تاثیر ابعاد فلپ و زاویه برخورد موج روی پاسخ سکو و توان تولیدی در سیستم ترکیبی سکوی توربین بادی و مبدل انرژی سرج نوسانی فلپ

فاطمه کمال[۱]، ابوذر اباذری[۲*]، رضا درستکار[۳]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار، Fatemeh.kamal77@gmail.com
[۲] عضو هیئت علمی، استادیار، دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار ، abuzarabazari@cmu.ac.ir
[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار، rezadorostkar.bnd@gmail.com

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۸/۱۳
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۱/۱۵
تاریخ انتشار مقاله: ۱۴۰۳/۰۱/۲۰

کلمات کلیدی:
سکوی فراساحلی
مبدل انرژی امواج
فلپ
توان خروجی
پاسخ دینامیکی

چکیده

استفاده از سکوهای فراساحلی توربین بادی، در دهه‌های اخیر موردتوجه محققان و صنایع قرار گرفته است. برای افزایش کارایی توان تولیدی و کاهش پاسخ سکوها، تئوری ترکیب سکوهای توربین فراساحلی با مبدل‌های انرژی امواج مورد بررسی قرار گرفته است. ترکیب مبدل انرژی امواج از نوع سرج نوسانی با سکوی فراساحلی کمتر موردتوجه قرار گرفته است و همچنین تأثیر ابعاد مبدل انرژی نوسانی فلپ روی توان تولیدی و پاسخ سکو تاکنون به‌صورت دقیق بررسی نشده است که در این تحقیق بررسی می‌گردد. همچنین تأثیر پارامترهایی مانند ابعاد فلپ و زاویه موج برخوردی روی پاسخ‌های هیو و سرج، رول و پیچ سکو و نهایتاً روی توان تولیدی کل بر اساس تئوری تفرق بررسی می‌شود. نتایج بدست آمده اثربخشی سیستم ترکیبی سکو و مبدل را در مقایسه با سکوی تنها از نقطه نظر توان تولیدی و کاهش ارتعاشات سکو تأیید می‌کند. همچنین مشخص شد که تاثیر افزایش پهنا در مقایسه با افزایش ارتفاع و ضخامت روی توان و ارتعاشات سکو قابل توجه‌تر است. به طور کلی مقدار توان تا حدود ۱۰۰۰ کیلو وات بستگی به ابعاد فلپ و پریود تحریک قابل تولید است .همچنین پاسخ ارتعاشی سکو با وجود مبدل انرژی در بعضی جهات حتی تا ۳۰ درصد کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده پایداری بیشتر سکو در حالت ترکیبی است.

The effect of flap dimension and wave angle on the dynamic response and extracted power of the hybrid system of offshore wind turbine and surge oscillating converter

Fatemeh Kamal[1], Abuzar Abazari[2*], Reza Dorostkar[3]

[1] *MSC student, Chabahar Maritime University,* Fatemeh.kamal77@gmail.com
[2*] *Faculty member, Chabahar Maritime University,* abuzarabazari@cmu.ac.ir
[1] *MSC student, Chabahar* Maritime University, rezadorostkar.bnd@gmail.com

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 04 Nov 2023
Accepted: 03 Apr 2024
Available online: 08 Apr 2024

Keywords:
Offshore platform
Wave energy converter
Flap
Output power
Dynamic response

ABSTRACT

The use of offshore wind turbines has attracted the attention of researchers recently. For enhancing the performance of power generation, the combination of these platforms with wave energy converters has been investigated. The integrated design of an oscillating surge WEC with a semi-submersible offshore platform has less been considered. Moreover, the effect of flap dimensions and wave direction on the dynamic response in roll, pitch, heave surge direction, and output power has not been studied which is investigated in the present study. The results confirmed the effectiveness of the hybrid system on vibration reduction and power production compared to the alone platform. The flap width is more effective than height and thickness on power production and platform response. The output power of 1000 kw can be generated depending on the flap dimension of the wave period. Furthermore, the dynamic response decreases up to 30% in hybrid design indicating the higher stability of the platform when attaching to WECs.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-02]
[DOI: 10.61186/marineeng.20.42.1]

۱ – مقدمه

اهمیت منابع انرژی تجدیدپذیر، به‌ویژه انرژی باد و امواج اقیانوسی، در دو دهه اخیر بیش از پیش آشکار شده است. مبدل‌های انرژی موج بر اساس محل ساخت و ساز [۱] سیستم استخراج انرژی [۲] دسته‌بندی‌های مختلفی دارند که می‌توان با نحوه قرارگرفتن در برابر موج [۳-۵] یا نوع حرکت جذب شده توسط مبدل [۶, ۷] آنها را تقسیم‌بندی کرد. یکی از مبدل‌های انرژی، مبدل انرژی نوسانی سرج از نوع فلپ است. این مبدل از یک صفحه تشکیل شده که در قسمت پایین لولا شده است. با برخورد موج امکان نوسان زاویه‌ای مبدل حول لولا به وجود می‌آید و نهایتاً باتوجه‌به سیستم تولید برق PTO نصب شده در لولا، امکان تبدیل انرژی مکانیکی فلپ به سیال تحت‌فشار و نهایتاً چرخاندن توربین جهت تولید برق به وجود می‌آید. این مبدل به‌عنوان یکی از فناوری‌های برداشت انرژی موج توسعه داده شده که تحقیقات زیادی نیز روی آن انجام شده است[۸, ۹] .

در سال‌های اخیر استفاده از توربین‌های بادی فراساحلی به علت پتانسیل زیاد باد در نواحی اقیانوسی گسترش زیادی پیدا کرده است. عموماً مناطق با پتانسیل بالای انرژی باد در دریا، مناطقی با عمق زیاد هستند که ناگزیر توربین بادی باید روی سکوی شناور نصب شود. طراحی دینامیکی سکوی شناور که تحت‌تأثیر نیروهای ناشی از باد و امواج قرار می‌گیرد یکی از جنبه‌های مهم طراحی چنین سیستمی است. برای افزایش کارایی چنین سکوهایی و بهینه‌کردن هزینه‌های نصب توربین بادی فراساحلی اخیراً تحقیقات زیادی برای ترکیب مبدل‌های انرژی امواج و توربین‌های فراساحلی انجام شده است تا مبدل انرژی نصب شده نیز به طور مستقل، امکان تولید توان را داشته باشد. در یک تقسیم‌بندی بر اساس نوع مبدل انرژی این تحقیقات شامل سه بخش عمده است:

ترکیب مبدل انرژی نوع نقطه‌ای با سکوهای شناور بررسی شده است که برای نمونه درستکار و همکاران [۱۰] ترکیب سکوی نیمه مغروق را با مبدل نقطه‌ای جوکار و همکاران [۱۱] ترکیب مبدل با شناور لنج را بررسی کردند. وانگ و همکاران [۱۲] کارایی هیدرودینامیکی یک مبدل انرژی نقطه‌ای نوع هیو نصب شده روی ستون مرکزی سکوی نیمه شناور توربین بادی ۵ مگاواتی را تحلیل کرد. کریمی‌راد و کوشان [۱۳] میزان توان تولیدی مبدل انرژی ترکیب شده نوع هیو با سکوی اسپار را با آنالیز کوپل هیدرو - ایرو - سروو - الاستیک محاسبه کردند. غفاری و همکاران با تحلیل زمانی و فرکانسی یک سیستم ترکیبی سکو و مبدل ویو استار را تحت اثر پریود و ارتفاع موج های مختلف تحلیل کردند [۱۴]. مبدل انرژی ستون نوسانگر آب نیز از جمله مبدل‌هایی بوده است که ترکیب آن با سکوها مورد بررسی قرار گرفته است. آئوباولت [۱۵] و همکاران و پرز[۱۶] و ایاذری [۱۷] ترکیب توربین بادی با یک مبدل ستون نوسان‌گر و آرایه‌ای از آنها را به روش عددی و تجربی از لحاظ فنی و اقتصادی مورد تحلیل قرار دادند. ترکیب سکوی شناور و مبدل نوع فلپ نیز از انواع دیگری بوده است که در یک پژوهش امکان استفاده از یک مبدل نوع فلپ به همراه یک توربین بادی بررسی شد. محققان سه مبدل انرژی موج بیضوی شکل نصب شده روی یک توربین شناور ۵ مگاواتی را از لحاظ هیدرودینامیکی تحلیل کردند ولی تأثیر پارامترهای مؤثر مختلف را مطالعه نکردند [۱۸].

همان‌طور که از مرور تحقیقات قبلی مشخص است مطالعه جامعی برای تأثیر ابعاد فلپ و زاویه برخوردی موج روی توان خروجی و همچنین پاسخ دینامیکی سکوی توربین بادی در حالت ترکیبی انجام نشده است. لذا در این تحقیق با استفاده از تئوری تفرق بر مبنای حل جریان پتانسیل و با روش المان مرزی کارایی سیستم ترکیبی و تاثیر ابعاد فلپ و جهت‌گیری زاویه‌ای موج روی توان تولیدی بررسی می‌گردد. لذا ابتدا سکوی شناور با مشخصات معلوم در نرم‌افزار انسیس آکوا مدل‌سازی می‌شود و پاسخ دینامیکی آن به دست می‌آید. سپس با نصب مبدل انرژی روی پانتون‌های سکو میزان تولید توان توسط مبدل‌های انرژی تحت شرایط مختلف محاسبه می‌شود و تأثیر این مبدل روی پاسخ دینامیکی سکو بررسی می‌گردد.

