

## تحلیل دینامیکی توربین بادی سه پایه دریایی تحت اثر توأم بارهای موج و باد با در نظر گرفتن اندرکنش آب و سازه

رضا دزواره رسنانی

ir.ac.dezvareh@nitr

استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

### چکیده

استفاده از انرژی باد به عنوان منبع تجدید شونده و جایگزین مناسب سوخت های فسیلی بسیار مهم است. با توجه به اینکه در دریا پایداری و سرعت بادهای بیشتر است، لذا اکثر کشورهایی که به دریا دسترسی دارند به نصب توربین های بادی در دریا توجه ویژه ای دارند. با نصب توربین های بادی در دریا، مسائل جدیدی در مقایسه با نصب این سازه ها در خشکی بوجود می آید که از بارهای اضافی محیط دریا (موج، جریان و...) و ویژگی های خاص طراحی این سازه ناشی می شود. لذا مدلسازی و تحلیل توربین بادی دریایی تحت بارهای باد و موج به صورت توأم امری ضروری است. در این تحقیق یک توربین بادی دریایی با سکوی سه پایه تحت اثر توأم بارهای موج و باد با توجه به معادلات حاکم بر آن ها، مدلسازی شده و تحلیل دینامیکی بر روی آن انجام شده است. سپس به بررسی اثرات مشخصه های موج و باد بر روی پاسخ این سازه می پردازد. نتایج تحقیق نشان می دهد که لزوماً افزایش مشخصات موج و باد باعث افزایش پاسخ سازه نمی شود به عنوان مثال با افزایش سرعت متوسط باد تا مقدار ۱۲ متر بر ثانیه، میزان نیروی برشی و لنگر خمشی پای سازه افزایش می یابد ولیکن با بیشتر شدن سرعت، مقادیر نیروی برشی و لنگر خمشی روند کاهشی را طی می نمایند که ناشی از سیستم کنترلی توربین بادی دریایی است. همچنین میزان اثر این پارامترها بر روی پاسخ سازه متفاوت است به نحوی که با افزایش ارتفاع مشخصه موج از ۲ متر به ۸ متر متوسط نیروی برش پایه سازه و لنگر واژگونی پای سازه به ترتیب ۱۰۴ و ۵۶ درصد افزایش می یابد لیکن با افزایش پریود حداکثر موج از ۸ ثانیه به ۱۶ ثانیه، متوسط نیروی برش پایه سازه و لنگر واژگونی پای سازه، تنها حدود ۴ درصد افزایش داشته است.

واژگان کلیدی: توربین بادی دریایی، سکوی سه پایه، تحلیل دینامیکی، باد، موج، اندرکنش آب و سازه

تاریخ دریافت مقاله : ۹۷/۰۱/۱۱  
تاریخ پذیرش مقاله : ۹۷/۰۷/۱۷

## ۱ - مقدمه

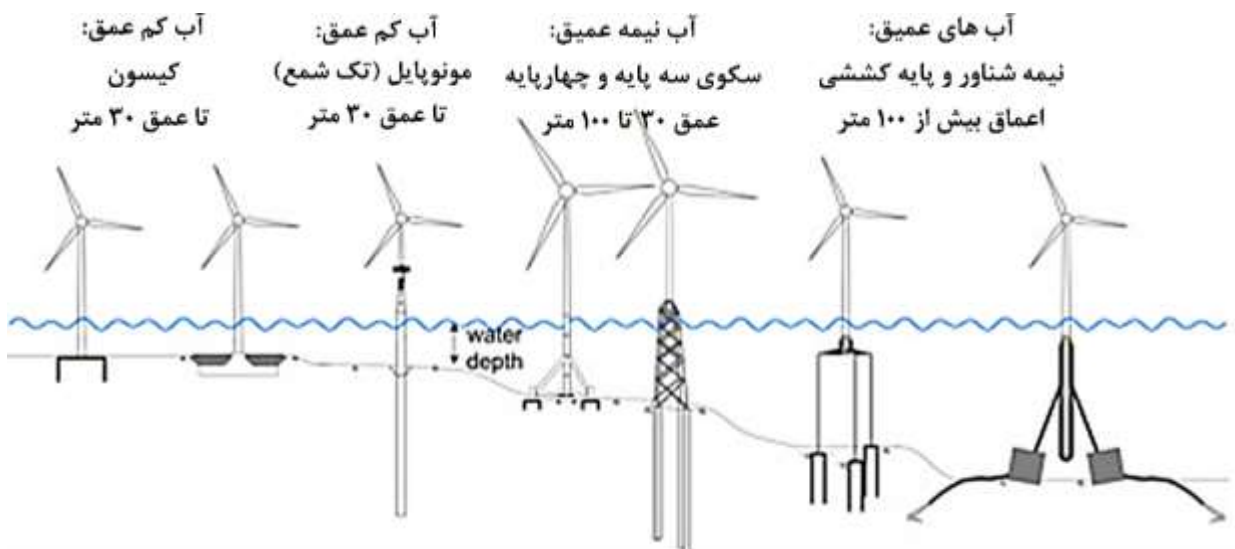
امروزه رشد مصرف انرژی در جوامع مدرن صنعتی علاوه بر خطر اتمام سریع منابع فسیلی، جهان را با تغییرات برگشت ناپذیر و تهدید آمیز زیست محیطی مواجه نموده است. لذا در برنامه ها و سیاستهای بین المللی در راستای توسعه پایدار جهانی، نقش ویژه ای به منابع تجدیدپذیر انرژی محول شده است. به گونه ای که بطور مثال اتحادیه اروپا تولید ۱۲٪ انرژی الکتریکی مورد نیاز از طریق انرژیهای نو را هدف قرار داده است. در کشور ما نیز در این راستا سازمان انرژیهای نو ایران متعاقب سیاستگذاریهای معاونت امور انرژی وزارت نیرو از سال ۱۳۷۴ عهده دار پرداختن به این مهم به منظور دستیابی به اطلاعات و فن آوریهای روز دنیا در خصوص استفاده از منابع انرژیهای تجدیدپذیر، پتانسیل سنجی و اجرای پروژههای متعدد (خورشیدی، باد و زمین گرمایی، هیدورژن و بیوماس) بوده است [۲۱].

