

## بررسی آثار سیستم مهار پایه کششی بر عملکرد هیدرودینامیک مبدل جاذب نقطه‌ای انرژی موج

محمود غیائی<sup>۱</sup>، مهدی نظری برنجکوب<sup>۲</sup>

mghiasi@aut.ac.ir

۱- استادیار دانشکده مهندسی دریا دانشگاه امیرکبیر

۲- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی دریا دانشگاه صنعتی امیرکبیر

### چکیده

نگرانی‌های زیست محیطی و تقاضای در حال رشد جهان به انرژی باعث افزایش علاقمندی به فن آوری‌های انرژی‌های تجدید پذیر شده است. تمرکز بر مطالعات تئوری جذب نقطه‌ای (متمرکز) انرژی موج اقیانوس از حدود چهار دهه پیش آغاز گردیده و کمتر از دو دهه تمرکز بر مطالعه و طراحی مبدل‌های شناور جاذب نقطه‌ای مورد توجه محققین بوده است. امروزه، پژوهش‌ها در بهینه‌سازی و اصلاح روش‌های کنونی، ابداع روش‌های جدید و پیش بینی راندمان در مبدل‌های جاذب نقطه‌ای مطرح است. در این مقاله آثار سیستم مهار پایه کششی بر عملکرد هیدرودینامیک یک مبدل جاذب نقطه‌ای دو بدنه مورد بررسی قرار گرفته است. در مدل سازی مبدل شامل دو بدنه: بویه جاذب انرژی و بدنه مغروق است، اتصال این دو با یک سیستم فنر خطی مدل سازی شده است و انرژی استحصال حاصل حرکت نسبی هیو بین دو بدنه است. تحلیل هیدرودینامیک در حوزه زمان انجام شده و نتایج، بیانگر تأثیرات مثبت اعمال لنگر پایه کششی بر افزایش حرکت نسبی هیو بین دو بدنه مبدل و افزایش ۶٫۲ درصدی انرژی استحصال از موج می‌باشد.

واژگان کلیدی: مبدل جاذب نقطه‌ای، لنگر پایه کششی، انرژی امواج، تئوری جریان پتانسیل.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۳/۰۹/۰۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۵/۰۷/۲۷

## ۱- مقدمه

طراحی سیستم‌های جاذب انرژی امواج دریا یکی از مهمترین مباحث چالش برانگیز مهندسی در عرصه انرژی‌های تجدیدپذیر در چند دهه گذشته بوده است. تاکنون، تولید برق از استحصال انرژی امواج دریا، توسط مبدل‌های جاذب نقطه‌ای در محیط دریایی موفق و کارآمد بوده است و نمونه‌هایی از این مبدل‌ها از حدود سال ۲۰۰۵ وارد عرصه تجاری سازی و تامین انرژی برق شده‌اند [۱].

مطالعات و تحقیقات ابتدایی جهت بررسی مفاهیم هیدرودینامیک و سیستم‌های جذب انرژی موج توسط بُدل و فالنس<sup>۱</sup> (۱۹۷۵) [۲]، ایوانز<sup>۲</sup> (۱۹۷۶) [۳] و می<sup>۳</sup> (۱۹۷۶) [۴] انجام گردید. آنان پیشنهادهایی در مورد سیستم‌ها و روش‌های مفهومی جذب انرژی موج و تئوری‌های جذب حداکثری انرژی بر روی جسم متقارن و تک بدنه (بویه جاذب نقطه‌ای) مطرح نموده‌اند. پس از آن، فالنس<sup>۴</sup> (۱۹۹۹) بر اساس روش‌های تحلیل عددی نشان داد که یک سیستم دو قسمتی جاذب نقطه‌ای، که با حرکت هیو نسبی بین دو قسمت مغروق و شناور، انرژی موج را استحصال می‌نماید، عملکردی بهتر خواهد داشت [۵].

در دهه گذشته، تمرکز تحقیقات و مطالعات بر روی بهبود عملکرد و افزایش راندمان مبدل‌های جاذب نقطه‌ای انرژی موج بوده است. البته، بهینه سازی در قسمت‌های مختلف مبدل بخصوص: سیستم‌های الکترومگنتیک، الکترومکانیک، انتقال و تبدیل انرژی و مدارهای هیدرولیک بیشتر از بهینه سازی ابعادی بویه و بدنه مغروق<sup>۵</sup> و سیستم‌های مهار در پژوهش‌های اخیر ملاحظه می‌گردد [۶].

متداول ترین نوع سیستم لنگر مهار جهت حفظ موقعیت دستگاه‌های مبدل جاذب نقطه‌ای استفاده از سیستم مهار کابلی، اسلاک<sup>۶</sup> و سه نقطه‌ای است. در سال ۲۰۰۵، جوهانینگ و همکارانش<sup>۷</sup> به پیشنهاد استانداردهای آینده در طراحی سیستم مهار برای مبدل‌های انرژی امواج پرداخته‌اند [۷]. در سال ۲۰۰۹ فونسکا و همکارانش<sup>۸</sup> به آنالیز سیستم مهار با طناب کابل ترکیبی برای مبدل‌های انرژی امواج

فراساحل پرداخته‌اند و در سال ۲۰۱۳ مارکوس ریتر و همکاران<sup>۹</sup> [۸] به بهینه‌سازی مبدل جاذب نقطه‌ای با کنترل خطوط مهار کابلی جهت کاهش حرکت هیو بدنه مغروق پرداخته‌اند [۹]. سیستم مهار اسلاک یکی دیگر از سیستم‌های مهار در مبدل‌های انرژی امواج است که مورد مطالعه و پژوهش بوده است. آنتونیو فالکا<sup>۱۰</sup> و همکارانش<sup>۱۰</sup> [۱۰]، ویسنت و همکارانش<sup>۱۱</sup> [۱۱] ۲۰۱۱ به مدلسازی مهار اسلاک برای مبدل جاذب نقطه‌ای دو بدنه و مهار آرایه‌ای از آنها و همچنین، آنالیز پیکربندی سیستم مهار اسلاک-زنجیری در مبدل (دو بدنه) جاذب نقطه‌ای انرژی موج پرداخته‌اند. در این مقاله به بررسی آثار سیستم مهار پایه کششی بر عملکرد هیدرودینامیک بدنه مغروق مبدل پرداخته شده است. در مبدل‌های دو بدنه جاذب نقطه‌ای مهار دامنه حرکت بدنه مغروق در جهت هیو باعث افزایش حرکت نسبی بین بویه و بدنه مغروق شده که حاصل آن افزایش انرژی استحصالی از موج است.

۲- مبدل‌های جاذب نقطه‌ای انرژی امواج<sup>۱۲</sup>

مبدل‌های جاذب نقطه‌ای، به روش نوسان هیو بویه (جسم شناور)، انرژی موج را جذب می‌کنند. شکل (۱) نمونه‌هایی از مبدل‌های جاذب نقطه‌ای را نشان می‌دهد. این دستگاه‌ها از دو قسمت بویه<sup>۱۳</sup> و بدنه مغروق<sup>۱۴</sup> تشکیل شده‌اند، تعدادی از آنها کاملاً شناور و تعدادی دیگر بر کف اقیانوس مستقر هستند. بویه این مبدل‌ها، عمدتاً بر روی سطح آب انرژی موج را جذب و با سازوکاری آنرا به سیستم داخلی منتقل می‌نماید. سیستم داخلی شامل، سیستم‌های تبدیل و ذخیره سازی انرژی و سیستم‌های کنترل است که در بدنه مغروق دستگاه مبدل قرار دارد و حرکت نوسانی هیو بویه عامل اصلی تولید انرژی در این مبدل‌ها می‌باشد [۱۲].

## ۲-۱- روش عملکرد در جذب انرژی موج

استحصال انرژی از موج در مبدل‌های جاذب نقطه‌ای حاصل حرکت نسبی بین بویه و بدنه مغروق دستگاه مبدل در جهت

<sup>8</sup> Fonseca N, Pascoal R, Morais T, Dias R.N.

<sup>9</sup> Markus Richter. and Mario E. Magañ

<sup>10</sup> Antonio F.O. Falcao. Pedro, Vicente, Luis. Gato.

<sup>11</sup> Pedro C. Vicente, Antonio F. De O Falcao, Pauli.

<sup>12</sup> The Point absorber wave energy converter.

<sup>13</sup> The Buoy

<sup>14</sup> The Immersed Body

<sup>1</sup> Budal, K., Falnes J.

<sup>2</sup> Evans, D, V.

<sup>3</sup> Mei, C C.

<sup>4</sup> Falnes J.