۲- معادلات حاکم

از آنجایی که برای یک سیستم قرار گرفته در معرض امواج دریا محاسبه نیروهای امواج مهم است، بایستی امواج دریا به صورت ریاضیاتی مدل‌سازی شوند. یکی از ساده‌ترین تئوری‌های مدل-سازی امواج که تئوری موج خطی است، برای شرایط امواج محیطی در تحقیق حاضر در نظر گرفته می‌شود. تئوری موج خطی بر اساس تئوری جریان پتانسیل و حل معادله لاپلاس و در نظر گرفتن شرایط پیوستگی، مرزی سینماتیکی و دینامیکی سطح آزاد و کف دریا ارائه شده است. که نهایتاً تابع پتانسیل موج خطی به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\emptyset = \frac{H}{2}\frac{g\cosh k(d+z)}{\sigma\cosh(kd)}\sin(kx-\sigma t) \qquad (۱)$$

H ارتفاع موج، d عمق آب، k عدد موج، σ فرکانس موج و g شتاب ثقل است. باتوجه‌به اینکه از نرم‌افزار آکوا بر اساس تحلیل جریان پتانسیل برای تحلیل سیستم ترکیبی استفاده می‌شود، لازم است در مورد تئوری تفرق که پایه و اساس معادلات حاکم بر مسئله است، اشاره شود. با استناد به تئوری تفرق به دلیل ماهیت جریان پتانسیل و همچنین خطی‌بودن موج، می‌توان تابع پتانسیل کلی مربوط به امواج تاثیر گذار روی یک جسم شناور را به سه ترم تابع پتانسیل موج رفت، موج تفرق و موج تابشی تقسیم کرد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-02]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.42.1]

φ_I تابع پتانسیل موج برخوردی تعریف می‌شود. تابع پتانسیل موج برخوردی بدون درنظرگرفتن وجود جسم و بر حسب شرایط مرزی سطح آزاد و شرایط مرزی کف حل می‌گردد.

$$\nabla^2\varphi_I = 0$$
$$\frac{\partial^2\varphi_I}{\partial t^2} + g\frac{\partial\varphi_I}{\partial Z} = 0 \qquad (۳)$$
$$\frac{\partial\varphi_I}{\partial Z} = 0$$

φ_D تابع پتانسیل موج تفرق است. تابع پتانسیل موج تفرق حاصل برخورد موج با سازه و بازتاب شدن موج است. در حل تابع پتانسیل موج تفرق، علاوه بر شرایط مرزی سطح آزاد و شرایط مرزی کف، باید شرط مرزی جسم نیز لحاظ گردد.

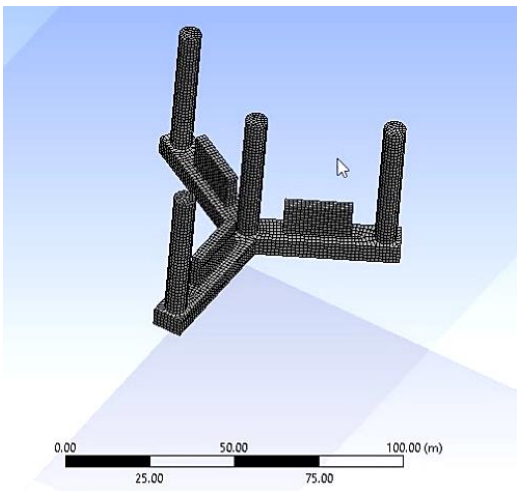
$$\nabla^2\varphi_D = 0$$
$$\frac{\partial^2\varphi_D}{\partial t^2} + g\frac{\partial\varphi_D}{\partial Z} = 0$$
$$\frac{\partial\varphi_D}{\partial Z} = 0 \qquad (۴)$$
$$\frac{\partial\varphi_D}{\partial n} = -\frac{\partial\varphi_I}{\partial n}$$

φ_R تابع پتانسیل موج تابشی در اجسام شناور است که ترم پتانسیل تابش نیز باید باتوجه‌به شرایط مرزی سطح آزاد و کف و همچنین شرایط مرزی روی سطح جسم محاسبه گردد.

$$\nabla^2\varphi_R = 0$$
$$\frac{\partial^2\varphi_R}{\partial t^2} + g\frac{\partial\varphi_R}{\partial_Z} = 0 \qquad (۵)$$
$$\frac{\partial\varphi_R}{\partial_Z} = 0$$
$$\frac{\partial\varphi_R}{\partial n} = \nabla\varphi_R.\hat{n} = \overrightarrow{V_B}\hat{n}$$

۳- مشخصات مدل

سکوی مورد مطالعه در این تحقیق یک سکوی نیمه مغروق است که سه مبدل انرژی فلپ همانند شکل ۱ به آن اضافه شده است. این سکو از یک ستون مرکزی برای نصب و سه ستون کناری تشکیل شده است و بر روی پانتون‌های سکو سه مبدل انرژی از نوع فلپ نصب می‌شود.



شکل ۱- نحوه چیدمان مبدل‌ها روی سکو

جدول ۱- مشخصات جرمی سکو

جرم فولادی شناور	1686000 kg
جرم کل	10780000 kg
مختصات مرکز ثقل	(0, 0, -18.9)
ارتفاع آزاد[1]	20 m
قطر ستون	6.5 m
ابعاد پانتون	طول:45.5 عرض:9 ارتفاع:6
زاویه بین پانتون‌ها	120 degree
آبخور	30 m
حجم مغروق	10517 m^3
I_{xx}	10650000000 $kg.m^2$
I_{yy}	10650000000 $kg.m^2$
I_{zz}	8142000000 $kg.m^2$

جدول ۲- مشخصات فلپ شماره ۱

جرم کل	650000 kg
مختصات مرکز ثقل	(20.5, 0 ,-13.6)
I_{xx}	4788333 $kg.m^2$
I_{yy}	2816666 $kg.m^2$
I_{zz}	236166 $kg.m^2$
پهنا فلپ	16,18,20 m
ارتفاع فلپ	11,13,15 m
ضخامت فلپ	1.5,2,2.5 m
B_{PTO}	4585.98 KN.s/rad

جدول ۳- شرایط محیطی مدل‌سازی

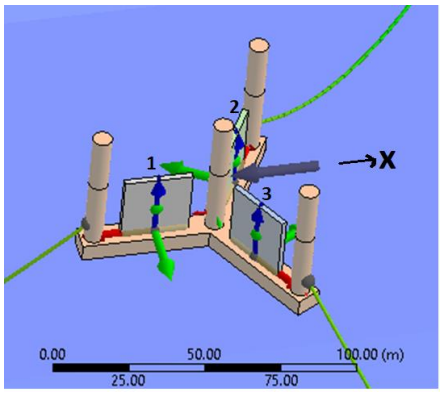
جهت موج نسبت به محور x	۰,۳۰,۹۰
پریود	6, 8, 10, 12, 14, 16 s
ارتفاع موج	2 m
سرعت باد	11/3 m/s
سرعت جریان دریایی	0.73 m/s

مشخصات جرمی سکو و فلپ شماره ۱ (شکل ۲) در جدول ۱ و جدول ۲ آمده است. همچنین تحلیل دینامیکی سکو در تحقیق حاضر تحت یک بارگذاری خاص انجام می‌شود که شرایط محیطی مربوط به این بارگذاری در جدول ۳ آمده است که شامل مقادیر تعریف شده برای پریود و ارتفاع موج منظم، سرعت باد و سرعت جریان دریایی است.