استفاده از انرژی باد به عنوان منبع تجدید شونده و جایگزین مناسب سوخت های فسیلی بسیار مهم است. با توجه به اینکه در دریا پایداری و سرعت بادها بیشتر است، لذا اکثر کشورهایی که به دریا دسترسی دارند به نصب توربین های بادی در دریا توجه ویژه ای دارند. کشور ایران نیز به واسطه دارا بودن صدها کیلومتر مرز آبی در شمال و جنوب، در آینده ای نه چندان دور می تواند از این انرژی پاک در دریاها استفاده نماید.

بطور کلی، با نصب توربین های بادی در دریا، مسائل جدیدی در مقایسه با نصب این سازه ها در خشکی بوجود می آید که از بارهای اضافی محیط دریا (موج، جریان و...) و ویژگی های خاص طراحی این سازه ناشی می شود [۳].

لذا عملکرد رفتار دینامیکی این توربین ها تحت بارگذاری موج و باد بسیار حائز اهمیت است. به همین دلیل یک معیار مهم طراحی برای بسیاری از جزئیات سازه های نگهدارنده توربین های بادی دریایی، بررسی اثر بارگذاری توأم موج و باد است [۴].

در حال حاضر با توجه به عمق دریا انواع مختلفی از این توربین ها در دریا استفاده می شوند که عمده تفاوت اصلی سازه ای آنها، نوع سازه نگهدارنده شان است (شکل (۱)). همانطور که در شکل (۱) مشاهده می گردد، سازه های نگهدارنده توربین های بادی دریایی به سه دسته کلی تک شمع (مونوپایل)<sup>۱</sup>، شابلونی (سکوی سه پایه<sup>۲</sup> و چهارپایه<sup>۳</sup>) و نیمه شناور کابلی (TLP)<sup>۴</sup> تقسیم بندی می شوند. سازه های نگهدارنده از نوع تک شمع برای عمل در اعماق در حدود ۳۰ متر مناسب است. همچنین سازه های شابلونی مناسب اعماق حدود ۳۰ تا ۷۰ متر است و در اعماق بیشتر از ۷۰ متر از سازه های نیمه شناور با کابل های مهاری استفاده می شود.



شکل (۱) انواع مختلف توربین های بادی دریایی در اعماق مختلف.

<sup>3</sup> Jacket

<sup>4</sup> Tension Leg Platform (TLP)

<sup>1</sup> Monopile

<sup>2</sup> Tripod

بادی دریایی در کشور با سکوی نگهدارنده سه پایه کاربردی و امکان پذیر است، در این تحقیق تحلیل دینامیکی توربین بادی دریایی با سکوی سه پایه مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است.

ب- از آنجا که توربین های بادی دریایی موضوع نسبتاً جدیدی است، تاکنون تمرکز تحقیقات بر روی ارائه مدل کامل و قابل اعتمادی برای تحلیل این سازه ها بوده است و به بررسی تاثیر پارامترهای مختلف دریا بطور جداگانه بر روی عملکرد توربین پرداخته نشده است، لذا مطالعه حاضر این پارامترها و تاثیر آن بر روی عملکرد سازه را مورد بررسی قرار می دهد.

به عبارت دقیق تر در این تحقیق به تحلیل دینامیکی توربین بادی سه پایه دریایی تحت تحریکات توأم ناشی از موج و باد با در نظر گرفتن اثرات آشفتگی باد و اندرکنش آب و سازه با استفاده از معادلات حاکم بر این سازه که شامل تئوری BEM<sup>۳</sup> (تکانه المان پره) ( برای محاسبه بار آئرو دینامیکی توربین) و معادله موریسون<sup>۴</sup> (برای محاسبه اندرکنش آب و سازه) است، پرداخته خواهد شد.

## ۲- معرفی توربین بادی سه پایه دریایی

### ۲-۱- توربین بادی

توربین بادی دریایی استفاده شده در این تحقیق، توربین ۵ مگاواتی طراحی شده در NREL می باشد، که مشخصات آن در جدول (۱) ارائه شده است. جزئیات بیشتر مشخصات این توربین در مرجع [۷] قابل مشاهده می باشد.

در توربین ۵ مگاواتی با مشخصات ذیل، با افزایش سرعت باد تا مقدار ۱۱/۴ متر بر ثانیه نیروی تراست وارد بر توربین افزایش می یابد و پس از اینکه در این سرعت باد، توربین به حداکثر توان اسمی خود (۵ مگاوات) رسید، بوسیله سیستم کنترلی pitch و stall dynamic، پرها در جهتی قرار می گیرند، که نیروی تراست بیشتری به توربین وارد نشود ولیکن قدرت همچنان ۵ مگاوات باقی بماند. این امر بدلیل جلوگیری از آسیب دیدگی توربین تحت بادهای شدید صورت می گیرد. همچنین در سرعت های باد بالاتر از ۲۵ متر بر ثانیه، توربین از کار کردن باز می ایستد (parked) یا به آرامی می چرخد (idling)، تا دچار آسیب نشود [۱۰].

شایان ذکر است در مناطق ساحلی که عمق دریا بسیار کم است، می توان از کیسون (مطابق شکل (۱)) نیز استفاده نمود. از آنجا که در مرحله اول پیاده سازی این طرح می بایست از پتانسیل های موجود در کشور استفاده نمود، با توجه به توانایی ساخت سکوی های شابلونی (مشابه سکوی های شابلونی نفتی)، امکان ساخت و نصب سازه نگهدارنده شابلونی برای توربین های بادی دریایی، نسبت به سایر گزینه ها فراهم است. لذا در این تحقیق مطالعه بر روی توربین بادی دریایی با سکوی سه پایه انجام می شود.

