تاثیر ابعاد و هندسه فلپ و جهت گیری ماژول ها در فلپ ماژوله شده در چگالی توان تولیدی مبدل انرژی نوسانی سرج از نوع فلپ

احسان اربابی[۱] ، ابوذر اباذری[۲*]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار، ehsanarbabi0101mec@gmail.com
[۲] عضو هیئت علمی، دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار ، abuzarabazari@cmu.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۶/۲۹
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۱۷
تاریخ انتشار مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۲۳

کلمات کلیدی:
مبدل انرژی امواج
هندسه فلپ
فلپ ماژوله
تحلیل فرکانسی
چگالی توان خروجی

چکیده

افزایش تقاضای جهانی برای مصرف انرژی و چالش گرمایش زمین ناشی از سوخت‌های فسیلی از عواملی هستند که باعث انگیزه محققان برای تحقیق در مورد تکنولوژی‌های انرژی‌های تجدیدپذیر شده است. یکی از منابع انرژی‌های پاک با پتانسیل بالا امواج دریا است. انواع مختلفی از مبدل‌های انرژی امواج توسط پژوهشگران تاکنون پیشنهاد شده است که مبدل نوسانی سرج از نوع فلپ لولاشده یکی از آنها است. در این تحقیق مبدل فلپ در شرایط امواج دریا در نرم افزار انسیس اکوا بر پایه حل معادله لاپلاس و جریان پتانسیل شبیه‌سازی می‌شود. با تحلیل فرکانسی ضرایب هیدرودینامیکی جرم افزوده، میرایی تشعشعی و ممان ناشی از نیروهای موج برخوردی و موج متفرق شده محاسبه می‌گردد. سپس این نتایج به صورت ورودی در نرم افزار متلب برای حل معادله دینامیکی حاکم استفاده می‌شود. تاثیر میرایی متغیر بهینه و پهنا، ارتفاع و همچنین تاثیر هندسه مستطیلی و هرمی و بیضی‌گون شکل برای فلپ صلب روی چگالی توان تولیدی بررسی می‌گردد. در ادامه با ارائه حالت جدید ماژوله شده تاثیر زوایای این ماژول‌ها روی چگالی توان خروجی مبدل انرژی مورد بحث قرار می‌گیرد و پیشنهادات برای حالت بهینه ارائه می‌گردد.

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

Ehsan Arbabi[1], Abuzar Abazari[2*]

[1] MSC student, Chabahar Maritime University, ehsanarbabi0101mec@gmail.com
[2] Faculty member, Chabahar Maritime University, abuzarabazari@cmu.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 20 Sep 2023
Accepted: 07 Jan 2024
Available online: 13 Jan 2024

Keywords:
Wave energy converter
Flap geometry
Flap module
Frequency analysis
Output power density

ABSTRACT

The increase of world demand for energy and global warming challenges due to fossil oil are the reasons that motivate the researches for studying the renewable energy technologies. One of the clean renewable energy resources with high potential is ocean waves. Various type of wave energy converters have been suggested by researchers up to now. Flap type surge oscillating wave energy converter is one of those. In the present research, this WEC is simulated in Ansys Aqwa based on the potential flow and solution of Laplas equation. The hydrodynamic coefficients and excitation moment are calculated through frequency response analysis. Then these are used as inputs in Matlab software for solving of governing dynamic equations. The effects of variable optimum PTO damping and width, height of flap and flap geometry on the extracted power density are investigated. Furthermore, a new design of modular flap is proposed and the effect of modules' orientation on the output power density is discussed.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.41.2.2]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.14]

۱ – مقدمه

مبدل‌های انرژی امواج از وسایلی هستند که برای کاهش سوخت-های فسیلی مورد توجه محققان و صنعتگران قرار گرفته‌اند. تحقیقات مختلفی روی انواع مبدل‌های انرژی تاکنون ارائه شده است [۱-۴]. همچنین ترکیب این مبدل‌ها با سکوهای فراساحلی [۲, ۷-۵] و یا سازه‌های فراساحلی دیگر [۸, ۹] برای افزایش کارایی آنها مورد مطالعه قرار گرفته است. یکی از این مبدل‌های انرژی، مبدل انرژی سرج نوسانی از نوع فلپ لولا شده است. این مبدل انرژی موج با ساختار ساده، توسط برخی از محققان مورد مطالعه قرار گرفته است. یکی از اولین تحقیق‌ها روی ویژگی‌های دینامیکی فلپ مستطیلی، توسط دین و دارلیمپر [۱۰] انجام شده است. ایوان و همکاران [۱۱] ویژگی‌های هیدرودینامیکی یک فلپ کاملا مغروق که البته با سطح آزاد ارتباط دارد را مطالعه کردند. رنزی و دیاس [۱۲] یک مدل سه بعدی ریاضیاتی برای مطالعه رفتار یک مبدل سرج نوسانی در یک کانال را توسعه دادند که با فرض سیال غیرویسکوز و غیرقابل تراکم و خطی‌سازی معادلات حرکت، تابع پتانسیل در دامنه سیال بدست آمد. همچنین هیدرودینامیک یک مبدل سرج تکی در محیط وسیع اقیانوس، توسط رنزی و دیاس مطالعه شد که آنها یک مدل نیمه تحلیلی با دامنه امواج کوچک، و فرض جریان غیر قابل تراکم و غیر ویسکوز در موج منظم را در نظر گرفتند [۱۳].

اولین مدل مبدل انرژی سرج نوسانی با مقیاس اصلی، با کاربرد تجاری در اسکاتند در سال ۲۰۰۹ نصب شد که چارچوب ریاضیاتی توصیف کننده هیدرودینامیک این مدل به نام اویستر، در سال ۲۰۱۴ با دیدگاه نیمه تحلیلی ارائه شد [۱۴]. همچنین در یک مطالعه عددی گومز و همکاران هیدرودینامیک یک فلپ مستطیلی لولا شده در کف را بررسی کردند که با در نظر گرفتن نیروهای هیدرودینامیکی خطی، یک تحلیل پارامتری در حوزه فرکانسی انجام دادند تا توان خروجی برای چند ورق با هندسه‌های متفاوت تخمین زده شود [۱۵]. مشخص شد که با تقسیم کردن ورق‌ها به تعداد کوچکتر توان تولیدی بهبود می‌یابد و بار وارد به فونداسیون کمتر می‌شود [۱۶]. در ادامه مدلسازی فلپ ماژولار مستطیلی در یک حوضچه موج ساز در آزمایش با مقیاس کوچک توسط ویلکینسن و همکاران در محدوده وسیعی از امواج برخوردی انجام شد [۱۷]. یک مقایسه بین توان تولیدی از فلپ تنها با فلپ ماژولار با پهنای کلی یکسان انجام شد که مشخص شد توان تولیدی در هر ماژول یکسان نیست. سنول و رئیسی یک تکنیک برای بهینه‌سازی سیستم تولید برق برای بهبود توان خروجی ارائه دادند. در این مطالعه هر دو دیدگاه دینامیک خطی و غیرخطی برای فلپ مستطیلی در نظر گرفته شد [۹]. سعیدی تهرانی یک دیدگاه عددی تجربی برای نشان دادن رفتار غیرخطی دینامیکی آرایه‌ای از مبدل‌های انرژی نوع فلپ مستطیلی ارائه داد [۱۸]. عظیمی‌نیا و اباذری توان تولیدی فلپ تکی با فلپ دوتایی را مقایسه کردند [۱۹] و همچنین کارایی و امکان پذیری فلپ با پایه شناور از جنبه توان تولیدی را مورد مطالعه قرار دادند [۲۰].

همانطور که از تحقیقات انجام شده مشخص است تحقیق جامعی برای بررسی تاثیرات ابعاد فلپ و هندسه‌های متفاوت فلپ روی توان تولیدی انجام نشده است. همچنین پیش‌بینی می‌شود که با تغییر هندسه فلپ (از طریق سیستم کنترلی با تغییر زاویه ماژول-های در فلپ تقسیم بندی شده) حین برخورد امواج، وضعیت هیدرودینامیکی جدیدی بدست آید که کمتر به آن پرداخته شده است. حالت فلپ ماژوله شده با چیدمان زاویه‌ای مختلف نیز نکته-ای دیگری است که در این تحقیق مورد مطالعه و بحث قرار می-گیرد.