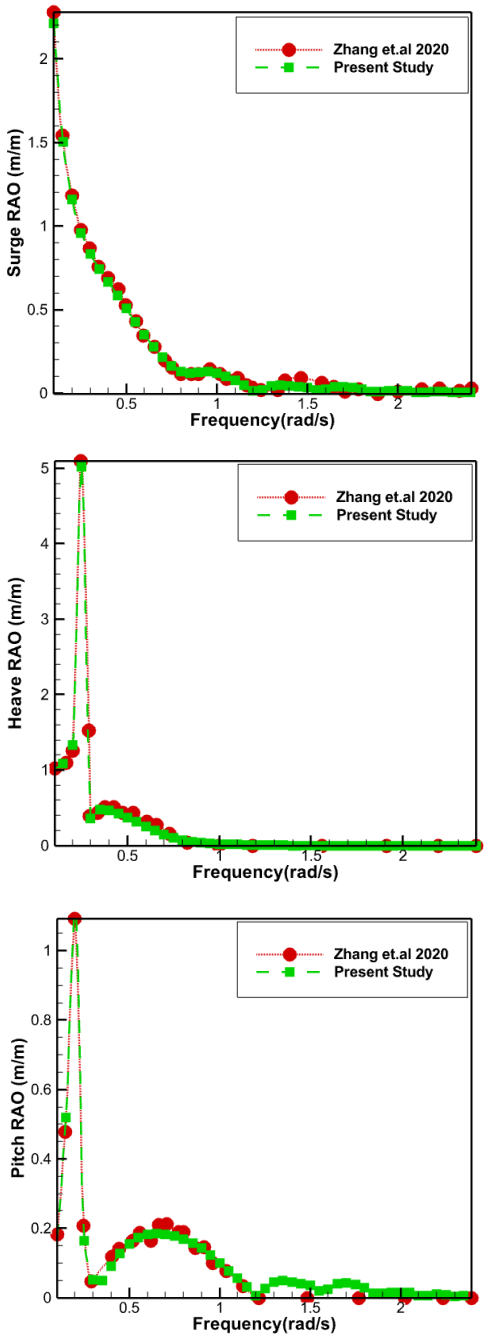
شایان ذکر است روش عددی بکار گرفته شده در نرم افزار آکوا برای تحقیق حاضر، بر اساس حل معادله لاپلاس با روش المان مرزی است. در این روش عددی به جای مش‌بندی و تولید المان در دامنه حجمی سیال صرفاً روی سطح جسم و مرزها المان‌بندی می‌شود. به طور تقریبی اندازه المان‌ها حدود ۱ متر است و تعداد کل المان‌ها بعد از مش‌بندی برای سکوی تنها ۷۹۰۰ و برای سیستم ترکیبی مبدل انرژی و سکوی نیمه‌شناور ۱۱۸۰۰ است.

[1] Free board

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-02]
[DOI: 10.61186/marineeng.20.42.1]



شکل ۲- نمایی از نصب مهارها



شکل ۳- مقایسه دامنه سرج، هیو و پیچ سکوی نیمه شناور مدلسازی شده در مقاله ژانگ و همکاران [۱۹] با نتایج آکوا از این مطالعه

در سکوهای نیمه مغروق جهت حفظ تعادل سکو از سیستم مهار استفاده می‌شود. در مطالعه حاضر، سیستم ترکیبی سکو و مبدل با سه مهار همانند شکل ۲ مشخص شده است.

لازم به ذکر است که مدل‌سازی سیستم PTO برای هر مبدل انرژی با اعمال میرایی در محل لولا در نرم افزار انسیس انجام می‌شود. مقدار میرایی در نظر گرفته شده بعد از انجام چندین ران به گونه‌ای انتخاب شد که دوران منطقی برای فلپ‌ها ایجاد شود که بتوان از آن توان استخراج کرد. لازم به ذکر است. برای نوسان یک جسم نیاز به وجود نیروی بازگرداننده نیز است که برای بعضی سیستم‌ها این نیروی بازگرداننده از طریق نصب فنر خارجی انجام می‌شود در حالی که برای فلپ‌های تحقیق حاضر، نیروهای بازگرداننده به واسطه ممان بازگرداننده هیدرواستاتیکی وجود دارد و نیازی به نصب فنر خارجی نیست. البته ممکن است در بعضی شرایط محیطی و ابعاد فلپ، با وجود بازگردانندگی هیدرواستاتیکی، نیاز به نصب یک فنر خارجی نیز باشد.

قبل از اینکه به بررسی پاسخ دینامیکی سکوی تنها و سیستم ترکیبی سکو و مبدل انرژی پرداخته شود جهت اطمینان از روش مدل‌سازی، نتایج پاسخ دینامیکی سکو به تنهایی در مقاله منتشر شده توسط ژانگ و همکاران [۱۹] با نتایج متناظر از روش بکاررفته در مطالعه حاضر مقایسه می‌شود. مقایسه نتایج پاسخ دینامیکی در جهت سرج، هیو و پیچ در شکل ۳ تطابق خوبی را نشان می‌دهد که نحوه مدل‌سازی در تحقیق حاضر را تایید می‌کند.

۴- نتایج و بحث

در ادامه پس از اعتبارسنجی روش بکار گرفته شده، سکوی مد نظر در دو حالت بدون فلپ و با فلپ در پریودهای ۶،۸،۱۰،۱۲،۱۴،۱۶ ثانیه و ابعاد متفاوت برای فلپ با پهنای ۱۶، ۱۸ و ۲۰ متر و ارتفاع‌های ۱۱، ۱۳، ۱۵ متر و ضخامت‌های مختلف۱,۵، ۲، ۲,۵ متر و در زوایای مختلف برخورد موج با مقادیر ۰،۳۰،۹۰ درجه با سکو تحلیل می‌شود. این فرآیند برای بررسی تاثیر اندازه پهنا، ارتفاع و ضخامت فلپ بر توان خروجی کل و پاسخ هیو، سرج، رول و پیچ سکو و همچنین اثرات تغییرات زاویه بر توان کل و پاسخ دینامیکی سکو است. بررسی اثرات تغییر هر پارامتر به این صورت است که یک حالت پایه برای ابعاد فلپ و زوایه برخورد در نظر گرفته می‌شود. مثلا در اینجا اندازه ارتفاع فلپ ۱۳ متر و زاویه موج ۰ درجه و ضخامت فلپ ۱,۵ متر و پهنای فلپ ۱۶ متر برای حالت پایه در نظر گرفته شده است که برای بررسی اثر مثلاً تغییر ارتفاع نسبت به حالت پایه دو مقدار دیگر برای ارتفاع در نظر گرفته می‌شود. برای شلوغ نشدن شکل‌ها، برچسب‌های مربوط به هر نمودار

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-02]
[DOI: 10.61186/marineeng.20.42.1]

در شکل‌ها به صورت مخفف آمده است که جدول ٤ راهنمایی برای بیان این مخفف‌ها است.

جدول ۴- راهنمای برچسب نمودارها

مشخصه و توضیحات پارامتر	پارامتر
سیستم ترکیبی سکو و مبدل انرژی (Platform & WEC)	PW
سکو بدون فلپ نصب شده (Single Platform)	SP
پهنا	W
ارتفاع فلپ	L
ضخامت فلپ	t
زاویه برخوردی موج	Θ
سه مبدل انرژی فلپ نصب شده بر روی سکو	Flap1,2,3

روند تحلیل به این صورت است که پس از حل زمانی در هر پریود موج و ابعاد خاص در نظر گرفته شده، دامنه پاسخ زاویه‌ای سکو و مبدل در حالت پایا محاسبه می‌شود و با توجه به معادله (۶)، توان تولیدی تعیین می‌گردد.

$$\bar{P}(\omega) = \frac{1}{2}\omega^2 B_{PTO}|\theta_{P-W}|^2 \quad (۶)$$

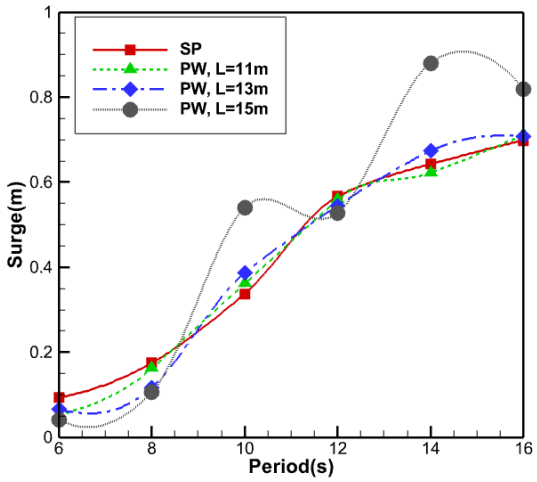
B_{PTO} میرایی سیستم PTO، θ_{P-W} دامنه جابجایی زاویه‌ای نسبی بین مبدل انرژی فلپ و سکو، ω فرکانس موج تحریک و $\bar{P}(\omega)$ توان متوسط تولیدی در یک سیکل ارتعاشات سکو است.

۴-۱ اثر تغییر ارتفاع فلپ‌ها

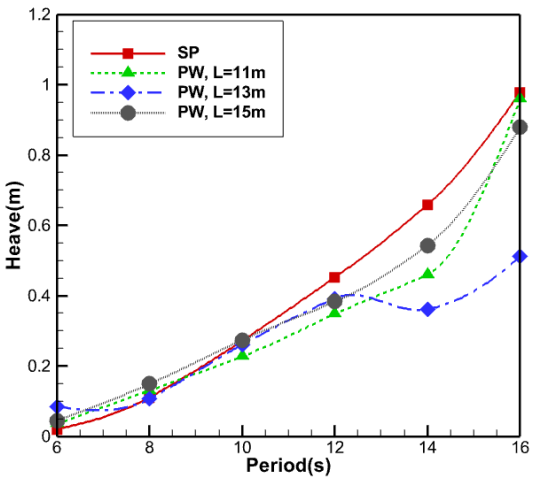
ابتدا ابعاد سه مبدل انرژی فلپ به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که پهنای ۱۶ متر و ضخامت ۱,۵ متر را دارند و تاثیر تغییر ارتفاع با سه اندازه متفاوت ۱۱ و ۱۳ و ۱۵ بررسی می‌شود تا مشخص شود سکو در کدام حالت همراه فلپ یا بدون فلپ و با کدام ابعاد فلپ دارای پایداری بهتری از نقطه نظر ارتعاشاتی است و اینکه در کدام ابعادِ فلپ، سکو می‌تواند توان بیشتری تولید کند. لازم به ذکر است با توجه به محدودیت صفحات، در بررسی اثرات پارامترهای مختلف فقط نمودارهای بعضی از حرکات مثلا پیچ، رول، هیو و سرج در این تحقیق آمده است.