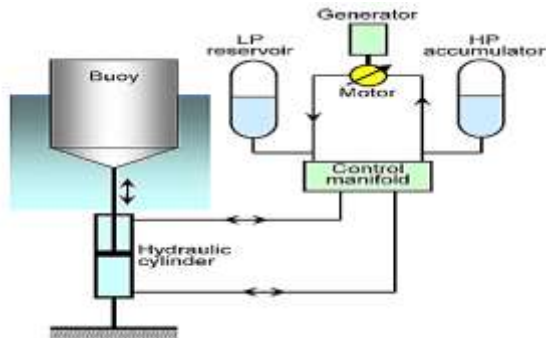
<sup>5</sup> Immersed body

<sup>6</sup> The Slack Mooring

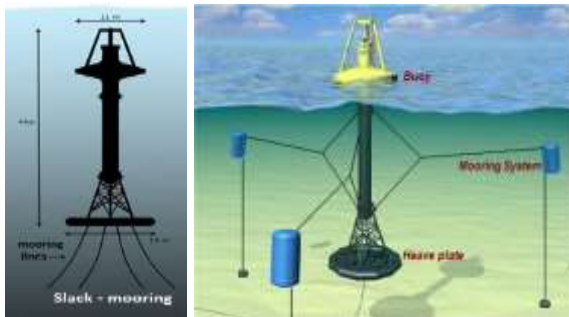
<sup>7</sup> Johanning I., Smith GH, Wolfram J.



شکل (۱) نمونه‌هایی از مبدل جاذب نقطه‌ای انرژی موج [۶، ۱۲].



شکل (۲) استحصال انرژی موج با حرکت هیو بویه و سیستم مدار هیدرولیک در مبدل جاذب نقطه‌ای انرژی موج [۱۲].



شکل (۳) کاهش حرکت هیو بدنه مبدل جاذب نقطه‌ای با صفحه هیو و حفظ موقعیت با مهار سه نقطه‌ای و یا اسلک [۶، ۱۳].

از این صفحه در مبدل OPT جهت کاهش حرکت هیو بدنه مغروق استفاده شده و جهت حفظ موقعیت دستگاه مبدل OPT از مهار کابلی، سه نقطه‌ای (سه بویه) و یا سیستم مهار اسلک<sup>۱۰</sup> (مهار افتاده) استفاده می‌شود. طرح واره‌ای از این سیستم مهار برای مبدل OPT در شکل (۳) آمده است [۶، ۱۳].

هیو است. این مبدل‌ها به دو روش انرژی جذب شده توسط بویه (نیروی برخاست<sup>۱</sup> و جذبی) را به انرژی الکتریسیته تبدیل می‌کنند. یک روش استفاده از ژنراتور خطی<sup>۲</sup> است و روش دوم استفاده از مدار تحت فشار هیدرولیک<sup>۳</sup> است [۶]. روش اول، سیستم ژنراتور خطی یا سیستم الکترومغناطیس، در این روش بویه با یک سیستم کابلی به بدنه مستقر بر کف دریا و نیز سیستم الکترومغناطیس داخل آن متصل بوده و در گذر هر موج، نوسان هیو بویه باعث جابجایی قائم آنرا در میدان مغناطیسی شده و تولید برق حاصل می‌گردد. این سیستم در مبدل اوپسالا<sup>۴</sup> و ال-۱۰<sup>۵</sup> کاربرد دارد [۶، ۱۲]. روش دوم، استفاده از سیستم مدار تحت فشار هیدرولیک است که در مبدل‌های جاذب نقطه‌ای OPT<sup>۶</sup> (تکنولوژی قدرت اقیانوس)، ویوباب<sup>۷</sup> و آکوبوی<sup>۸</sup> استفاده می‌گردد [۶، ۱۳]. در این سیستم، انرژی استحصال موج به فرم انباشت فشار سیال (هیدرولیک) تبدیل می‌گردد. فشار حاصل شده در سیستم مدار هیدرولیک تحت نیروی موج و عملکرد بویه می‌باشد. در این روش با گذر موج از بویه، نوسان هیو در بویه دستگاه اتفاق افتاده و در نتیجه، پیستون هیدرولیک (که با یک میله به بویه متصل است) با همان فرکانس بویه شروع به نوسان در جهت قائم می‌نماید. در زمان بالاروی و پایین روی بویه، روغن هیدرولیک در مدار داخلی دستگاه تحت فشار ناشی از نیروی موج قرار گرفته و در نهایت روغن پر فشار، هیدروموتور کوپله شده با ژنراتور دورانی را به کار خواهد انداخت و تولید الکتریسیته حاصل می‌گردد [۶، ۱۲]. این فرآیند در شکل (۲) برای حرکت نوسانی هیو بویه تشریح شده است [۱۲].

## ۲-۲- سیستم کاهش حرکت هیو در بدنه مبدل

یکی از روش‌های مهار در مبدل‌های جاذب نقطه‌ای جهت کاهش دامنه حرکت هیو بدنه مغروق استفاده از صفحه هیو<sup>۹</sup> است، این صفحه به فرم دیسک (قطر زیاد و ارتفاع کم) در انتهای غوطه وری بدنه مغروق مبدل قرار گرفته و با افزایش جرم اضافه هیدرودینامیک در جهت هیو باعث کاهش حرکت هیو بدنه مغروق می‌گردد.

<sup>6</sup> The Ocean Power Technologies (OPT).

<sup>7</sup> The Wavebob Point Absorber \_ WEC.

<sup>8</sup> The Aquabuoy Point Absorber \_ WEC.

<sup>9</sup> The Heave Plate or the Reaction Plate.

<sup>10</sup> The Slack Mooring System.

<sup>1</sup> The Power Take-Off (PTO).

<sup>2</sup> The Linear Electrical Generator.

<sup>3</sup> The Hydraulic\_PTO (Power Take-Off).

<sup>4</sup> The Uppsala \_ WEC (Wave Energy Converter).

<sup>5</sup> The L10 Point Absorber \_ WEC.

### ۲-۳- مدل سازی عملکرد مبدل جاذب نقطه‌ای

جهت محاسبه میزان انرژی استحصال‌ی از موج در مبدل دو بدنه (بویه و بدنه مغروق) جاذب نقطه‌ای، مدل سازی‌های متفاوتی مطرح است. مدل سیستم ترکیبی فنر- میراگر، سیستم فنر خطی و سیستم میراگر سه روش متداول است. این سیستم‌ها بین بویه و بدنه مغروق مبدل جاذب نقطه‌ای مطابق شکل (۴) قرار می‌گیرد [۱۴].

نیروی ایجاد شده در سیستم فنر- میراگر را می‌توان نیروی استحصال‌ی از موج<sup>۱</sup> ( $F_{PTO}$ ) در مبدل مدل سازی شده دانست، که با معادله (۱) مشخص می‌گردد. نیروی استحصال‌ی حاصل اختلاف جابجایی ( $\Delta Z$ ) و اختلاف سرعت هیو ( $\Delta U$ ) بین بویه (B) و بدنه مغروق<sup>۲</sup> (I) دستگاه مبدل است. در این معادله،  $K_{PTO}$  ضریب سختی فنر<sup>۳</sup>،  $C_{PTO}$  ضریب میرایی توان جذب شده<sup>۴</sup>،  $U$  سرعت هیو و  $Z$  جابجایی هیو است [۱۴].

$$F_{PTO} = C_{PTO} \times \Delta U_{B-I} + K_{PTO} \times \Delta Z_{B-I} \quad (1)$$

$$\Delta U_{B-I} = U_B - U_I, \quad \Delta Z_{B-I} = Z_B - Z_I$$

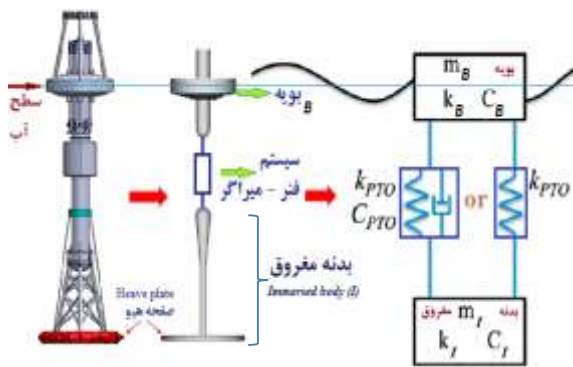
مقادیر ضریب میرایی ( $C_{PTO}$ ) و سختی فنر ( $K_{PTO}$ ) در مدل سازی شکل (۴) و معادله (۱)، وابسته به مشخصات موج برخوردی و انرژی آن است. چنانچه موج ضعیف باشد، مقادیر کم برای دو پارامتر فوق، در نظر گرفته شده تا امکان حرکت نسبی در جهت هیو برای بویه میسر گردد و در یک موج قوی، مقادیر ضریب میرایی و سختی فنر افزایش خواهد یافت تا انرژی بیشتری از موج استحصال گردد. تعیین مقادیر حدی و بهینه این پارامترها جزء مطالعات در هر پژوهش با این نوع مدل سازی است. چنانچه در یک موج کم ارتفاع (ضعیف)، مقادیر سختی فنر یا میرایی بیش از حد زیاد باشد، موج قادر به ایجاد حرکت نسبی بین بویه و بدنه مغروق نبوده (دو بدنه بطور یکپارچه عمل می‌کند) و انرژی از موج برخوردی استحصال نخواهد شد.

