مجله مهندسی مکانیک مدرس، مرداد 1396، دوره 17، شماره 5، ص‌ص 129-137

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

هیدرودینامیک بویه مهارشده با رویکرد بهبود در جذب انرژی موج

مهدی نظری‌برنجکوب[1]، محمود غیاثی[2*]

1- دانشجوی دکتری، مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
2- استادیار، مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
* تهران، صندوق پستی 015875-4413، mghiasi@aut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 07 اسفند 1395
پذیرش: 07 فروردین 1396
ارائه در سایت: 09 اردیبهشت 1396

کلید واژگان:
مبدل اوپسالا
بویه جاذب نقطه‌ای
بویه مخروطی
بویه کپ‌کروی
انرژی موج استوکس

چکیده

در مبدل‌های تک- بدنه جاذب نقطه‌ای انرژی موج اقیانوسی، نوساناتِ یک جسم شناور (بویه) عامل اصلی تولید الکتریسیته است. بهینه‌سازی هندسه بویه راهی برای افزایش راندمان در این مبدل‌ها محسوب می‌شود. در تحقیق حاضر فرآیندِ جذب انرژی موج در مبدل جاذب نقطه‌ای، به یک سیستم فنر- میراگر خطی شبیه‌سازی شده است. دو هندسه برای بویه مبدل مدل‌سازی‌شده (بویه مخروطی و بویه کپ‌کروی) در نظر گرفته شده است. بررسی تأثیر هندسه بویه بر دینامیک آن در موج غیرخطی و همچنین مقایسه عملکرد دینامیکی دو بویه بر راندمان مبدل انرژی موج انجام شده است. نحوه یکسان‌سازی شرایط محیطی و مدل‌سازی دو مدل مهارشده موردبحث قرارگرفته است و یک روش یکسان‌سازی پیشنهاد شده است. انرژی مؤثر موج بر هر مدل براساس مشخصات هندسه بویه آن محاسبه شده است. سپس تحلیل هیدرودینامیک مدل مهارشده به روش المان مرزی و با رعایت حاکمیت استفاده از تئوری تفرق انجام شده است. موج برخوردی به مدل، موج استوکس مرتبه دوم در نظر گرفته‌شده است.

نتایج در حوزه زمان و فرکانس به‌دست‌آمده است و با نتایج پژوهش در دسترس اعتبارسنجی شده است. حداکثر پاسخ دینامیکی بویه مهارشده با هندسه کپ‌کروی در هیو و سرج (جهت قائم و افق) به ترتیب حدود 4.4% و 11.3% بیشتر از مدل دیگر است. مبدل مدل‌سازی شده با بویه کپ‌کروی نسبت به مدل با بویه مخروطی در جذب انرژی موج موفق‌تر است. متوسط درصد جذب انرژی موج در مبدل مدل‌سازی شده با بویه کپ‌کروی در حدود 2.2% تا 2.5% بیشتر از مدل دیگر است. متوسط درصد جذب انرژی موج توسط دو مدل، بین 20% تا 24% درصد پیش‌بینی شده است.

Hydrodynamics of restrained buoy with an approach to wave energy absorption enhancement

Mehdi Nazari Berenjkoob[1], Mahmoud Ghiasi[1*]

1- Department of Maritime Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.
* P.O.B. 015875-4413 Tehran, Iran, mghiasi@aut.ac.ir.

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 25 February 2017
Accepted 27 March 2017
Available Online 29 April 2017

Keywords:
Uppsala converter
Point absorber buoy
Conical buoy
spherical-cap buoy
Stokes wave energy

ABSTRACT

In single-body converters of ocean wave energy, oscillations of a floating body (buoy) serve as the main driving force for electricity generation. Buoy geometry optimization is known as an approach to enhance the efficiency of these converters. In the present research, the process of wave energy absorption in point absorber converter is modeled as a spring-damper system. Two geometries are considered for the buoy of the converter (conical and spherical-cap). The effects of buoy geometry on its dynamics in the nonlinear wave are investigated and comparison of these effects on dynamic performances of the modeled converter is reported. Equalization of environmental conditions and modeling of the two models were discussed, and a new equalization method was proposed. Effective wave energy on each model was calculated based on geometrical characteristics of the corresponding buoy. Then, the models were hydrodynamically analyzed via boundary element method by taking the diffraction theory as the governing theory. The incident wave was assumed to be a second-order Stokes wave.

Results were obtained in both time and frequency domains and validated against the results of available research. Maximum dynamic responses of the restrained buoy with spherical-cap geometry in heave and surge (vertical and horizontal directions, respectively) were found about 4.4% and 11.3% higher than the conical buoy, respectively. The average percentage of absorbed wave energy by the modeled converter with spherical-cap buoy was about 2.2-2.5% higher than that of the other model. The average percentage of absorbed energy by the models waspredicted to range within 20-24%.

1- مقدمه

انرژی امواج قابل‌اعتمادتر نسبت به دیگر انرژی‌های تجدیدپذیر است. زیرا چگالی و پراکندگی آن بیشتر است. البته مناطقی با شار انرژی موج متوسط، مناسب‌تر از مناطق پرانرژی‌تر (ناپایدارتر) مانند مناطق نزدیک ساحل و کم‌عمق است. در این مناطق انرژی تولیدی از موج منظم‌تر، تعمیر و نگهداری و نیز دسترسی به دستگاه مبدل و انرژی تولیدی آسان‌تر است [1]. مبدل‌های

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

M. Nazari Berenjkoob, M. Ghiasi, Hydrodynamics of restrained buoy with an approach to wave energy absorption enhancement, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 5, pp. 129-137, 2017 (in Persian)

انرژی موج برای تبدیل انرژی امواج به انرژی الکتریسیته استفاده می‌شوند. مبدل‌ها انواع مختلفی مثل جاذب نقطه‌ای، ستون نوسانگر، تضعیف‌کننده و غیره دارند که انتخاب درست آن‌ها باید براساس ویژگی منطقه‌ای و زیست‌محیطی صورت گیرد [1]. تاکنون طیف گسترده‌ای از فناوری‌های استحصال و تبدیل انرژی موج به الکتریسیته ارائه شده است. امروزه دو روش برای تبدیل انرژی استحصالی از موج متعارف یک روش استفاده از ژنراتور خطی و روش دیگر استفاده از مدار تحت‌فشار هیدرولیک است. در روش نخست یک سیستم الکترومغناطیس فرآیند تبدیل انرژی استحصالی از موج را به انرژی الکتریسیته انجام می‌دهد. این سیستم در مبدل تک بدنه اوپسالا و L10 کاربرد دارد [2]. درروش دوم انرژی موج تبدیل به یک فشار هیدرولیک می‌شود و این فشار هیدرولیک ژنراتور را فعال می‌کند. سیستم مدار تحت فشار هیدرولیک در مبدل‌های دوبدنه جاذب نقطه‌ای مانند مبدل آکوابوی، ویِوباب و OPT[1] استفاده می‌شود [3,2].

