

مدلسازی و تحلیل سیستم مبدل جاذب نقطه‌ای انرژی امواج دریا برای یک بویه استوانه‌ای با بهره‌گیری از حرکات هیو

محمد رضا نگهداری^۱، حسین دلایلی^۲، محمد حسن مقدس^۳

negahdari@cmu.ac.ir

- ۱- دانشجوی دکتری، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، شاهین شهر
 ۲- استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، شاهین شهر
 ۳- استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، شاهین شهر

چکیده

امروزه بیش از ۸۰ درصد انرژی‌های تولیدی در جهان از سوخت‌های فسیلی بدست می‌آیند. بنابراین جستجو در استفاده از روش‌های نوین جهت بهره برداری از منابع انرژی نو مورد توجه می‌باشد. یکی از منابع مهم انرژی، آبها و دریاها می‌باشند. امواج دریا از منابع مهم تولید انرژی هستند که با استفاده از تکنولوژی و وسایل مدرن می‌توان آن را به انرژی مورد نیاز جهت مصارف مختلف تبدیل نمود. در این مقاله نیز با بهره‌گیری از این موضوع، به مدل سازی وسیله ای می‌پردازیم که بتوان از انرژی حاصل از امواج دریا و تبدیل آن به انرژی الکتریکی جهت مصارف مختلف استفاده نمود. این مبدل دارای دارای بویه استوانه ای شکل بوده و از حرکات هیو تولید انرژی می‌نماید. شبیه سازی معادلات ریاضی حاکم بر مبدل در محیط سیمولینک متلب انجام گرفته است و نتایج مدل سازی و تحلیل شامل جابجایی، سرعت، نیرو و توان مورد بررسی قرار گرفته است.

واژگان کلیدی: انرژی امواج دریا، مبدل جاذب نقطه‌ای، حرکت هیو، توان PTO، سیمولینک Matlab.

تاریخ دریافت مقاله:	۹۳/۰۳/۱۶
تاریخ پذیرش مقاله:	۹۴/۱۰/۲۹

۱- مقدمه

با افزایش روز افزون جمعیت جهان و محوری بودن منابع انرژی، کلیه کشورهای با مشکل انرژی روبه‌رو هستند. انرژی برای تمام انسانها مسئله‌ای اساسی است. انرژی در تمام ابعاد جامعه انسانی رسوخ کرده و جنبه‌های مختلف آن از زندگی روزانه افراد گرفته تا سیاستهای جهانی و بین المللی و طرحهای توسعه ملی را تحت تاثیر قرار داده است. انرژی در سالهای اخیر به علت پدیده‌های که بحران جهانی انرژی نام گرفته، اهمیت زیادی کسب کرده است. اوایل دهه ۱۹۷۰ آشکار شد که سوخته‌های فسیلی که از سالها پیش پایه و اساس موازنه انرژی را در اقتصاد جهان تشکیل می‌دادند، در آینده ای نه چندان دور تمام خواهند شد. در این زمان تناسب بین کشف ذخایر سوخته‌های فسیلی و رشد مصرف سوخت به هم خورد و محاسبات علمی چشم جهانیان را باز کرد که تا یک نسل دیگر این ذخایر به پایان خواهد رسید.

متخصصان بر این باورند که با استفاده از انرژیهای پاک نظیر انرژی خورشیدی، باد، زمین گرمایی، هیدروژنی، امواج دریا و غیره به جای انرژیهای حاصل از سوخته‌های فسیلی از آلودگیهای زیست محیطی و خطرات ناشی از آن جلوگیری خواهد شد. انرژیهای تجدیدپذیر به ویژه برای کشورهای در حال توسعه از جاذبه ی بیشتری برخوردار است، لذا در برنامه‌ها و سیاستهای بین المللی از جمله در برنامه‌های سازمان ملل متحد در راستای توسعه پایدار جهانی نقش ویژه‌ای به منابع تجدیدپذیر انرژی محول شده است، اما سازگار کردن این منابع انرژی با سامانه فعلی مصرف انرژی جهانی هنوز با مشکلاتی همراه است که بررسی و حل آنها حجم مهمی از تحقیقات علمی جهان را در دهه‌های اخیر به خود اختصاص داده است.

دولت ایران اقدامات مثبتی را برای توسعه منابع انرژی تجدیدپذیر در پیش گرفته است. انرژی بادی و خورشیدی، زمین گرمایی، انرژی امواج، انرژی هیدروژنی و انرژی هسته‌ای نمونه‌هایی از منابع انرژی تجدید پذیر و پاک به شمار می‌روند که پتانسیل مناسبی در کشور در به کارگیری این منابع انرژی وجود دارد [۱].

تمرکز بیش از ۲۰ درصد جمعیت کشور و بیشترین مراکز تجاری و پالایشگاهی در خط ساحلی ۲۷۰۰ کیلومتری آبهای ایران با توان متوسط امواج در حدود ۳/۵ kw/m و

همچنین وجود جزایر بسیار در خلیج فارس، که گاهاً به دلیل فقدان انرژی الکتریسیته خالی از سکنه شده‌اند، پارامترهایی است، که می‌تواند ایران را به یکی از پتانسیل‌های منطقه در جذب انرژی‌های دریایی تبدیل نماید. انرژی امواج دریا، بواسطه روش‌های استحصال آن‌ها، پاک‌ترین و غیرآلاینده‌ترین نوع انرژی در بین انرژی‌های تجدیدپذیر است و برای استحصال این انرژی از دو قرن گذشته راه‌های مختلفی ارائه گردیده است. اولین قدم در سال ۱۹۶۵ میلادی توسط ژاپنی‌ها با ساختن ده‌ها فانوس دریایی که با انرژی امواج کار می‌کردند، صورت گرفت.

دستگاه‌هایی مانند: ستون نوسانگر آب^۱، نوسانگر موج ارشمیدس^۲، جاذب نقطه‌ای انرژی امواج و دستگاه مبدل پلامیس^۳ را می‌توان نمونه‌های موفق دانست، که با تغییرات دامنه امواج و در مناطقی با توان حداقل ۲۰kw/m، در سواحل اقیانوسی امریکا، استرالیا، اسکاتلند، پرتقال، انگلستان کار می‌کنند (نظری و همکاران، ۱۳۹۰).

تاکنون مطالعات مختلفی در این زمینه توسط تئوری‌های مربوط به حرکت امواج انجام گرفته است [۲]. استفاده از روش‌های مختلف در سال‌های اخیر به منظور تبدیل انرژی امواج به انرژی الکتریکی توسط محققان مورد بررسی قرار گرفته است. استفاده از روش‌های عددی در این زمینه به عنوان نمونه ای از این فعالیت‌ها می‌باشد [۳]. مطالعات تئوری و کاربردی موضوع تا اواخر دهه ۹۰ میلادی ادامه داشت [۴-۶].

اولین نتایج در سال ۱۹۷۶ توسط نیومن^۴ و همکارانش مورد بحث و بررسی قرار گرفت [۷]. این نتایج از روش‌های عددی و تحلیلی ادامه یافت و بعد از آن نیز ساخت مدل به عنوان موثرترین فعالیت عملی و کاربردی در این زمینه مورد توجه قرار گرفت. اساس و ساختار این مدل‌ها به گونه‌ای است که امواج دریا را دریافت کند و با استفاده از تولید انرژی و انتقال به انرژی به ژنراتور، انرژی مورد نیاز را برای مصارف مختلف فراهم کند.