بر اساس پژوهش هسیانگ و وایلی<sup>۵</sup> (۲۰۱۱) کمترین مقدار سختی فنر جهت حفظ پایداری مدل ۲۰۰ کیلو نیوتن بر متر برای موج در محدوده ۲ متر و ۴ متر مشخص شده است. براساس پژوهش آنان، سیستم فنر خطی در مدل سازی مبدل دو بدنه جاذب نقطه‌ای، در مقادیر سختی فنر ۲۰۰۰ کیلو نیوتن بر متر، توان کمتری را نسبت به ضریب سختی

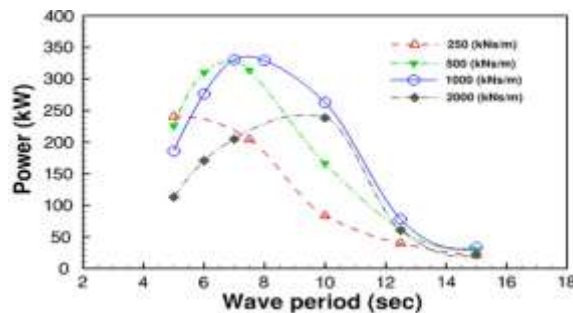
فنر ۱۰۰۰، ۵۰۰ کیلو نیوتن بر متر از موج با ارتفاع ۴ متر استحصال کرده است [۱۴]. شکل (۵) تغییرات توان جذب شده از موج به ارتفاع ۴ متر با زمان‌های تناوب متفاوت را نشان می‌دهد. در این شکل تاثیرات ضریب سختی فنر ( $K_{PTO}$ ) بر توان جذب شده از موج در مدل سازی یک مبدل دو بدنه (بویه و بدنه مغروق) که با یک سیستم فنر بهم متصل شده است مشخص است [۱۴].

### ۳- فرضیات و معادلات حاکم

اثر نیروی پُسای (درگ) باد بر سطح آب مهم‌ترین عامل پیدایش امواج سطحی دریا است. به دلیل تغییر جهت و سرعت وزش باد و قابلیت تغییر جهت انتشار موج، امواج در عمل بسیار نامنظم و غیر قابل پیش بینی هستند. به هر حال نظریه‌های گوناگونی برای الگوسازی امواج دریا ارائه شده که متداولترین آنها نظریه ایری<sup>۶</sup>، استوکس<sup>۷</sup> و نوئیدال<sup>۸</sup> است [۶].



شکل (۴) طرح واره‌ای از مبدل جاذب نقطه‌ای و مدل سازی عملکرد آن با سیستم فنر- میراگر و یا فنر خطی [۱۴، ۶].



شکل (۵) عملکرد مبدل در جذب توان استحصال‌ی از موج با ارتفاع ۴ متر و تاثیرات ضریب سختی فنر ( $K_{PTO}$ ) [۱۴].

<sup>5</sup> Yi-Hsiang, Yu. and Ye, Li.

<sup>6</sup> Airy.

<sup>7</sup> Stokes.

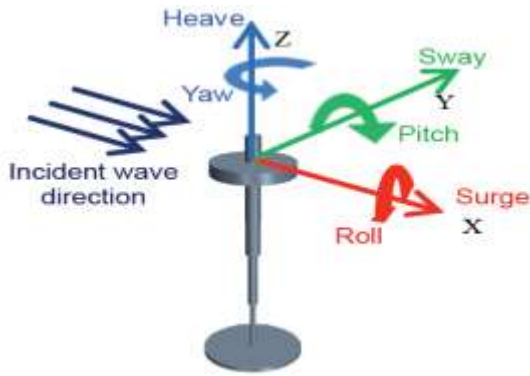
<sup>8</sup> Cnoidal

<sup>1</sup> The Force of the Power Take-Off, ( $F_{PTO}$ ).

<sup>2</sup> Immersed body

<sup>3</sup> The Spring Stiffness

<sup>4</sup> The Power Absorption Damping Coefficient



شکل (۶) محور مختصات و جهات حرکت مبدل جاذب نقطه‌ای.

$$\frac{\partial \phi_7}{\partial n} = - \frac{\partial \phi_0}{\partial n} \quad \text{« شرط روی سطح خیس »} \quad (۴)$$

$$\frac{\partial \phi_j}{\partial n} = i\omega n_{j=1,2,3} \quad \text{« برای سرج، اسوی، هیو »} \quad (۵)$$

$$\frac{\partial \phi_j}{\partial n} = i\omega n_{j=4,5,6} \quad \text{« برای رول، پیچ و یاو »} \quad (۶)$$

$$(n_4, n_5, n_6) = (x, y, z) \times (n_1, n_2, n_3)$$

در معادله فوق،  $n_j$  بردار واحد نرمال بر روی سطح جسم در سه جهت اصلی است و موقعیت هر گره با پارامتر  $(x, y, z)$  مشخص است و در کف  $(z \rightarrow -\infty)$  پتانسیل تشعشع به صفر میل می‌کند  $(\phi_j \rightarrow 0)$ . معادلات انتگرال مرزی مشترک برای مسئله پتانسیل تشعشع و تفرق برابر است با [۱۶، ۱۵]:

$$2\pi \phi_j(p) + \iint_{\partial B} \phi_j(q) \frac{\partial G(p,q)}{\partial n_q} dS_q = \iint_{\partial B} \frac{\partial \phi_j}{\partial n_q} G(p,q) dS_q \quad (۷)$$

« برای مسئله تفرق »

$$2\pi \phi_A(p) + \iint_{\partial B} \phi_A(q) \frac{\partial G(p,q)}{\partial n_q} dS_q = 4\pi \phi_0(p) \quad (۸)$$

در دو معادله فوق انتگرال بر روی سطح خیس شده  $(\partial B)$  است و پارامتر  $(\partial/\partial n_q)$  مشتق در جهت نرمال در نقطه منبع و  $q(\xi, \eta, \zeta) \in \partial B$  و  $P(x, y, z)$  نقطه میدان جریان است و تابع گرین  $(G)$  جهت استفاده در معادلات انتگرالی (۷) و (۸) برابر است با: [۱۵]

$$G(p, q) = \frac{1}{r} + G^*(p, q) \quad (۹)$$

$$G^*(p, q) = \frac{1}{r_1} + 2kPV \int_0^\infty \frac{1}{\tau - k} e^{\tau(z+\zeta)} J_0(\tau R) d\tau - 2\pi i k e^{\tau(z+\zeta)} J_0(\tau R)$$

$$R^2 = (x - \xi)^2 + (y - \eta)^2, r^2 = R^2 + (z - \zeta)^2$$

محاسبه نیروی اعمالی موج به جسم یکی از مسائل مهم در هیدرودینامیک است و روش‌هایی جهت محاسبه این نیروها مطرح است. یکی از این روش‌ها حل مسئله اندرکنش موج و جسم بر پایهٔ تئوری پتانسیل<sup>۱</sup> و به روش المان مرزی است که با حل مسئله تفرق و تشعشع، نیروها و ضرایب هیدرودینامیک محاسبه می‌گردد. مختصری از معادلات و فرضیات در این روش در ادامه تشریح شده است.

با حاکم بودن معادله لاپلاس تابع پتانسیل سرعت و با فرض سیال غیر لزج، تراکم ناپذیر، غیرچرخشی و صرف نظر نمودن از کشش سطحی و با در نظر گرفتن جسم شناور در شرایط آب عمیق و موج منظم می‌توان تابع پتانسیل کل  $(\phi)$  حاصل از برخورد یک موج خطی منظم به یک جسم شناور را با سه ترم  $\phi_0$  پتانسیل موج برخوردی<sup>۲</sup>،  $\phi_7$  پتانسیل تفرق<sup>۳</sup> و  $\phi_j$  اجزاء پتانسیل تشعشع جسم<sup>۴</sup> مطابق معادله (۲) و (۳) نسبت به زمان مشخص نمود. در معادله (۲)،  $\phi_A$  مستقل از حرکت جسم شناور است و مجموع پتانسیل موج برخوردی و تفرق می‌باشد [۱۶، ۱۵].

$$\phi(x, y, z, t) = \phi_0 + \phi_7 + \phi_j = \phi_A + \phi_j \quad (۲)$$

$$\phi = \text{Re} \left\{ \left( \sum_{j=1}^6 \xi_j \phi_j(x, y, z) + A \phi_A(x, y, z) \right) e^{i\omega t} \right\}$$

$$\phi_0 = \frac{igA}{\omega} e^{(vz - ivx \cos \theta - ivy \sin \theta)} \quad (۳)$$

در معادلات فوق  $A$  دامنه و  $\omega$  فرکانس موج برخوردی،  $v$  عدد موج  $(\omega^2/g)$  و  $\theta$  زاویه انتشار برخورد موج نسبت به محور  $x$  است و  $g$  شتاب ثقل و  $\xi_j$  مشخص کنندهٔ دامنه مختلط نوسان جابجایی جسم شناور در شش درجه آزادی است. مقادیر ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷ به ترتیب اجزاء تشعشع در جهات سرج، اسوی، هیو، رول، پیچ و یاو<sup>۵</sup> است [۱۵]. شکل (۶) دستگاه مختصات و جهات حرکت در شش درجه آزادی در یک مدل مبدل جاذب نقطه‌ای را نشان می‌دهد. با ارضاء معادله لاپلاس پتانسیل سرعت در سیال و اعمال شرایط مرزی سطح آزاد آب و میل نمودن تشعشع به سمت صفر در کف، پارامترهای مجهول شرایط مرزی روی قسمت خیس جسم شناور  $(\partial B)$  و شرط تشعشع جسم برابر است با معادلات (۴) تا (۵): [۱۵]

<sup>۴</sup> The radiation components of the velocity potential of a body motion.