تا کنون تحقیقاتی در زمینه اثر نیروی آئرو دینامیکی باد بر روی سازه نگهدارنده توربین بادی دریایی انجام شده است، به عنوان نمونه فیض اله زاده و محمودی توربین بادی دریایی با سکوی ثابت تک شمعی را تحت نیروی تراست مورد بررسی قرار دادند [۵]. همچنین جانکمن و بوهل به مدلسازی عددی توربین بادی دریایی شناور دریایی پرداخته اند [۶]. سرانجام جانکمن و همکاران بر پایه معادلات حاکم بر توربین بادی دریایی تحت بارهای آئرو دینامیکی ناشی از باد و هیدرو دینامیکی ناشی از موج، در محیط شبیه ساز برنامه متلب، یک توربین بادی دریایی با پایه تک شمع را مورد مطالعه قرار دادند [۷]. این تحقیقات منجر به ارائه یک برنامه منبع باز<sup>۱</sup> به نام FAST<sup>۲</sup> گردید که امکان تحلیل دینامیکی انواع توربین های بادی دریایی را تحت بارگذاری های مختلف می دهد [۸ و ۹].

در تحقیقات مذکور هدف اصلی ارائه یک مدل عددی برای حل معادلات حاکم بر توربین های بادی دریایی بوده است و هیچکدام توربین بادی دریایی با سکوی نگهدارنده سه پایه را بررسی نکرده اند لذا در ادامه این تحقیقات در مطالعه حاضر اولاً به بررسی این نوع از توربین بادی دریایی و تحلیل دینامیکی آن پرداخته می شود، ثانیاً اثرات هر کدام از خصوصیات موج و باد بطور جداگانه بر روی عملکرد این سازه بررسی می گردد. بطور کلی دو نقصی که در تحقیقات گذشته بوده است به شرح ذیل است:

الف- اکثر تحقیقات بر روی توربین دریایی با سکوی تک شمع، شناور و شابلونی چهارپایه انجام شده، لذا از آنجا که با توجه به پتانسیل اجرایی کشور و همچنین عمق کم در سواحل خلیج فارس، به نظر می رسد طرح پایلوت توربین

<sup>3</sup> Blade Element Momentum (BEM)

<sup>4</sup> Morison Equation

<sup>1</sup> Opensource

<sup>2</sup> Fatigue, Aerodynamics, Structures, and Turbulence

جدول (۲) مشخصات هندسی سکوی سه پایه.

عق آب	۴۵ متر
ارتفاع عرشه نسبت به سطح آب	۱۸ متر
قطر خارجی ستون مرکزی	۵/۷-۳/۴ متر
ضخامت ستون مرکزی	۰/۰۵ متر
قطر خارجی قطعه انتقالی	۵/۷ متر
ضخامت قطعه انتقالی	۰/۰۳۲-۰/۰۵ متر
قطر خارجی مهاربندهای کف	۱/۲ متر
ضخامت مهاربندهای کف	۰/۰۲۵ متر
قطر خارجی مهاربندهای تحتانی	۱/۸۷۵ متر
ضخامت مهاربندهای تحتانی	۰/۰۲۵ متر
قطر خارجی مهاربندهای فوقانی	۲/۴۷۵ متر
ضخامت مهاربندهای فوقانی	۰/۰۳۵ متر

جدول (۱) مشخصات توربین ۵ مگاواتی NREL.

قدرت اسمی	۵ مگا وات
جهت روتور	Upwind
طول و تعداد پره ها	سه پره ۶۱/۵ متر طول
قطر روتور (Hub)	۱۲۶/۳ متر
ارتفاع Hub	۹۰ متر
سرعت اسمی باد	۱۱/۴ متر بر ثانیه
سرعت اسمی روتور	۱۲/۱ دور بر دقیقه
راندمان ژنراتور	۹۴/۴ درصد
جرم روتور	۱۱۰۰۰ کیلوگرم
جرم Nacelle	۲۴۰۰۰ کیلوگرم

## ۲-۲- سکوی سه پایه نگهدارنده توربین

سکوی سه پایه نگهدارنده توربین در واقع یک سازه ترکیبی بین سکوی تک شمع و سکوی شابلونی چهارپایه است که در آن ستون مرکزی همانند سکوی تک شمع، برج توربین را به قطعه انتقالی متصل می نماید. و در قسمت تحتانی این سکو، ستون مرکزی به یک قاب فضایی همانند آنچه که در سکوی شابلونی چهارپایه هست، متصل می شود (شکل (۲)). سکوی سه پایه نگهدارنده مطابق شکل (۲)، در عمق ۴۵ متری آب قرار می گیرد به نحوی که عرشه آن در ارتفاع ۱۸ متری از تراز سطح آب است. مشخصات سازه‌ای این سکو مطابق جدول (۲) است [۱۱].

## ۲-۳- معادله حرکت توربین بادی دریایی

معادله حرکت دینامیکی توربین بادی ثابت دریایی با سکوی سه پایه تحت بارهای دینامیکی توام موج و باد را می توان مطابق رابطه ذیل تعریف نمود.

$$F_{inertia} + F_{elastic} + F_{damping} = F_{hydro} + F_{aero} \quad (1)$$

که در آن مجموع نیروهای داخلی سیستم (اینرسی، میرایی و الاستیک) برابر با نیروهای خارجی وارده که نیروی آئرو دینامیکی و نیروی هیدرودینامیکی وارد بر توربین و سکوی نگهدارنده آن است، قرار گرفته است [۱۲].