در این مقاله ضمن بررسی فرآیند تولید انرژی از امواج دریا به بررسی روش‌های ممکن جهت تبدیل انرژی فوق می‌پردازیم. اساس و ساختار این وسایل ساده بوده و روش

¹ Oscillating Water Column (OWC)

² The Archimedes Wave Swing (AWS)

³ Pelamis Wave Energy Converter

⁴ Newman

می‌شود. همانطور که اشاره گردید امواج دریا به عنوان یکی از منابع مهم انرژی دارای اهمیت زیادی می‌باشد. در این قسمت با استفاده از تئوری موج خطی به بررسی و ارتباط پارامترهای موج با موضوع و محاسبه انرژی حاصل از امواج دریا می‌پردازیم. همانگونه که در شکل (۱) می‌بینید، مشخصات اصلی یک موج نشان داده شده است.

مهم ترین پارامترهای موج عبارتند از:

f: فرکانس در ارتباط با طول موج (λ) و سرعت افقی (v)

λ : طول موج^۲ بر حسب (m)

T: دوره تناوب^۳ (s)

a: دامنه موج^۴ (m)

H: فاصله قله تا قعر موج که برابر 2a می‌باشد.

v: سرعت افقی موج که طبق رابطه ۱ بیان می‌گردد.

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda f \quad (\text{in m/s}) \quad (1)$$

و فرکانس زاویه‌ای^۵ برابر است با:

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \quad (\text{rad/s}) \quad (2)$$

آزمایش‌ها نشان داده است که مقدار طول موج در سطح مطابق رابطه زیر می‌باشد:

$$\lambda = \frac{2\pi g}{\omega^2} \quad (\text{in m}) \quad (3)$$

و از روابط فوق می‌توان نوشت:

$$T = \sqrt{2\pi\lambda/g} \quad (s) \quad (4)$$

که مقدار g برابر 9.81 m/s^2 است.

۲-۱- انرژی و توان موج

حال باید دید مقدار انرژی کل حاصل از موج چقدر است. مقدار دانسیته انرژی موج^۶ بر حسب مشخصات موج به صورت زیر محاسبه می‌گردد [۱۲]:

$$E_{\text{density}} = \frac{\rho_{\text{water}} g H^2}{8} = \frac{\rho_{\text{water}} g A^2}{2} \quad (5)$$

و توان معادل آن برابر است با:

$$P_{\text{density}} = \frac{E_{\text{density}}}{T} = \frac{\rho_{\text{water}} g H^2}{8T} = \frac{\rho_{\text{water}} g A^2}{2T} \quad (6)$$

عملکرد اکثر آنها بر مبنای روش‌های ارتعاشی تبدیل انرژی موج^۱ و حرکت یک درجه آزادی می‌باشد. به این ترتیب که این وسایل با استفاده از یک حرکت ارتعاشی و با روشی که در ادامه به آن خواهیم پرداخت، در انجام هدف یاد شده عمل خواهند کرد. بعد از آن نیز ساخت مدل به عنوان موثرترین فعالیت عملی و کاربردی در این زمینه مورد توجه قرار گرفت. این فعالیت‌ها به صورت تکاملی تا سال ۲۰۰۵ با ساخت مدل در ابعاد نمونه آزمایشگاهی ادامه یافت. روند تغییرات تکاملی بیشتر بر اساس نحوه عملکرد مدل‌ها در تولید انرژی با وسایل مختلف بوده است [۸]. مزیت استفاده از این روش‌ها بدلیل جایگزینی آن با تکنولوژی‌های خاص و تجهیزات پیچیده و در عین حال ارزان بودن و قابل دسترس بودن آن در مقایسه با سایر روش‌ها است.

بر اساس پژوهش R, Shafaghat و همکاران (۲۰۱۴)، بر میزان هم‌خوانی تکنولوژی‌های استحصال انرژی امواج با شرایط اقلیمی و مشخصات امواج حاکم بر دریا‌های ایران، مبدل‌های جاذب نقطه‌ای بعنوان بهترین گزینه پیشنهاد شده است.

امروزه بخشی از برق مصرفی در جزیره مادیرا پرتغال و جزایر گریک توسط مبدل جاذب نقطه‌ای انرژی امواج (Aquabuoy) تامین می‌شود و مبدل جاذب نقطه‌ای SEAREV و OPT به ترتیب در جزیره اژورس پرتغال (Azores) و ایرلند در حال بهره برداری هستند. پژوهش‌های مختلفی در زمینه مبدل‌های جاذب نقطه‌ای انجام شده است. پژوهش Hyeok-Jun Koh و همکارانش (۲۰۱۳) در برآورد تاثیرات پدیده تشدید بر بویه‌های جاذب انرژی [۵]، پژوهش J, Pastor و همکارانش (۲۰۱۴) [۶] بر آثار اشکال بویژه بر میزان جذب انرژی موج و پژوهش Ye Li و همکارانش (۲۰۱۳) [۹] در مرکز ملی انرژی‌های تجدیدپذیر امریکا، بر روی مبدل جاذب نقطه‌ای انرژی امواج بر اساس ابعاد مدل OPT-PB150، نمونه‌هایی از تحقیقات در سال‌های آتی است [۱۰].

۲- امواج دریا و پارامترهای موج مرتبط با موضوع

وزش باد روی سطح تماس آب و هوا عامل اصلی به وجود آورنده امواج است. بخش عمده‌ای از انرژی امواج در سواحل و مناطق نزدیک به ساحل مستهلک

¹ Pendulum Wave Energy Converter

² Wave Length

³ Time Period

⁴ Amplitude

⁵ Angular Frequency

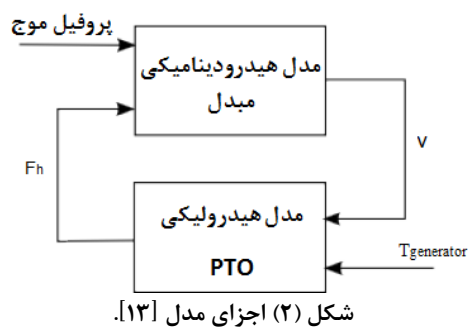
⁶ Energy Density of a Wave

حرکت مبدل در حوزه فرکانس بررسی شده و سپس با حل معادلات در حوزه زمان، نتایج لازم بدست آمده است.

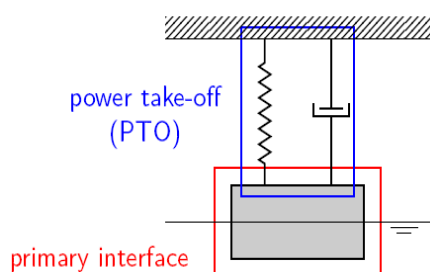
۳- مدل هیدرودینامیکی بویه استوانه‌ای شکل

مدلسازی یک طرح واقع بینانه با در نظر گرفتن فاکتور هزینه‌ها و نهایتاً دستیابی به یک طرح اقتصادی از پارامترهای اساسی طراحی می‌باشد. در شکل (۲) اجزای مدل در این تحقیق نشان داده شده است. فرضیات:

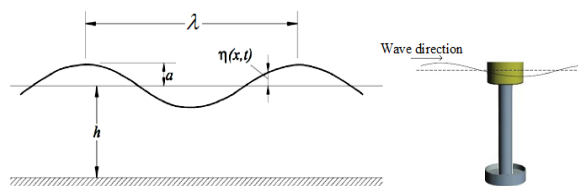
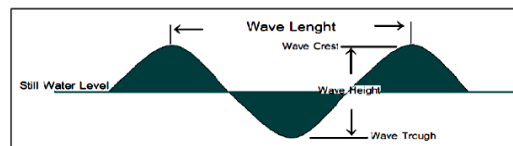
- هیدرودینامیک خطی^۳
- برخورد یک جهته موج^۴
- عمق یکنواخت آب^۵
- استخراج انرژی از امواج توسط هر مبدل انرژی موج^۶ (WEC) نیازمند این است که امواج نیرویی را به مکانیزم‌های عکس‌العملی وارد کنند و این مکانیزم‌ها قادر به مقاومت در برابر نیروی حاصل از امواج باشند. مکانیزمی که با آن انرژی بین امواج و دستگاه WEC منتقل و در نهایت به شکل انرژی قابل استفاده تبدیل می‌شود، سیستم توان PTO نامیده می‌شود. در اشکال (۳) و (۴) سیستم PTO مبدل امواج دریا نشان داده شده است.