<sup>۵</sup> Surge, Sway, Heave, Roll, Pitch, Yaw.

<sup>۱</sup> The Potential Based Methods.

<sup>۲</sup> The Incident Wave Potential.

<sup>۳</sup> The Scattering Potential.

با توجه به معادله (۱۲) جهت محاسبه انرژی و یا نیروی استحصالی از موج، نیاز به محاسبه دامنه حرکت هیو بویه و بدنه مغروق در حوزه زمان است، لذا، مبدل جاذب نقطه‌ای مورد نظر در محیط نرم افزار موسز مدل سازی و تحلیل هیدرودینامیک در حوزه زمان انجام گردیده است. این نرم افزار جهت شبیه سازی و تحلیل دینامیکی در حوزه زمان و فرکانس برای سیستم‌های شناور فراساحلی طراحی شده است و قابلیت بالایی در مدل سازی و تجزیه و تحلیل سیستم‌های مهار دارد [۱۸].

در این مدل سازی، از المان فنر خطی با کد کلاس SPR در نرم افزار جهت اتصال دو بدنه مبدل (بویه و بدنه مغروق) استفاده گردید. این نوع المان قابلیت مشخص نمودن سختی فنر (K<sub>P<sub>TO</sub></sub>) در هر جهت مشخصه را دارد [۱۸]. مشخصات ابعادی مبدل مدل سازی شده در جدول (۱) مشخص است.

جدول (۱) مشخصات ابعادی و هندسی مدل مطابق با شکل (۷).

نام قسمت	ابعاد (متر)			مرکز ثقل و بویانسی x=y=0		وزن kg
	قطر	ارتفاع	Draft	Z <sub>Buoyancy</sub>	Z <sub>G</sub>	
(بویه)	۲.۵	۵	۰	۰	۰	-
قسمت یک	۱۱	۲	۰.۲۴	-۰.۱۲	+۰.۷۶	۱۲
دو، سه و	/	۱	۱.۲۴	-۰.۵۷۳	-۰.۵۷۳	۲۰
چهار	۲.۵	۵	۶.۲۴	-۳.۷۴	-۳.۷۴	۳۲
فنر (S)	K <sub>P<sub>TO</sub></sub> = ۲۰۰.۱۲۰۰			-۱۰.۹۹	-۱۰.۹۹	-
(بدنه)	۲	۹	۲۴.۷۴	-۲۰.۲۴	-۲۰.۲۴	۸
(مغروق)	۱	۹	۳۳.۷۴	-۲۹.۲۴	-۲۹.۲۴	۴
Cylinder 1, 2 Heave-P	۱۴	۰.۸۴	۳۴.۵۸	-۳۴.۱۶	-۳۴.۱۶	۱۷.۳۵
کل دستگاه	-	۳۶.۳	۳۴.۵۸	-۲۱.۴۴	-۲۵.۳۶	۲۴۹.۵

#### ۴-۱- تولید شبکه و محیط دریایی

شبکه بندی روی جسم و سطح آزاد چه از منظر کیفیت و چه از منظر تعداد شبکه می‌بایست، متناسب با روش محاسباتی باشد. در روش المان مرزی، شبکه بندی تنها در مرز جسم صورت می‌پذیرد و این روش تعداد المان‌ها را نسبت به روش المان محدود کاهش می‌دهد. ضمن آنکه محاسبه پارامترها در تمام نقاط داخل و روی مرز امکان پذیر است [۱۹]. شکل (۸) و (۹) شبکه بندی بر روی مدل و سطح آب را نشان می‌دهد.

شش جزء نیرو حاصل از مسئله تشعشع و تفرق به ترتیب برابر با فرم ماتریسی معادله (۱۰) و (۱۱) است. در معادله (۱۰)، a<sub>kj</sub> جرم اضافه هیدرودینامیک و b<sub>kj</sub> میرایی حاصل از تشعشع جسم در شش درجه آزادی است [۱۵، ۱۶].

« شش جزء نیرو حاصل از مسئله تشعشع »

$$F_k = \text{Re} \left\{ \sum_{j=1}^6 \xi_j e^{i\omega t} f_{kj} \right\}, \quad K = 1, \dots, 6 \quad (10)$$

$$f_{kj} = -\rho \iint_{\partial B} \frac{\partial \phi_k}{\partial n} \phi_j ds = \omega^2 a_{kj} - i\omega b_{kj}$$

« شش جزء نیرو حاصل از مسئله تفرق »

$$F_{exj} = \text{Re} \left\{ A e^{i\omega t} X_j \right\}, \quad j = 1, \dots, 6 \quad (11)$$

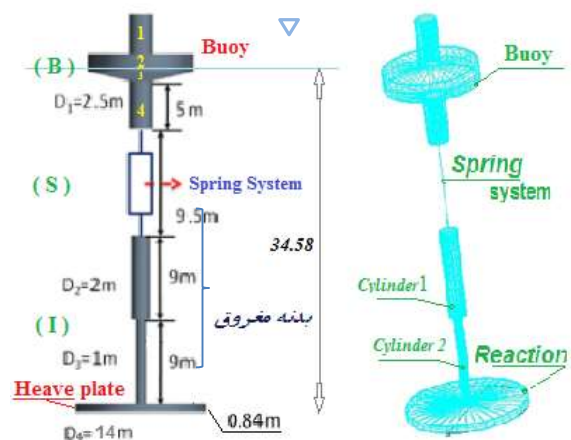
$$X_j = -\rho \iint_{\partial B} \phi_A \frac{\partial \phi_j}{\partial n} ds$$

#### ۴- مدل سازی

جهت مدل سازی مبدل جاذب نقطه‌ای از سیستم فنر استفاده شده است و مدل از سه بخش شامل: بویه (B)، سیستم فنر<sup>۱</sup> (S) و بدنه مغروق<sup>۲</sup> (I) تشکیل شده است. در این مدل سازی (شکل ۷)، بویه در معرض مستقیم برخورد موج است و نیروی اعمالی موج به آن، باعث عکس العمل در سیستم فنر می‌گردد. قسمت مغروق مدل متشکل از دو مقطع استوانه‌ای و یک صفحه هیو بوده و تحت تأثیر آثار موج در عمق و نیروی اعمالی از طرف سیستم فنر است. در طراحی مبدل، توازن بین وزن و نیروی شناور (بویانسی)، توسط صفحه هیو انجام گرفته است و همواره مرکز ثقل پائین تر از مرکز بویانسی حفظ شده است. نیروی (F<sub>P<sub>TO</sub></sub>) و انرژی (E<sub>P<sub>TO</sub></sub>) استحصال شده از موج در این مدل سازی برابر است با: [۱۴، ۱۷].

$$F_{P<sub>TO</sub>} = K_{P<sub>TO</sub>} \times \Delta Z_{B-I}, \quad \Delta Z_{B-I} = Z_B - Z_I \quad (12)$$

$$E_{P<sub>TO</sub>} = 0.5 \times K_{P<sub>TO</sub>} (\Delta Z_{B-I})^2$$



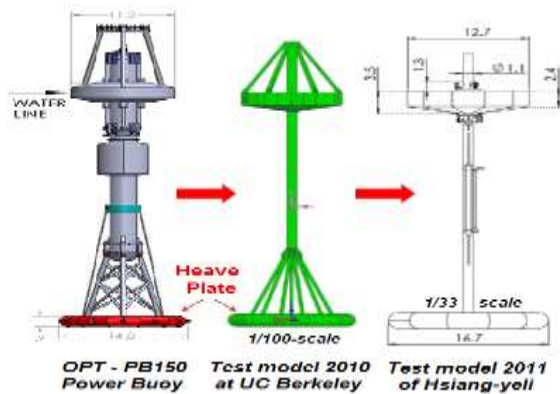
شکل (۷) هندسه و ابعاد مدل مبدل دو بدنه جاذب نقطه‌ای.

<sup>2</sup> The Immersed Bod

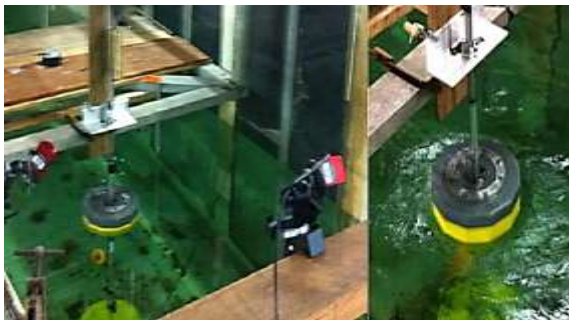
<sup>1</sup> The Spring System.