با توجه به شکل ۴ تا شکل ۷، به طور کلی اضافه کردن مبدل انرژی فلپ باعث کاهش حرکات دینامیکی سکو در مقایسه با سکوی بدون مبدل انرژی می‌شود و به نظر می رسد که بخشی از انرژی ارتعاشاتی سکو توسط مبدل انرژی مستهلک می‌شود. در حالت همراه با مبدل انرژی، فلپ با ارتفاع ۱۳ متر دارای کمترین مقدار پیچ و با ارتفاع ۱۱ متر دارای کمترین مقدار رول و سرج و هیو می‌باشد. سکو بدون وجود مبدل دارای بیشترین مقدار پیچ و رول می‌باشد. نکته مهم این است که تاثیر مبدل انرژی نوسانی زاویه‌ای فلپ در حرکات زاویه‌ای پیچ و رول سکو، نسبت به حرکات انتقالی سکو مشهودتر است زیرا انرژی جنبشی دورانی سکو، با حرکت زاویه‌ای نسبی بین فلپ و سکو توسط میراگر موجود در سیستم pto جذب می‌شود.

همچنین شکل ۶ و شکل ۷ نشان می‌دهد که وجود فلپ‌های نصب شده، فرکانس طبیعی ارتعاشات سکو را در جهت های رول و پیچ در مقایسه با سکوی بدون مبدل انرژی تحت تاثیر قرار می‌دهند و تغییرات ارتفاع باعث تغییرات مشهود فرکانس تشدید سکو در جهات زاویه‌ای می‌شود. این نکته از تغییر محل پیک پاسخ دینامیکی رول و پیچ با تغییر ارتفاع فلپ‌ها مشخص می‌شود. علت می‌تواند به تغییرات ممان اینرسی معادل و فنریت معادل رول و پیچ سکوی ترکیبی ربط داد که به واسطه وجود فلپ‌ها مقدارش تغییر می‌کند.

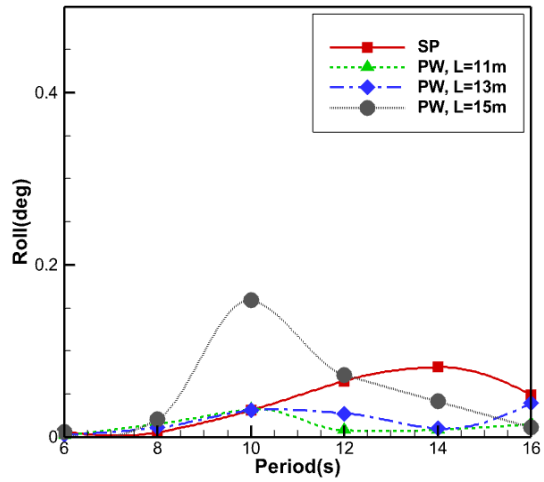


شکل ۴- تاثیر ارتفاع فلپ روی دامنه سرج سکوی ترکیبی و سکوی تنها

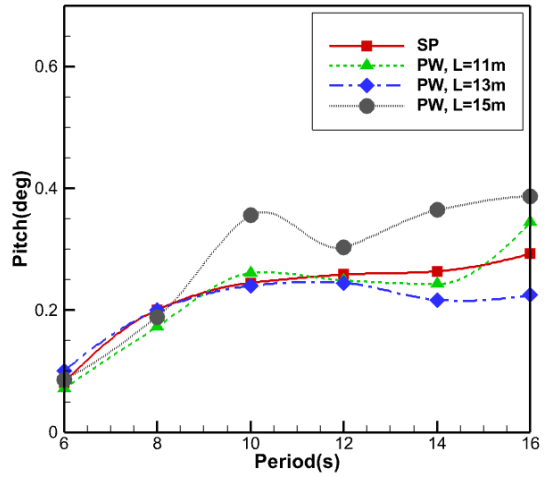


شکل ۵- تاثیر ارتفاع فلپ روی دامنه هیو سکوی ترکیبی و سکوی تنها

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-02]
[DOI: 10.61186/marineeng.20.42.1]

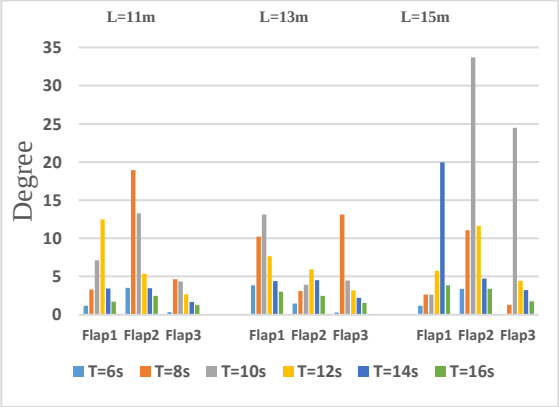


شکل ۶- تاثیر ارتفاع فلپ روی دامنه رول سکوی ترکیبی و سکوی تنها

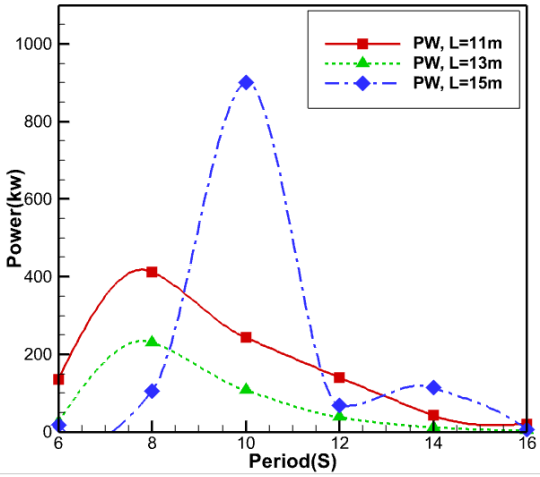


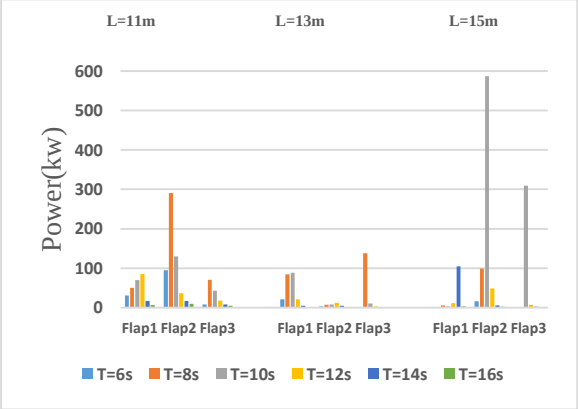
شکل ۷- تاثیر ارتفاع فلپ روی دامنه پیچ سکوی ترکیبی و سکوی تنها

لازم به ذکر است افزایش ارتفاع فلپ سطح برخوردی فلپ با موج برای تحریک بیشتر را افزایش می‌دهد و از طرفی بخش بالایی آن به سطح آزاد آب و موقعیت وجود ذرات موج با شتاب بیشتر نزدیک می‌شود طوری که می‌توان با افزایش ارتفاع، توان تولیدی بیشتری بدست آورد.



شکل ۸- – تاثیر ارتفاع فلپ روی دامنه جابجایی فلپ‌ها





شکل ۹- تاثیر ارتفاع فلپ روی توان تولیدی مبدل‌های انرژی

با توجه به مشخصات دینامیکی سکو و مبدل‌های مدنظر، در ارتفاع ۱۵ متر همانند شکل ۹ بیشترین مقدار توان به اندازه‌ی ۹۰۰ کیلو وات در مقایسه با دو ارتفاع دیگر ۱۱ و ۱۳ متر بدست می‌آید. البته نکته مثبت در طراحی هیدرودینامیکی این است که این پیک توان برای ارتفاع ۱۵ متر تقریباً در حدود پریود پیک غالب اقیانوس‌ها یعنی ۱۰ ثانیه اتفاق افتاده است که نکته مثبتی از نقطه نظر طراحی مبدل انرژی است.