شکل (۲) اجزای مدل [۱۳].



شکل (۳) سیستم PTO مبدل امواج [۱۳].



شکل (۱) مشخصات اصلی یک موج [۱۱].

مطابق تئوری موج خطی، مقدار انرژی کل ناشی از انرژی پتانسیل و جنبشی برای یک موج منحصر به فرد در هر طول موج به ازای عرض واحد از قله موج^۱ برابر است با:

$$E = \frac{\rho g H^2 \lambda}{8} \quad (J/m) \quad (7)$$

با جایگذاری مقدار λ از رابطه (۳) خواهیم داشت:

$$E = \frac{\pi \rho g^2 H^2}{4\omega^2} \quad (J/m) \quad (8)$$

از رابطه (۲) می‌توان مقدار ω را در رابطه فوق قرار داد. بنابراین خواهیم داشت [۱۲]:

$$E = \frac{1}{16\pi} \rho g^2 H^2 T^2 \quad \left(\frac{J}{m}\right) \quad (9)$$

مقدار توان حداکثر در شرایط ایده آل (P_{ideal}) متناسب با انرژی کل حاصل از موج می‌باشد که به ازای عرض واحد قله موج^۲ از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$P_{ideal} = \frac{1}{16\pi} \rho g^2 H^2 T \quad \left(\frac{W}{m}\right) \quad (10)$$

با جایگذاری مقادیر چگالی (ρ) و $g = 9.81 m/s^2$ در این رابطه، مقدار توان مطابق رابطه زیر بدست می‌آید:

$$P_{ideal} = 1915 H^2 T \quad \left(\frac{W}{m}\right) \quad (11)$$

از رابطه فوق چنین بر می‌آید که توان تولیدی حاصل از انرژی امواج به دوره تناوب (T) و دامنه موج ($a=H/2$) بستگی دارد.

با توجه به رابطه (۲) و ارتباط دوره تناوب و فرکانس موج، تاثیر فرکانس موج در میزان دامنه یا جابجایی بویه به علت وقوع پدیده تشدید به منظور جذب بیشترین نیرو و توان در ادامه این تحقیق بررسی خواهد شد. همچنین معادلات

³ Linear Hydrodynamics

⁴ Unidirectional Incident Wave

⁵ Uniform Water Depth

⁶ Wave Energy Convertor

¹ Wave Energy Per Unit Crest Width

² Power Per Meter of Wave Front (Wave Crest)

$$\ddot{z} + 2\zeta\omega_n\dot{z} + \omega_n^2 z = 0 \quad (15)$$

طبق تئوری ارتعاشی می توان فرکانس طبیعی سیستم و ضرایب میرایی هیدرودینامیک آن را بصورت زیر بیان نمود:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{c}{m_a + m}} \quad (16)$$

$$\zeta = \frac{b}{2\omega_n(m_a + m)} \Rightarrow \frac{b}{2\sqrt{ac}} \quad (17)$$

همانطور که می دانیم دامنه موج را می توان با رابطه زیر بیان نمود:

$$A = A_0 \cos(\omega t) \quad (18)$$

بنابراین پاسخ دامنه سیستم (z) در فازهای مختلف جابجایی (ε) تحت اثر موج برابر است با:

$$z = z_0 \cos(\omega t - \varepsilon) \quad (19)$$

A_0 و z_0 مقادیر ثابتی هستند و ω فرکانس زاویه‌ای $\omega = 2\pi/T$ است. T پریود و ε زاویه فاز است [۱۴].

در شکل (۵) نیروهای وارد بر بویه شناور نشان داده شده است. با استفاده از قانون دوم نیوتن می توان معادله حرکت مبدل در حوزه زمان را بصورت زیر بیان نمود:

$$m\ddot{z}(t) = F_h(t) + F_e(t) + F_r(t) + F_{PTO}(t) \quad (20)$$

در رابطه فوق m جرم بویه و \ddot{z} شتاب حرکت هیو، F_e نیروی تحریک، F_r نیروی دمپینگ، F_b نیروی بویانسی^۱ و F_{PTO} نیروی ناشی از سیستم PTO بر مبدل شناور، نیروهای دیگر شامل f_h و f_e و f_r به سبب تئوری موج خطی که عبارتند از:

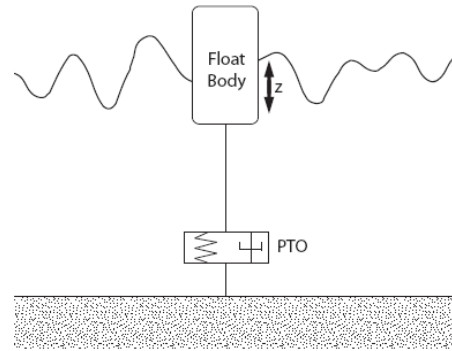
f_h نیروی هیدرواستاتیک که برابر است با [۱۵]:

$$F_h(t) = -K_h z(t) \quad (21)$$

f_e نیروی تحریک موج ناشی از عکس العمل برخورد موج به جسم وابسته به f_r نیروی تحریک و دمپینگ با خطی سازی معادلات مورسون^۲ بصورت زیر نوشته می شود:

$$\begin{aligned} F_e &= \mu\dot{\eta} + \lambda\eta + K\eta \\ F_r &= -\mu\dot{z} - \lambda z \end{aligned} \quad (22)$$

که μ برابر با مقدار جرم افزوده^۳، λ عبارت دمپینگ و مقدار جابجایی موج برخورد η بصورت مشتق مرتبه ۲ در معادله فوق ظاهر شده است. نیروی بویانسی F_b نیز با رابطه زیر بیان می گردد [۱۱]:



شکل (۴) نمایش بویه شناور مبدل انرژی امواج [۱۱].

جهت استخراج بیشترین مقدار توان از امواج، سیستم PTO باید توانایی ایجاد یک نیروی مهارکننده متغیر با زمان، همراه با عکس العمل‌های سیستم WEC را دارا باشد. این مسئله نیازمند اندازه‌گیری واقعی عکس العمل‌ها و واکنش‌های WEC و همچنین کنترل سیستم PTO در طی سیکل موج است. بعلاوه، برای مؤثرتر بودن فعالیت‌های دستگاه در حالات مختلف دریا، سیستم کنترل‌کننده و همچنین سیستم PTO باید به گونه ای قادر به وفق دادن خود به شرایط محیط باشند به طوری که:

- ۱) جذب و دریافت قدرت در دریاهای کوچک به بیشترین مقدار خود برسد.
- ۲) ریسک آسیب دیدن دستگاه‌ها در دریاهای بزرگ به حداقل خود برسد.