۲- معادلات حاکم

مبدل انرژی نوع فلپ در نظر گرفته شده از نوع یک درجه آزادی است که به خوبی می‌تواند در جاهای کم عمق برای دریافت انرژی جنبشی امواج بکار گرفته شود. این مبدل شامل یک ورق لولا شده به کف است که با برخورد امواج تحت اثر نیروهای امواج قرار می-گیرد. نیروهای امواج همان نیروهای موج فرودکریلوف، نیروهای موج تشعشعی و نیروهای موج تفرق هستند. یکی از قسمت‌های مهم یک مبدل انرژی، سیستم تبدیل انرژی مکانیکی به الکتریکی است که به عبارتی همان PTO است. PTO در خیلی از مبدل های انرژی از یک بخش بازگرداننده به صورت یک فنر و یک میراگر تشکیل شده است. فنر برای بازگرداندن جسم نوسان کننده به وضعیت اولیه است برای اینکه بتوان یک حرکت ارتعاشی رفت و برگشتی حول نقطه تعادل دینامیکی ایجاد کرد. میراگر برای اتلاف انرژی مکانیکی یا به عبارتی تبدیل انرژی مکانیکی به انرژی الکتریکی است. PTO می‌تواند همان ژنراتور تولید کننده برق شامل سیم پیچ و آهنربا باشد که قدرت تبدیل انرژی مکانیکی به الکتریکی را دارد و با یک مقدار خاص برای میزان ضریب فنریت و ضریب میرایی مدلسازی می‌شود. البته در حالاتی دیگر، انرژی مکانیکی به انرژی موجود در یک سیال تحت فشار برای چرخاندن پره‌های توربین تبدیل می‌شود که همین میزان تبدیل را نیز می‌توان با یک ضریب میرایی مدلسازی کرد. لازم به ذکر است که در تحقیق حاضر ساختار مبدل انرژی نوع فلپ به گونه‌ای از لحاظ دینامیکی طراحی شده است که علاوه بر بازگردانندگی هیدرواستاتیکی که بواسطه بویانسی ایجاد شده است، یک فنر خارجی پیچشی هم در سیستم PTO اعمال می-

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.41.2.2]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.14]

شود. نهایتاً ممان بازگرداننده کل باعث یک حرکت زاویه‌ای رفت و برگشتی ارتعاشی می‌شود. نکته قابل ذکر این است که برای ابعاد در نظر گرفته شده میزان ضریب بازگردانندگی هیدرواستاتیکی نمی‌تواند به اندازه کافی زیاد باشد تا از ارتعاشات زاویه‌ای بزرگ غیرمنطقی(مثلا دامنه ارتعاشات بیشتر از ۹۰ درجه) جلوگیری کند. در ارتعاشات زاویه‌ای با دامنه بزرگ اثرات ویسکوزیته و گردابه بسیار مشهودتر است که نمی‌توان در نواحی با دامنه ارتعاشات زیاد به پاسخ‌های بدون در نظر گرفتن ویسکوزیته اطمینان کرد [۲۱, ۲۲]. لذا به همین علت در این مطالعه از یک فنر پیچشی ثابت نیز در pto، برای منطقی کردن پاسخ ارتعاشی و کوچک کردن دامنه نوسانات زاویه‌ای نیز استفاده شده است. میزان بازگردانندگی هیدرواستاتیکی پیچشی با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$C_h = \left(\frac{1-\alpha}{2}\right)\rho_w g t W L^2 \qquad (۱)$$

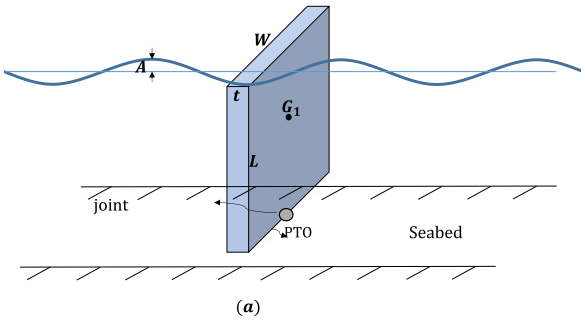
که α نسبت چگالی ورق ρ_p به چگالی آب ρ_w، g شتاب ثقل، t ضخامت ورق، w پهنای ورق و L ارتفاع فلپ است. لازم به ذکر است که این رابطه برای حالت ساده‌ای که مرکز ثقل روی مرکز بویانسی قرار می گیرد، ارائه شده است. بازگردانندگی زاویه‌ای هیدرواستاتیکی از طریق بویانسی ایجاد شده، به سیستم القا می-شود. ضریب بازگردانندگی کل برابر است با:

$$C = C_h + C_{pto} \qquad (۲)$$

که مقدار در نظر گرفته شده برای ضریب C_{pto}، $120KN.m/rad$ است. مشخصات نمونه‌های مورد مطالعه مبدل فلپ در نظر گرفته شده با هندسه مکعب مستطیلی، در جدول ۱ آمده است. نمایی از این مبدل در شکل ۱ مشاهده می‌شود.

جدول ۱- مشخصات مبدل انرژی

پارامتر	مقدار
پهنای ورق w	4,6,8 m
ضخامت ورقt	0.3 m
ارتفاع ورقL	2.7 m
عمق آبh	2.5 m
دامنه امواج A	0.1 m



(a)

شکل ۱- مبدل انرژی نوع فلپ با ورق مستطیلی متصل شده به PTO

برای تعیین توان خروجی نیاز به تحلیل دینامیکی سیستم ارتعاشی از طریق معادله دینامیکی و تعیین میزان دامنه ارتعاشات است تا بتوان میزان توان خروجی را محاسبه کرد. می‌توان معادله دینامیکی حاکم بر ارتعاشات زاویه‌ای فلپ را به صورت زیر در حوزه زمان در نظر گرفت.

$$\mathrm{I}\ddot{\theta} = \mathrm{M_{hds}} + \mathrm{M_{exc}} + \mathrm{M_{PTO}} + \mathrm{M_{hyd}} \qquad (۳)$$

با فرض خطی بودن ارتعاشات، می‌توان معادله دینامیکی ارتعاشات سیستم مبدل انرژی را در حوزه فرکانس به صورت زیر ساده‌سازی کرد.

$$\left[(I + I_a)\omega^2 + \mathrm{i}\omega\left(B_r + B_{pto}\right) + C\right]\Theta(\omega) = M_{exc}(\omega) \qquad (۴)$$

I ممان اینرسی جرمی و $\Theta(\omega)$ دامنه ارتعاشات زاویه‌ای فلپ و B_{pto} میرایی مربوط به سیستم PTO است. I_a ممان اینرسی جرمی افزوده ، B_r ضریب میرایی تشعشعی و M_{exc} دامنه ممان تحریک امواج برخوردی و متفرق شده هستند که از نرم افزار آکوا بدست می‌آیند. برای تعیین ضرایب هیدرودینامیکی و ممان تحریک نیاز به تحلیل فرکانسی در نرم افزار انسیس اکوا است. تحلیل فرکانسی بر اساس تئوری تفرق انجام می‌گردد که بایستی سه تابع پتانسیل موج برخوردی، موج تشعشعی و موج متفرق شده از حل معادله لاپلاس که در زیر آمده است، بدست آید. با توجه به توابع پتانسل موج برخوردی و متفرق شده، نیرو و ممان تحریک وارد به مبدل شناور محاسبه می‌گردد و با استفاده از تابع پتانسیل موج تشعشعی، ضریب ممان اینرسی جرمی افزوده و میرایی تشعشعی زاویه‌ای محاسبه می‌گردد.

$$\nabla^2\Phi = 0 \qquad (۵)$$

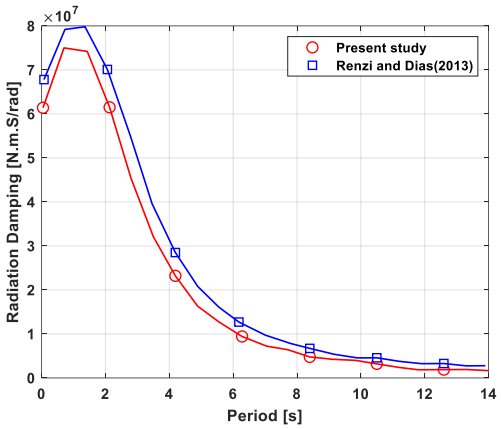
$$\Phi = \mathbb{R}\{(\phi_I + \phi_R + \phi_D)e^{-i\omega t}\} \qquad (۶)$$

قبل از اینکه نمونه مبدل‌های در نظر گرفته شده در این تحقیق بررسی شوند، یک صحت‌سنجی از روش بکار گرفته شده در تحقیق حاضر با مقایسه با نتایج تحقیق رنزی و دیاس [۱۳] انجام می‌شود. ابعاد فلپ در نظر گرفته شده در آن مطالعه به صورت جدول ۲ است.