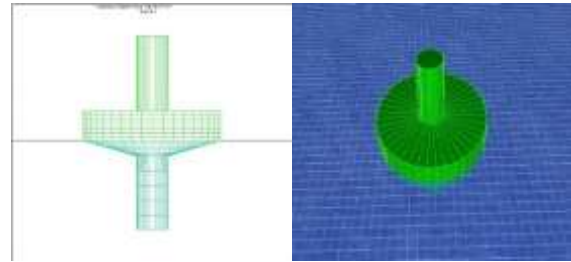
آزمایشگاهی استفاده گردید. شکل (۱۰) دو مدل پژوهش هسیانگ در مقیاس ۱:۱۰۰ و مقیاس ۱:۳۳ از مبدل جاذب نقطه‌ای OPT - PB150 جهت تست آزمایشگاهی و تحلیل عددی نشان می‌دهد. شکل (۱۱) تست مدل پژوهش هسیانگ در مقیاس ۱:۱۰۰ را در تانک موج نشان می‌دهد. تحلیل دینامیکی در حوزه زمان، بر روی مدل مبدل دو بدنه جاذب نقطه‌ای با ضریب سختی فتر  $200 \text{ kN/m}$  مطابق با مدل پژوهش هسیانگ و وایلی [۱۴] انجام شد. شکل (۱۲) مقایسه‌ای است بین نتایج حاصله با پاسخ‌های پژوهش هسیانگ و وایلی. همانگونه که در این شکل مشخص است، دامنه حرکت بویه در جهت هیو  $1.24 \text{ m}$  است و دامنه نوسان هیو بدنه مغروق  $0.41 \text{ m}$  است در پژوهش هسیانگ و وایلی [۱۴]. نتایج حاصل از تحلیل در محیط نرم افزاری موسز<sup>۱</sup>، این محدوده را برای بویه  $1.18 \text{ m}$  و برای بدنه مغروق در محدوده  $0.38 \text{ m}$  نشان می‌دهد. تفاوت دامنه حرکت هیو برای بویه در پژوهش حاضر و پژوهش هسیانگ  $6 \text{ cm}$  است و برای پاسخ هیو بدنه مغروق (R)  $3 \text{ cm}$  است و در مجموع خطای محاسباتی و مدل سازی بویه  $5$  درصد و برای بدنه مغروق  $7,3$  درصد است.



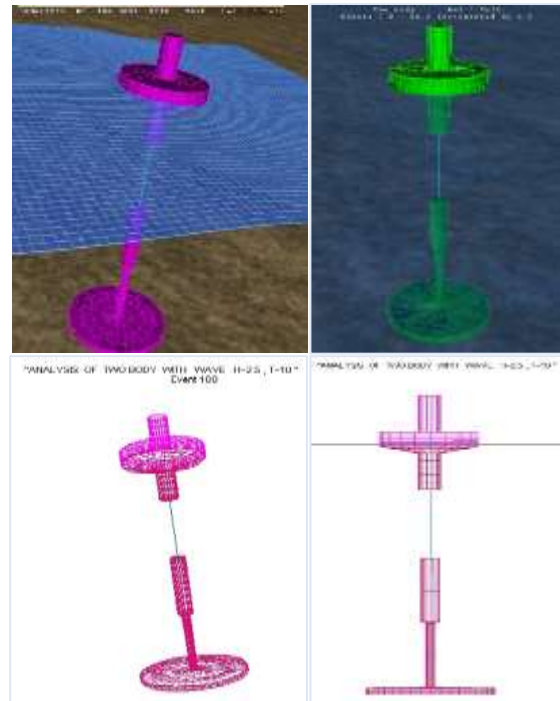
شکل (۱۰) دو مدل هسیانگ جهت تست آزمایشگاهی [۱۴،۱۷].



شکل (۱۱) مدل آزمایشگاهی هسیانگ و وایلی (۲۰۱۱) [۲۰].



شکل (۸) مدل بویه و شبکه بندی روی آن و سطح آزاد آب.



شکل (۹) مدل مبدل دو بدنه جاذب نقطه‌ای و شبکه بندی روی آن و سطح آزاد آب.

ژرفای دریا در این تحقیق،  $70$  متر و موج برخوردی به مدل به ارتفاع  $2,5$  متر و پرپود  $10$  ثانیه، مطابق با پژوهش هسیانگ و وایلی [۲۰] انتخاب شده است. این پژوهش جهت اعتبار سنجی استفاده شده است.

## ۵- اعتبار سنجی

جهت اعتبار سنجی از پژوهش هسیانگ و وایلی استفاده گردید. آنان یک مدل با مقیاس  $1:100$  نسبت به مبدل جاذب نقطه‌ای انرژی موج با نام OPT - PB150 را در تانک موج دانشگاه برکلی آمریکا در سال  $2010$  تست نمودند و مدل دیگری را در مقیاس  $1:33$  در سال  $2011$  آزمایش نمودند [۱۴، ۱۷، ۲۰]. برای اعتبارسنجی از این پژوهش

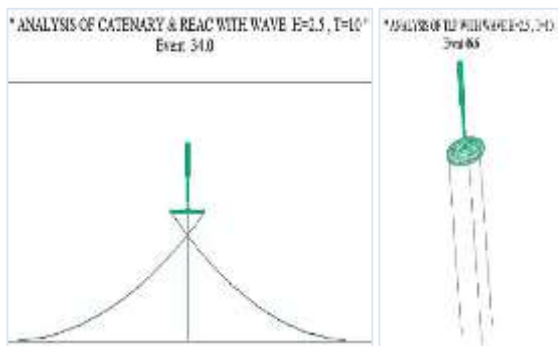
<sup>1</sup> Moses Ultramarine.

بویه	$R_{x,y}=1,778$ , $R_z=2,5093$	۶,۳۴
------	--------------------------------	------

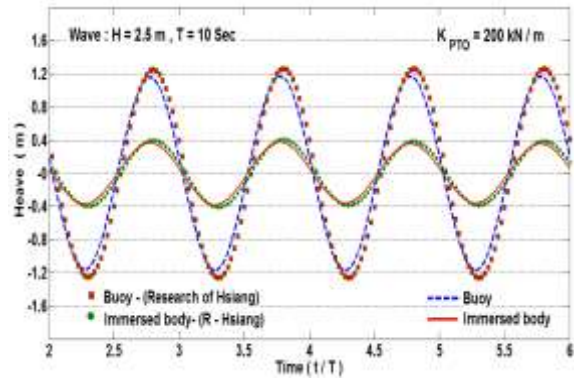
نقطه اتصال روی شناور و کف دریا، در یک مختصات  $(x, y)$  است و آنالیز دینامیکی مهار انجام شد. در حالت لنگر مهار کتنری از خطوط مهار با قابلیت تعیین مدول الاستیسیته و وزن واحد طول دلخواه استفاده گردید [۱۸]. در این مدل سازی نیز موقعیت بدنه مغروق و عمق غوطه وری آن با حالت بدون لنگر یکسان است و در حالت نصب لنگر بصورت ضربدری مطابق با شکل (۱۳) آنالیز انجام شد. نتایج حاصله عبارتند از: پاسخ دینامیکی مدل در شش درجه آزادی در حوزه زمان و نیز به صورت اپراتور دامنه پاسخ<sup>۱</sup> و همچنین، مقادیر شتاب، سرعت و موقعیت مرکز ثقل، مقادیر نیروها در خطوط مهار و نیز نیروهای اعمال شده از لنگر به نقطه اتصال به مدل در حوزه زمان.

برای بررسی تاثیرات سیستم‌های مهار، تحلیل هیدرو دینامیک بر روی بدنه مغروق مبدل در سه مرحله مجزا انجام گردید. مرحله اول، بدون اعمال تأثیر لنگر مهار، تحلیل صورت پذیرفت که بعلاوه سرج زیاد بدنه مغروق در دامنه محاسباتی خارج شده، لذا، زمان اعمال موج محدود به ۵۰ ثانیه بوده است. در دو مرحله دیگر تحلیل هیدرو دینامیک بدنه مغروق مبدل با اعمال سیستم مهار پایه کششی و با سیستم مهار کتنری انجام گردد.

بدین منظور، تحلیل هیدرو دینامیک در محیط نرم افزاری موسز با اعمال موج منظم به ارتفاع ۲,۵ متر و زمان تناوب ۱۰ ثانیه بر بدنه مغروق انجام شد. پاسخ‌های هیو در حوزه زمان از مجموع نتایج حاصله استخراج و در سه حالت فوق الذکر مقایسه شد. شکل (۱۴) پاسخ هیو بدنه مغروق در حالت بدون اعمال اثر سیستم مهار را نشان می‌دهد، که مرکز ثقل بدنه مغروق در فاصله ۳۱,۹۳ متر از سطح آب است.



شکل (۱۳) لنگر پایه کششی و کتنری بر بدنه مغروق مبدل.



شکل (۱۴) مقایسه پاسخ‌های هیو بویه و بدنه مغروق مبدل با پژوهش هسیانگ و وایلی [۱۴].