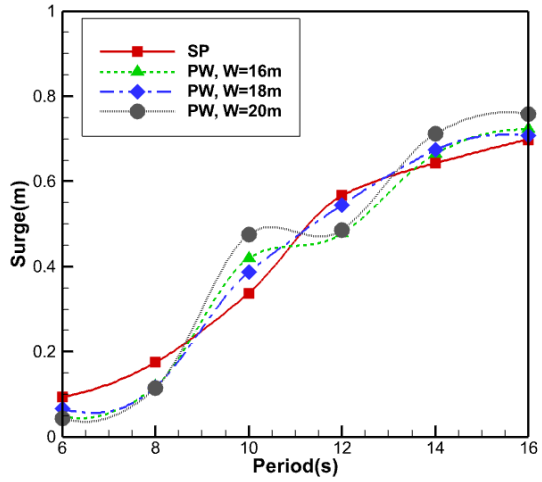
۴-۲ اثر تغییر پهنای فلپ‌ها

در این بخش اثر تغییرات پهنای فلپ‌ها روی پاسخ سکو و توان تولیدی بررسی می‌شود. با ثابت نگه داشتن ارتفاع و ضخامت فلپ-ها صرفاً با تغییر اندازه پهنا با مقادیر۱۶، ۱۸ و ۲۰ متر اثر پهنا روی توان تولیدی مورد تحلیل قرار می‌گیرد. با توجه به شکل ۱۰ تا شکل ۱۳ مشخص است که ارتعاشات سکو با فلپ‌های با پهنای ۲۰ متر در جهت سرج، رول و پیچ نسبت به سکوی تنها زیاد می-شود در حالی که ارتعاشات سکو در جهت هیو برای پهنای ۲۰ متر اتفاقاً وضعیت بهتری از لحاظ ارتعاشاتی در مقایسه با همه پهناهای درنظر گرفته شده و سکوی تنها دارد. در پریودهای بالا و یا فرکانس پایین موج تحریک، جرم افزوده القایی در جهت هیو به

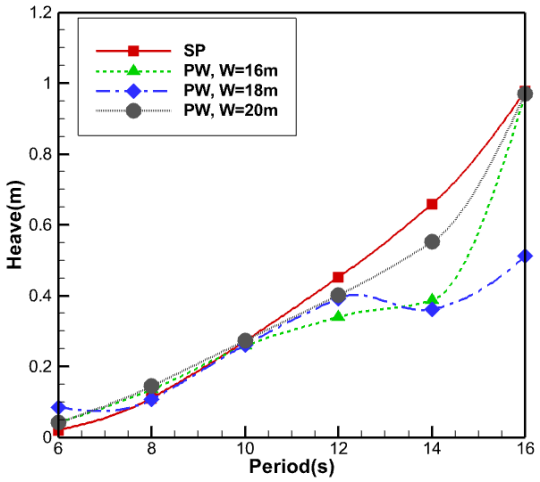
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-02]
[DOI: 10.61186/marineeng.20.42.1]

کل سکو بیشتر از مقدار متناظر در پهناهای ۱۶ و ۱۸ متر است که باعث می‌شود نهایتا ارتعاشات سکو در این جهت کاهش چشمگیری پیدا کند. روی هم رفته پهنای ۱۸ متر خصوصیات دینامیکی بهتری برای ارتعاشات سکو بوجود می‌آورد. این نکته مربوط به اثرات ممان اینرسی افزوده، جرم افزوده، نیروها و ممان-های تحریک است که برای این پهنای خاص برای فلپ در نظر گرفته شده به گونه‌ای است که نیروهای مقاوم، غلبه بیشتری نسبت به نیروهای تحریک وارد بر کل سیستم ترکیبی دارند که منجر به کاهش ارتعاشات شده است. از نقطه نظر توان تولیدی، پهنای بیشتر ۲۰ متر در مقایسه با دو مقدار پهنای دیگر پیک توان بیشتری ایجاد می‌کند. علت این است که در پهنای بیشتر، ممان تحریک بیشتری حول لولا به واسطه سطح برخورد بیشتر موج در مقایسه با پهنای کمتر ایجاد می‌شود.

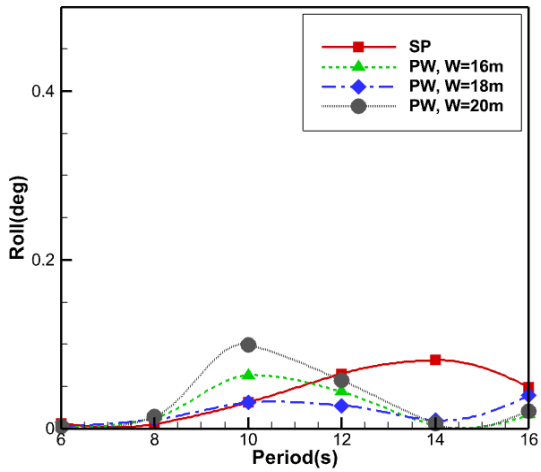
نکته دیگر مربوطه به افزایش پریود مربوط به توان پیک است که با افزایش پهنا مقدار پریود متناظر با پیک توان نیز زیاد می‌شود. این نکته می‌تواند مربوط به این باشد که با افزایش پهنا، میزان جرم افزوده و بالتبع ممان اینرسی جرمی افزوده و ضریب بازگردانندگی زیاد می‌شود اما میزان افزایش ممان اینرسی افزوده غلبه بیشتری بر افزایش ضریب بازگردانندگی دارد طوری که پریود جابجایی و توان پیک نهایتاً افزایش یافته است. این پریود پیک تقریباً متناظر با پریود غالب دریاهای مختلف ۸-۱۰ ثانیه است که نشان می‌دهد برای این سکو با تنظیم ابعاد فلپ طراحی هیدرودینامیکی نسبتا خوبی نیز می‌توان بوجود آورد.



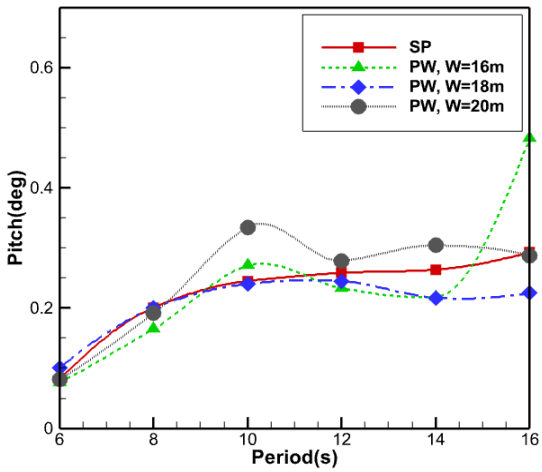
شکل ۱۰- تاثیر پهنای فلپ روی دامنه سرج سکوی ترکیبی و سکوی تنها



شکل ۱۱- تاثیر پهنای فلپ روی دامنه هیو سکوی ترکیبی و سکوی تنها



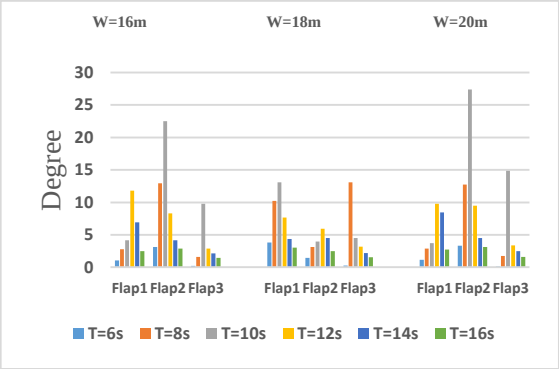
شکل ۱۲- تاثیر پهنای فلپ روی دامنه رول سکوی ترکیبی و سکوی تنها



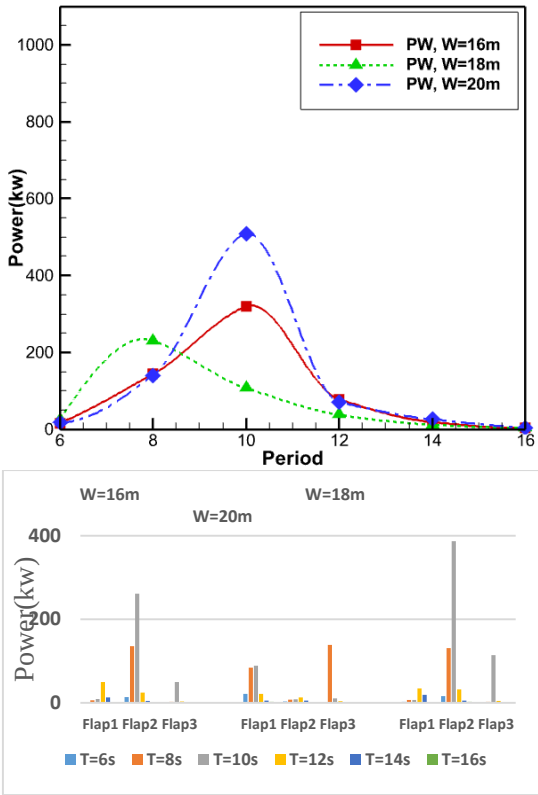
شکل ۱۳- تاثیر پهنای فلپ روی دامنه پیچ سکوی ترکیبی و سکوی تنها