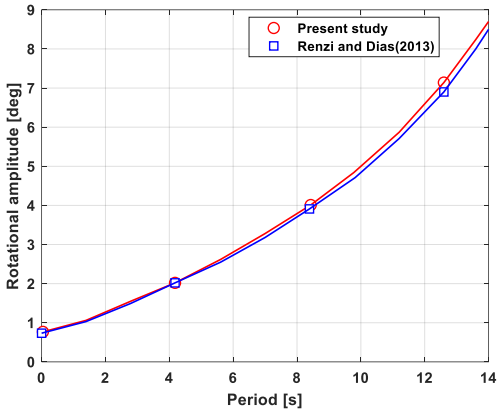
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.41.2.2]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.14]

جدول ۲- مشخصات مدل تحقیق رنزی و دیاس [۱۳]

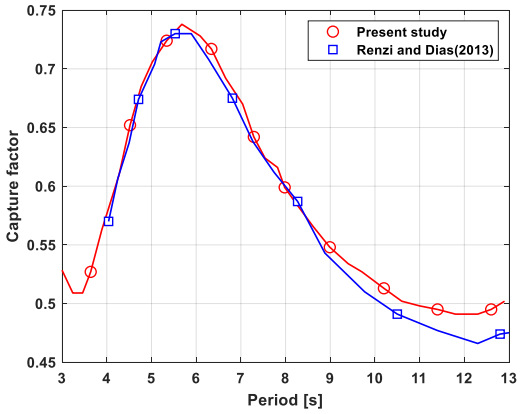
پهنای فلپ$(\boldsymbol{m})$	18
ارتفاع فلپ$(\boldsymbol{m})$	1.5
عمق آب$(\boldsymbol{m})$	10.9
دامنه موج$(\boldsymbol{m})$	0.3
جرم $(\boldsymbol{kg})$	61216
ممان اینرسی فلپ$(\boldsymbol{kg.m2})$	1.80e6
فاصله مرکز ثقل تا لولا$(\boldsymbol{m})$	4.7



شکل ۲- مقایسه میرایی تشعشعی- مطالعه حاضر و رنزی دیاس[۱۳]



شکل ۳- مقایسه ارتعاشات زاویه‌ای- مطالعه حاضر و رنزی دیاس[۱۳]



شکل ۴- مقایسه فاکتور برداشت مطالعه- حاضر و رنزی دیاس[۱۳]

به عنوان مثال مقایسه ضرایب میرایی تشعشعی و جابجایی فلپ و توان تولیدی در شکل ۲ و شکل ۳ و شکل ۴ آمده است که نشان می‌دهد تطابق خوبی بین نتایج وجود دارد. لازم به ذکر است که ممان تحریک و ممان اینرسی جرمی افزوده نیز تطابق خوبی دارند که به علت محدودیت صفحات مقاله صرفاً نتایج ضریب میرایی و دامنه ارتعاشات زاویه‌ای در اینجا آورده شده است.

البته اختلاف موجود به علت مبنای روش رنزی و دیاس است که یک روش تحلیلی و تجربی است. نکته مهم این است که روش رنزی و دیاس نیز بر اساس تئوری جریان پتانسیل است و اثرات ویسکوزیته صرف نظر شده است. البته این به شرطی است که نسبت دامنه امواج در مقابل پهنای مدل به اندازه کافی کوچک باشد [۲۳]. در صورتی که این نسبت بزرگ باشد اثرات ایجاد گردابه‌ها بایستی در نظر گرفته شود. به همین علت است که در برای نمونه‌های در نظر گرفته شده در مطالعه حاضر نیز نسبت دامنه موج به پهنا به اندازه‌ای کوچک در نظر گرفته شده است که بتوان از اثرات ایجاد گردابه‌ها جلوگیری کرد. همچنین نتایج مطالعه رنزی و دیاس صرفا برای نواحی دور از تشدید نمایش داده شده است، زیرا در نواحی تشدید بواسطه جابجایی‌های بزرگ پاسخ‌های بدست آمده ممکن است با خطا باشد. در مقاله حاضر با فرض معادلات خطی در تمامی پریودها، نتایج حتی برای نواحی تشدید نیز بیان شده است که البته باید با احتیاط به نتایج مشاهده شده در باند فرکانسی باریک اطراف نقطه تشدید اطمینان کرد اما برای بقیه پریودها نتایج با اطمینان زیادی مورد قبول است.

۳- میرایی بهینه

در ادامه برای ابعاد در نظر گرفته شده در این تحقیق به عنوان مثال برای فلپ با پهنای ۶ متر و ارتفاع ۲,۷ متر و ضخامت ۳.۰ متر ممان تحریک هیدرودینامیکی و ضرایب هیدرودینامیکی جرم افزوده و میرایی از طریق تحلیل در نرم افزار آکوا بدست آورده می‌شود. میزان توان تولیدی توسط مبدل انرژی امواج، بستگی به میزان میرایی در نظر گرفته شده در PTO است.

$$p = 0.5 \times B_{pto} \times \omega^2 \times |\Theta|^2 \qquad (۷)$$

با توجه به وابستگی توان تولیدی به میزان میرایی سیستم PTO، توان تولیدی بر حسب مقدار میرایی فرق خواهد کرد. همچنین توان تولیدی تابع فرکانس و دامنه جابجایی زاویه‌ای فلپ است که از طرفی دامنه ارتعاشات نیز تابع فرکانس است. برای میرایی موجود در PTO که وظیفه استهلاک یا تبدیل انرژی را دارد، می‌توان دو استراتژی را در نظر گرفت. در روش اول که در عمل پیاده کردن آن ساده‌تر است، مقدار میرایی ثابتی در همه پریودهای مختلف موج تحریک می‌توان در نظر گرفت. در روش دوم با توجه

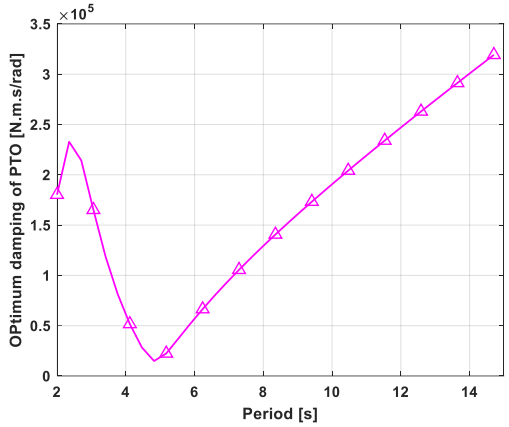
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.41.2.2]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.14]

به اینکه امکان پیش‌بینی پریود و فرکانس برخورد موج وجود دارد، با توجه به شرایط دریایی خاص در هر لحظه، مقدار میرایی مربوطه از طریق یک سیستم کنترلی تنظیم می‌گردد تا بیشترین توان ممکن بدست آید. با توجه به اینکه معادله دینامیکی ارتعاشات، به صورت خطی در نظر گرفته شده است و به صورت رابطه ساده فرکانسی (۴) در آمده است، می‌توان با استفاده از رابطه تحلیلی توان (۷)، توان را بر حسب متغیر B_{pto} ماکزیمم کرد و به این ترتیب مقدار بهینه B_{pto} به گونه‌ای به دست می‌آید که توان تولیدی ماکزیمم شود. نهایتاً مقدار میرایی بهینه به صورت رابطه زیر بدست می‌آید.