مبدل‌های جاذب نقطه‌ای یا تک بدنه و یا دوبدنه است. در مبدل‌های دوبدنه انرژی استحصالی از موج حاصل جابه‌جایی نسبی بین بویه و بدنه دستگاه در جهت قائم (نوسان هیو بویه) است. در این نوع مبدل‌ها از سیستم مدار تحت‌فشار هیدرولیک استفاده می‌شود و بویه و بدنه دستگاه مبدل هر دو شناور است [3]. در مبدل‌های تک‌بدنه که بویه آن‌ها شناور و بدنه بر بستر دریا ثابت شده انرژی استحصالی از موج فقط وابسته به نوسان بویه در موج است [2].

پژوهش‌های زیادی در زمینه دینامیک بویه جاذب انرژی موج در امواج منظم و نامنظم انجام شده است، به‌طور خاص مقایسه دینامیک اشکالی از هندسه بویه در موج منظم برای آنالیز یک مبدل دوبدنه مهارشده توسط الویز و همکارانش مطالعه شده است. در پژوهش آن‌ها از سه هندسه برای بویه، شامل استوانه عمودی، مخروط و نیم‌کره استفاده شده که جرم و سطح تلاقی آن‌ها با آب متفاوت است [4].

در پژوهشی دیگر مقایسه فشار حاصل از موج بر سه هندسه بویه به کمک یک کد تجاری المان محدود شامل مخروط، کره و استوانه افقی با شعاع برابر ولی جرم متفاوت، توسط بیراأ بررسی شده است [5]. در دو پژوهش عددی یادشده جرم بویه‌ها و یا سطح تلاقی آن‌ها با آب یکسان نیست. در فرآیند مقایسه عملکرد بویه‌ها در جذب انرژی موج تفاوت موجود در انرژی مؤثر موج بر هر بویه در محاسبات لحاظ نشده است.

شبیه‌سازی عددی اندرکنش بین موج و جسم شناور و نیز مقایسه نیروی کوبش بویه‌هایی که از آب خارج شده‌اند توسط دی‌بکر و همکارانش انجام‌شده است. تمرکز پژوهش آن‌ها بر سه شکل هندسی بویه شامل بویه کروی و بویه مخروطی با زاویه 45 و 30 بوده است. آن‌ها به کمک شبیه‌سازی مبدل توسط نرم‌افزار ومیت، پیش‌بینی کردند که بویه مخروطی 45 درجه در جذب انرژی بهتر و در میزان کوبش نوع هندسه بسیار مؤثر است [6].

در پژوهشی دیگر دینامیک دو هندسه بویه (مخروط و نیم‌کره) در موج نامنظم توسط پاستور و لی‌یو بررسی شده است. آن‌ها از نرم‌افزار آکوا- انسیس استفاده و پیش‌بینی کرده‌اند که ایجاد همخوانی (تناسب) بین طول موج و قطر بویه سبب افزایش دامنه حرکت هیوِ بویه می‌شود، همچنین اثرات منفی حرکت پیچ (یا رول) را کاهش می‌دهد [7].

در دو پژوهش عددی یادشده (پاستور و همکار، دی‌بکر وهمکاران) جرم بویه‌ها متفاوت بوده و مقدار انرژی مؤثر موج بر هر بویه در نظر گرفته نشده است. در این پژوهش‌ها از نسبت توان استحصالی به حداکثر توانی که می‌توان از موج استحصال کرد استفاده شده است.

یکسان‌سازی شرایط محیطی و مشخصات فیزیکی بویه‌ها جهت مقایسه دینامیک آن‌ها در برخورد با موج حائز اهمیت است. در پژوهش‌های یادشده یا شعاع بویه‌ها یا جرم آن‌ها و یا عمق غوطه‌وری آن‌ها یکسان در نظر گرفته نشده است؛ بنابراین نیاز به مطالعه دوباره احساس می‌شود.

نکته قابل‌توجه آن است که در فرآیند مقایسه میزان انرژی جذب شده توسط بویه‌ها با یکدیگر و نیز مقایسه تأثیر هندسه بویه بر دینامیک آن در امواج باید جرم بویه‌ها یکسان باشد و مقدار انرژی مؤثر موج بر هر بویه در محاسبات لحاظ شود. انرژی مؤثر موج بر هر مدل وابسته به عمق غوطه‌وری بویه (h_B) و سطح تلاقی آن با آب ($A_W{}^B$) است.

در تحقیق حاضر مبدل تک بدنه انرژی موج به یک بویه مهارشده با سیستم فنر- میراگر خطی شبیه‌سازی شده است. دو هندسه برای قسمت مغروقِ بویه در نظر گرفته شد. جرم بویه‌ها و شعاع آن‌ها (یا سطح تلاقی بویه‌ها با آب) یکسان است. با توجه به عمق غوطه‌وری هر بویه انرژی مؤثر موج بر هر بویه محاسبه شده است تا درصد انرژی جذب‌شده از انرژی مؤثر موج مشخص شود.

تفاوت مهم بین پژوهش‌های مشابه یادشده و پژوهش حاضر یکسان‌سازی شرایط محیطی، مدل‌سازی و مشخصات فیزیکی بویه‌ها، جهت مقایسه دینامیک آن‌ها در برخورد با موج است. دو مدل طراحی‌شده در محیط نرم‌افزاری آکوا- انسیس در برخورد امواج غیرخطی تحلیل هیدرودینامیک شده‌اند. برای کاهش خطا و افزایش دقت نتایج مدل در شرایط آب عمیق و در محدوده حاکمیت تئوری تفرق طراحی و آنالیز شده است.

2- مبدل تک‌بدنه انرژی موج

مطالعات و تحقیقات ابتدایی جهت بررسی مفاهیم هیدرودینامیک و سیستم‌های جاذب انرژی موج توسط بُدِل و فالنس [8] و مِی [9] انجام شد. آنان پیشنهادهایی در مورد سیستم‌ها و روش‌های مفهومی جذب انرژی موج و تئوری‌های جذب حداکثری انرژی توسط جسم شناور متقارن و تک بدنه (بویه جاذب نقطه‌ای) مطرح کرده‌اند.

در اواخر دهه 1970 بدل و فالنس بر یک جاذب نقطه‌ای با حرکت کنترل‌شده در نروژ کار کردند، سپس فالنس و لی‌لبکن بررسی‌هایی بر طرح مبدل بُدِل در سال 2003 انجام دادند. آن‌ها براساس طرح بُدل به بررسی استحصال انرژی موج به روش ستون نوسانگر آب درونِ یک جسم شناور با سه هندسه مختلف، پرداخته‌اند [10].