### ۶- مقایسه آثار لنگر پایه کششی و کتنری بر هیدرو دینامیک بدنه مغروق مبدل جاذب نقطه‌ای

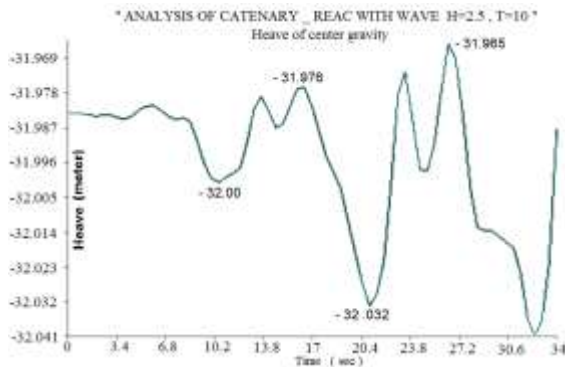
جهت تعیین تاثیرات سیستم‌های مهار شامل: لنگر پایه کششی و لنگر کتنری بر عملکرد هیدرو دینامیک بدنه مغروق مبدل بدون هیچگونه تغییر در هندسه و ابعاد بدنه مغروق، فقط با اعمال لنگر کششی و کتنری با مشخصات ذکر شده در جدول (۲) تحلیل هیدرو دینامیکی فقط بر روی بدنه مغروق مبدل انجام پذیرفت. در این مدل سازی موقعیت بدنه مغروق و عمق غوطه وری آن با حالت مدل سازی مبدل دو بدنه جاذب نقطه‌ای (شکل (۷)) یکسان است و در حالت بدون پیش کشیدگی مهار، آنالیز در حوزه زمان انجام گردید. در حالت لنگر پایه کششی، از خطوط مهار سکوه‌های پایه کششی در نرم افزار که قابلیت عکس العمل در کشش و فشار را دارد، استفاده شد (کلاس مهار ROD). المان‌های این نوع مهار مدول الاستیسیته فولاد و مقطعی لوله‌ای شکل دارند [۱۸].

جدول (۲) مشخصات لنگر مهار، بویه و بدنه مغروق مبدل.

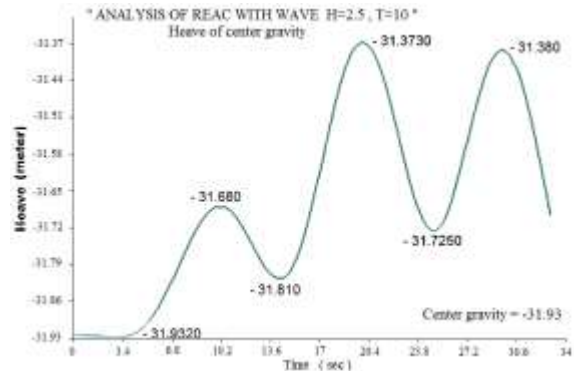
نام قسمت	تعداد خط مهار	قطر خارجی	قطر داخلی
مهار کششی	۳	۲۰۰ (mm)	۲۰ (mm)
مهار کتنری	۴	۱۰۰ (mm)	۰
طول	پیش کشیدگی	مدل بانگ	
مهار کششی	۰ (kN)	۲۱۰ (GPa)	۳۵,۴۳ (m)
مهار کتنری	۰ (kN)	۶۵,۳ (GPa)	۶۵ (m)
وزن ton	مرکز ثقل	مرکز بویانسی	
بدنه مغروق	-۳۳,۴۵Z =	Z=-۳۱,۵۶	۱۸۵,۵
بویه	-۱,۹۰Z =	Z=-۱,۴۵	۶۴
غوطه وری	شعاع ژیراسیون		
بدنه مغروق	$R_{x,y}=4,493$ , $R_z=6,017$		۳۴,۵۸

<sup>۱</sup> Response Amplitude Operator – (RAO).





شکل (۱۶) دامنه حرکت بدنه مغروق با مهار لنگر کنتری در جهت هیو (مرکز ثقل بدنه: ۳۱.۹۳ - متر).



شکل (۱۴) دامنه نوسان هیو بدنه مغروق در حالت بدون سیستم مهار (مرکز ثقل بدنه: ۳۱.۹۳ - متر).

علت عدم پاسخ منظم و تناوبی در سیستم لنگر کنتری نسبت به لنگر پایه کششی قطر کم و عدم پیش کشیدگی برای لنگر است. ضمن آنکه، در حالت لنگر کنتری نیروی بازگردان حاصل از وزن خطوط مهار و فاصله مرکز ثقل آنها است، ولی در سیستم مهار کششی نیروی بازگردان حاصل از نیروی کششی ایجاد شده در خطوط مهار می‌باشد.

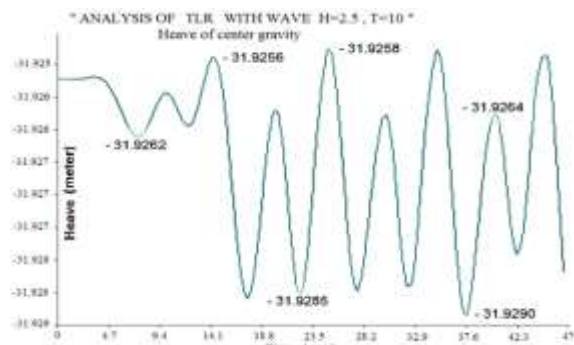
مشخصات سیستم مهار انتخابی برای دو حالت کنتری و کششی با گزینش حداقل‌های مشخصه لنگر مهار از قبیل تعداد خطوط مهار، قطر خطوط مهار، مساحت مؤثر و در حالت پیش کشیدگی صفر برای دو سیستم مهار بوده است، لذا با افزایش این مقادیر کاهش نوسان هیو امکان پذیر است. با بررسی نتایج بدست آمده، متوسط دامنه جابجایی هیو بدنه مغروق، برای حالت بدون سیستم مهار ۳۰٫۴۸ سانتی متر و برای حالت مهار به کمک لنگر کششی و لنگر کنتری به ترتیب: ۱٫۸ و ۴۰٫۵ میلی‌متر است. با استناد به نتایج تحلیل در طول ۲۰۰ ثانیه اعمال موج، نتیجه می‌شود که سیستم مهار کششی ۹۸ درصد و کنتری ۸۵ درصد دامنه نوسان هیو بدنه مغروق را نسبت به حالت بدون لنگر مهار کاهش می‌دهد. نوسانات هیو در حالت مهار کششی علاوه بر کاهش دامنه نوسان هیو به مقیاس میلی‌متر، نسبت به مهار کنتری منظم تر است (فقط در جهت هیو).

براساس الگوریتم عملکردی سیستم مدار هیدرولیک در مُبدل جاذب نقطه‌ای (شکل (۲))، عامل ایجاد فشار در سیستم مدار هیدرولیک دستگاه مُبدل، نیروی استحصالی توسط بویه و عکس‌العمل معکوس بدنه مغروق مُبدل است، لذا، در قیاس با دیگر سیستم‌های لنگر مهارمانند: کابلی، اسلک (مهار افتاده) و لنگر کنتری، قابلیت تحمل فشار در لنگر پایه کششی باعث افزایش عکس‌العمل معکوس بدنه

در این حالت، به دلیل عدم اعمال سیستم مهار بر بدنه مغروق مُبدل، حرکت سرچ بدنه مغروق زیاد بوده، لذا، آنالیز در محدوده زمانی ۵۰ ثانیه انجام شد. در دو مرحله بعدی، تأثیر سیستم مهار بر این محدوده زمانی بررسی شده است.

پاسخ‌ها در حالت بدون سیستم مهار: دامنه نوسان هیو بدنه مغروق در محدوده ۲۵ تا ۴۴٫۵۲ سانتی متر است. همانگونه که در نمودار شکل (۱۴) مشخص است، بعلت عدم مهار بدنه مغروق مُبدل و حساسیت نرم افزار در ایجاد تعادل بین نیروی وزن، بویانسی و نیروی موج در طول تحلیل دینامیکی در حوزه زمان، مرکز ثقل مُبدل جابجایی دارد که با مهار بدنه مغروق مُبدل حذف می‌گردد.

پاسخ‌ها در حالت با سیستم مهار: حداکثر دامنه نوسان هیو بدنه مغروق در حضور لنگر پایه کششی در محدوده ۰٫۶ تا ۲٫۹ میلی‌متر و نوسان هیو به شکل متناوب و منظم است (شکل (۱۵)) و با اعمال لنگر کنتری به بدنه مغروق دستگاه، حداکثر دامنه نوسان هیو در محدوده ۱۵ تا ۶۷ میلی‌متر است. شکل (۱۶) دامنه نوسان در جهت هیو در حالت کنتری را نشان می‌دهد.



شکل (۱۵) دامنه حرکت بدنه مغروق با مهار لنگر پایه کششی در جهت هیو (مرکز ثقل بدنه: ۳۱٫۹۳ - متر).

حرکت سرچ شده و از دامنه محاسباتی خارج می‌گردد، لذا، تحلیل در زمان محدود (۵۰ ثانیه) فقط جهت بررسی و مقایسه آثار اعمال لنگر مهاری بر پاسخ‌های بویه و بدنه مغروق مبدل انجام شده است.

نتایج حاصل شده در این مرحله، بر اساس نسبت پاسخ دامنه هیو بویه و بدنه مغروق به دامنه موج برخوردی در شکل (۱۷) مشخص شده است. مطابق رابطه (۱۲) چنانچه بدنه مغروق مبدل در جهت هیو به نحوی مهار شود که حرکت نسبی بین بویه و بدنه مغروق مبدل در جهت هیو افزایش یابد، حاصل آن افزایش انرژی استحصالی از موج خواهد بود.