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-02]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.42.1]



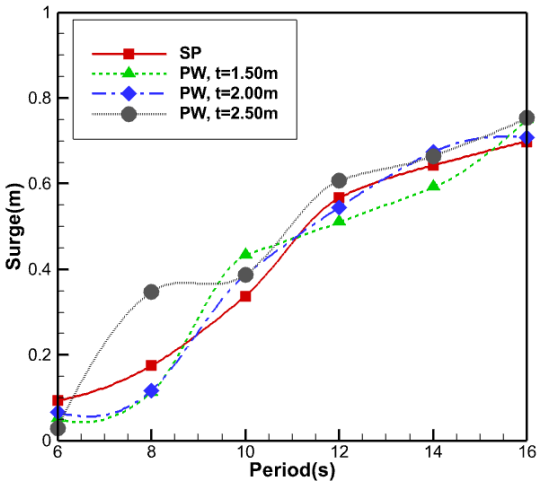
شکل ۱۴- تاثیر پهنای فلپ روی دامنه جابجایی فلپ‌ها



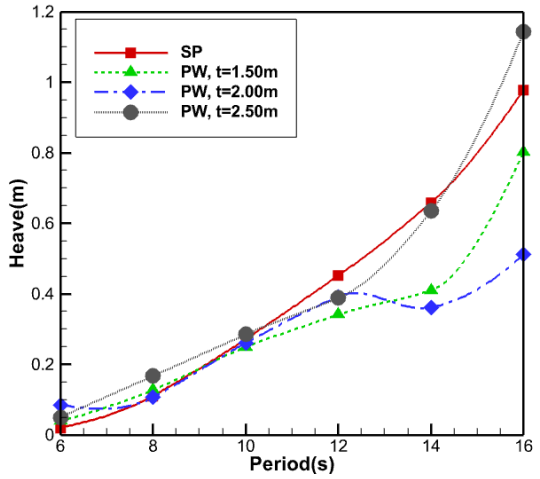
شکل ۱۵- تاثیر پهنای فلپ روی توان تولیدی مبدل‌های انرژی

۴-۳ اثر تغییر ضخامت فلپ‌ها

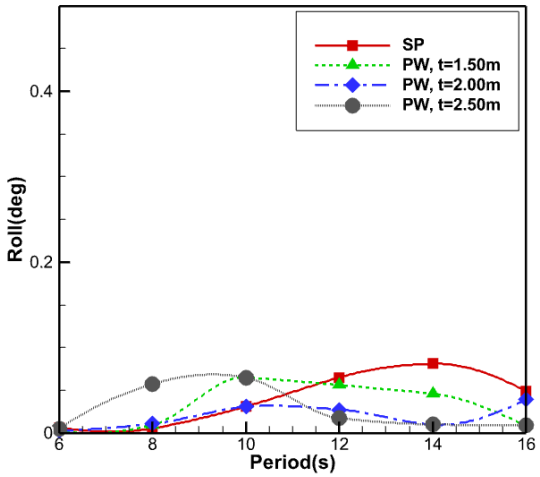
در ادامه به بررسی تاثیر تغییرات ضخامت فلپ روی پاسخ و توان سکو پرداخته می‌شود که با در نظر گرفتن سه ضخامت مختلف برای فلپ‌ها تاثیرات اندازه ضخامت فلپ با ران گرفتن در نرم افزار آکوا بر اساس تئوری تفرق بر مبنای جریان پتانسیل بررسی می شود. به طور کلی شکل ۱۶ تا شکل ۱۹ نشان می‌دهد که افزایش ضخامت وضعیت ارتعاشاتی را در جهت‌های مختلف سرج، هیو، پیچ و را بهبود نمی‌دهد. البته با توجه به اینکه هندسه جسم تغییر چندانی نمی‌کند ممانهای هیدردینامیکی مقاوم ناشی از ممان اینرسی جرمی افزوده و میرایی تشعشعی تغییر چندانی نمی‌کنند. اما با تغییر ضخامت، جرم و بویانسی تغییر می‌کند که از لحاظ دینامیکی، ارتعاشات سکو در حالت ترکیبی را تقریباً افزایش می‌دهد. توان تولیدی در شکل ۲۱ مشخص می‌کند که در ضخامت کمتر، بیشینه توان در پریود غالب امواج ایجاد می‌شود.



شکل ۱۶- تاثیر ضخامت فلپ روی دامنه سرج سکوی ترکیبی و سکوی تنها



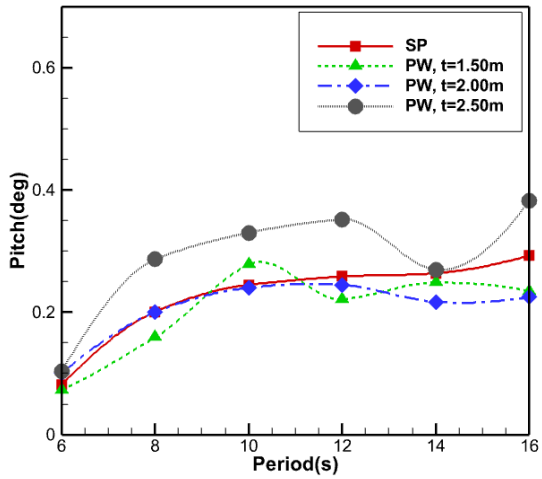
شکل ۱۷- تاثیر ضخامت فلپ روی دامنه هیو سکوی ترکیبی و سکوی تنها



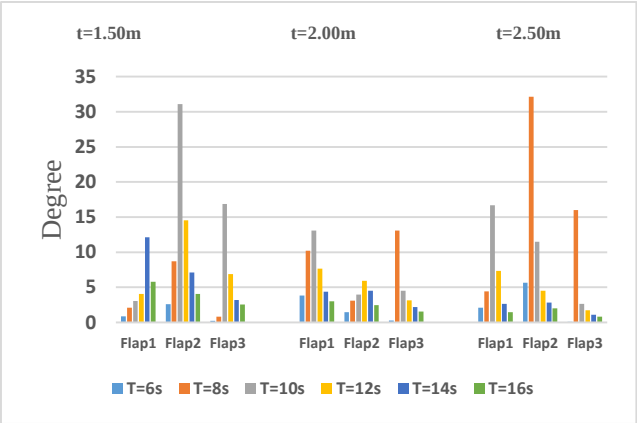
شکل ۱۸- تاثیر ضخامت فلپ روی دامنه رول سکوی ترکیبی و سکوی تنها

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-02]

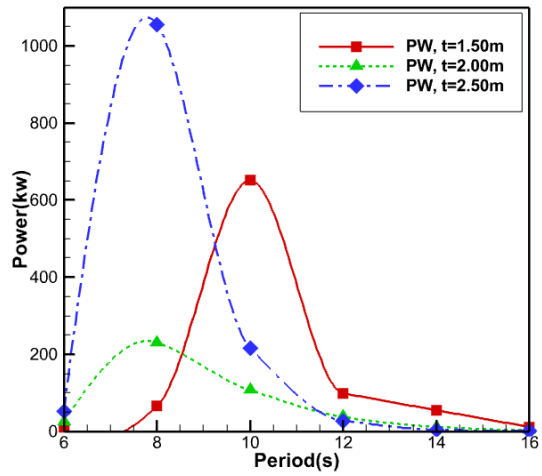
[DOI: 10.61186/marineeng.20.42.1]