تمرکز بر مبدل تک بدنه با سیستم ژنراتور خطی و براساس طرح بُدل در دانشگاه اوپسالا سوئد بیشتر صورت گرفته است. این پروژه از سال 2001 شروع شده است و در حال تکمیل و توسعه قسمت‌های مختلف آن از جمله ژنراتور خطی و هندسه بویه است [10]. در مبدل تک بدنه اوپسالا یک سیستم ژنراتور خطی، تبدیل انرژی استحصالی از موج (توسط بویه) را انجام می‌دهد (شکل 1) [11]. در این روش بویه جاذب انرژی موج با یک مهار کابلی به سیستم الکترومغناطیس (داخل بدنه مستقر بر کف دریا) متصل است. این سیستم شامل آهن‌ربای ثابت، آهن‌ربای متصل به بویه و یک دور پیچ سیمی است. با تغییر قطبیت مغناطیسی در اثر حرکت آهن‌ربای متصل به بویه نوسانی، الکتریسیته تولید می‌شود [11,2]. این فرآیند به‌صورت طرح‌واره در شکل 1 که اصول کارکردی دستگاه اوپسالا نیز نمایش داده شده است [11].

[1] Aquabuoy, Wavebob and OPT (Ocean Power Technologies) Wave Energy Conveter (WEC)

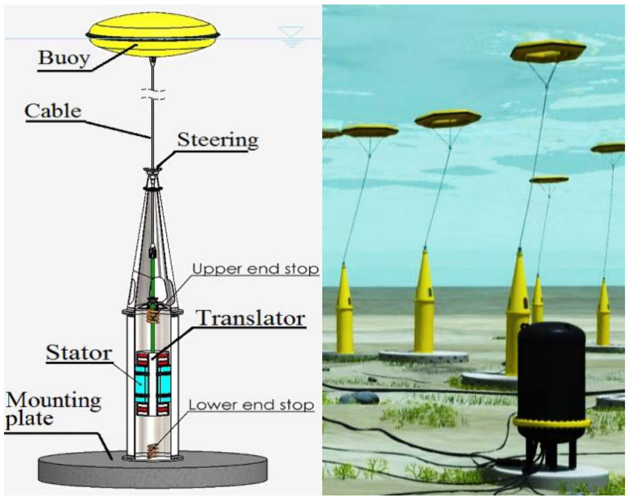

Fig. 1 A schematic from Uppsala point-absorber converter and its main components [11]

شکل 1 نمایی از مبدل جاذب نقطه‌ای اوپسالا و اجزای اصلی آن [11]

3- مدل‌سازی عملکرد مبدل تک بدنه در جذب انرژی موج

جهت محاسبه میزان انرژی استحصالی از موج در مبدل تک‌بدنه جاذب نقطه‌ای مدل‌سازی‌های متفاوتی مطرح است. مدل سیستم ترکیبی فنر- میراگر، سیستم فنر خطی و یا سیستم میراگر خطی سه روش متداول است [12,10,3]. در این مدل‌سازی‌ها بویه و بدنه مبدل با یکی از این سیستم‌ها به هم کوپل می‌شوند. سیستم عملکرد مبدل جاذب نقطه‌ای اوپسالا در فرآیند جذب انرژی موج (شکل 1) را می‌توان به‌صورت یک سیستم فنر خطی و یک میراگر خطی شبیه‌سازی کرد (شکل 2). در واقع با این شبیه‌سازی سیستم فنر- میراگر جایگزین سیستم مدار تبدیل انرژی در مبدل جاذب نقطه‌ای اوپسالا می‌شود [10]. در نتیجه نیروی جذب‌شده از موج برابر با نیروی ذخیره‌شده در سیستم فنر- میراگر خواهد بود. هدف از پژوهش حاضر یکسان‌سازی شرایط محیطی و مدل‌سازی برای دو بویه مهار شده و مقایسه عملکرد دینامیکی آن‌ها در موج منظم غیرخطی است؛ بنابراین می‌توان از هر یک از سه سیستم یادشده نیز استفاده کرد.

در تحقیق حاضر برای محاسبه میزان انرژی استحصالی از موج از سیستم ترکیبی فنر- میراگر خطی استفاده شده است (چپ شکل 2). این سیستم در آکوا به یک مهار با سختی خطی مشخص (کابل مهار الاستیک) و یک ضریب میرایی ثابت در جهت z-z شبیه‌سازی شده است (راست شکل 2).

کابل مهاری یک خط الاستیک است که سبب حفظ موقعیت بویه می‌شود. مقادیر سختی مهار و ضریب میرایی قابل تغییر است. در مجموع سیستم مدل‌سازی شده شامل سه بخش بویه جاذب انرژی (با دو هندسه متفاوت)، کابل مهار و میراگر است.

طول کابل پس از تعادل بین نیروی جرم و بویانسی بویه در حالت آب ساکن برابر با پارامتر ($L_M{}^{n=0}$) است. با برخورد موج به بویه تغییراتی در موقعیت بویه حاصل می‌شود، این جابه‌جایی‌ها در جهت افق و قائم با پارامتر x و z (نوسان سرج و هیوِ بویه) در شکل 2 نشان داده شده است. پارامتر $L_M{}^n$ طول کابل در لحظه n است که به صورت رابطه (1) تعریف می‌شود.

$$L_M{}^n = L_M{}^{n-1} + \Delta L_M{}^n \quad , \quad n=1,2,\cdots \quad , \quad n=0 : t=0$$
$$\Delta L_M{}^n = \sqrt{x_n{}^2 + (z_n + L_M{}^{n-1})^2} - L_M{}^{n-1} \qquad (1)$$

در مدل‌سازی شکل 2 بویه در معرض مستقیم با برخورد موج است و نیروی اعمالی موج به آن سبب عکس‌العمل در کابل مهاری می‌شود. مهار به

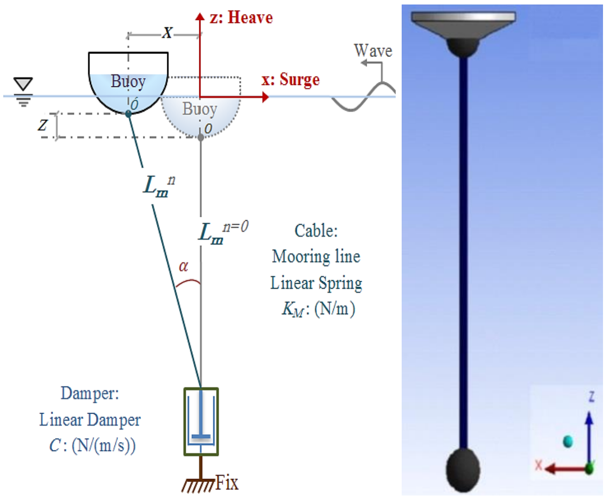

Fig. 2 The simulation of the point-absorber converter system for wave energy absorption (left) and its modeling in AQWA software (right).