جهت کاهش دامنه حرکت هیو بدنه مغروق، استفاده از صفحه هیو (صفحه‌ای با قطر زیاد و ارتفاع کم) در مبدل‌های جاذب نقطه‌ای انرژی موج متداول است و موقعیت مبدل با سیستم لنگر مهاری تثبیت می‌شود.

پس از تحلیل مبدل دو بدنه جاذب نقطه‌ای با سیستم فنر خطی با سختی ۱۲۰۰ کیلونیوتن بر متر و بدن تأثیر لنگر مهاری، پاسخ‌های هیو بویه و بدنه مغروق مبدل از مجموع پاسخ‌ها استخراج و با توجه به رابطه (۱۲) انرژی استحصالی محاسبه گردید. شکل (۱۸) مقایسه‌ای است بین انرژی موج و انرژی استحصالی با سیستم فنر خطی و بدون اعمال اثر مهار بر مبدل. نتایج بیانگر استحصال ۱۳٫۵ درصد از انرژی موج توسط مبدل دو بدنه مدل سازی شده در شرایط مرحله اول محاسباتی است.

#### ۷-۲- تحلیل مبدل با اعمال لنگر پایه کششی

جهت تحلیل مبدل دو بدنه جاذب نقطه‌ای با سیستم فنر خطی و در شرایط اعمال لنگر پایه کششی بر بدنه مغروق، مدلسازی شد. مطابق روش قبل و شامل سه بخش اصلی: بویه، سیستم فنر خطی (SPR) و بدنه مغروق مبدل مطابق با شکل (۱۹) انجام گردید.

در این مدل‌سازی مشابه مرحله اول: بویه و بدنه مغروق با یک فنر با سختی ۱۲۰۰ kN/m به هم متصل شده‌اند. ابعاد و مشخصه‌های هندسی مدل تغییر نکرده و مطابق جدول (۱) است و مشخصات لنگر پایه کششی مطابق جدول (۲) می‌باشد. تحلیل دینامیکی در حوزه زمان و در شرایط دریایی مرحله قبل، انجام شده است. شکل (۲۰) بیانگر نسبت دامنه پاسخ‌های هیو بویه و بدنه مغروق مبدل به دامنه موج در یک محدوده زمانی است.

مغروق در هنگام پایین روی بویه می‌گردد. با توجه به نتایج و مطالب فوق، می‌تواند پیش‌بینی نمود، سیستم لنگر پایه کششی در این نوع عملکرد جذب انرژی از موج، بهتر از سیستم‌های مهاری دیگر مانند: سیستم مهار اسلک، کابلی، سه نقطه‌ای (بویه‌ای) و کنتری عمل کند (فقط در عملکرد سیستم مدار هیدرولیک در مبدل‌های دو بدنه جاذب نقطه‌ای انرژی موج).

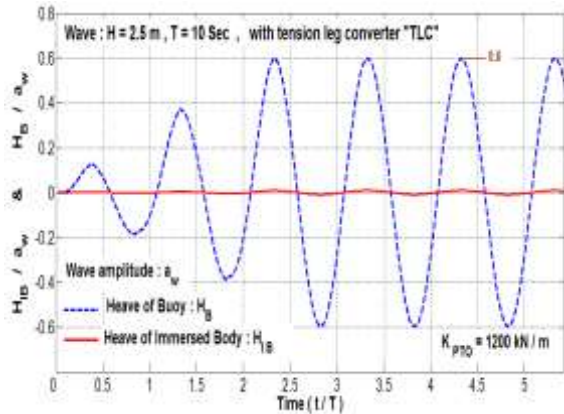
#### ۷- بررسی اثرات لنگر پایه کششی بر هیدرودینامیک مبدل دو بدنه جاذب نقطه‌ای

بررسی اثرات سیستم مهار کنتری و پایه کششی بر بدنه مغروق مبدل جاذب نقطه‌ای نشان داد که، لنگر پایه کششی بهتر از لنگر کنتری دامنه حرکت بدنه مغروق مبدل را در جهت هیو کاهش می‌دهد و پیش بینی گردید که، سیستم پایه کششی به بهبود عملکرد جذب انرژی در مبدل دو بدنه جاذب نقطه‌ای که از سیستم مدار هیدرولیک (شکل (۲۲)) جهت جذب و تبدیل انرژی استفاده می‌کند، کمک خواهد نمود، لذا یک سیستم مهار کششی با سه خط مهار با مشخصات ذکر شده در جدول (۲) برای مبدل جاذب نقطه‌ای انتخاب گردید.

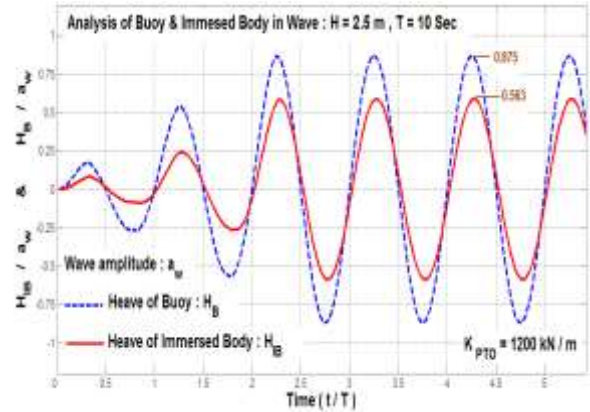
پس از انجام تحلیل صحت سنجی محاسبات با خطای ناشی از محاسبات و مدل سازی بین ۵ تا ۷ درصد نسبت به پژوهش مرجع (پژوهش آزمایشگاهی هسیانگ و واپلی) و دستیابی به پاسخ‌های مطلوب و نیز انتخاب لنگر پایه کششی برای مبدل دو بدنه (بویه و بدنه مغروق) جاذب نقطه‌ای، در ادامه تحلیل در دو حالت انجام گردید، ابتدا، بدون تأثیر لنگر مهاری و در مرحله بعدی با اعمال لنگر پایه کششی، این تحلیل‌ها در حوزه زمان و جهت تعیین عملکرد هیدرودینامیک مبدل دو بدنه با سیستم فنر خطی (با سختی فنر ۱۲۰۰ kN/m) انجام گردید.

#### ۷-۱- تحلیل هیدرودینامیک مبدل دو بدنه

تحلیل هیدرودینامیک در حوزه زمان بر روی مبدل دو بدنه جاذب نقطه‌ای با سختی فنر خطی ۱۲۰۰ کیلونیوتن بر متر انجام گردید. نکته قابل توجه آن است که، در روند محاسبات فقط جابجایی هیو جهت محاسبه انرژی استحصالی از موج مدنظر است. بواسطه عدم اعمال تأثیر سیستم لنگر مهاری بر بدنه مغروق مبدل (فقط در این مرحله محاسبات) مدل دارای



شکل (۲۰) نسبت دامنه نوسان هیو بویه و بدنه مغروق به دامنه موج در شرایط اعمال لنگر پایه کششی بر مبدل.

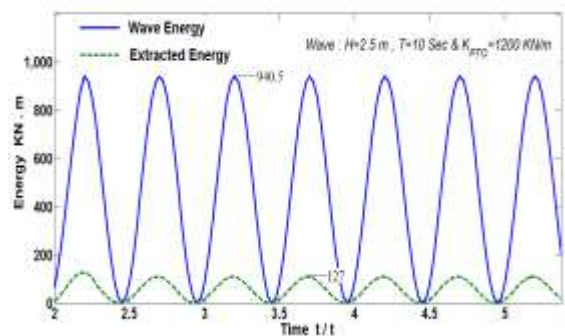


شکل (۱۷) نسبت دامنه هیو بویه و بدنه مغروق به دامنه موج.

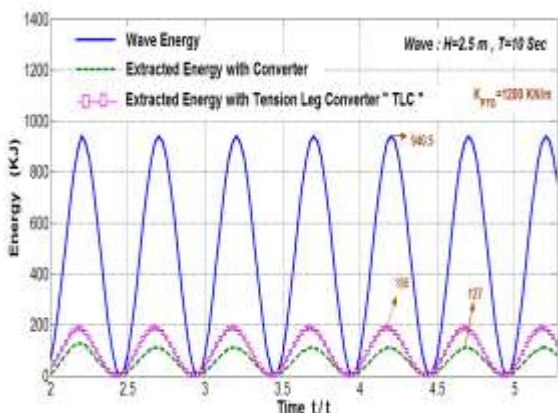
دینامیک مبدل دو بدنه با سیستم اتصال فنر خطی، نتایج ذیل حاصل می‌گردد.

دامنه حرکت بویه و بدنه مغروق با اعمال لنگر پایه کششی هر دو کاهش داشته است این کاهش به ترتیب: درصد ۳۱٫۵ و ۹۸ درصد بوده است، ولی دامنه حرکت نسبی هیو بین بویه و بدنه مغروق افزایش داشته است و از  $\pm ۰٫۳۹$  متر به  $\pm ۰٫۷۵$  متر رسیده است که حدود ۹۳ درصد با اعمال لنگر پایه کششی دامنه حرکت نسبی هیو بین بویه و بدنه مغروق افزایش داشته است.