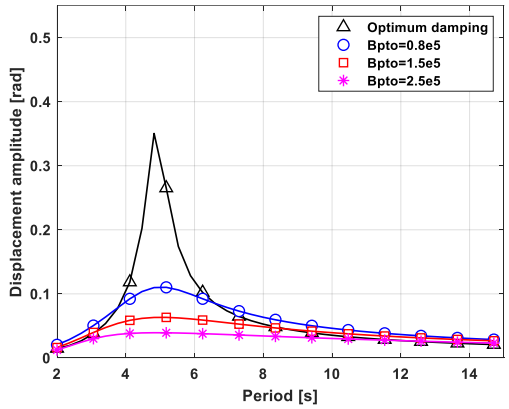
$$B_{pto-opt} = \sqrt{{B_r}^2 + \left[\frac{C}{\omega} - \omega(I + I_a)\right]^2} \qquad (۸)$$

با توجه به رابطه بالا، برای فلپ در نظر گرفته شده مقدار میرایی بهینه سیستم PTO برای تولید بیشترین توان به صورت شکل ۵ بر حسب پریود تغییر می‌کند که بایستی این تغییرات توسط یک سیستم کنترلی با پیش‌بینی شرایط دریای خاص تنظیم شود تا منجر به تولید توان بهینه و ماکزیمم شود. شکل ۵ نشان می‌دهد که میرایی بهینه بر حسب پریود تغییر می‌کند مثلاً در پریود ۵ ثانیه با کمترین میزان میرایی، بیشترین توان بدست می‌آید. این نتیجه منطقی است زیرا توان تولیدی علاوه بر میرایی pto با مجذور دامنه ارتعاشات زاویه‌ای هم وابسته است که نهایتاً حاصل ضرب این دو پارامتر مقدار توان زیادی را در این پریود نتیجه می‌دهد. بیشترین مقدار میرایی بهینه در محدوده پریودهای کمتر از ۱۰ ثانیه تقریباً 2.45e5 N.m.s/rad است.

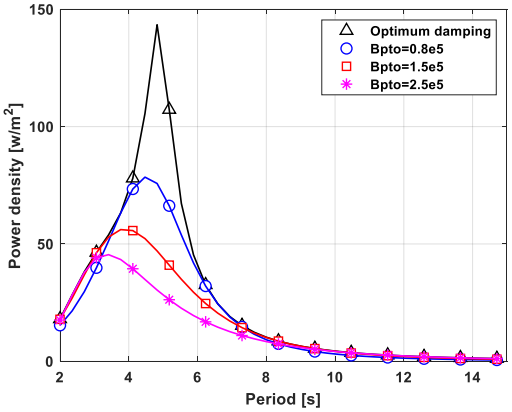
برای اینکه مفهوم میرایی بهینه بهتر مشخص شود طبق اصول بیان شده در استراتژی اول، با سه مقدار میرایی ثابت 0.8e5, 1.5e5, 2.5e5 تحلیل دینامیکی برای سیستم انجام می‌گیرد تا تفاوت توان تولیدی در دو استراتژی میرایی ثابت و میرایی متغیر به وضوح مشخص شود. بعد از تحلیل دینامیکی، نتایج بدست آمده در شکل ۶ نشان می‌دهد که بیشترین جابجایی زاویه‌ای مربوطه به استراتژی دوم با وجود میرایی متغیر است و همین نکته برای توان تولیدی در شکل ۷ نیز مشاهده می‌شود که مقادیر زیاد و یا کم برای میرایی ثابت pto، چگالی سطحی توان تولیدی کمتری در مقایسه با میرایی متغیر بهینه ایجاد می‌کنند. لذا ارزش هزینه کرد برای ایجاد سیستم کنترلی با قابلیت تنظیم میرایی pto بیش از پیش در اینجا مشخص می‌شود. چگالی سطحی توان در حقیقت میزان توان تولیدی بر واحد سطح می‌باشد.



شکل ۵- تغییرات میرایی بهینه بر حسب پریود امواج



شکل ۶- مقایسه جابجایی زاویه‌ای فلپ با دو استراتژی میرایی ثابت و میرایی بهینه برای PTO



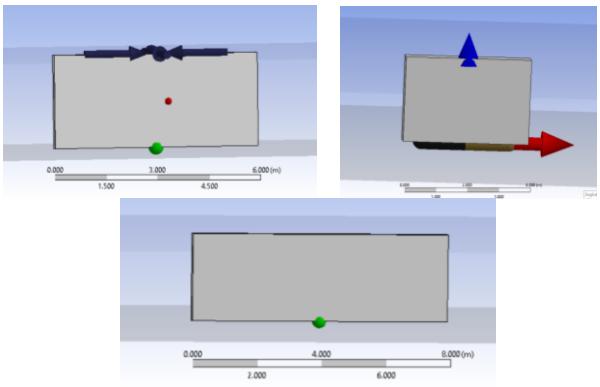
شکل ۷- مقایسه چگالی سطحی توان تولیدی با دو استراتژی میرایی ثابت و میرایی بهینه برای PTO

در ادامه تاثیر پارامترهای مختلف مانند ابعاد فلپ و هندسه و زاویه ماژول ها روی توان خروجی بررسی می گردد. شایان ذکر است که در همه حالت‌های مورد بررسی در ادامه تحقیق، مرکز بویانسی و جرم روی هم قرار گرفته‌اند و وزن فلپ همواره ۳۰٪ میزان نیروی بویانسی فرض می‌شود و میرایی در نظر گرفته شده در همه حالت‌ها، میرایی متغیر بهینه است.

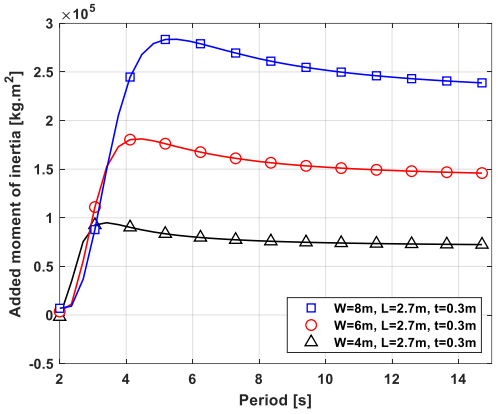
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.41.2.2]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.14]

۴- تاثیر ابعاد روی میزان توان تولیدی

یکی از عوامل تاثیر گذار روی توان تولیدی، تغییر پهنای فلپ موجود در سیستم مبدل انرژی امواج است. از این رو برای دو حالت دیگر که پهنای فلپ مقادیر ۶ و ۸ متر در نظر گرفته می-شود تا با استفاده از نرم افزار انسیس آکوا و با تحلیل فرکانسی، ضرایب هیدرودینامیکی و ممان تحریک بدست آورده شود و سپس در متلب تحلیل پاسخ انجام پذیرد.

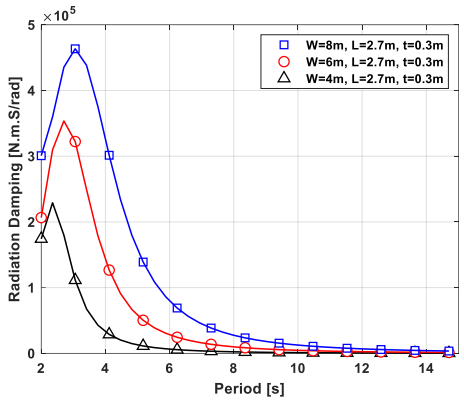


شکل ۸-فلپ با سه پهنای مختلف ۴و ۶ و ۸ متر

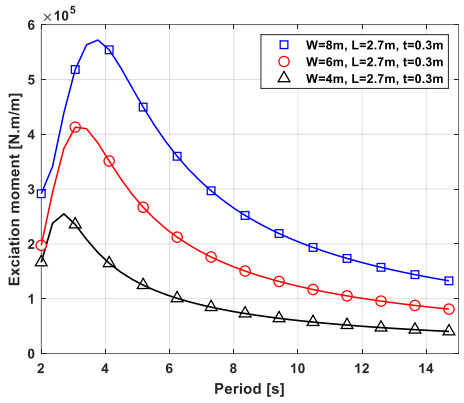


شکل ۹- ممان اینرسی افزوده بر حسب پریود برای سه پهنای مختلف

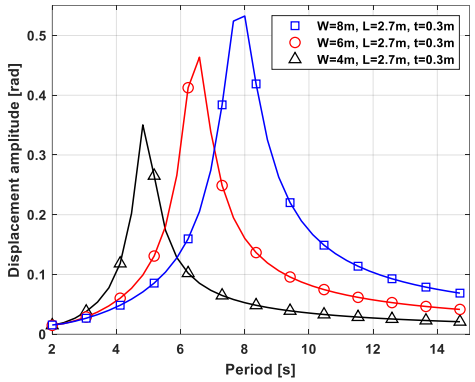
شکل ۹ نشان می‌دهد که با افزایش پهنای فلپ، به طور کلی میزان ممان اینرسی جرمی افزوده افزایش می‌یابد و البته پریود پیک ممان اینرسی جرمی افزوده نیز با افزایش پهنا بزرگ‌تر می-شود. روند مشابهی برای ضریب میرایی تشعشعی و ممان تحریک با افزایش پهنا در شکل ۱۰ و شکل ۱۱ مشاهده می‌شود. این افزایش‌ها با توجه به بزرگ شدن سطح فلپ قابل پیش بینی بود زیرا سیال بیشتری اطراف فلپ در پهنای بیشتر، شتاب می‌گیرد که منجر به ممان اینرسی جرمی افزوده بیشتری می‌گردد. همچنین افزایش پهنا، سطح بیشتری از فلپ را در معرض شتاب ذرات سیال موج قرار می‌دهد و بالتبع نیرو و ممان تحریک بیشتری به مبدل انرژی اعمال خواهد شد.