شکل 2 شبیه‌سازی سیستم مبدل جاذب نقطه‌ای در جذب انرژی موج (چپ) و مدل‌سازی آن در آکوا (راست) و جهات حرکت بویه مهارشده

بستر دریا ثابت شده و نیروی جذب شده از موج برابر با نیروی درون فنر- میراگر در هر بازه زمانی است. نیرو و انرژی استحصالی از موج به صورت روابط (3,2) تعریف‌شده است که به ترتیب با اندیس F_A و E_A مشخص است. در این رابطه K_M سختی خطی کابل مهار (سختی فنر خطی)، C ضریب میرایی (جایگزین میراگر)، Δl_M تغییر طول کابل مهار و $\overline{\dot{Z}_B}{}^n$ سرعت متوسط بویه در هر بازه زمانی در امتداد هیو است. اندیس n شمارنده زمانی است. به‌طوری‌که در لحظه صفر (t=0) مقدار n برابر با صفر است.

$$F_A{}^n = F_M{}^n + F_D{}^n = K_M{}^n \, \Delta L_M{}^n + C \, \dot{Z}_B{}^n \qquad (2)$$

$$E_A{}^n = E_D{}^n + E_M{}^n = \int_{t_{n-1}}^{t_n} C \, (\overline{\dot{Z}_B^n})^2 \, dt + \int_{l_{n-1}}^{l_n} K_M \, L_M \, dl \qquad (3)$$

4- فرضیات

بویه در این مدل‌سازی با یک تک کابل به بستر دریا به‌طور محکم مهار شده است. نیروی کشش اولیه در کابل مهاری در اثر نیرو بویانسی منفی بویه اعمال شده و کابل مهارِ الاستیک بین بستر دریا و مرکز ثقل بویه کشیده شده است. میزان کشیدگی کابل (تغییر طول کابل) بسته به سختی کابل و نیروی بویانسی منفی بویه دارد. باید به این نکته اشاره کرد که از وزن کابل و اثرات تغییرات آهسته سطح آب (جزر و مد)، جریانات دریایی و دیگر شرایط محیطی بر مدل صرف‌نظر شده است. بستر دریا صاف، بدون شیب و با ژرفای 50 متر فرض شده است. امواج برخوردی، منظم- یک‌جهت است و بررسی دامنه حرکت بویه در هیو و سرج مورد نظر است. برای ایجاد کشش اولیه در کابل مهاری جرم هر بویه به صورت رابطه (4) تعریف شده است.

$$m_B = \forall_B \, \rho - \frac{F_M{}^{n=0}}{g} \quad , \quad \rho : \frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3} \quad , \quad g : \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2} \qquad (4)$$

در رابطه بالا پارامتر $\forall_B$ حجم غوطه‌وری هر یک از بویه‌ها برحسب مترمکعب است. چگالی آب و شتاب ثقل به ترتیب با ρ و g مشخص‌شده و برابر با 1025 و 9.806 است. پارامتر $F_M{}^{n=0}$ معرف نیروی کشش اولیه در کابل مهار که برابر با 100 کیلو نیوتن فرض شده است.

5- هندسه و ابعاد بویه‌های جاذب انرژی موج

طراحی سازه‌های شناور دریایی مانند سکوهای استخراج نفت باهدف کاهش

نوسانات سازه است، در حالی که برای طراحی یک بویه جاذب انرژی موج باید عکس آن عمل کرد و هندسه بویه طوری تعیین شود تا بیشترین دامنه حرکت در اثر برخورد موج حاصل گردد.

برای مقایسه عملکرد هیدرودینامیک بویه‌ها با یکدیگر و میزان انرژی جذب‌شده توسط بویه‌ها باید جرم بویه‌ها یکسان باشد، همچنین انرژی مؤثر موج بر هر یک از بویه‌ها در آنالیز نتایج مورد نظر باشد. در تحقیق حاضر دو هندسه برای قسمت غوطه‌وری بویه استوانه‌ای در نظر گرفته شده است. این دو بویه دارای حجم غوطه‌وری و شعاع یکسان هستند. بدین ترتیب جرم بویه‌ها و سطح تلاقی آن‌ها با آب یکسان خواهد بود. برابری شعاع و حجم غوطه‌وری بویه‌ها سبب تفاوت در عمق غوطه‌وری آن‌ها شده است؛ بنابراین انرژی موج برخوردی برای هر دو عمق غوطه‌وری متفاوت محاسبه شده است تا درصد جذب انرژی توسط هر مدل قابل محاسبه باشد.

پژوهش عددی ویسنته و همکارانش [10] جهت اعتبارسنجی نتایج مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش دینامیک یک عدد بویه مهارشده با هندسه کره در موج منظم و نامنظم به کمک نرم‌افزار ومیت بررسی شده است. مشخصات این بویه و نیز دو بویه با هندسه مخروطی و کپ‌کروی (نیم‌کره ناقص) در جدول 1 و شکل‌های 3 و 4 مشخص شده است.

تحلیل هیدرودینامیک مدل‌ها در محیط نرم‌افزاری آکوا- انسیس انجام شده است. این نرم‌افزار یک مجموعه ابزار قدرتمند و انعطاف‌پذیر برای آنالیز مهار و تحلیل هیدرودینامیک اجسام در محیط دریایی است که بر مبنای تئوری تفرق کدنویسی شده است [7]. نسبت قطر بویه‌ها به طول موج همواره بزرگ‌تر از 0.2 انتخاب شده است ($D_B/\lambda \geq 0.2$) تا خطا محاسباتی درروند استفاده از تئوری تفرق در محاسبات کاهش یابد.

طراحی هندسه مدل نقطه آغاز به کار با این نرم‌افزار است که در محیط سالیدورد[1] انجام شده و به محیط نرم‌افزار انتقال یافته است؛ سپس پارامترهای اصلی برای تعریف محیط دریایی مانند عمق آب، ابعاد محیط محاسباتی و دانسیته سیال مشخص شده است. پس از آن مشخصه‌های مدل مانند مرکز جرم، مقدار جرم جسم، مشخصات نقطه اتصال کابل‌مهاری به جسم شناور و بستر دریا، طول اولیه کابل مهاری، ضرایب ثابت هیدرودینامیکی و... مشخص شده است.

از آن‌جایی که در ماژول آکوا در نرم‌افزار انسیس نیرو و ضرایب هیدرودینامیک (جرم اضافه، میرایی و...) براساس فرکانس امواج برخوردی و بر مبنای تئوری تفرق محاسبه می‌شود [7]؛ بنابراین نخست فرکانس‌های امواج و جهت حرکت آن‌ها مشخص شده است. این فرکانس‌ها باید با فرکانس موج برخوردی که در قسمت بعدی نرم‌افزار تعریف می‌شود یکی باشد. پارامترهای دیگر که به‌عنوان اطلاعات اولیه- ورودی به نرم‌افزار داده می‌شود عبارت از مقدار شتاب ثقل، نوع موج برخوردی و مشخصات آن، مشخصه‌های آنالیز، دامنه حوزه زمان، گزینه‌های پاسخ ویژه زمانی و نوع دینامیک کابل مهاری است.