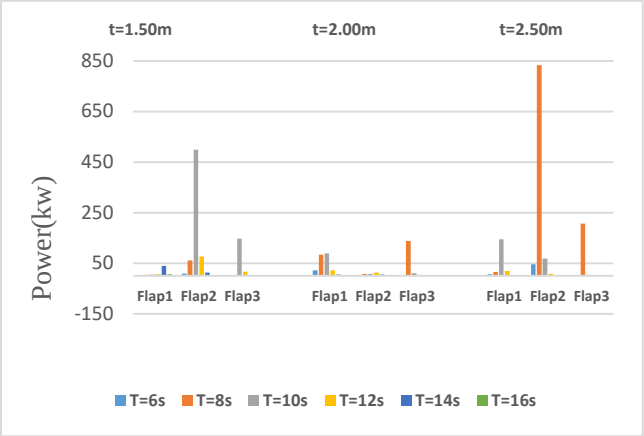


شکل ۱۹- تاثیر ضخامت فلپ روی دامنه پیچ سکوی ترکیبی و سکوی تنها



شکل ۲۰- تاثیر ضخامت فلپ روی دامنه جابجایی فلپها



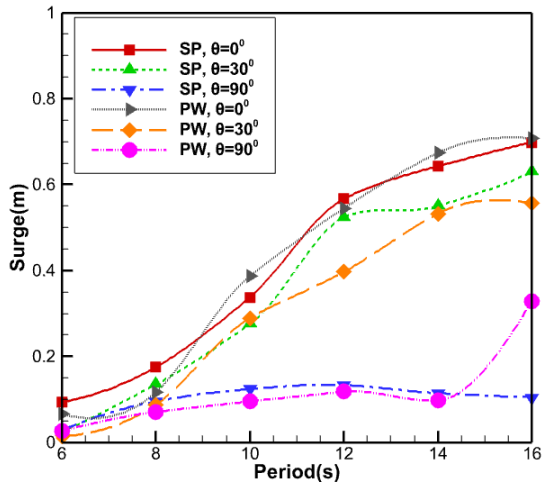


شکل ۲۱- تاثیر ضخامت فلپ روی توان مبدلهای انرژی

۴-۴ اثر تغییر زاویه موج برخوردی

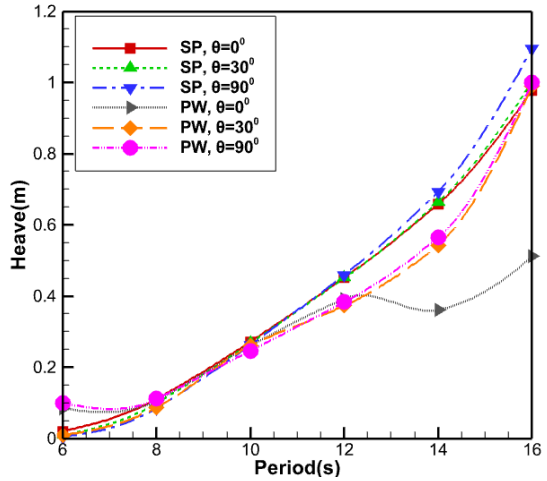
یکی از پارامترهای مهم و موثر دیگر روی توان تولیدی که در این تحقیق بررسی می‌شود تاثیرات زاویه برخورد موج به سکو و فلپ های نصب شده روی سکو است. با توجه به اینکه فلپها با زاویه ۱۲۰ درجه نسبت به هم نصب شده‌اند. در زاویه برخورد صفر، شرایط به گونه‌ای است که مولفه سرعت و شتاب موج اعمال شده به فلپ ۲ و ۳ نیروی زیادی به مجموعه فلپها و بالتبع سکو وارد می‌کند و باعث ایجاد دامنه سرج و زاویه پیچ بیشتر وارد بر سکو در زاویه برخورد صفر درجه می‌گردد.

نتایج رول سکو برعکس پاسخ پیچ است. یعنی در زاویه برخورد صفر درجه میزان رول سکو کمتر از دو حالت دیگر است زیرا در زاویه برخورد صفر درجه نیروهای وارد شده به دو فلپ دیگر به گونه‌ای است که یک تقارن در گشتاور اعمالی به سکوی ایجاد شده و گشتاورها همدیگر را خنثی می‌کنند و نهایتاً میزان گشتاور کمی برای ایجاد رول در سکو ایجاد می‌شود.

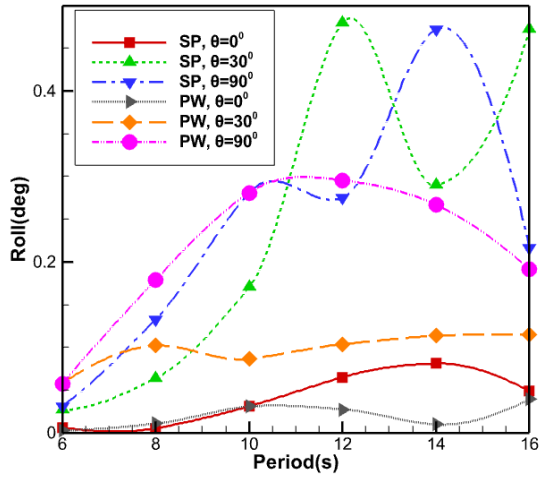


شکل ۲۲- تاثیر زاویه برخورد موج روی دامنه سرج سکوی ترکیبی و سکوی تنها

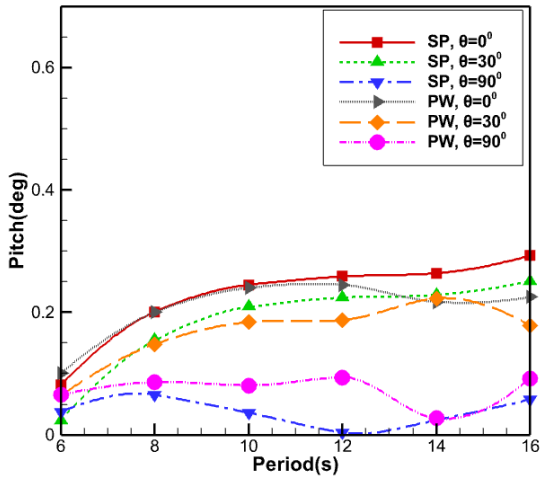
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-02]
[DOI: 10.61186/marineeng.20.42.1]



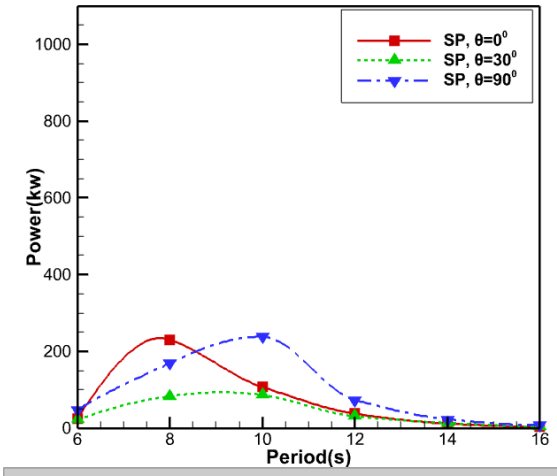
شکل ۲۳- تاثیر زاویه برخورد موج روی دامنه هیو سکوی ترکیبی و سکوی تنها

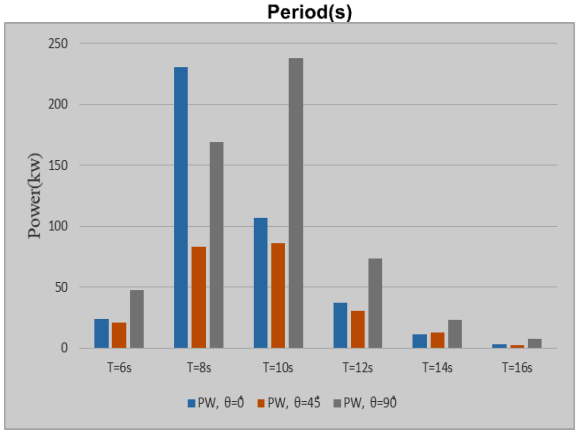


شکل ۲۴- تاثیر زاویه برخورد موج روی دامنه رول سکوی ترکیبی و سکوی تنها



شکل ۲۵- تاثیر زاویه برخورد موج روی دامنه پیچ سکوی ترکیبی و سکوی تنها





شکل ۲۶- تاثیر زاویه برخورد موج روی توان مبدل های انرژی

در حالت بدون فلپ که سکو به تنهایی در معرض امواج قرار دارد، موج برخوردی با زاویه صفر درجه، نیروی گشتاور کمتر و زاویه پیچ کمتری ایجاد می‌کند. بنابراین در زوایای بیشتر برخورد و نزدیک به ۹۰ درجه تقارن نیروهای تحریک حول محور X به هم می‌خورد که منجر به ایجاد رول بیشتر در سکو و از طرفی جابجایی هیو بیشتر برای سکو می‌شود.

مطابق با شکل ۲۶ زاویه برخورد موج به سکو به گونه‌ای است که در زاویه ۰ و ۹۰ درجه مقدار بیشینه توان مشابهی بدست می‌آید که این به علت ممان تحریک با مولفه بزرگتر عمود بر سطح فلپ-ها است که نهایتاً منجر به جابجایی زاویه‌ای بیشتر فلپ‌ها و توان تولیدی بیشتر می‌شود. نکته قابل ذکر این است که در شرایط دریایی واقعی جهت برخورد امواج در اختیار طراح نیست که بتوان آن را تنظیم کرد اما در حالت‌های خاصی این طراحی مقدماتی می‌تواند این گونه مورد استفاده قرار گیرد که در صورت برخورد موج با زوایای به غیر از صفر درجه، مبدل‌های انرژی فلپ برای دریافت انرژی باز شوند که البته فعال کردن و غیر فعال کردن مبدل‌ها در چنین طراحی نیاز به مباحث فنی خاص خودش دارد.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-02]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.42.1]