۴- هیدرودینامیک حرکت هیو

با استفاده از قانون دوم نیوتن برای حرکت هیو برای یک سیلندر نوسان کننده خواهیم داشت [۱۴].

$$\sum F = m\ddot{z} = -F_b + \rho g(d - z)A_w - b\dot{z} - m_a\ddot{z} \quad (12)$$

F_b نیروی بویانسی، d عمق فرورفتگی در آب در حالت تعادل، m_a میزان جرم افزوده خواهد بود. بنابراین مقدار نیروی بویانسی برابر است با:

$$F_b = \rho g d A_w \quad (13)$$

بنابراین معادله حرکت به فرم زیر خواهد بود:

$$a\ddot{z} + b\dot{z} + cz = 0 \quad (14)$$

که a مقدار جرم سیلندر (m) و جرم افزوده آن (m_a)، b ضریب دمپینگ، c ضریب نیروی هیدرواستاتیک ($\rho g A_w$) و A_w مساحت صفحه آب‌خور می باشد. با توجه به توضیحات پیشین می توان معادله فوق را به فرم زیر بازنویسی نمود:

¹ Buoyant Force

² Morison Equations

³ Added Mass

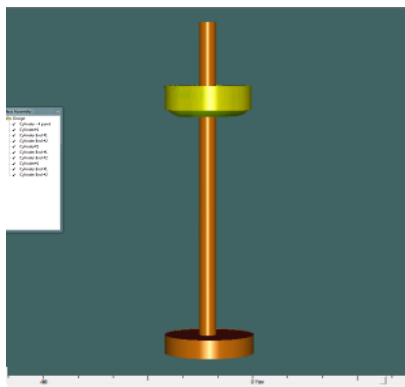
بنابراین در این تحقیق دو فرم استوانه ای و کسینوسی با یکدیگر مقایسه شده اند. محاسبه نیروی مقاومت (درگ) بویه مبدل توسط ماژول Hullspeed بسته نرم افزار Maxsurf انجام گرفته که نمودار آن در شکل (۷) نشان داده شده است. این نمودار برای دو حالت بویه به صورت استوانه ای و فرم کسینوسی با یکدیگر مقایسه شده است. همانطور که در شکل مشاهده می شود مقاومت فرم کسینوسی کمتر است.

۷- شبیه سازی و تحلیل معادلات حاکم

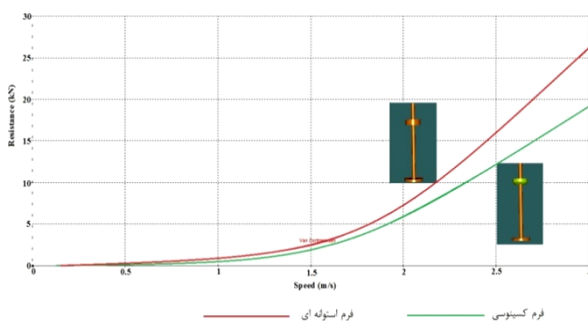
نیروهایی که بر بویه مبدل وارد می شود شامل نیروهای هیدرواستاتیک و هیدرودینامیک می باشد. در حالت کلی این نیروها بصورتی که در شکل (۸) مشاهده می گردد دسته بندی شده است. در شکل (۹) نیز نیروهای موثر در مدل سازی بویه مبدل نشان داده شده است.

جدول (۱) ابعاد و اجزای بویه مبدل.

اجزای مبدل	قطر (متر)	ارتفاع (متر)
Buoy	9.5	3
Spar	2.3	44.3
Damper	11.8	1.5



شکل (۶) دستگاه مبدل امواج دریا.



شکل (۷) مقایسه نمودار نیروی مقاومت برای فرم استوانه و کسینوسی بویه مبدل امواج دریا.

$$F_b = -Kz = -\rho g \pi r^2 z \quad (23)$$

که ρ مقدار دانسیته آب دریا، g شتاب جاذبه، r شعاع شناوری و z برابر با مقدار جابجایی بویه شناور نسبت به حالت تعادل است.

۵- مدل مبدل انرژی امواج دریا به انرژی الکتریکی

با مطالعه و بررسی های بعمل آمده در خصوص طرح های ارائه شده در زمینه تبدیل انرژی امواج دریا به انرژی الکتریکی در این بخش به ارائه طرح اولیه خواهیم پرداخت. همانطور که پیش تر نیز اشاره گردید، مدل ارائه شده دارای یک بویه می باشد و مهمترین مشخصه های طرح شامل موارد زیر است:

الف- مبدل مجهز به یک بویه یا جسم شناور است، چرا که حرکات یک بویه دارای بازده مناسبی برای جذب انرژی است.

ب- نحوه جذب انرژی توسط مبدل بواسطه حرکات عمودی یا هیو در امواج می باشد. بعبارت دیگر از بالا و پایین آمدن بویه شناور در آب برای انتقال و تبدیل انرژی امواج به انرژی مکانیکی می توان بهره برداری لازم را نمود.

با توجه به توضیحات پیشین، بدنه یک مبدل OPT Hydraulic که با سیستم مدار فشار هیدرولیک کار می کند انتخاب گردید. به سبب انجام مقایسه این مبدل مشابه مبدل Bosma و مبنای انتخاب مدل در تحقیق حاضر می باشد. جهت عملی شدن اصول عملکرد سیستم، دستگاه در سه بخش اصلی شامل بویه شناور جاذب انرژی^۱، استوانه بدنه اصلی و صفحه مهار خیز هیو^۲ مدل سازی می گردد.

۶- مدل سازی بویه مبدل

شبیه سازی مدل بویه در نرم افزار Maxsurf انجام گرفته است. در شکل (۶) مدل سازی این مبدل نشان داده شده است. این مدل شامل ۳ قسمت می باشد و ابعاد اجزای مختلف مدل در جدول (۱) مشخص شده است. بر مبنای پژوهش J, Pastor و نتایج این تحلیل استحصال انرژی امواج به ترتیب، توسط بویه کسینوسی (Cosine)، نسبت به مدل های دیگر دارای برتری نسبی می باشد.

¹ Bouy or Float

² Heave Plat

نیروی دمپینگ را می توان مجموع اثرات جرم افزوده (added mass) و دمپینگ (damping radiation) و بصورت رابطه (۲۶) بیان نمود [۷]:

$$F_r(\omega) = -(-\omega^2 M_a(\omega) + j\omega C(\omega))Z(\omega) \quad (26)$$

همچنین برآیند نیروهای هیدرواستاتیک حاصل از نیروی وزن و بویانسی نیز بصورت رابطه (۲۷) خواهد بود:

$$F_h(\omega) = -\rho g A Z(\omega) \quad (27)$$

در آنالیز RAO رفتارها و پاسخ یک سازه را در برابر شرایط دریا نشان می دهد و در تحلیل های هیدرودینامیک دارای اهمیت زیادی است. همچنین توسط این آنالیزها می توان فرکانس هایی را که در آن بیشترین توان قابل استخراج می باشد را تعیین نمود. شکل (۱۰) تحلیل RAO^۱ برای بویه مبدل نشان داده شده است. این پارامتر طبق رابطه (۲۸) بیان می گردد:

$$RAO = \frac{\xi}{\eta} \left[\frac{m}{m} \right] \quad (28)$$

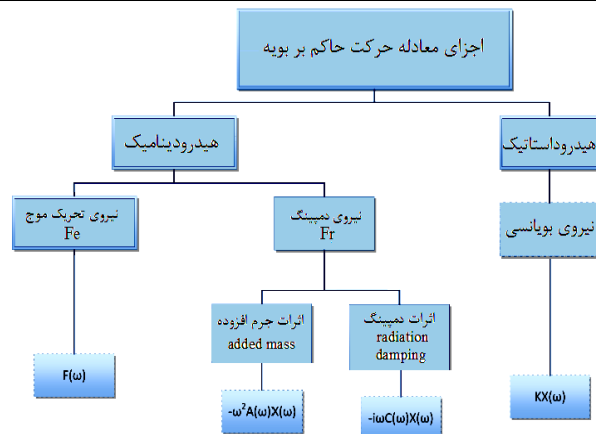
که ξ دامنه حرکت هیو و η دامنه موج برخوردی به جسم است. همانطور که در شکل (۱۰) نیز مشاهده می شود در فرکانس های ۱ تا ۲ رادیان بر ثانیه به دلیل پدیده تشدید مقدار جابجایی حرکت بویه حداکثر خواهد بود.