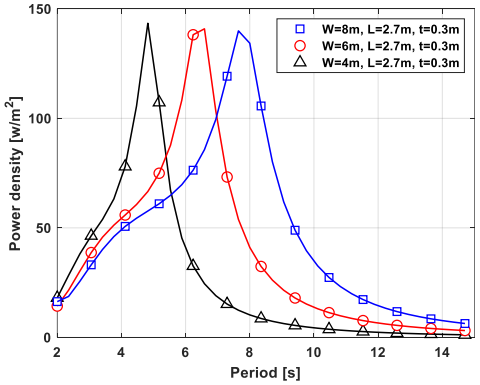
شکل ۱۰- میرایی تشعشعی بر حسب پریود در سه پهنای مختلف



شکل ۱۱- ممان تحریک بر حسب پریود برای سه پهنای مختلف



شکل ۱۲- دامنه جابجایی بر حسب پریود برای سه پهنای مختلف



شکل ۱۳- چگالی سطحی توان تولیدی بر حسب پریود برای سه پهنای مختلف

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.41.2.2]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.14]

شکل ۱۲ دامنه جابجایی سه نمونه را در سه پهنای مختلف نمایش می‌دهد. علی‌رغم اینکه طبق نمودارهای قبلی ممان تحریک در پهناهای بیشتر، بزرگتر می‌شود اما به علت ممان‌های هیدرودینامیکی مقاوم بیشتر ناشی از ممان اینرسی افزوده و ممان ناشی از میرایی تشعشعی بسیار بیشتر، نهایتاً جابجایی کمتری برای فلپ با پهنای بیشتر بوجود می‌آید. اما نکته قابل توجه این است که توان خروجی فقط به میزان دامنه ارتعاشات وابسته نیست بلکه به میرایی بهینه نیز وابسته است. این موضوع از نتایج شکل ۱۳ مشخص می‌شود که در آن نهایتاً فلپ با پهنای بزرگتر منجر به چگالی سطحی توان بیشتر در پریودهای بزرگتر می‌شود. همچنین با افزایش پهنای فلپ، پریود طبیعی تشدید افزایش و یا فرکانس طبیعی تشدید مبدل انرژی کاهش می‌یابد. نکته طراحی دیگر این است که میزان بیشینه چگالی سطحی توان برای سه پهنای مختلف تقریباً مشابه است.

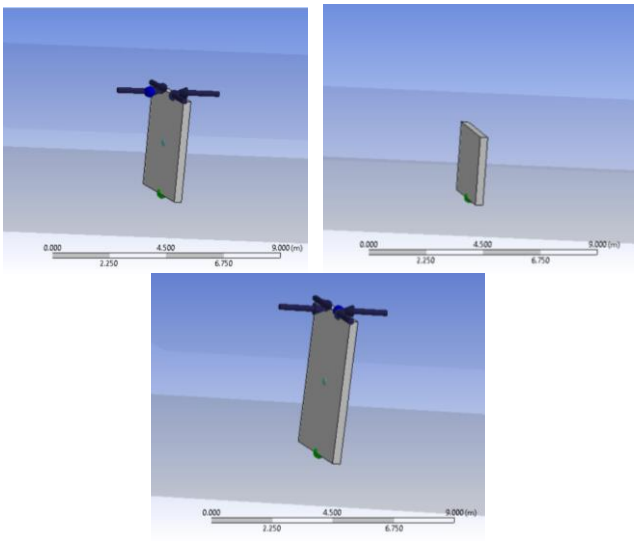
یکی از عوامل تاثیرگذار دیگر در توان تولیدی، ارتفاع فلپ است. تاثیر این پارامتر نیز مشابه روند قبلی ابتدا با تحلیل فرکانسی در نرم افزار آکوا برای تعیین ضرایب هیدرودینامیکی و سپس تحلیل دینامیکی در نرم افزار متلب انجام می‌گردد. در جدول زیر میزان این افزایش ارتفاع‌ها بیان شده است. افزایش ارتفاع به گونه‌ای صورت گرفته است که منجر به مساحت یکسانی در مقایسه با نمونه‌های متناظر در حالت افزایش پهنا می‌شود.

جدول ۳- ابعاد فلپ های در نظر گرفته شده

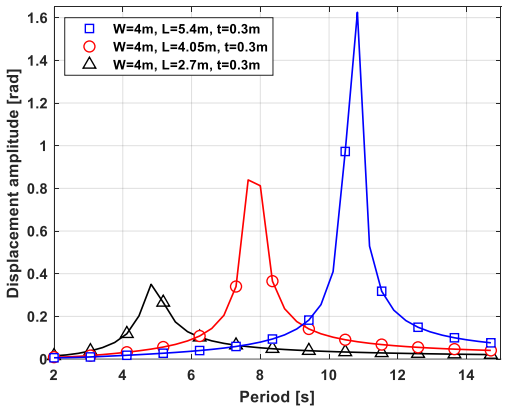
	توضیح	افزایش پهنا	افزایش ارتفاع
۱	مساحت نمونه ها در این ردیف برابر هستند	۲,۷*۴	۲,۷*۴
۲	مساحت نمونه ها در این ردیف برابر هستند	۲,۷*۶	۴,۰۵*۴
۳	مساحت نمونه ها در این ردیف برابر هستند	۲,۷*۸	۵,۴*۴

فلسفه افزایش ارتفاع فلپ به مقدار 4.05m برای این بوده است که مساحت یکسانی با شرایط افزایش پهنا در پهنای ۶ متر بوجود آید و سپس مقایسه ای بین نتایج دو فلپ با مساحت یکسان انجام شود که یکی در راستای پهنا و دیگری در راستای ارتفاع بزرگ شده است. به عبارتی دیگر مساحت ۴,۰۵*۴ برابر با مساحت ۲,۷*۶ متر است. ولی مقایسه شکل ۱۳ و شکل ۱۶ نشان می‌دهد که افزایش ارتفاع تاثیر بیشتری روی چگالی سطحی توان تولیدی است. در ادامه نتایج نشان می‌دهد افزایش بیشتر پهنا که منجر به مساحت ۲,۷*۸ می شود، در مقایسه با مساحت یکسان ۵,۴*۴ که در اثر افزایش ارتفاع صورت گرفته است، تاثیر کمتری دارد و باز هم افزایش ارتفاع برای چگالی سطحی توان موثرتر است. نتایج شکل ۱۲ و شکل ۱۳ نشان می‌دهد که به طور کلی با افزایش ارتفاع فلپ، دامنه جابجایی و توان تولیدی افزایش می‌یابد. البته لازم به ذکر است افزایش ارتفاع فلپ با این فرض صورت گرفته است که عمق‌های مختلفی برای نصب مبدل انرژی فلپ در دسترس باشد که بتوان با افزایش ارتفاع فلپ در جای عمیق‌تری مبدل انرژی را نصب کرد. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش ارتفاع مشابه با حالت افزایش پهنا، پریود تشدید ارتعاشات افزایش می‌یابد. این یک نکته مهم از نقطه نظر طراحی است زیرا با تنظیم ابعاد فلپ می‌توان محدوده تشدید را با توجه به شرایط دریایی خاص در هر منطقه تنظیم کرد.

در همه حالت‌های در نظر گرفته شده برای افزایش پهنا و ارتفاع، مرکز بویانسی و مرکز جرم به گونه‌ای تنظیم می‌شود که روی هم قرار گرفته اند. می‌توان با تنظیم و جابجایی محل مرکز جرم نسبت به بویانسی شرایط دینامیکی دیگری را برای سیستم مد نظر ایجاد کرد.