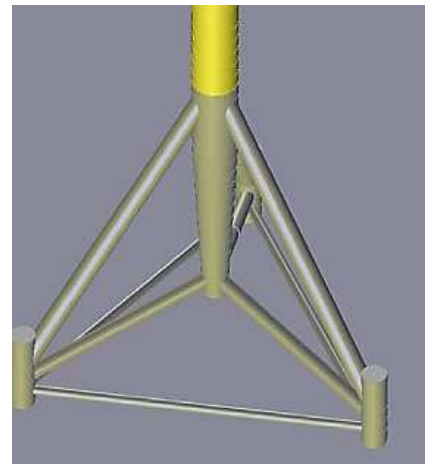
## ۳- معرفی نیروهای آئرو دینامیک و هیدرودینامیک

### ۳-۱- بار موج وارد بر سکوی سه پایه

به منظور محاسبه بار موج و نیروهای هیدرودینامیکی ناشی از اندرکنش آب و سکوی نگهدارنده توربین بادی از فرمول موریسون استفاده می شود. محاسبه نیروی وارده از طرف امواج بر روی اجزای استوانه‌ای، به نسبت طول موج به قطر عضو بستگی دارد. وقتی که این نسبت بزرگتر از ۵ باشد عضو تاثیر قابل توجهی روی موج تابشی نمی گذارد، لذا نیروی موج را می توان به صورت جمع نیروی درگ و نیروی اینرسی، مطابق رابطه (۲) محاسبه نمود.

$$F_{hydro} = F_{morison} = F_D + F_I = 0.5\rho_w c_D A (v - u')|v - u'| + \rho_w B (c_M v' - (c_M - 1)u'') \quad (2)$$

که در آن  $F_{hydro}$  نیروی هیدرودینامیکی بر حسب نیوتن بر متر که در جهت عمود بر محور عضو عمل می کند.  $F_D$  نیروی درگ بر حسب نیوتن بر متر که بر محور عضو در صفحه محور عضو و  $u'$  وارد می شود.  $F_I$  ماتریس نیروی اینرسی بر حسب نیوتن بر متر که عمود بر محور عضو در صفحه محور عضو و  $u''$  اعمال می گردد.  $\rho_w$  جرم مخصوص آب بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب،  $A$  سطح تصویرشده عمود بر محور استوانه در واحد طول،  $B$  حجم جابجاشده استوانه در واحد



شکل (۲) سکوی سه پایه نگهدارنده توربین بادی.

$$T = \int B p_N dr \quad (7)$$

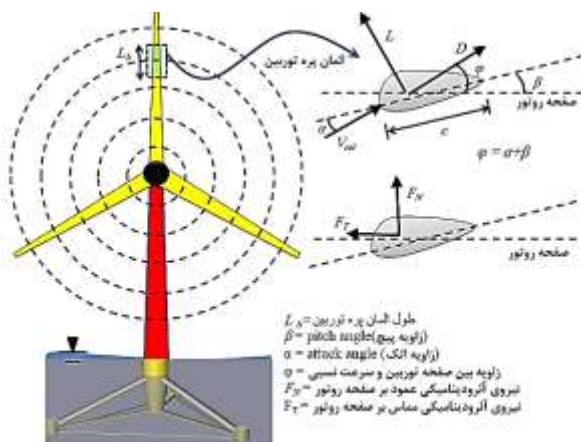
$$M = \int r B p_T dr \quad (8)$$

که در آن  $T$  نیروی کل عمود بر صفحه روتور (rotor thrust)،  $M$  لنگر کل وارده بر توربین (rotor torque)،  $B$  تعداد پره‌های (تیغه‌های) توربین،  $r$  فاصله هر ایرفویل از مرکز توربین،  $dr$  طول هر ایرفویل است. شایان ذکر است پارامترهای معرفی شده در بالا به همراه دیگر پارامترهای اصلی تئوری BEM بطور شماتیک در شکل (۳) مشخص شده است.

#### ۴- تشریح مدل‌سازی

از روابط ارائه شده در بخش قبل و همچنین معادله مربوط به اندرکنش آب و سازه (نیروی موريسون) مشخص است که برای حل معادله حرکت دینامیکی سازه (رابطه (۱))، به سرعت باد و شتاب و سرعت آب نیاز است. از طرف دیگر برای بدست آوردن این پارامترها، به تغییرمکان، سرعت و شتاب توربین و سکوی سه پایه نگهدارنده آن نیاز است. بنابراین معادله حرکت سیستم توربین بادی سه پایه دریایی تحت نیروهای هیدرو دینامیک و آئرو دینامیک بصورت یک معادله کوپل و اندرکنشی غیرخطی است.

به منظور حل این معادله غیر خطی و کوپل حاکم بر مدل ریاضی سیستم، می‌توان با استفاده از شبیه ساز نرم افزار متلب (Simulink)، بدون نوشتن در یک معادله نیز آن‌ها را حل نمود که بر پایه همین امر در ادامه از کد منبع باز FAST که پیشتر توضیح داده شد، استفاده خواهد شد. در شکل (۴) یک نمونه از مدل‌سازی انجام شده مشاهده می‌شود.



شکل (۳) نیروهای آئرو دینامیکی وارد بر توربین بادی دریایی مطابق BEM

طول،  $C_D$  ضریب درگ،  $C_M$  ضریب اینرسی،  $v$  مولفه بردار سرعت تحت موج یا جریان آب عمود بر محور عضو بر حسب متر بر ثانیه،  $v'$  مولفه بردار شتاب آب عمود بر محور عضو بر حسب متر بر مجذور ثانیه،  $u'$  سرعت پاسخ سازه و  $u''$  شتاب پاسخ سازه است. شایان ذکر است در رابطه فوق که به رابطه موريسون اصلاح شده معروف است اثر حرکات نسبی سازه در مقابل آب دیده شده است. همچنین نیروی اینرسی، ترم جرم افزوده متناسب با شتاب سازه را شامل شده است [۱۳].