۸- تحلیل و آنالیز بویه مبدل امواج در حوزه زمان

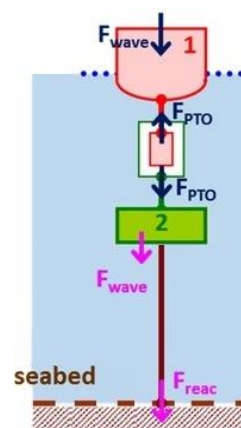
تا به حال آنالیز و بررسی رفتار بویه توسط بسته نرم افزاری هیدرودینامیکی در حوزه فرکانس انجام گرفت و نتایج آن استخراج و نشان داده شد. در مرحله بعد بایستی نتایج شبیه سازی حاصل از حوزه فرکانس را به حوزه زمان برد تا بتوان رفتارهای حرکتی سیستم از قبیل جابجایی، سرعت، شتاب و نیز نیروی PTO و توان استحصالی را بدست آورد. در حالت کلی معادله حرکت وارد بر سیستم در حوزه زمان بصورت زیر خواهد بود [۷]:

$$M\ddot{z}(t) = F_e(t) + F_r(t) + F_h(t) + F_p(t) + F_m(t) + F_{PTO}(t) \quad (29)$$

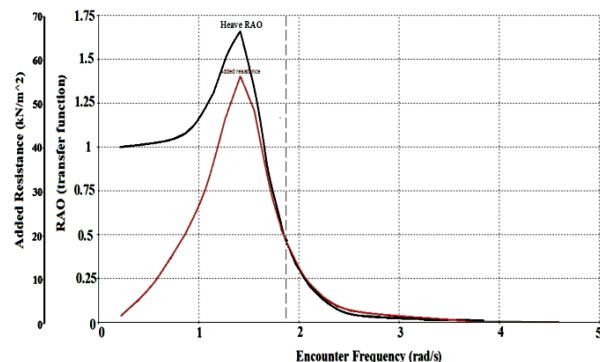
که M جرم جسم و مولفه های نیرو شامل نیروی تحریک موج، نیروی دمپینگ، نیروی هیدرواستاتیک، نیروی حاصل از اثرات ویسکوزیته سیال، نیروی ناشی از وجود مهار (در صورت وجود) و نیروی PTO می باشد. نیروی PTO، نیروی جذب شده توسط مبدل برای تبدیل به انرژی قابل استفاده



شکل (۸) تقسیم بندی نیروهای موثر بر بویه مبدل [۷].



شکل (۹) نمایش نیروهای موثر در مدلسازی بویه مبدل.



شکل (۱۰) نمودار RAO بویه مبدل.

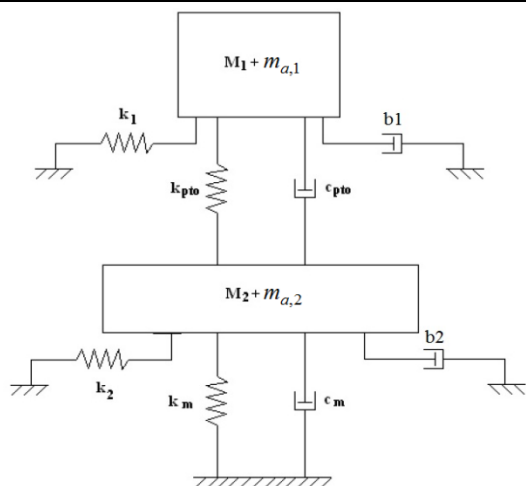
با توجه به قانون دوم نیوتن، مجموع کل نیروهای وارد بر بویه مبدل توسط رابطه (۲۴) بیان می گردد:

$$M\ddot{z}(t) = F(t) \quad (24)$$

همانطور که نمودار شکل (۱۰) نیز مشخص است، نیروی کل برابر با مجموع نیروی تحریک موج، نیروی دمپینگ و هیدرواستاتیک می باشد. لذا خواهیم داشت [۷]:

$$-\omega^2 MZ(\omega) = F_e(\omega) + F_r(\omega) + F_h(\omega) \quad (25)$$

¹ Response Amplitude Operator



شکل (۱۱) نمودار نیرویی یا جسم آزاد سیستم مبدل انرژی امواج دریا.

به جهت بررسی معادلات و انتقال آنها از حوزه فرکانس به حوزه زمان بویه را متشکل از ۲ جسم شامل شناور (Float) و دو قسمت دیگر (Spar, Damper) به عنوان یک جسم در نظر گرفته می شود. لذا معادلات حرکت در حوزه زمان بصورت زیر نوشته می شود:

(۳۹)

$F_{e1} - F_{r11} - F_{r12} - F_{PTO} = \rho g A_1 z_1 + b_1 \dot{z}_1 + (M_1 + m_{a,1}) \ddot{z}_1$
 $F_{e2} - F_{r22} - F_{r21} + F_{PTO} - F_m = \rho g A_2 z_2 + b_2 \dot{z}_2 + (M_2 + m_{a,2}) \ddot{z}_2$
 که در رابطه فوق $F_{r_{ij}}$ نیروی دمپینگ مربوط به آثار جرم افزوده است و مولفه های آن بصورت زیر خواهد بود [۱۶]:

$$\begin{aligned} F_{r11} &= F_{r1} = m_{11} \ddot{z}_1 + b_1 \dot{z}_1 \\ F_{r22} &= F_{r2} = m_{22} \ddot{z}_2 + b_2 \dot{z}_2 \\ F_{r12} &= m_{12} \ddot{z}_2 \\ F_{r21} &= m_{21} \ddot{z}_1 \end{aligned} \quad (40)$$

که m_{ij} مولفه های ماتریس جرم افزوده و $b1$ و $b2$ ضرایب میرایی هیدرودینامیک بوده که مقادیر آنها از تحلیل هیدرودینامیکی در معادلات جایگذاری می گردد. همچنین ترم های دیگر معادله حرکت بصورت زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} F_{h1} &= K_1 z_1 = \rho g A_1 z_1 = \rho g \pi r_{Buoy}^2 z_1 \\ F_{h2} &= K_2 z_2 = \rho g A_2 z_2 = \rho g \pi r_{Spar}^2 z_2 \\ F_m &= -K_m z_2 \end{aligned} \quad (41)$$

در روابط فوق، مقادیر K_1 ، K_2 ، K_m به ترتیب ضرایب هیدرواستاتیک و ثابت مهار بویه می باشند. همچنین برای محاسبه نیروی PTO می توان رابطه زیر را بیان نمود.