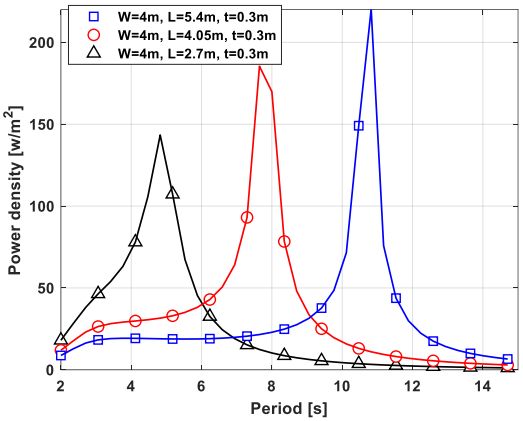


شکل ۱۴-فلپ با سه ارتفاع مختلف



شکل ۱۵- دامنه جابجایی زاویه‌ای بر حسب پریود برای سه ارتفاع مختلف فلپ

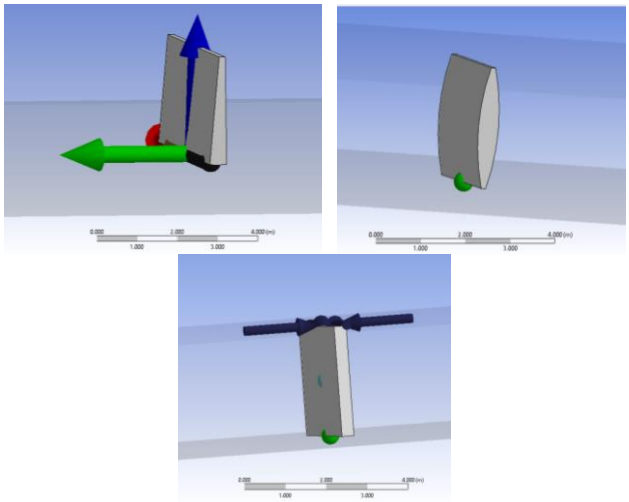
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.41.2.2]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.14]



شکل ۱۶- چگالی سطحی توان تولیدی بر حسب پریود برای سه ارتفاع مختلف فلپ

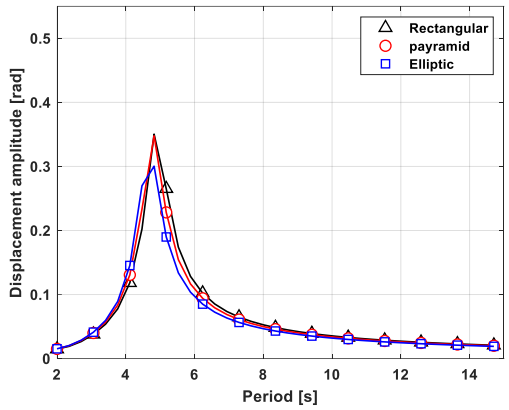
۵- تاثیر هندسه فلپ روی میزان توان خروجی

در این بخش تاثیر هندسه فلپ را روی توان خروجی بررسی می‌کنیم. برای این منظور دو هندسه هرمی و بیضی گون را برای فلپ در نظر گرفته می‌شود. البته ارتفاع و پهنای فلپ‌ها کاملا یکسان است و حجم فلپ هرمی و بیضی‌گون به گونه ای تنظیم شده است که نهایتاً در هر سه حالت، حجم‌ها و بالتبع نیروی بویانسی یکسان باشند. همچنین جرم فلپ در هر سه حالت ۳۰ درصد نیروی بویانسی در نظر گرفته شده است و مرکز جرم و بویانسی فرض شده است که روی هم قرار گرفته‌اند. در هر صورت سعی شده است تا شرایط یکسان و مشابهی برای هر سه حالت در نظر گرفته شود و فقط هندسه آنها با هم تفاوت داشته باشد.

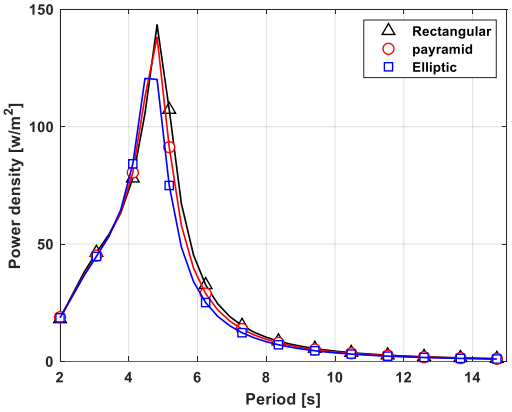


شکل ۱۷- مبدل انرژی فلپ با سه هندسه متفاوت (مستطیلی- هرمی-بیضی گون)

نتایج تحلیل دینامیکی در شکل ۱۸ و شکل ۱۹ برای سه هندسه متفاوت نشان می‌دهد که هندسه مستطیلی برای فلپ، به میزان کمی جابجایی زاویه‌ای و چگالی سطحی توان بیشتری را نتیجه می‌دهد که البته از طرفی با توجه به ساخت ساده‌تر فلپ مستطیلی به نظر این هندسه، هم از لحاظ هیدرودینامیکی و هم از نظر سادگی در پیاده سازی در اجرا، عملکرد بهتری را نتیجه می‌دهد. مشاهده می‌شود که پریود طبیعی ارتعاشات زاویه‌ای و پریود پیک توان در سه هندسه مختلف تفاوت چندانی ندارد زیرا با وجود ثابت ماندن پهنا و ارتفاع ثابت برای سه فلپ با هندسه‌های مختلف، تغییر قابل توجه در ضریب بازگردانندگی هیدرواستاتیکی و ممان اینرسی جرمی افزوده ایجاد نشده است که باعث تغییر محل پریود پیک گردد.



شکل ۱۸- دامنه ارتعاشات زاویه‌ای برای مبدل انرژی با سه هندسه متفاوت



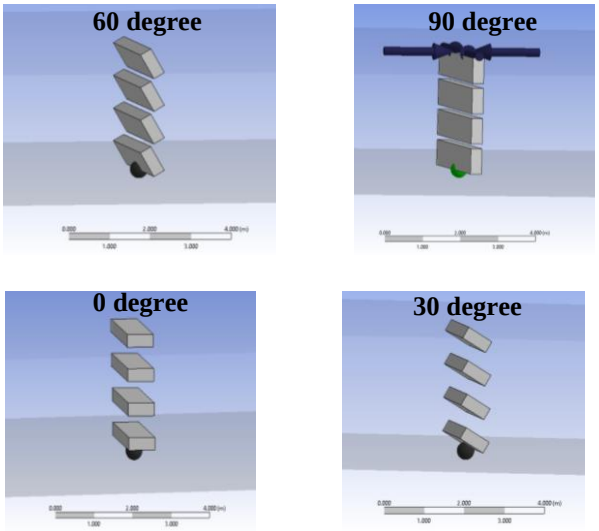
شکل ۱۹- چگالی سطحی توان تولیدی برای مبدل انرژی با سه هندسه متفاوت

۶- فلپ ماژول شده

تبدیل فلپ یکپارچه به حالت چندتایی که روی یک فریم نصب شده‌اند و از لحاظ دینامیکی مانند یک جسم صلب ارتعاش می‌کنند، ممکن است پاسخ‌های هیدرودینامیکی خاصی را نتیجه دهد که مهندسین بتوانند در عمل از نتایج آن بهره‌مند شوند. تغییر زاویه این ماژول‌ها نسبت به موج برخوردی احتمالاً ویژگی‌های هیدرودینامیکی جدیدی را به سیستم اعمال خواهد کرد. پیش‌بینی می‌شود که هر چه ماژول‌ها زاویه کمتری با سطح افق داشته باشند ممان‌های مقاوم ناشی از ممان اینرسی جرمی افزوده و میرایی تشعشعی کمتر شود که نکته مثبتی در افزایش دامنه

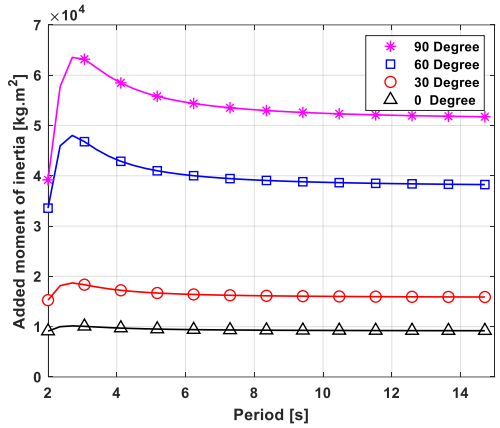
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.41.2.2]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.14]

ارتعاشات و یا احتمالاً جابجایی نقطه تشدید سیستم دینامیکی خواهد بود. از طرفی ممان تحریک نیز کاهش خواهد یافت که منجر به کاهش دامنه ارتعاشات و احتمالاً کاهش توان تولیدی خواهد شد. لذا می‌توان مقابله این اثرات را با تحلیل دینامیکی در حالات مختلف بررسی کرد تا مشاهده کرد نهایتاً کدام یک از این اثرات بر دیگری غلبه خواهد کرد. فلپ ماژول شده در حالات مختلف برای زاویه فلپ‌ها در شکل ۲۰ قابل مشاهده است.