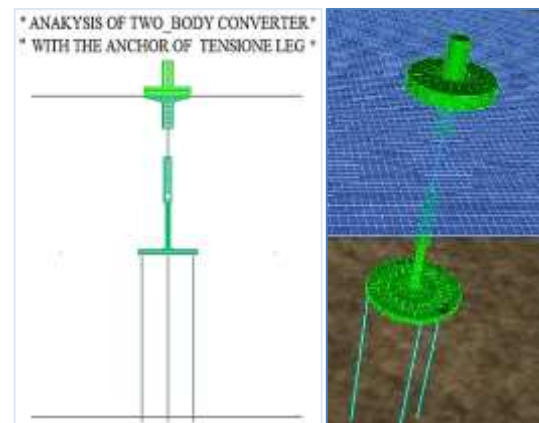
افزایش اختلاف دامنه نوسان هیو بین دو بدنه مبدل جاذب نقطه‌ای مطابق معادله (۱۲) باعث افزایش انرژی استحصالی می‌گردد. شکل (۲۱) مقایسه‌ای بین انرژی استحصالی از موج توسط مبدل دو بدنه جاذب نقطه‌ای مدل سازی شده با سیستم فنر خطی است.



شکل (۱۸) انرژی موج و انرژی استحصالی از آن توسط مبدل بدون تأثیر لنگر مهاری بر مبدل.



شکل (۲۱) مقایسه انرژی استحصالی از انرژی موج با اعمال لنگر پایه کششی بر مبدل دو بدنه جاذب نقطه‌ای.



شکل (۱۹) مدل سازی مبدل جاذب نقطه‌ای با لنگر پایه کششی.

با توجه به این نتایج، دامنه حرکت هیو بدنه مغروق تقریباً بطور کامل مهار شده است که علت آن، تأثیر لنگر پایه کششی بر مهار حرکت بدنه مغروق مبدل در جهت هیو است. با بررسی نتایج در دو شکل (۲۰) و (۱۷) که مقایسه‌ای است بین دامنه حرکت هیو بویه و بدنه مغروق در دو حالت: اعمال لنگر پایه کششی بر مبدل و عدم تأثیر لنگر در تحلیل هیدرو

## ۹- مراجع

- [1] Fadaeenejad, M., Shamsipour, R., Rokni, S. D and Chandima G., "New Approaches in Harnessing Wave Energy: With Special Attention to Small Islands", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 29, pp. 345-354, 2014.
- [2] Budal, K. and Falnes, J., "A Resonant Point Absorber of Ocean-Wave Power", *Journal of Nature*, Vol. 918, pp. 478-489, 1975.
- [3] Evans, D. V., "A Theory for Wave-Power Absorption by Oscillating Bodies", *J Fluid Mech*. Vol. 77, pp. 1-25, 1976.
- [4] Mei, CC., "Power Extraction from Water Waves", *J Ship Res.*, Vol. 20, pp. 20-63, 1976.
- [5] Falnes, J., "Wave-energy Conversion Through Relative Motion Between two Single-Mode Oscillating Bodies", *J Offshore Mech Arc Eng.*, Vol. 121, pp. 8-32, 1999.
- [6] Alexandra. A. E. Price., "New Perspectives on Wave Energy Converter Control", A Thesis of Doctor of Philosophy at the University of Edinburgh, March, 2009.
- [7] Johanning, G. H. and Smith, J. Wolfram, "Towards Design Standards for WEC Moorings", 6<sup>th</sup> European wave Tidal Energy Conference. 2005.
- [8] Fonseca, N., Pascoal, R., Morais, T., Dias, R. and Fonseca, N., "Design of a Mooring System with Synthetic Ropes for the FLOW Wave Energy Converter", 28<sup>th</sup> International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. American Society of Mechanical Engineers, 2009.
- [9] Markus, R., Magaña, M. E., Sawodny, O., Brekken, K.A. and Hyuck-Min, K., "Power Optimisation of a Point Absorber Wave Energy Converter by Means of Linear Model Predictive Control", *Renewable Power Generation, IET*, Vol.8, No.2, pp.203-215, 2014.
- [10] Falcão, F., Vicente, P. C., Gatoa, L. M.C. and Justino. P. A., "Dynamics of Arrays of Floating Point-Absorber Wave Energy Converters with Inter-Body and Bottom Slack-mooring Connections", *Applied Ocean Research*, Vol. 31, pp. 267-281, 2009.
- [11] Vicente, P. C., Falcão, A. F. and Justino. P. A., "Slack-Chain Mooring Configuration Analyses of a Floating Wave Energy Converter", 9<sup>th</sup> European Wave and Tidal Energy Conference, Southampton, UK, 2011.
- [12] Falcão, F. A., "Wave Energy Utilization: A Review of the Technologies", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 14, pp. 899-918, 2010.
- [13] Arthur, Pecher, "Performance Evaluation of Wave Energy Converters", PhD Thesis

این مقایسه در دو حالت: بدون اعمال اثر سیستم مهار و با اعمال اثر لنگر پایه کششی بر بدنه مغروق مبدل است. نیروی استحصالی در این دو حالت بر اساس پاسخ‌های دینامیکی بویه و بدنه مغروق به موج با ارتفاع ۲٫۵ متر و زمان تناوب ۱۰ ثانیه بوده و براساس رابطه (۱۲) استخراج شده است.

## ۸- نتیجه‌گیری

نتایج این مقایسه، بیانگر افزایش ۶٫۲ درصدی انرژی استحصالی از موج در اثر استفاده از لنگر پایه کششی در مبدل دو بدنه جاذب نقطه‌ای نسبت به حالت بدون اعمال اثر لنگر است و درصد انرژی جذب شده از موج در شرایط مرحله اول (بدون تأثیر لنگر مهار) ۱۳٫۵ است و در مرحله دوم (اعمال لنگر پایه کششی) ۱۹٫۷ درصد حاصل شده است.

در این مقاله، به بحث و بررسی آثار سیستم‌های مهار شامل: لنگر پایه کششی و کتنری بر پاسخ دینامیکی هیو یک مبدل دو بدنه جاذب نقطه‌ای انرژی موج پرداخته شد. بدین منظور مدل سازی و تحلیل هیدرودینامیک در حوزه زمان بر روی نمونه مدل پژوهش آزمایشگاهی هسیانگ و وایلی که در تانک موج دانشگاه برکلی آمریکا تست گردیده است، انجام پذیرفت. پس از معتبر سازی نتایج، آثار دو لنگر فوق، بر دامنه حرکت هیو بدنه مغروق بررسی گردید که نتایج آن، بیانگر کاهش دامنه حرکت بدنه مغروق مبدل به ترتیب ۸۵٪ و ۹۸٪ برای حالت اعمال لنگر کتنری و پایه کششی نسبت به حالت مهار دامنه حرکت هیو بدنه مغروق مبدل فقط با استفاده از صفحه هیو (صفحه‌ای با قطر زیاد و ارتفاع کم) است. سپس، تحلیل بر روی یک مبدل دو بدنه (بویه و بدنه مغروق) جاذب نقطه‌ای که با سیستم فنر خطی کوپل شده است، انجام گردید و آثار سیستم لنگر پایه کششی بر عملکرد مبدل بررسی شد. نتایج بیانگر افزایش حرکت نسبی در جهت هیو بین دو بدنه مبدل در اثر اعمال سیستم مهار پایه کششی است که باعث افزایش ۶٫۲ درصدی انرژی استحصالی از موج می‌گردد. در مجموع در اثر اعمال سیستم مهار پایه کششی بر مبدل دو بدنه جاذب نقطه‌ای، میزان انرژی استحصالی از موج با ارتفاع ۲٫۵ متر و زمان تناوب ۱۰ ثانیه و در شرایط ذکر شده، از ۱۳٫۵ درصد حالت بدنه مغروق فقط با استفاده از صفحه هیو به ۱۹٫۵ درصد در حال استفاده از سیستم مهار پایه کششی افزایش داشته است.

- Defended in Public at Aalborg University, 28<sup>th</sup> September, 2012.
- [14] Yi-Hsiang, and Yu. Ye, Li., "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, 2013.
- [15] Yang, S.A., "On the Singularities of Green's Formula and its Normal Derivative, with an Application to Surface Wave Body interaction problems", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. Vol. 47, pp. 1841-1864, 2000.
- [16] Newman, J. N., "Marine Hydrodynamics", London, England. 9th printing, 1999.
- [17] Yi-Hsiang, and Yu. Ye, Li., "A RANS Simulation for the Heave Response of a two-Body Floating Point Wave Absorber", 21<sup>st</sup> International offshore (ocean) and polar engineering conference, Hi, United States. 2011.
- [18] Bentley Sustaining Infrastructure. "Reference Manual for Moses Ultramarine", Bentley Systems October 14, 2014.
- [19] Katsikadelis, J. T., "Boundary Elements: Theory and Applications", Elsevier Science Ltd. First edition 2002.
- [20] Yi-Hsiang, Yu. Ye, Li., Epler, J. and Previsic. M., "Experimental Investigation of the Power Generation Performance of Floating-Point Absorber Wave Energy Systems", 27<sup>th</sup> International Workshop on Water Waves and Floating Bodies Copenhagen, Denmark, 2012.