$$F_{PTO} = -C_{PTO} \frac{dz}{dt} - K_{PTO} z \quad (42)$$

است. نیروی تحریک موج توسط تابع تبدیل از حوزه فرکانس به حوزه زمان و بصورت زیر نوشته می شود:

$$F_e(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \eta(\tau) F_t(t-\tau) d\tau \quad (30)$$

که $\eta(t)$ تغییرات موج در سطح است. پس خواهیم داشت:

$$F_t(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (31)$$

برای نیروی دمپینگ نیز با توجه به تابع تبدیل داریم [۷]:

$$F_r(t) = -\int_{-\infty}^t k(t-\tau) \dot{z}(\tau) d\tau - m(\infty) \ddot{z}(t) \quad (32)$$

$$k(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} K(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (33)$$

و ماتریس جرم افزوده بصورت رابطه (۳۴) بیان شده است:

$$m(\infty) = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{12} & m_{22} \end{bmatrix} \quad (34)$$

که برای مقادیر جرم افزوده استوانه نیز داریم:

$$m_a = \rho \pi R^2 L \quad (35)$$

بنابراین با توجه به اثرات جرم افزوده رابطه زیر نوشته می شود [۷]:

$$K(\omega) = R(\omega) + i\omega [m(\omega) - m(\infty)] \quad (36)$$

که در آن $R(\omega)$ ضرایب دمپینگ در حوزه فرکانس و $m(\omega)$ مقادیر جرم افزوده جسم می باشد. همچنین نیروی هیدرواستاتیک نیز بصورت عبارت زیر نوشته می شود:

$$F_h(t) = \rho g A z(t) \quad (37)$$

در صورت وجود مهار نیروی ناشی از آن را می توان به فرم زیر بیان نمود [۷]:

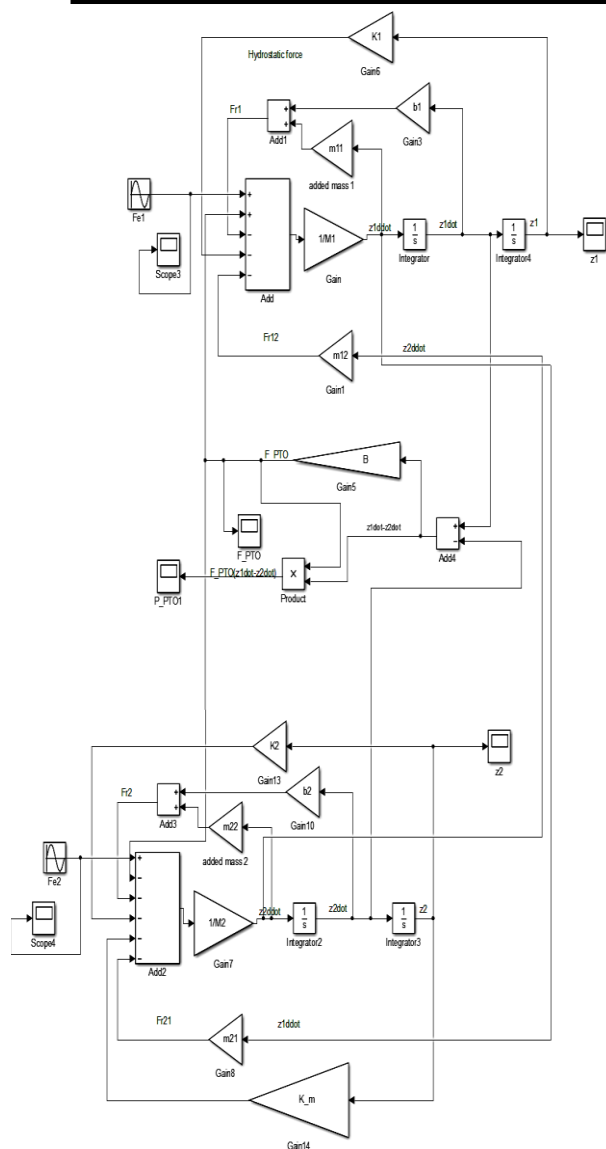
$$F_m(t) = -K_m z(t) \quad (38)$$

که در آن K_m ثابت مهار و دارای مقادیر مشخصی است. شکل (۱۱) نمودار نیرویی یا جسم آزاد مبدل^۱ را نشان می دهد. در بخش بعد ضرایب نشان داده شده در آن شامل ضرایب موجود در معادلات حرکت معرفی خواهند شد.

۹- نتایج حل معادلات در حوزه زمان

با توجه به مدل ارائه شده، ترم های مختلف معادلات حاکم بر بویه مبدل استخراج شده و در ادامه به مدل سازی معادلات در محیط سیمولینک متلب می پردازیم. با توجه به معادلات ارائه شده به حل آنها و استخراج نتایج حاصل می پردازیم.

¹ Free Body Diagram



شکل (۱۲) شبیه سازی معادلات در سیمولینک مطلب.

جدول (۲) مقادیر ضرایب موجود در شبیه سازی معادلات حرکت بویه مبدل امواج.

مقدار	توضیحات	ضرایب
۱۱۷۲۵	جرم Floater	$m_1(kg)$
۲۵۵۰۰	جرم Spar/Damper	$m_2(kg)$
۱۴۵۰۰	مولفه ماتریس جرم افزوده	$m_{11}(kg)$
۱۸۰۰۰	مولفه ماتریس جرم افزوده	$m_{12}(kg)$
۲۸۰۰۰	مولفه ماتریس جرم افزوده	$m_{21}(kg)$
۱۵۰۰۰	مولفه ماتریس جرم افزوده	$m_{22}(kg)$
۲۱۷۰۰۰	ضریب میرایی هیدرواستاتیک Floater	$b_1(N/m/s)$
۲۰۹۰۰۰	ضریب میرایی هیدرواستاتیک Spar/Damper	$b_2(N/m/s)$
۲۵۰۰۰۰	ثابت مهار بویه	$K_m(N/m)$
۳۰۸۰۰۰	ضریب هیدرواستاتیک Floater	$K_1(N/m)$
۳۷۶۰۰۰	ضریب هیدرواستاتیک Spar/Damper	$K_2(N/m)$

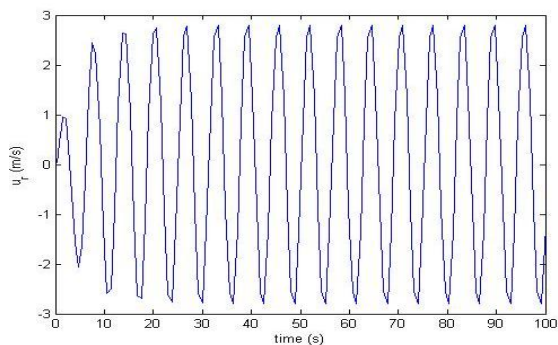
که در رابطه فوق C_{PTO} و K_{PTO} ضرایب میرایی و جذب نیروی PTO می باشند. مقدار این ضرایب با توجه به تحلیل انجام گرفته برای بویه مبدل بهینه توسط Teillant و همکاران در این تحقیق به ترتیب ۳۵۰۰۰ کیلوگرم بر ثانیه و ۵۰ کیلو نیوتن بر متر در نظر گرفته شده است [۱۷]. بنابراین توان حاصل از نیروی PTO نیز بصورت زیر قابل محاسبه خواهد بود:

$$P_{PTO} = F_{PTO} (\dot{z}_1 - \dot{z}_2) \quad (۴۳)$$

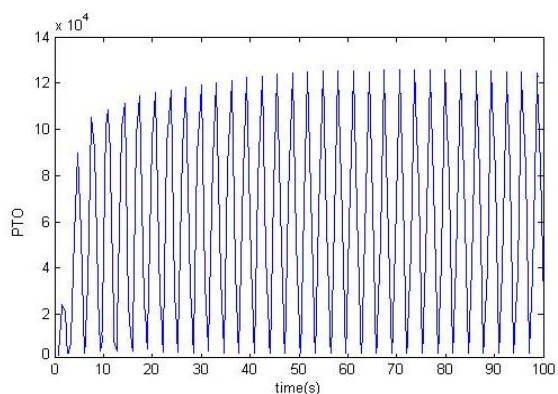
با محاسبات انجام گرفته در بخش هیدرواستاتیک و هیدرودینامیک و نیز تحلیل حرکات مبدل نتایج شبیه سازی و آنالیز صورت گرفته در جدول (۲) بصورت مقادیر عددی آورده شده است. مقادیر بدست آمده در مرحله بعد و پس از شبیه سازی معادلات حرکت مبدل در محیط سیمولینک متلب جایگذاری شده و در نهایت مقادیر جابجایی، سرعت، شتاب، نیرو و توان حاصل از این نیرو بدست آمده است. شبیه سازی معادلات در سیمولینک متلب در شکل (۱۲) نشان داده شده است و نتایج آن شامل (۱۳) تا (۱۵) نشان داده شده است. در این شبیه سازی نیروی تحریک موج به صورت یک سیگنال به بویه وارد می گردد. همچنین تاثیر هر یک از پارامترها در میزان توان خروجی را می توان بررسی و تحلیل نمود. بطور نمونه با توجه به مقدار ضریب میرایی هیدرواستاتیک می توان میزان توان خروجی را بررسی کرد. اگر مقدار ضریب میرایی افزایش یابد، توان خروجی کاهش می یابد.

همانطور که در شکل (۱۶) مشاهده می شود با افزایش این پارامتر، توان بطور قابل ملاحظه ای کاهش یافته است. بررسی نتایج تحقیق حاضر برای یک حالت سیستم نشان می دهد که در صورتی که فرکانس طبیعی سیستم در بازه فرکانس تشدید قرار بگیرد، سبب افزایش نوسان و جابجایی حرکت هیو و در نتیجه بهبود توان خروجی خواهد شد.

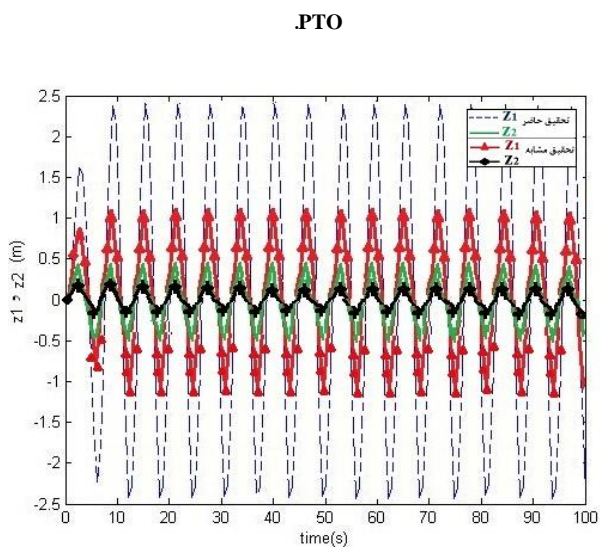
این مطالعه و بررسی با مقایسه نتایج این تحلیل و نتایج تحقیق مشابه [۷] برای مقادیر جابجایی (z_1 و z_2) انجام گرفته و نمودار آن در شکل (۱۷) نشان داده شده است. مطابق با شکل مقادیر جابجایی برای دو قسمت مبدل بصورت جداگانه مقایسه و نشان داده شده است.



شکل (۱۵) نمودار سرعت نسبی $u_{relative\ velocity} (\dot{z}_1 - \dot{z}_2)$.

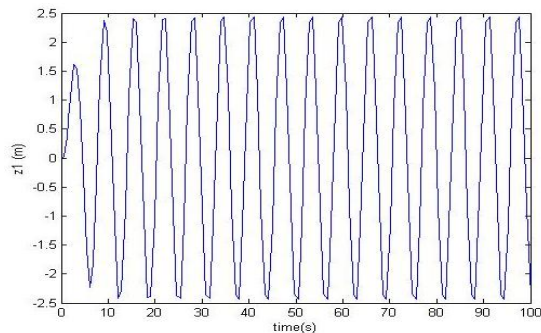


شکل (۱۶) تاثیر افزایش ضریب میرایی در کاهش توان خروجی PTO

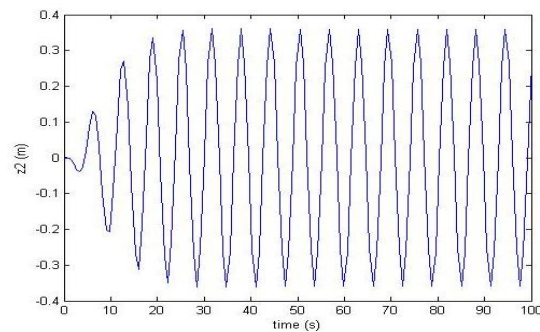


شکل (۱۷) مقادیر جابجایی مربوط به بویه (z1) و دمپر (z2) و مقایسه آن با تحقیق مشابه [۷].

با توجه به بررسی صورت گرفته و نتایج نشان داده شده در نمودار شکل (۱۸) می توان دریافت که با افزایش مقدار جابجایی بویه، میزان توان جذب شده افزایش می یابد. این موضوع با مقایسه میزان توان خروجی برای ۲ حالت مختلف و به ازای مقادیر جابجایی نشان داده شده در شکل (۱۷) نشان داده شده است.

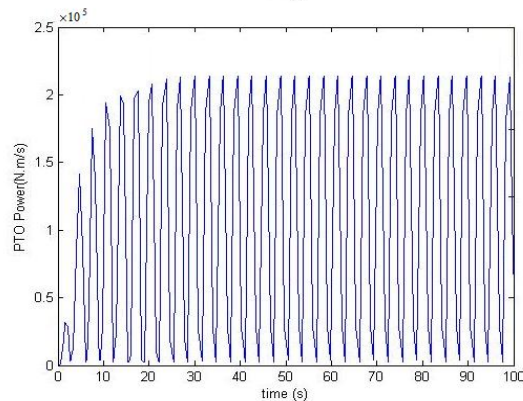
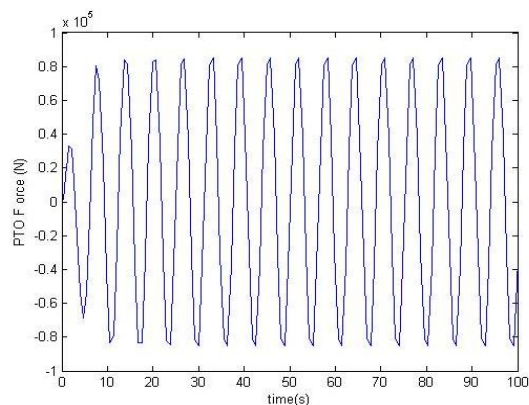


(الف)



(ب)

شکل (۱۳) نمودارهای جابجایی (Z) حاصل از شبیه سازی الف- Floater (Z1)، ب- Spar&Damper (Z2).