خروجی نرم‌افزار براساس خواسته مسئله می‌تواند شامل مقادیر نیروهای هیدرودینامیک، نیروی وارده بر جسم و نیروی داخلی کابل در طول زمان اجرا باشد، همچنین در خروجی برنامه؛ تاریخچه زمانی حرکت جسم، مقادیر شتاب، سرعت و جابه‌جایی جسم در جهات مختلف مشخص است.

6- دینامیک مدل

[1] SOLIDWORKS

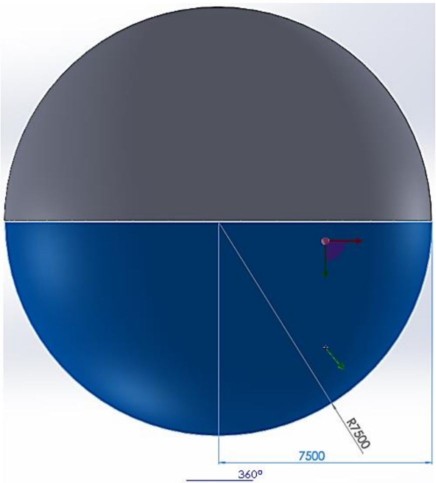

Fig. 3 Geometry of moored buoy in numerical research of Vicente for validation

شکل 3 هندسه بویه مهارشده در پژوهش عددی ویسنته برای اعتبار سنجی

جدول 1 مشخصات دو بویه با شعاع و جرم یکسان و نیز بویه استفاده‌شده در پژوهش ویسنته و همکارانش [10]

Table 1 Specifications of buoys with the same weight and radius and also the buoy is used in research of Vicente [10]

هندسه بویه	شعاع (متر)	جرم (تن)	عمق غوطه‌وری (متر)
بویه مخروط	7.500	170.9345	3.000
بویه کپ‌کروی	7.500	170.9345	2.000
بویه ویسنته	7.500	803.6214	7.500
هندسه بویه	حجم غوطه‌وری (m^3)	مرکز بویانسی (متر)	مرکز ثقل (متر)
مخروط	176.7145	-0.75	-1.75
کپ‌کروی	176.7145	-.662	-1.662
بویه ویسنته	883.5729	-2.800	-3.800

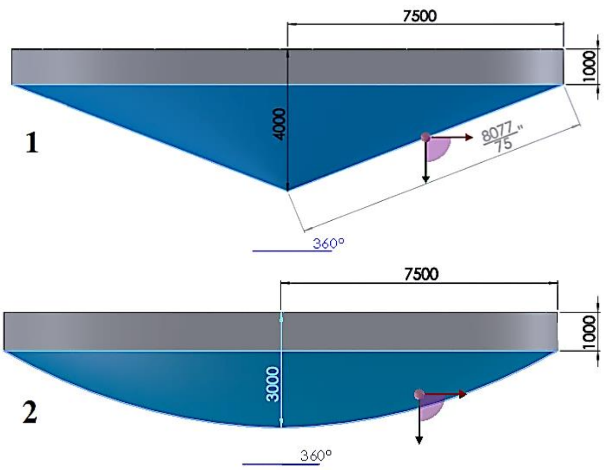

Fig. 4 Geometry of buoys with the same weight and radius

شکل 4 هندسه بویه مخروطی و بویه کپ‌کروی با شعاع و وزن یکسان

محاسبه نیروی اعمالی موج به جسم شناور و آنالیز دینامیک جسم در امواج یکی از مسائل مهم در هیدرودینامیک است. روش‌های متعددی جهت محاسبه این نیروها مطرح است. یکی از این روش‌ها حل مسئله اندرکنش موج و جسم بر پایه تئوری تفرق و به روش المان مرزی است. در این زمینه کارهای بسیاری صورت گرفته است. می‌توان به پژوهش‌های سال‌های اخیر

ویلیام فینگن و همکارانش [13]، عباس‌نیا و غیاثی [14] و رافائل و همکارانش [15] اشاره کرد.

دینامیک اجسام شناور با سیستم مهار برای کشتی و سکوهای فراساحلی به‌صورت تئوریک و به‌طور گسترده‌ای مطالعه شده است. در سال‌های اخیر برای مبدل‌های انرژی موج فراساحلی نیز مطالعات صورت گرفته است که می‌توان به پژوهش‌های جوهانینگ و همکارانش [16]، آنتونیو فالکائو و همکارانش [17]، ماکسیمیلیان و همکارانش [18] و نگهداری و همکارانش [12] اشاره کرد. آن‌ها در زمینه آنالیز دینامیکی سیستم مهار و بررسی اثرات آن بر دینامیک و راندمان مبدل انرژی موج مطالعه کرده‌اند. به طورکلی می‌توان حرکت دینامیکی جسم شناور را با معادلات حرکت (5) توصیف کرد.

$$m\,a = F \quad , \quad I_g\, a_\Omega + \Omega \times (I_g\, \Omega) = M \tag{5}$$

در این‌جا F و M به ترتیب بردار نیرو و ممان کلی اعمال‌شده به جسم که جرم جسم و تانسور اینرسی ممان در مرکز ثقل با m و I_g تعریف شده است. پارامتر a بردار شتاب برای حرکت انتقالی و پارامترهای a_Ω و Ω بردار شتاب و سرعت زاویه‌ای است. معادله حرکت جسم شناور مهار شده مطابق با مدل‌سازی شکل 2 در جهت z را می‌توان به شکل رابطه (6) نوشت [7].

$$(m + m_a(\omega))\frac{d^2Z(t)}{dt^2} + (C_{hyd}(\omega) + C)\frac{dZ(t)}{dt} + \\ +(k_{hys} + k_M)\, Z(t) = F_{ex}(\omega, t) \tag{6}$$

در این‌جا نیروهای تحریک خارجی با F_{ex} تعریف شده است. ضریب میرایی هیدرودینامیک، ضریب بازگردان هیدرو استاتیک، سختی کابل مهار و جرم اضافه هیدرودینامیک جسم شناور به ترتیب با پارامترهای C_{hyd}، k_{hys}، k_M و m_a مشخص شده که وابسته به فرکانس موج (ω) است. این پارامترهای هیدرودینامیک از طریق استفاده از روش المان مرزی و با رعایت حاکمیت تئوری تفرق با استفاده از آکوا محاسبه شده است. مقدار k_{hys} به مساحت مقطع بویه که سطح آب را قطع می‌کند، وابسته است $(k_{hys} = \rho g {A_W}^B)$. شکل 5 نمایی از مدل‌سازی را در آکوا نشان می‌دهد.