#### ۳-۲- بار باد وارد بر بخش توربین بادی

تولید انرژی توسط توربین وابسته به اندرکنش بین ایرفویل‌های هریک از تیغه‌های روتور و جریان باد است. جریان باد بر روی ایرفویل تیغه‌ها، تولید نیروهای آئرو دینامیکی Lift و Drag می‌کند. به منظور محاسبه بارهای ناشی از باد بر روی بخش توربین این سازه‌ها از روش BEM استفاده می‌شود که شکل کلاسیک این روش در سال ۱۹۳۵ توسط Glauert ارائه شده است [۱۴]. در این روش در صورتیکه  $C_l$  و  $C_d$  به ترتیب ضرایب lift و drag باشد، نیروی lift و drag در واحد طول ایرفویل از روابط ذیل بدست می‌آید.

$$L = 0.5 \rho_{air} V_{rel}^2 c C_l \quad (3)$$

$$D = 0.5 \rho_{air} V_{rel}^2 c C_d \quad (4)$$

که در آن  $L$  نیروی lift (نیروی برا) وارد بر واحد طول ایرفویل،  $D$  نیروی drag وارد بر واحد طول ایرفویل،  $\rho_{air}$  جرم مخصوص هوا بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب،  $c$  وتر یا عرض ایرفویل بر حسب متر (Chord)،  $V_{rel}$  برآیند سرعت باد و سرعت چرخشی روتور است.

از آنجائیکه نیروهای عمودی و مماسی وارد بر صفحه روتور (Rotorplane) مطلوب است، با تصویر نیروهای lift و drag محاسبه شده مولفه‌های عمود و مماس وارد بر روتور مطابق ذیل بدست می‌آید.

$$p_N = L \cos \phi + D \sin \phi \quad (5)$$

$$p_T = L \sin \phi - D \cos \phi \quad (6)$$

که در آن  $p_N$  مولفه عمود بر صفحه روتور،  $p_T$  مولفه مماس بر صفحه روتور،  $\phi$  زاویه  $V_{rel}$  با صفحه روتور است.

بدین ترتیب در نهایت نیروی کل عمود بر صفحه روتور (rotor thrust) و لنگر کل وارده بر توربین (rotor torque) از روابط ذیل بدست می‌آید:

شده است. این طیف تابعی از ارتفاع مشخصه موج ( $H_s$ )،  
 پرپود پیک موج ( $T_p$ ) و فرکانس ( $f$ ) می باشد [۱۴].

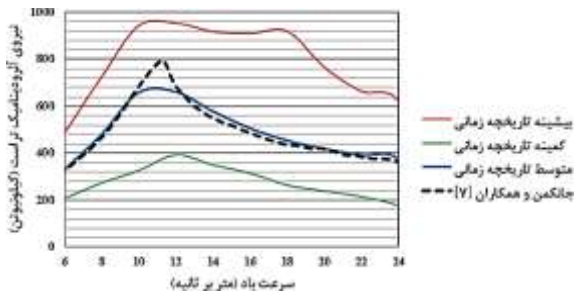
$$S(f)_{\text{Pierson-Moskowitz}} = \frac{5}{16} \frac{H_s^2}{T_p^4 f^5} \exp\left(-\frac{5}{4}(fT_p)^{-4}\right) \quad (10)$$

از طیف مذکور با استفاده از تابع معکوس تبدیل سریع فوریه  
 (IFFT)، تاریخچه زمانی تغییرات تراز سطح آب بدست  
 می آید. از آنجا که برای محاسبه نیروی هیدرودینامیکی بر  
 اساس فرمول موریسون داشتن سرعت و شتاب ذرات آب در  
 ترازهای مختلف نیاز است، با استفاده از تئوری موج خطی  
 ایری (Airy)، سرعت و شتاب ذرات آب در ترازهای مختلف  
 از روی تغییرات تراز سطح آب بدست خواهد آمد [۱۶].

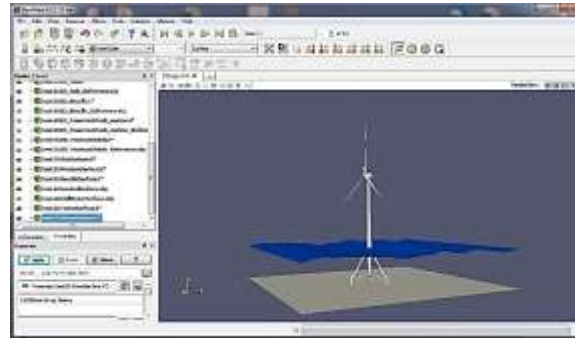
دو پارامتری که در این تحقیق به عنوان خروجی در نظر  
 گرفته شده است، میزان برش پایه و لنگر واژگونی سازه است.  
 لذا از آنجا که برای بررسی این دو پارامتر در طول زمان باید  
 معیاری غیر از بیشینه پاسخ تنها مورد مطالعه قرار گیرد، چرا  
 که بیشینه پاسخ تنها در یک لحظه اتفاق می افتد، برای این  
 منظور سه پارامتر ماکزیمم ( $\mu$  Max)، میانگین ( $\mu$ ) و میانگین  
 به علاوه انحراف معیار ( $\sigma + \mu$ ) پاسخ سازه در طول مدت  
 تحلیل مورد بررسی قرار گرفته است.

#### ۵- صحت سنجی مدل

به منظور اعتبارسنجی مدل حاضر و همچنین حصول  
 اطمینان از عملکرد سیستم کنترلی pitch و stall dynamic و  
 توربین در این تحقیق، مقادیر بیشینه، کمینه و متوسط  
 تاریخچه زمانی نیروی تراست حاصل از مدل مذکور با مقادیر  
 حالت پایدار (steady state) مدل ارائه شده توسط جانکمن  
 و همکاران [۷] به ازای سرعت های مختلف باد مقایسه شده-  
 است.



شکل (۵) مقایسه نتایج نیروی تراست مدل تحقیق حاضر با  
 مدل جانکمن و همکاران.



شکل (۴) مدل سازی توربین بادی سه پایه دریایی

به منظور مطالعات پارامتریک بر روی سیستم توربین بادی  
 سه پایه دریایی، شرایط مختلف بارگذاری مطابق جدول (۳)  
 به عنوان ورودی در نظر گرفته شده است.