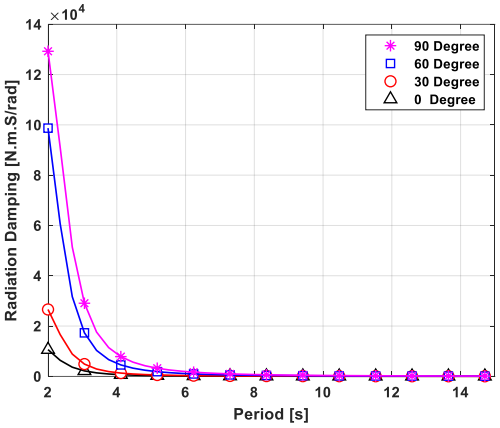


شکل ۲۰- مبدل انرژی ماژوله شده با جهت گیری مختلف ماژول‌ها

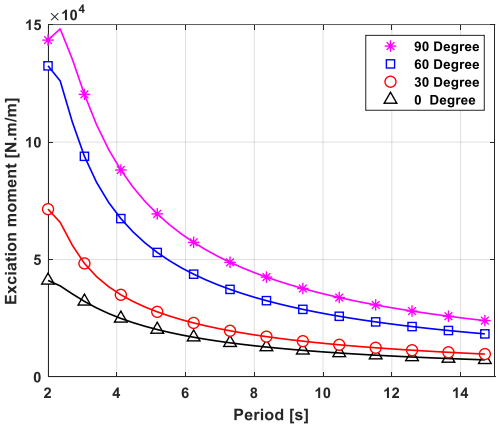
نتایج ضرایب هیدرودینامیکی در شکل ۲۱ و شکل ۲۲ برای زاویه-های مختلف ماژول‌ها این نکته را مشخص می‌کند که همانطور که انتظار می‌رفت با نزدیک شدن زاویه ماژول‌ها با خط تراز افق، میزان ممان اینرسی جرمی افزوده کاهش می‌یابد زیرا ذرات سیال کمتری اطراف فلپ شتاب می‌گیرند که باعث ممان اینرسی جرمی افزوده کمتر می‌شود. همچنین قدرت امواج تشعشعی در ماژول-های با زاویه کمتر، کوچکتر از ماژول‌های با زاویه بیشتر است که منجر به میرایی تشعشعی کمتری می‌گردد. همچنین در زوایای کوچک ماژول‌ها نزدیک به صفر، ذرات شتاب‌دار سیال موج برخوردی و موج متفرق شده به سطح تصویر شده کمتری در راستای موج برخورد می‌کنند که نهایتاً ممان تحریک کمتری را منجر خواهد شد. شایان ذکر است که افزایش میزان ضرایب هیدرودینامیکی از زاویه ۳۰ تا ۶۰ درجه در مقایسه با میزان افزایش همین ضرایب از زاویه ۰ تا ۳۰ درجه چشمگیر تر است. اما به هرحال تقابل اثر کاهش ضرایب هیدرودینامیکی و کاهش ممان تحریک روی توان خروجی که به ترتیب موجب افزایش و کاهش توان تولیدی می‌شوند در شکل ۲۴ و شکل ۲۵ به وضوح مشخص می‌شود.



شکل ۲۱ – ضریب ممان اینرسی جرمی افزوده برای فلپ در حالتهای مختلف چیدمان زاویه‌ای ماژول‌ها



شکل ۲۲ – ضریب میرایی تشعشعی برای فلپ در حالتهای مختلف چیدمان زاویه‌ای ماژول‌ها

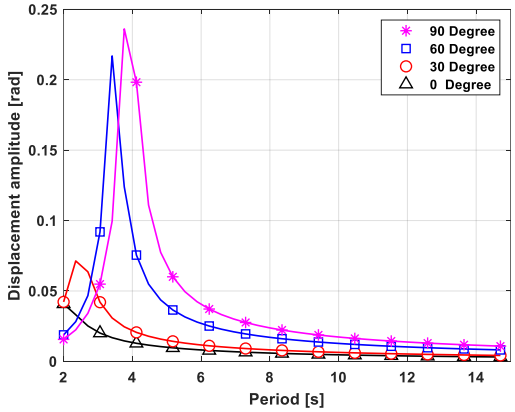


شکل ۲۳ – ممان تحریک برای فلپ در حالت‌های مختلف چیدمان زاویه‌ای ماژول‌ها

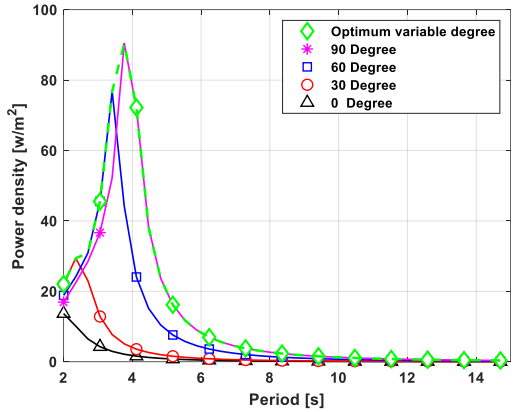
به طور کلی این نتیجه را می‌توان گرفت که مقدار پیک توان و پیک جابجایی با قائم شدن ماژول‌ها افزایش می‌یابد. به طور دقیق-تر مشخصه‌های دینامیکی تعیین می‌کند که نزدیکی زاویه ماژول‌ها به ۹۰ درجه باعث افزایش جابجایی و چگالی سطحی توان در پریودهای بالا می‌شود و بر عکس در پریودهای خیلی کوچک که البته چندان هم ناحیه عملیاتی و شرایط واقعی دریا نیست، چگالی سطحی توان تولیدی کاهش می‌یابد. نکته جالب توجه این است

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.41.2.2]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.14]

که برای فلپ با مشخصات در نظر گرفته شده تقابل دو اثر ممان تحریک و ضرایب هیدرودینامیک منجر به اثر بهتری برای پیک توان خروجی در زاویه ۹۰ درجه می‌شود. از یک جنبه دیگر مهندس طراح باید به میزان کاهش تنش های وارده به سازه نیز دقت نظر داشته باشد. ممان تحریک بالا و دامنه جابجایی بالا و بالتبع تنش بالاتر در همه جا به عنوان نکته مثبت در نظر گرفته نمی‌شود. لذا می‌توان با کاهش زاویه، میزان تنش‌های وارد به سازه فلپ را کم کرد که البته میزان توان تولیدی نیز کمتر خواهد شد ولی مزیتش این است که سازه به صورت پایدارتر با عمر طولانی تر به عملکرد خود ادامه خواهد داد.



شکل ۲۴ – دامنه جابجایی زاویه‌ای برای فلپ در حالت‌های مختلف چیدمان زاویه‌ای ماژول‌ها



شکل ۲۵ – چگالی سطحی توان تولیدی برای فلپ در حالت‌های مختلف چیدمان زاویه‌ای ماژول‌ها

مهندس طراح می‌تواند با هزینه بیشتر و با پیاده‌سازی سیستم کنترلی توان بسیار بیشتری در مقایسه با هر کدام از چهار حالت بیان شده در شکل ۲۵ تولید کند. این روش بدین گونه است که با تشخیص شرایط دریایی در هر لحظه و پیش‌بینی پریود امواج، زاویه ماژول‌ها در هر لحظه به گونه‌ای تنظیم شود که بیشترین چگالی سطحی توان را بدهد. یعنی اگر پریود موج تحریک ۳ ثانیه بود زاویه ماژولها به حدود ۳۰ درجه و اگر پریود موج ۳,۵ ثانیه بود زاویه ماژول ها به ۶۰ درجه و اگر پریود موج ۴ ثانیه بود زاویه ماژول‌ها به زاویه قائم توسط سیستم کنترلی تنظیم گردد. به این ترتیب با یک سیستم کنترلی، بهترین و بهینه‌ترین حالت برای دریافت چگالی توان طراحی می‌گردد. حالت بهینه در شکل ۲۵ با رنگ سبز خط چین نمایش داده شده است که مقدار چگالی توان تولیدی آن از همه حالت‌ها بیشتر است.