به طور کلی، طراحی مبدل انرژی باید به گونه‌ای باشد که بیشترین توان البته در شرایط منطقی از نقطه نظر عملیاتی بدست آید. در مورد پروژه حاضر، هدف اصلی بررسی تاثیر مبدل انرژی فلپ بر پاسخ سکو در جهات مختلف است و هدف دیگر این بود که ابعاد فلپ چه تاثیری بر پاسخ سکو و میزان توان تولیدی دارد. نکته مهم این است که می‌توان با تغییر ابعاد فلپ، به گونه-ای فرکانس طبیعی فلپ را تنظیم کرد که بیشترین جابجایی و احتمالا بیشترین توان در فرکانس پیک امواج اتفاق بیافتد که این نکته‌ای برای تنظیم نقطه تشدید است. اما به هر حال خود پدیده تشدید منجر به پاسخ‌های بسیار بزرگ برای جابجایی زاویه‌ای فلپ می‌شود که در عمل جابجایی های بزرگتر از مثلا ۴۵ درجه به علت چالش‌های سازه‌ای منطقی نیست. لذا در مقاله حاضر هدف اصلی ایجاد پدیده تشدید در فرکانس پیک امواج نیست. از طرفی دیگر موج برخوردی در تحقیق حاضر، هم یک موج منظم با دامنه ثابت در نظر گرفته شده است، که صرفا وابستگی پاسخ به فرکانس تحریک بررسی شود. با این وجود مثلاً می‌توان برای ابعاد در نظر گرفته شده، با فرض اینکه اگر پریود پیک امواج تحریک ۱۰ ثانیه باشد، پهنای ۲۰ متر و ارتفاع ۱۶ و ضخامت ۱,۵ متر باعث وقوع تشدید در جابجایی‌های و نهایتاً تشدید در توان تولیدی در پریود ۱۰ ثانیه می‌شود و می‌توان این ابعاد را برای پاسخ بهتر در نظر گرفت.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش کارایی سیستم ترکیبی از نقطه نظر تولید توان تولیدی و تاثیر مبدل روی پاسخ سکو بررسی می‌شود. به طور کلی صرفاً افزایش ارتفاع فلپ باعث افزایش توان نمی‌شود و در یک ارتفاع خاص می‌توان پارامترهای دینامیکی سیستم را به گونه‌ای تنظیم کرد که توان بیشتر و البته حالت بهتری برای پاسخ سکو بدست آورد که با توجه به ابعاد فلپ، ارتفاع ۱۳ متر ارتفاع مناسبی است. در مورد تغییرات پهنا، گرچه فلپ با پهنای بزرگتر،۲۰ متر، بیشترین مقدار توان تولیدی را دارد اما از نظر پاسخ دینامیکی سکو همواره افزایش پهنای فلپ‌ها منجر به پاسخ دینامیکی بهتر برای سکو نمی‌شوند و برای ابعاد در نظر گرفته شده پهنای میانگین ۱۸ متر پاسخ دینامیکی کمتری را منجر می‌شود. افزایش ضخامت فلپ تاثیر مثبتی در پاسخ پیچ، سرج و هیو سکو ندارد اما در کل توان تولیدی در حالتی که ضخات فلپ ۳ متر باشد بیشترین مقدار است. زاویه برخورد موج به سکو به غیر از صفر هم از لحاظ پاسخ سکو و هم از نقطه نظر توان تولیدی بهتر است. با توجه به چیدمان خاص سکو و فلپ‌های در نظر گرفته شده زاویه بین ۰ تا ۹۰ درجه برای زاویه برخورد موج حالت مناسب‌تری است که البته اگر چیدمان فلپ‌ها به گونه دیگری بود زاویه برخورد می توانست فرق کند. بستگی به پریود موج تحریک و ابعاد فلپ، بیشترین مقدار توان تا حدود ۱۰۰۰ کیلو وات توسط مبدل‌های انرژی قابل تولید است. به طور کلی پاسخ سکو در جهات زاویه‌ای کاهش قابل توجهی نسبت به جهات انتقالی دارد که این به علت طبیعت حرکت چرخشی‌فلپ‌های لولا شده نسبت به سکو است که انرژی جنبشی دورانی را میرا می‌کنند.

۶- مراجع

1-OLEINIK, P., BELOTI TROMBETTA, T., GUIMARÃES, R., KIRINUS, E. and MARQUES, W.,(2019), *Comparative study of the influence of a wave energy converter site on the wave field of Laguna, SC, Brazil*, Sustainable Energy Technologies and Assessments **31**, p. 26.۲۷۲-۲
https://doi.org/10.1016/j.seta.2018.12.023

2-NESHAT, M., ALEXANDER, B. and WAGNER, M.,(2020), *A hybrid cooperative co-evolution algorithm framework for optimising power take off and placements of wave energy converters*, Information Sciences **534**, p. 218-244.
https://doi.org/10.1016/j.ins.2020.03.112

3-WEI, Y., ABADIE, T., HENRY ,A. and DIAS, F.,(2016), *Wave interaction with an Oscillating Wave Surge Converter. Part II: Slamming*, Ocean Engineering **113**, p. 319-334.
https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2015.12.041

4-EHSAN ARBABI, Abuzar Abazari,(2024), *The effects of dimension, geometry and the modules' orientation in a modular flap arrangement on the extracted power density of surge oscillating flap wave energy converter, Journal Of Marine Engineering.*
https://marine-eng.ir/article-1-1059-en.html

5-NAVAB KHODABANDEH, Abuzar Abazari, MEHDI YUSEFI,(2024), *Comparison of the output power of the piston wave energy converter by Morison and the diffraction based numerical method and investigation of effect of WEC dimension on the generated power, iranian journal of marine science and technology.*
https://navy.iranjournals.ir/article_247931.html?lang=en

6-GIANNINI, G., SANTOS, P., RAMOS, V. and TAVEIRA-PINTO, F.,(2020), *On the Development of an Offshore Version of the CECO Wave Energy Converter*, Energies **13**, p. 1036.
https://doi.org/10.3390/en13051036

7-PECHER, A. and KOFOED, J.,(2017), *Handbook of Ocean Wave Energy*.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-39889-1

8-ABAZARI, A. and AZIMINIA, M.,(2023), *Enhanced power extraction by splitting a single flap-type wave energy converter into a double configuration*, Renewable Energy Research and Applications **4**(2), p. 243-249.
https://doi.org/10.22044/rera.2022.11846.1118

9-ABAZARI, A. and AZIMINIA, M. M.,(2023), *Water wave power extraction by a floating surge oscillating WEC comprising hinged vertical and horizontal flaps,*

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-02]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.42.1]

Journal of Energy Management and Technology **7**(1), p. 27-33.
https://dorl.net/dor/20.1001.1.25883372.2023.7.1.4.4

10-DOROSTKAR, R., ABAZARI, A. and EBRAHIMI, A.,(2022), *Energy harvesting through an integrated design of a semi-submersible offshore platform with point absorber wave energy converters*, International Journal Of Coastal, Offshore And Environmental Engineering(ijcoe) **7**(4), p. 27-36.
https://doi.org/10.22034/ijcoe.2022.166735

11-HOSEIN JOKAR, Abuzar Abazari, REZA DOROSTKAR,(2024), *Performance evaluation of a hybrid system of dhow ship and wave energy converter for power generation, Renewable Energy Research and Applications.*

12-WANG, Y., ZHANG, L., MICHAILIDES, C., WAN, L. and SHI, W.,(2020), *Hydrodynamic Response of a Combined Wind–Wave Marine Energy Structure*, Journal of Marine Science and Engineering **8**, p. 253.
https://doi.org/10.3390/jmse8040253

13-KARIMIRAD, M. and KOUSHAN, K.,(20 ,(١٦ *WindWEC: Combining Wind and Wave Energy Inspired by Hywind and Wavestar*.
https://doi.org/10.1109/ICRERA.2016.7884433

14-GHAFARI, H. R., *et al.*,(2022), *Novel concept of hybrid wavestar- floating offshore wind turbine system with rectilinear arrays of WECs*, Ocean Engineering **262**, p. 112253.

15-AUBAULT, A., ALVES, M., SARMENTO, A., RODDIER, D. and PEIFFER, A.,(2011), *Modeling of an Oscillating Water Column on the Floating Foundation WindFloat*, vol. 5.
https://doi.org/10.1115/OMAE2011-49014

16-PÉREZ-COLLAZO, C., GREAVES, D. and IGLESIAS, G.,(2018), *Hydrodynamic response of the WEC sub-system of a novel hybrid wind-wave energy converter*, Energy Conversion and Management **171**.
http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2018.05.090

17-ABAZARI, A.,(2022), *Dynamic Response of a Combined Spar-Type FOWT and OWC-WEC by a Simplified Approach*, Renewable Energy Research and Applications.
https://doi.org/10.22044/rera.2022.11768.1109

18-KUMAWAT, K., KARMAKAR, D. and GUEDES SOARES, C., (2019), Numerical Investigation of Semi-submersible Floating Wind Turbine Combined with Flap-Type WECs: Volume 2, p. 793-805.
https://doi.org/10.1007/978-981-13-3134-3_59

19-ZHANG, L., SHI, W., KARIMIRAD, M., MICHAILIDES, C. and JIANG, Z.,(2020), *Second-order hydrodynamic effects on the response of three semisubmersible floating offshore wind turbines*, Ocean Engineering **207**, p. 107371.
https://hdl.handle.net/11250/2733600

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-02-02]

[DOI: 10.61186/marineeng.20.42.1]