جدول (۳) شرایط بارگذاری (مطابق شرایط دریایی کشور)

ارتفاع مشخصه موج ( $H_s$ )	۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ متر
پرپود حداکثر موج ( $T_p$ )	۸، ۱۲ و ۱۶ ثانیه
سرعت متوسط باد در تراز توربین ( $V_{hub}$ )	۸، ۱۲، ۱۶، ۲۰ و ۲۴ متر بر ثانیه

برای محاسبه تاریخچه زمانی نیروهای آئرو دینامیکی و  
 هیدرودینامیکی وارد بر سیستم مطابق بارگذاری های جدول  
 (۳)، به ترتیب نیاز به بدست آوردن تاریخچه زمانی سرعت  
 باد و تاریخچه زمانی تغییرات تراز سطح آب است. برای  
 محاسبه سرعت باد وارد بر توربین ها بطور کلی دو طیف  
 سرعت Kaimal و Von Karman مورد استفاده قرار می گیرد  
 که در این تحقیق از طیف Kaimal مطابق رابطه زیر بهره  
 برده شده است. طیف kaimal تابعی از فرکانس ( $f$ )، سرعت  
 متوسط باد ( $V_{mean}$ )، تراز سرعت از سطح دریا (یا  
 زمین) ( $l$  مقیاس طولی) و ضریب آشفتگی ( $I_t$ ) است [۱۴].

$$S(f)_{\text{Kaimal}} = \frac{I_t^2 V_{mean}^l}{(1 + 1.5 \frac{fl}{V_{mean}})^{\frac{5}{3}}} \quad (9)$$

در این تحقیق با استفاده از کد Turbsim که یکی از  
 زیرمجموعه های کد FAST است، با در نظر گرفتن ضریب  
 آشفتگی، برش باد و دیگر پارامترهای تاثیرگذار، تاریخچه  
 زمانی سرعت باد برای سرعت بادهای متوسط مختلف  
 استخراج شده است و برای محاسبه نیروی آئرو دینامیکی بر  
 اساس تئوری BEM به برنامه FAST اعمال می شود [۱۵].  
 همچنین به منظور محاسبه تاریخچه زمانی تراز سطح آب از  
 طیف رایج Pierson-Moskowitz مطابق رابطه زیر استفاده



همانطور که ملاحظه می‌شود با افزایش ارتفاع موج، نیروی برش پایه و لنگر واژگونی پای سازه افزایش می‌یابد که این امر بدلیل نیروی هیدرودینامیک بزرگتری است که در ارتفاع موج‌های بالاتر به سازه اعمال می‌شود. همچنین از روی تاریخچه زمانی نمودارهای فوق، میزان افزایش سه معیار ماکزیمم، میانگین و میانگین به علاوه انحراف معیار مطابق جدول ذیل محاسبه شده‌است.

نتایج جدول (۴) نشان می‌دهد که افزایش ارتفاع موج بر روی نیروی برش پایه تأثیر بیشتری گذاشته‌است. همچنین درصد افزایش کم میانگین در هر دو پارامتر نیروی برش پایه و لنگر واژگونی نشان‌دهنده آن است که افزایش ارتفاع موج دامنه نوسانات نیروهای وارد بر سازه را به شدت افزایش داده و مقدار میانی نیروی وارده تغییر چندانی نمی‌کند که این امر از روی نمودارهای شکل (۶) و (۷) نیز قابل مشاهده است.

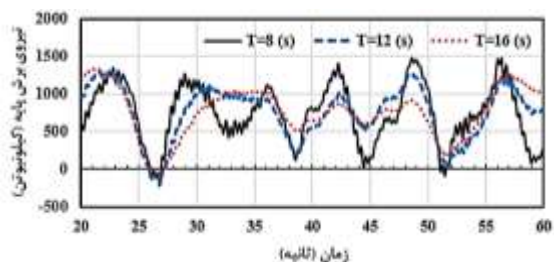
#### ۶-۲- اثر پریود حداکثر موج

برای بررسی اثر پریود حداکثر موج بر روی میزان برش پایه و لنگر واژگونی سازه، دو پارامتر دیگر یعنی ارتفاع مشخصه موج و سرعت میانگین باد در تراز توربین ثابت در نظر گرفته شده‌است. نمودار شکل‌های (۸) و (۹) تاریخچه زمانی دو پارامتر برش پایه و لنگر واژگونی را در سه پریود حداکثر موج ۸، ۱۲ و ۱۶ ثانیه با یکدیگر مقایسه نموده‌است.

مطابق این نمودارها، افزایش پریود موج باعث کاهش میزان نیروی برش پایه و لنگر واژگونی پای سازه می‌شود که البته این کاهش در مقایسه با اثر ارتفاع موج ناچیز است.

جدول (۴) درصد افزایش در اثر افزایش ارتفاع موج.

$\sigma+\mu$	$\mu$	Max	
۱۴۱	۸	۴۰۶	نیروی برش پایه
۵۶	۲	۹۸	لنگر واژگونی پای سازه



شکل (۸) نیروی برش پایه.

(ارتفاع موج ۲ متر و سرعت باد ۱۲ متر بر ثانیه)

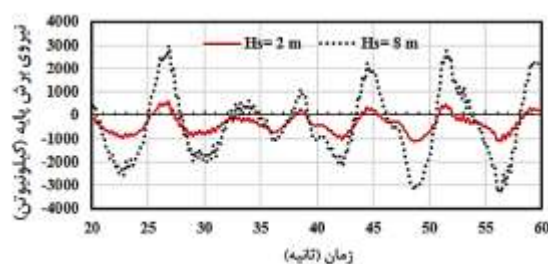
همانطور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، مقادیر متوسط تاریخچه زمانی نیروی تراست مدلسازی این تحقیق با تقریب خوبی بر نتایج مدل حالت پایدار (steady state) ارائه شده توسط جانکمن و همکاران تطبیق دارد. همچنین مشاهده می‌شود که مقادیر بیشینه، کمینه و متوسط تاریخچه زمانی نیروی تراست در مدل این تحقیق، برای سرعت‌های بیشتر از ۱۲ متر بر ثانیه شروع به کاهش می‌نماید که مطابق آنچه در بخش ۱-۲ بیان شد، این امر نشان‌دهنده عملکرد درست سیستم کنترلی pitch و stall dynamic در مدل این تحقیق است.