7- اعتبارسنجی

جهت اعتبارسنجی از پژوهش عددی ویسنته و همکارانش [10] استفاده شد. آن‌ها دینامیک یک بویه مهارشده با هندسه کره با شعاع 7.5m را در موج منظم و نامنظم تحلیل کرده‌اند. در پژوهش آن‌ها مقادیر سختی مهار (k_M) و

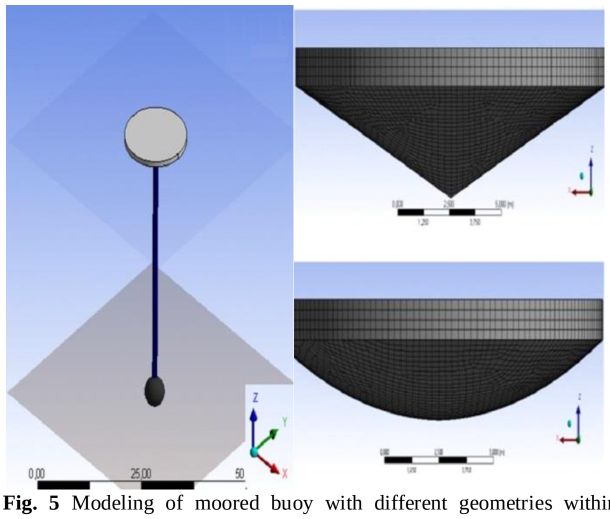

Fig. 5 Modeling of moored buoy with different geometries within AQWA.

شکل 5 مدل‌سازی بویه مهارشده با دو هندسه متفاوت در آکوا- انسیس

ضریب میرایی (C) به ترتیب برابر با 180 kN/m و 250 kN/(m/s) در نظر گرفته شده است. نخست یک بویه مهارشده با مشخصات مندرج در جدول 1 و شکل 3 (مطابق با مدل ویسنته) مدل‌سازی شد. مشخصات موج برخوردی، شرایط محیطی و فرضیات نیز مشابه این پژوهش در نظر گرفته شده است. شکل 6 بیانگر نتایج حاصل از تحلیل حاضر با نتایج پژوهش عددی ویسنته و همکارانش است. براساس گراف‌های این شکل حداکثر دامنه حرکت هیو برای بویه مهارشده در پژوهش ویسنته 0.8409 متر و در تحقیق حاضر 0.8819 متر است. حداکثر سرعت هیوِ بویه نیز به ترتیب 0/8323 و 0.9149 است. اختلاف نتایج در حداکثر دامنه حرکت هیو بویه برابر با 4.10 سانتی‌متر (4.87% خطا) و برای سرعت هیو 0.082 متر بر ثانیه (9.85% خطا) است. نسبت پاسخ هیو بویه کروی به دامنه موج برخوردی (عملگر دامنه پاسخ هیو) در پژوهش ویسنته و پژوهش حاضر در شکل 7 در حوزه فرکانس نشان داده شده است.

8- دینامیک بویه مهارشده (در حوزه زمان)

با توجه به تغییرات فشار موج در عمق آب سعی شده است که عمق غوطه‌وری بویه‌ها در یک محدوده باشد؛ بنابراین به جای بویه کروی از یک

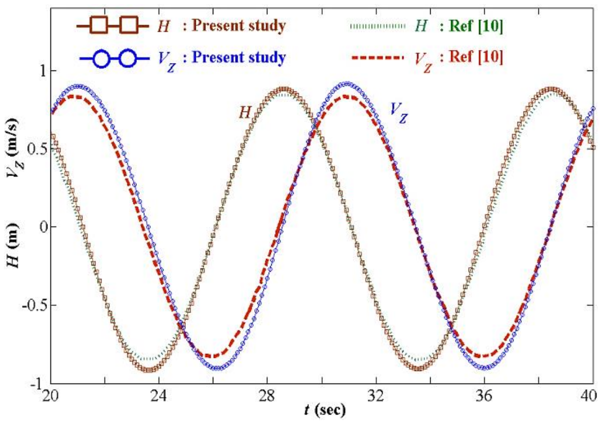

Fig. 6 A comparison between heave responses (H) and respective speeds (V_Z) of moored buoy in the present research and those of the research by vicente et al. [10] Regular wave of $A_W = 1\ \text{m}$, $T_W = 10\ \text{s}$ and $C = 250\ \text{kN/(m/s)}$, $K_M = 180\ \text{kN/m}$

شکل 6 مقایسه بین دامنه حرکت و سرعت هیو بویه کروی مهارشده در پژوهش ویسنته و همکارانش [10] و پژوهش حاضر. دامنه موج برخوردی یک متر، زمان تناوب 10 ثانیه، سختی کابل مهاری 180 kN/m و ضریب میرایی 250 kN/(m/s)

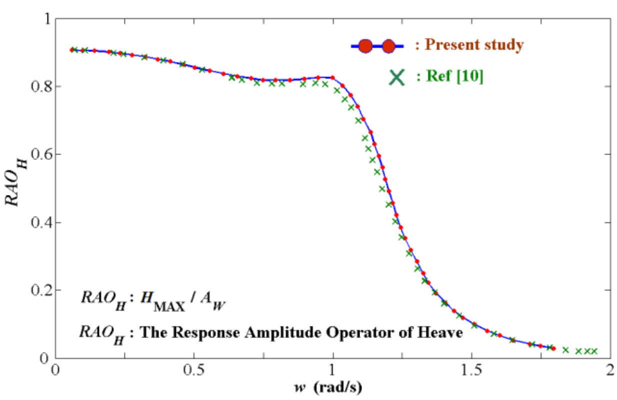

Fig. 7 Response Amplitude Operator (RAO) in heave for two identical buoys in the present research and those of the research by vicente et al. [10] In the frequency domain

شکل 7 عملگر دامنه پاسخ هیو برای بویه مهارشده با هندسه کره در پژوهش ویسنته و همکارانش [10] و پژوهش حاضر در حوزه فرکانس

بویه کپ‌کروی (نیم‌کره ناقص) استفاده شده است. در این صورت اختلاف عمق غوطه‌وری دو بویه حدود یک متر است. این تفاوت در عمق غوطه‌وری بویه‌ها نیز در محاسبه انرژی مؤثر موج برخوردی بر هر بویه لحاظ شده است.

نتایج عددی مرتبط با پاسخ دینامیکی دو مدل مهار شده با بویه مخروطی و با بویه کپ‌کروی به موج منظم غیرخطی (استوکس مرتبه دوم[1]) در جهت z و x (هیو و سرج) در شکل‌های 8 و 9 ترسیم شده است. دامنه موج برخوردی یک متر و زمان تناوب آن 6.5 ثانیه فرض شده است. نیروی کشش اولیه در کابل 100 kN، مقدار ضریب میرایی C =200 kN.s/m و ضریب سختی کابل مهاری K_M =100 kN/m در نظر گرفته‌شده است.