۷- نتیجه گیری

برای یک فلپ یکپارچه یک درجه آزادی، توان خروجی کاملا به میرایی سیستم pto وابسته است و چنانچه پیاده سازی سیستم کنترلی امکان پذیر باشد می‌توان با تنظیم میرایی وابسته به نوع پریود موج تحریک، میرایی بهینه‌ای را ایجاد کرد که منجر به توان بیشینه خواهد شد. همچنین نتایج نشان داد که تغییر ابعاد فلپ تاثیر مهمی در میزان توان تولیدی و پریود توان پیک خواهد گذاشت طوری که افزایش پهنا و ارتفاع فلپ میزان پیک توان و پریود متناظر با آن را افزایش می‌دهد. اثرات افزایش ارتفاع بسیار مشهودتر از اثرات افزایش پهنا است طوری که در بزرگترین فلپ-های در نظر گرفته شده با مساحت یکسان، نمونه با ارتفاع بزرگتر میزان چگالی توان $220\ w/m^2$ را در مقایسه با توان نمونه با بیشترین پهنا یعنی $150\ w/m^2$ دارد. مشاهده شده تغییر هندسه ظاهری فلپ به حالت هرمی و یا بیضی‌گون تاثیر چندانی در تغییر پریود پیک و توان خروجی ندارد. طوری که پریود پیک با توجه به عدم تغییر قابل توجه بازگردانندگی هیدرواستاتیکی و ممان اینرسی جرمی افزوده در مقدار حدودی 5 s می‌ماند همچنین میزان بیشینه چگالی سطحی توان برای سه هندسه متفاوت مقدار مشابه $145\ w/m^2$ است.

یکی دیگر از راه‌های افزایش توان تولیدی در یک بازه فرکانسی، تبدیل فلپ تکی به فلپ چندتایی است که با تغییر زاویه فلپ‌ها بر حسب پریود موج تحریک می‌توان نهایتاً از طریق یک سیستم کنترلی در پریودهای کوچک با ماژول‌های با زاویه کوچکتر و در پریودهای بالا با ماژول‌های با زوایای بزرگتر به چگالی سطحی توان بهینه و بیشتری رسید. که مثلا برای زاویه ۹۰ درجه چگالی سطحی توان تا مقدار $90\ w/m^2$ افزایش می‌یابد.

پیشنهاد می‌شود که برای ادامه کار، کارکرد مبدل انرژی فلپ برای امواج نامنظم خلیج فارس یا دریای عمال مورد بررسی قرار گیرد و همچنین پاسخ دینامیکی مبدل انرژی برای دامنه‌های امواج بزرگ و وجود اثرات ویسکوزیته با حل معادلات غیر خطی برآورد شود.

۸- مراجع

1-ADERINTO, T. and LI, H.,(2019), *Review on power performance and efficiency of wave energy converters*, Energies **12**(22), p. 4329. https://doi.org/10.3390/en12224329

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.41.2.2]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.14]

2-QIAO, D., HAIDER, R., YAN, J., NING, D. and LI, B.,(2020), *Review of Wave Energy Converter and Design of Mooring System* , Sustainability **12**(19), p. 8251.
https://doi.org/10.3390/su12198251

3-ABAZARI, A., ZAREEI, M. R. and POURSHEIKHALI, S.,(2021), *Determination of the power resonant frequency of an OWC converter based on the RLC circuit analytical approach*, International Journal of Maritime Technology, p.۱۰۵-۹۳ .
http://ijmt.ir/article-1-801-en.html

4-AHAMED, R., MCKEE, K. and HOWARD, I.,(2020), *Advancements of wave energy converters based on power take off (PTO) systems: A review*, Ocean Engineering **204**, p. 107248.
https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107248

5-NGUYEN, H. P., WANG, C., TAY, Z. and LUONG, V.,(2020), *Wave energy converter and large floating platform integration: A review*, Ocean Engineering **213**, p. 107768.
https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107768

6-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

7-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** ,(٤)p. 27-36.
https://doi.org/10.22034/ijcoe.2022.166735

8-GHARECHAE, A. and ABAZARI, A.,(*Performance Assessment of a Combined Circular Aquaculture Cage Floater and Point Absorber Wave Energy Converters*, Available at SSRN 4220626.
http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4220626

9- CLEMENTE, D., ROSA-SANTOS, P., FERRADOSA, T. and TAVEIRA-PINTO , F.,(2023), *Wave energy conversion energizing offshore aquaculture: Prospects along the Portuguese coastline*, Renewable Energy **204**, p. 347-358.
https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.01.009

10-DEAN, R. G. and DALRYMPLE, R. A.,(1991), *Water wave mechanics for engineers and scientists*, world scientific publishing company, vol. 2.
http://dx.doi.org/10.1142/1232

11- EVANS, D. V. and PORTER, R.,(1997), *Efficient Calculation of Hydrodynamic Properties of OWC-Type Devices*, Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering **119**(4), p. 210-218.
https://doi.org/10.1115/1.2829098

12-RENZI, E. and DIAS, F.,(2012), *Resonant behaviour of an oscillating wave energy converter in a channel*, Journal of Fluid Mechanics **701**, p. 482-510.
https://doi.org/10.1017/jfm.2012.194

13-RENZI, E. and DIAS, F.,(2013), *Hydrodynamics of the oscillating wave surge converter in the open ocean*, European Journal of Mechanics - B/Fluids **41**, p. 1-10.
https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2013.01.007

14-RENZI, E., DOHERTY, K., HENRY, A. and DIAS, F.,(2014), *How does Oyster work? The simple interpretation of Oyster mathematics*, European Journal of Mechanics-B/Fluids **47**, p. 124-131.
https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2014.03.007

15-GOMES, R., LOPES, M., HENRIQUES, J., GATO ,L. and FALCÃO, A.,(2015), *The dynamics and power extraction of bottom-hinged plate wave energy converters in regular and irregular waves*, Ocean Engineering **96**, p. 86-99.
http://dx.doi.org/10.1016/j.oceaneng.2014.12.024

16- L. Wilkinson, K. Doherty, J. Nicholson, T. Whittaker, and S. Day, *"Modelling the Performance of a Modular Flap-Type Wave Energy Converter,"* in 11th European Wave and Tidal Energy Conference, 2015, No. November..

17-WILKINSON, L., WHITTAKER, T., THIES, P. R., DAY, S. and INGRAM, D.,(2017), *The power-capture of a nearshore, modular, flap-type wave energy converter in regular waves*, Ocean Engineering **137**, p. 394-403.
https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.04.016

18-SAEIDTEHRANI, S.,(2021), *Flap-type wave energy converter arrays: Nonlinear dynamic analysis*, Ocean Engineering **236**, p. 109463.
https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109463

19-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

20-ABAZARI, A. and AZIMINIA, M. M.,(2023), *Water wave power extraction by a floating surge oscillating WEC comprising hinged vertical and horizontal flaps*, Journal of Energy Management and Technology **7**(1), p. 27-33.
https://dorl.net/dor/20.1001.1.25883372.2023.7.1.4.4

21-ABAZARI, A., BEHZAD, M. and THIAGARAJAN, K. P.,(2022), *Experimental*

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.41.2.2]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.14]

Assessment of Hydrodynamic Coefficients for a Heave Plate Executing Pitch Oscillations, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering **148**(1), p. 04021038.
http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000683

22- ABAZARI, A., ALVANDI, M., BEHZAD, M. and THIAGARAJAN, K. P.,(2020), *Vortex shedding modes around oscillating non-uniform double heave plates*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment **235**(2), p. 558-569.
https://doi.org/10.1177/1475090220966910

23- MEI, C. C., STIASSNIE, M. A. and YUE, D. K.-P.,(2005), *Theory and applications of ocean surface waves: Part 1: linear aspects*, World Scientific.
https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2006JFM...568..474P/doi:10.1017/S0022112006223139

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1402.19.41.2.2]
[DOI: 10.61186/marineeng.19.41.14]