#### ۶- بحث و نتایج

در این بخش به بررسی اثرات باد و موج بر روی میزان برش پایه و لنگر واژگونی پرداخته می‌شود.

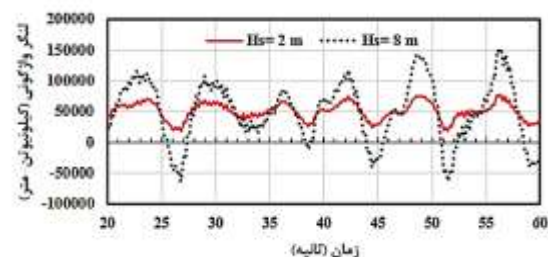
#### ۶-۱- اثر ارتفاع مشخصه موج

به منظور بررسی اثر ارتفاع موج بر روی میزان برش پایه و لنگر واژگونی سازه، پریود موج و سرعت میانگین باد در تراز توربین ثابت در نظر گرفته شده‌است. نمودار شکل‌های (۶) و (۷) تاریخچه زمانی دو پارامتر برش پایه و لنگر واژگونی را در دو ارتفاع مشخصه موج ۲ و ۸ متر با یکدیگر مقایسه نموده‌است.



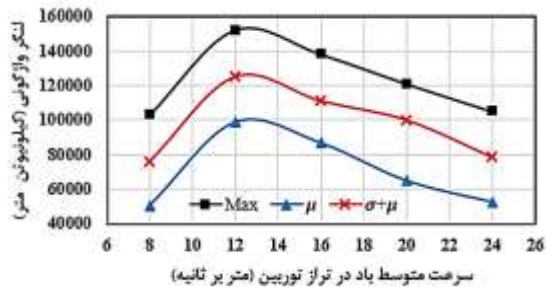
شکل (۶) نیروی برش پایه.

(پریود موج ۸ ثانیه و سرعت باد ۸ متر بر ثانیه)



شکل (۷) لنگر واژگونی پای سازه.

(پریود موج ۸ ثانیه و سرعت باد ۸ متر بر ثانیه)



شکل (۱۱) تغییرات لنگر واژگونی در سرعت‌های مختلف باد.

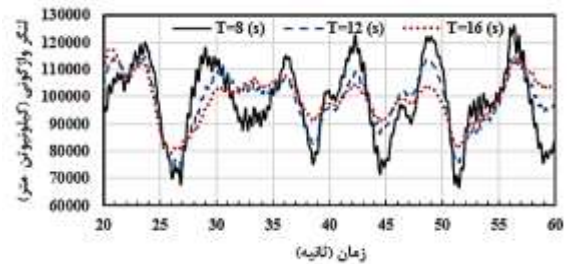
همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش سرعت متوسط باد تا مقدار ۱۲ متر بر ثانیه، میزان نیروی برشی و لنگر خمشی پای سازه افزایش می‌یابد ولیکن با بیشتر شدن سرعت، مقادیر نیروی برشی و لنگر خمشی روند کاهشی را طی می‌نمایند. دلیل این امر نکته اشاره شده در بخش ۲-۱ است، همانطور که بیان شد، از آنجاییکه بعد از سرعت ۱۲ متر بر ثانیه سیستم کنترلی توربین به گونه‌ای عمل می‌نماید که ضمن حفظ حداکثر توان تولید برق (۵ مگاوات)، نیروی آئرودینامیکی تولید شده توسط توربین (نیروی تراست) کاهش یابد تا توربین از اثرات تخریبی احتمالی در سرعت‌های بالا در امان باشد، لذا با کاهش این نیرو، مقادیر نیروی برشی و لنگر خمشی پای سازه نیز کاهش می‌یابد.

#### ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک توربین بادی دریایی با سکوی نگهدارنده سه پایه، تحت بارگذاری‌های مختلف باد و موج به صورت توأم با در نظر گرفتن اندرکنش آب و سازه قرار گرفت و تاریخچه زمانی پاسخ سازه (نیروی برش پایه و لنگر واژگونی) محاسبه شد. سپس اثرات سه پارامتر ارتفاع مشخصه موج، پرپود غالب موج و سرعت متوسط باد بر روی پاسخ سازه بصورت جداگانه بحث و بررسی شد. نتایج حاصل از این بررسی نشان داد که:

- بطور کلی تغییرات نیروی برش پایه بیشتر تحت تأثیر تغییرات مشخصه‌های موج و نیروی هیدرودینامیکی است.
- لنگر واژگونی با تغییر سرعت باد و به تبع آن تغییر نیروی آئرودینامیکی وارد بر سازه، تغییرات محسوس‌تری را نشان می‌دهد.

- تغییرات در پرپود غالب موج، به میزان ناچیزی باعث تغییرات در پاسخ سازه می‌شود.
- افزایش ارتفاع موج باعث افزایش پاسخ سازه می‌گردد.



