omega$
موقعیت دورانی سکو (deg)	$\theta$
زاویه گام (deg)	$\theta_{pitch}$
<b>زیرنویس‌ها</b>	
میانگین	<i>ave</i>
ژنراتور	<i>gen</i>
القایی	<i>Ind</i>
مبنا	<i>rated</i>
نسبی	<i>rel</i>
<b>بالا نویس</b>	
چرخشی	<i>c</i>
غیر چرخشی	<i>nc</i>



- Netherlands Energy Research Foundation ECN, (1995).
- [16] K. Gharali, D.A. Johnson, Numerical modeling of an S809 airfoil under dynamic stall, erosion and high reduced frequencies, *Applied Energy*, 93 (2012) 45-52.
- [17] J.G. Leishman, T. Beddoes, A Semi-Empirical Model for Dynamic Stall, *Journal of the American Helicopter society*, 34(3) (1989) 3-17.
- [18] R. Reuss Ramsay, M. Hoffman, G. Gregorek, Effects of grit roughness and pitch oscillations on the S815 airfoil, National Renewable Energy Lab., Golden, CO (United States); Ohio State Univ., Columbus, OH (United States), 1996.
- [11] J. Jonkman, S. Butterfield, W. Musial, G. Scott, Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO., (2009)
- [12] M.O. Hansen, *Aerodynamics of wind turbines*, Routledge, (2015)
- [13] H. Glauert, Airplane propellers, in: *Aerodynamic theory*, Springer, (1935) 169-360
- [14] D.A. Spera, *Wind turbine technology*, (1994).
- [15] J. Schepers, H. Snel, G. van Bussel, Dynamic inflow: yawed conditions and partial span pitch control,