متوسط دامنه حرکت بویه مهارشده شماره یک و دو در جهت z (هیو) به ترتیب برابر با 0.7637 و 0.7685 متر، در جهت x (سرج) به ترتیب برابر با 1.4325 و 1.4483 متر است.

براساس رابطه (3) برای محاسبه انرژی استحصالی از موج نیاز به محاسبه سرعت هیو و نیز تغییر طول کابل مهاری در هر بازه زمانی است. این مقادیر برای دو مدل مهارشده با بویه مخروطی و با بویه کپ‌کروی در شکل 10 ترسیم شده است. نتایج نشان می‌دهد که متوسط سرعت بویه شماره یک و دو در جهت هیو ($\overline{\dot{Z}_B}^n$) برحسب متر بر ثانیه به ترتیب برابر با 0.7396 و 0.7422 است. متوسط تغییر طول کابل ($\Delta L_M{}^n$) برای مدل مهارشده با بویه مخروطی و با کپ کروی شکل برحسب متر به ترتیب برابر با 0.8269 و 0.8486 است.

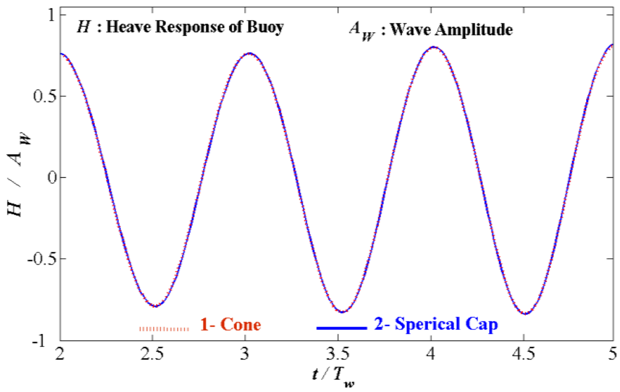

Fig. 8 The ratio of heave responses (H) of two buoys to the amplitude of incident regular wave in the time domain. Regular wave of $A_W = 1$ m, $T_W = 6.5$ s and $C = 200$ kN/(m/s), $K_M = 100$ kN/m

شکل 8 نسبت پاسخ هیو دو بویه به موج منظم برخوردی با دامنه یک متر و پریود 6.5 ثانیه در حوزه زمان. سختی کابل 100 kN/m، ضریب میرایی 200 kN/(m/s)

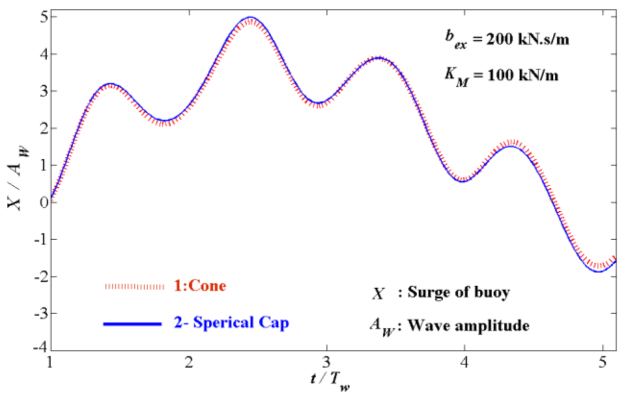

Fig. 9 The ratio of surge responses (X) of two buoys to the amplitude of incident regular wave of $A_W = 1$ m, $T_W = 6.5$ s

شکل 9 نسبت پاسخ سرج دو بویه مهارشده به دامنه موج منظم برخوردی با دامنه یک متر و زمان تناوب 6.5 ثانیه

نتایج حاصل از تحلیل هیدرودینامیک دو مدل مهارشده در حوزه زمان نشان می‌دهد که حداکثر پاسخ دینامیکی بویه مهارشده با هندسه کپ کروی در جهت z و x (هیو و سرج) به ترتیب حدود 4.4% و 11.3% بیشتر از مدل دیگر است. سرعت هیو این مدل نیز حدود 1.6% بیشتر است. مقادیر حداکثر دامنه حرکت بویه‌ها در جهت z و x (هیو و سرج) و نیز حداکثر سرعت هیوِ بویه‌ها و حداکثر تغییر طول کابل مهاری در جدول 2 بیان شده است.

9- انرژی موج

امواج آب، نمادی از نیروهای اعمالی (عمدتاً باد) به سیال است که تمایل به جابه‌جایی و تغییر شکل سطح سیال را دارند. حرکت امواج در سطح آب بر لایه‌های زیر سطح اثر گذاشته و موجب نوسان آن می‌شود. با توجه به شدت نیروی اعمالی به آب، امواج در اندازه‌ها و اشکال مختلف تولید می‌شود [19]. به دلیل تغییر جهت و سرعت وزش باد و قابلیت تغییر جهت انتشار موج، امواج در عمل نامنظم و غیرقابل پیش‌بینی هستند. به هر حال نظریه‌های گوناگونی برای الگوسازی امواج دریا ارائه شده که متداول‌ترین آن‌ها نظریه ایری، استوکس و نوئیدال است [20]. محدوده اعتبار هر یک از این نظریه‌ها بسته به عمق آب (h)، ارتفاع و پریود موج (T_w, H_w) است که با دو معیار تعیین می‌شود [21].

در این تحقیق عمق آب 50m، دامنه امواج 1m و زمان تناوب 6.5s فرض شده است. معیار عمق آب $h/(gT_w{}^2)$ و شیب موج $H_w/(gT_w{}^2)$ به ترتیب برابر 0.120 و 0.00483 است که براساس گراف اعتبار تئوری امواج[2] [21]،

جدول 2 حداکثر دامنه حرکت بویه‌ها در هیو و سرج، حداکثر سرعت هیو بویه‌ها و حداکثر دامنه تغییر طول کابل مهاری

Table 2 The maximum amount for heave and surge motion domain, heave speeds and cable length variation for two models

هندسه بویه	حداکثرتغییر طول کابل	حداکثر سرعت هیو	حداکثر دامنه سرج (متر)	حداکثر دامنه هیو
مخروط	0.8352	0.8127	2.4219	0.8189
کپ‌کروی	0.8769	0.8260	2.6954	0.8547