شکل (۹) لنگر واژگونی پای سازه. (ارتفاع موج ۲ متر و سرعت باد ۱۲ متر بر ثانیه)

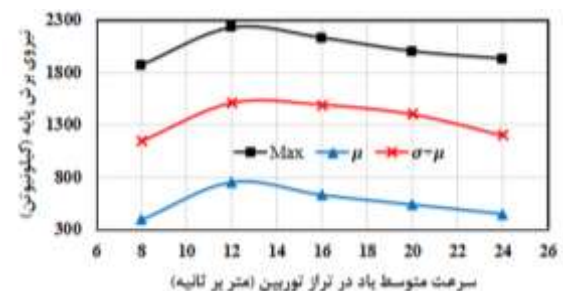
دلیل کاهش میزان نیرو و لنگر پای سازه با افزایش پرپود موج اینست که هرچند پرپود موج افزایش یابد میزان فرکانس‌های نیروی هیدرودینامیک تولیدشده ناشی از اندرکنش آب و سازه کاهش پیدا می‌کند، در نتیجه باعث کاهش نیروی وارده به کل سیستم می‌شود. با توجه به تاریخچه زمانی نمودارهای فوق، میزان افزایش سه معیار ماکزیمم، میانگین و میانگین به علاوه انحراف معیار مطابق جدول (۵) محاسبه شده‌است.

جدول (۵) درصد کاهش در اثر افزایش پرپود موج.

$\sigma+\mu$	$\mu$	Max	
۴	-۲	۱۰	نیروی برش پایه
۴/۵	-۰/۵	۸	لنگر واژگونی پای سازه

#### ۵-۳- اثر سرعت متوسط باد

به منظور بررسی اثر باد، تاریخچه زمانی پاسخ سازه تحت شرایط مختلف بارگذاری مطابق جدول (۳) محاسبه گردیده و سپس متوسط مقادیر ماکزیمم، میانگین و میانگین به اضافه انحراف معیار، برای سرعت بادهای ۸ تا ۲۴ متر بر ثانیه مطابق نمودارهای شکل‌های (۱۰) و (۱۱) رسم شده است.



شکل (۱۰) تغییرات نیروی برش پایه در سرعت‌های مختلف باد.



- [9] Jonkman, B., and Jonkman, J., "FAST v8. 15.00 a-bjj", National Renewable Energy Laboratory, 2009.
- [10] Dezvareh, R., Bargi K., and Mousavi, A., "Control of Wind/Wave-Induced Vibrations of Jacket-Type Offshore Wind Turbines through Tuned Liquid Column Gas Dampers", Structure and Infrastructure Engineering, Vol.12, No.3, pp.312-326, 2016.
- [11] Damiani, R., Jonkman, J., Robertson, A., and Song, H., "Assessing the Importance of Nonlinearities in the Development of a Substructure Model for the Wind Turbine CAE Tool FAST: Preprint. No. NREL/CP-5000-57850. National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO., 2013.
- [12] Bargi, K., Dezvareh, R., and Mousavi, Amin. "Contribution of Tuned Liquid Column Gas Dampers to the Performance of Offshore Wind Turbines under Wind", Wave, and Seismic Excitations", Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Vol.15, No.3, pp.551-561, 2016.
- [13] Laya, E., Jerome J., Connor, J., and Shyam Sunder S., "Hydrodynamic Forces on Flexible Offshore Structures", Journal of Engineering Mechanics, Vol.110, No.3, pp.433-448, 1984.
- [14] Hansen, M.O.L., "Aerodynamics of Wind Turbines second Edition Earthscan", London, UK, 2008.
- [15] Jonkman, B.J., and M. Buhl, Jr, L., TurbSim User's Guide: Revised February 2007 for Version 1.21. No. NREL/TP-500-41136. National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO., 2007.
- [16] Dean, R.G., and Dalrymple, R.A.. Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists. Vol.2. world scientific publishing Co Inc, 1991.
- افزایش سرعت باد تا مقدار ۱۲ متر بر ثانیه، پاسخ سازه را ازدیاد می‌بخشد ولیکن به دلیل سیستم کنترلی توربین در سرعت‌های بیش از ۱۲ متر بر ثانیه پاسخ سازه روند کاهشی دارد.
- با توجه به نیاز روزافزون به انرژی‌های تجدیدپذیر نظیر توربین‌های بادی، پیشنهاد می‌شود این مطالعه بر روی توربین‌های بادی دریایی با انواع دیگر سکوهاى نگهدارنده نظیر سکوی شابلونی چهارپایه و سکوی نیمه شناور نیز انجام شود. همچنین از آنجاییکه میزان آشفستگی باد به عنوان پارامتری تأثیرگذار در تعیین نیروی آئرو دینامیکی است، بررسی اثر این پارامتر در مطالعات بعدی ضروری به نظر می‌رسد.
- ### ۷- منابع
- [1] Jens, V., Brandstrup, L., and Robert D. Goddard, "A Brief History of the Wind Turbine Industries in Denmark and the United States", In Academy of international business (Southeast USA Chapter) Conference proceedings, pp.322-327, 2004.
- [2] Brown, L.R. "World on the Edge: How to Prevent Environmental and Economic Collapse WW Norton", 2011.
- [3] Johannes, K.M., "Dynamics and Design Optimisation of Offshore Wind Energy Conversion Systems". DUWIND, Delft University Wind Energy Research Institute, 2001.
- [4] Dong, W., Moan, T., and Gao Z., "Long-Term Fatigue Analysis of Multi-Planar Tubular Joints for Jacket-Type Offshore Wind Turbine in time Domain", Engineering Structures, Vol.33, No.6, 2002-2014.
- [۵] فیض‌اله زاده، مهدی و محمودی، محمدجواد، تحلیل ارتعاشات ناشی از نیروی تراست برج توربین بادی فراساحلی با سکوی ثابت تک شمع، نشریه دریافنون، سال دوم، بهار و تابستان ۱۳۹۴، صفحه ۳۱ الی ۴۶.
- [6] Jonkman, J. M., Marshall L., and Buhl Jr., "Loads Analysis of a Floating Offshore Wind Turbine using Fully Coupled Simulation", In Wind Power Conference and Exhibition, Los Angeles, CA. 2007.
- [7] Jonkman, J., Butterfield, S., M. Walter, and Scott G., "Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development", No. NREL/TP-500-38060. National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO., 2009.
- [8] Jonkman, Jason M., and Buhl, M., and Jr, L., Renewable Energy Laboratory", No. NREL/EL-500-38230, Golden, CO, 2005.