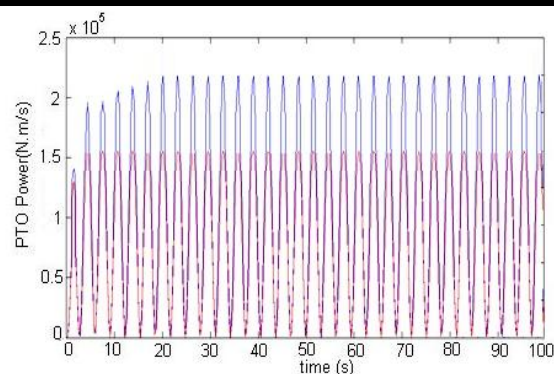
شکل (۱۴) نمودار الف-نیروی PTO ب- توان PTO.

علائم، نشانه‌ها و ارقام

M	جرم
m	جرم افزوده
b	ضریب میرایی
B	ضریب نیروی PTO
g	شتاب جاذبه
ρ	چگالی
K	ضریب نیروی هیدرواستاتیک
Km	ضریب نیروی مهار
z	جابجایی حرکت هیو
\dot{z}	سرعت حرکت هیو
Fe	نیروی تحریک موج
Fr	نیروی دمپینگ
Fpto	نیروی ناشی از سیستم
A	مساحت مقطع
ω	فرکانس
P	توان
Fh	نیروی هیدرواستاتیک

۱۱- مراجع

- [1] M. K. T. Hoen, "Modeling and Control of Wave Energy Converters", MSC thesis, Norwegian University of Science and Technology, 2009.
- [2] Antonio, F. de, O. Falcao, "Wave Energy Utilization: A Review of the Technologies", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 14, pp. 899-918, 2010.
- [3] Antonio, F. de, O. Falcao., "Control Techniques for Wave Energy Converters", PHD thesis, Instituto Politecnico de Coimbra, 2010.
- [4] Drew, B., Plummer A. R. and Sahinkaya, M. N., "A Review of Wave Energy Converter Technology", J. Power and Energy, Vol. 223, pp. 887-902, 2009.
- [5] Hyeok J. K., Won S. R., Il-Hyoung Cho., Hyuck-Min Kweon, "Multi-objective Optimum Design of a Buoy for the Resonant-type Wave Energy Converter", J Mar Sci Technol., Vol. 20, No. 1, pp. 53-63, 2014.
- [6] Jeremiah, P., Liu Y. "Power Absorption Modeling and Optimization of a Point Absorbing Wave Energy Converter Using Numerical Method", Journal of Energy Resources Technology, Vol. 136, pp. 1-8, 2014.
- [7] Bret B., "On the Design, Modeling, and Testing of Ocean Wave Energy Converters", PHD thesis, Oregon State University, 2014.
- [8] Kelley, R., "Wave Energy Converter Design Tool for Point Absorbers with Arbitrary Device Geometry", PHD thesis, Oregon State University, 2013.



شکل (۱۸) مقایسه مقادیر توان خروجی برای ۲ حالت مبدل به ازای مقادیر جابجایی نشان داده شده در شکل (۱۷).

همانطور که در شکل (۱۸) نیز مشاهده می‌شود، افزایش جابجایی بویه سبب افزایش توان خروجی خواهد شد.

۱۰- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در بخش قبل معادلات حاکم بر حرکت بویه مبدل در حوزه فرکانس و زمان مورد تحلیل و بررسی و نتایج آن ارائه گردید. در این تحقیق کلیه پارامترهای موثر در حرکت بویه در معادلات در نظر گرفته شده است. شبیه‌سازی و حل این معادلات بدین منظور انجام گردید و نتایج لازم استخراج گردید. نتایج بدست آمده شامل نمودارهای جابجایی، سرعت، نیرو و توان خروجی می‌باشد. برای این منظور پارامترهای مختلف و تاثیرگذار بر توان خروجی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

همانطور که از شکل (۱۰) نیز بر می‌آید، با توجه به دامنه فرکانس و مدل سازی مبدل توسط دو جسم با سیستم دارای ۲ درجه آزادی، فرکانس طبیعی سیستم را در محدوده فرکانس تشدید قرار داده است. این موضوع سبب افزایش دامنه نوسان هیو و نیز جذب بیشترین توان خروجی بوده است.

همچنین ارتباط دو قسمت مبدل بوسیله سیستم توان PTO و شبیه‌سازی آن توسط یک فنر و دمپر، محاسبه توان خروجی را ممکن نموده است. استفاده از سیستم مهار متصل به کف دریا و شبیه‌سازی آن در معادلات بصورت یک فنر، اجزای سیستم را تکمیل نموده است. افزایش توان خروجی از اهداف این مدل سازی بوده است، بنابراین مدل ارائه شده دارای ویژگی‌های هیدرودینامیکی مناسب می‌باشد.

[9] Yu. Y. H., Li. Y., "Reynolds-Averaged Navier-Stokes Simulation of the Heave Performance of a Two-Body Floating-point Absorber Wave Energy System", J. Computers & Fluids, Vol. 73, pp. 104-114, 2014.

[۱۰] مهدی نظری برنجکوب، حسن قاسمی، "طراحی دستگاه مبدل ۱۰ کیلوواتی جاذب نقطه‌ای انرژی امواج دریا در منطقه عسلویه خلیج فارس"، نشریه انرژی ایران، دوره ۱۴ شماره ۳ پاییز ۱۳۹۰.

[11] Robert K. P., "Modeling, Simulation, and Analysis of Two Hydraulic Power Take-off Systems for Wave Energy Conversion", PHD thesis, 2013.

[12] Muetze A., Vining J., "Ocean Wave Energy Conversion", IEEE Annual Meeting Conference, Vol. 3, pp. 1-8, 2005.

[13] Jacques du Plessis. "A Hydraulic Wave Energy Converter", PHD thesis, March 2012.

[14] Scott K., "A Design Outline for Floating Point Absorber Wave Energy Converters", Advances in Mechanical Engineering, 2014.

[15] Cretel, J. A., Lightbody, M. G., "Maximisation of Energy Capture by a Wave-Energy Point Absorber using Model Predictive Control", Preprints of the 18th IFAC World Congress, 2011.

[16] Antonio, F. & de O, Falcao. "A Linear Quadratic Gaussian Approach for Power Transfer Maximization of a Point Absorber Wave Energy Converter Electric Power Components and Systems", 2015.

[17] Teillant, B., Gilloteaux, J. C. and Ringwood, J. V., "Optimal Damping Profile for a Heaving Buoy Wave Energy Converter", PHD thesis, Norwegian University of Science and Technology, 2010.

[18] Paasch, R., "Time-Domain Modeling of Heaving Point Absorber Wave Energy Converters, Including Power Take-O and Mooring", PHD thesis, 2011.

[19] Alexandr, I. Korotkin, "Added Masses of Ship Structures", Springer Netherlands, 2009.

[20] Kurniawan, A., "Modelling and Geometry Optimization of Wave Energy Converters", PHD thesis, Norwegian University of Science and Technology, 2013.

[۲۱] مهدی نظری برنجکوب، محمود غیائی، "طراحی و تحلیل مبدل جدید در استحصال انرژی امواج خلیج فارس"، دهمین همایش بین المللی انرژی، ۱۳۹۳.

[۲۲] گزارش نهایی طرح تحقیقاتی، "برآورد انرژی امواج و جزر و مد در سواحل ایران"، دفتر انرژی‌های نو وزارت نیرو، ۱۳۷۶.