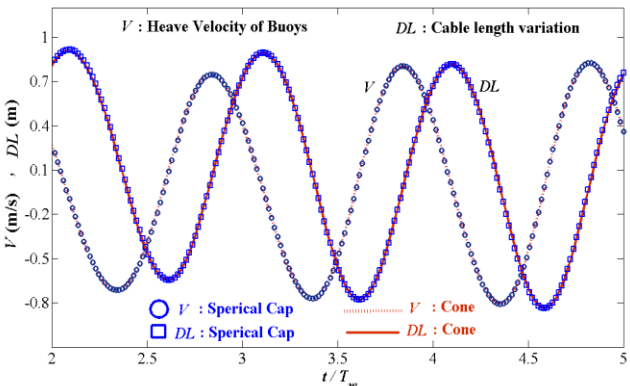

Fig. 10 Cable length variation and heave speeds for moored model with Cone and Spicial-Cap buoy

شکل 10 تغییر طول کابل مهار و سرعت هیو برای مدل مهارشده با بویه مخروطی و کپ‌کروی

[1] Second-order Stokes wave

[2] Validity of wave theories graph (Le Mehaute, 1969)

موج فرض شده در محدوده امواج استوکس مرتبه دوم قرار دارد. پروفیل موج استوکس مرتبه دوم (η) و تابع پتانسیل آن (ϕ) به صورت روابط (8,7) تعریف می‌شود [20].

$$\eta = A_w\cos(kx-\omega t) + \frac{{A_w}^2 k}{4}\frac{\cosh(kh)}{\sinh^3(kh)}(2+\cosh 2kh)\cos(2kx-2\omega t) \qquad (7)$$

$$\phi = \frac{A_w g}{\omega}\frac{\cosh k(h+z)}{\cosh(kh)}\sin(kx-\omega t) - \frac{3\omega {A_w}^2}{8}\frac{\cosh 2k(h+z)}{\sinh^4(kh)}\sin 2(kx-\omega t) \qquad (8)$$

انرژی موج (E_w) متشکل از انرژی پتانسیل موج (E_P) و انرژی جنبشی موج (E_k) است که به شکل رابطه (9) تعریف می‌شود [20]. با اعمال روابط (8,7) در رابطه (9) مقادیر سرعت موج در جهت x و z (u، w) محاسبه می‌شود و سپس مقادیر انرژی پتانسیل و انرژی جنبشی موج برحسب عمق مؤثر موج بر بویه (h) و طول‌موج (λ) به‌دست‌آمده است.

$$E_w = E_P + E_k = \frac{1}{2}\rho g\int_0^{\lambda}\eta^2\,dx + \frac{\rho}{2}\int_0^{\lambda}\int_{-h}^{0}[u^2+w^2]\,dzdx \;,\quad u=\frac{\partial\phi}{\partial x} \;,\quad w=\frac{\partial\phi}{\partial z} \qquad (9)$$

در رابطه (9) پارامتر E_w انرژی موج در واحد عرض موج برحسب ژول بر متر است. پارامتر h به‌عنوان عمق مؤثر موج بر بویه برابر با عمق غوطه‌وری بویه جاذب انرژی موج در نظر گرفته شده که برای بویه مخروطی برابر با 3m و برای بویه کپ‌کروی 2m است ($h = h_B$).

انرژی مؤثر موج بر هر بویه مهارشده (${E_w}^B$) وابسته به مساحت مؤثر موج بر بویه (${A_W}^B$) و انرژی موج در مساحت واحد (${E_w}^1$) است که به صورت رابطه (10) تعریف می‌شود. با تعیین مقادیر انرژی مؤثر موج بر هر بویه به کمک روابط (7-10) می‌توان درصد جذب انرژی و یا نسبت انرژی جذب شده از موج به انرژی مؤثر موج برخوردی بر هر مدل (E_A/E_w^B) را به‌دست آورد.

$${E_w}^B = {E_w}^1 \times {A_W}^B \;\; (\mathrm{J}) \quad,\quad {E_w}^1 = \frac{E_w}{\lambda}\;\; (\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{m}^2}) \quad,\quad {A_W}^B = \pi\, {r_B}^2 \;\; (\mathrm{m}^2) \qquad (10)$$

9-1- انرژی استحصالی از موج

انرژی استحصالی از موج با توجه به شبیه‌سازی عملکرد مبدل جاذب نقطه‌ای (شکل 2)، وابسته به‌سرعت حرکت بویه در جهت z (هیو) و تغییرات طول کابل مهاری در هر بازه زمانی است. مقادیر انرژی استحصالی توسط دو مدل مهارشده در جدول 3 بیان شده است و شکل 11 نسبت انرژی استحصالی از موج توسط دو مدل مهارشده به انرژی مؤثر موج برخوردی بر هر مدل (E_A/E_w^B) را نشان می‌دهد.

آنالیز نتایج نشان می‌دهد که به طور متوسط در هر پریود موج دو مدل مهارشده با بویه مخروطی و کپ‌کروی به ترتیب 22.49% تا 24.95% از انرژی مؤثر موج را جذب می‌کند. مدل مهارشده با بویه کپ کروی به طور متوسط حدود 2.5% بیشتر انرژی جذب کرده و حداکثر این اختلاف حدود 3.71% است (حوزه زمان).

10- دینامیک مدل مهارشده (در حوزه فرکانس)

ابعاد مدل و دیگر فرضیات مدل‌سازی در این مرحله از محاسبات با آنالیز در حوزه زمان یکسان در نظر گرفته شده است. جهت آنالیز حوزه فرکانس دامنه امواج 1m و فرکانس آن‌ها در محدوده 0.7 rad/s تا 2 rad/s فرض شده است. عملگر دامنه پاسخ (*RAO*) برای بویه مهارشده در هیو در شکل 12 نشان داده شده است. حداکثر این مقدار برای مخروط 0.8295m و برای کپ کروی 0.8612m در موج با فرکانس زاویه‌ای 1.05 rad/s رخ داده است.

مقادیر دامنه حرکت سرج و سرعت هیو بویه (متناظر بازمان رخ داد حداکثر دامنه حرکت هیو در هرکدام از بویه‌های مهارشده)، برای محاسبه انرژی استحصالی از موج در حوزه فرکانس به‌دست‌آمده است. به طوری که در محدوده زمانی که حداکثر دامنه حرکت برای هر بویه در هیو رخ داده است مقادیر دامنه حرکت سرج و نیز مقادیر سرعت هیو از بین نتایج حاصله استخراج شد. در واقع در لحظه‌ای که بیشترین جابه‌جایی هیو در بویه‌ها اتفاق افتاده مقادیر انرژی استحصالی از موج محاسبه شده است.

جدول 3 انرژی مؤثر موج، متوسط و حداکثر انرژی استحصالی از آن (حوزه زمان)

Table 3 Effective energy of wave on buoys, the average and maximum of absorbed energy from it (the time domain)

هندسه بویه	انرژی مؤثر موج بر هر بویه (ژول)	متوسط انرژی جذب‌شده (ژول)	درصد متوسط انرژی جذب‌شده
مخروط	638380	143589.81	22.49%
کپ کروی	585770	146178.27	24.95%
هندسه بویه	انرژی مؤثر موج بر بویه (ژول)	حداکثر انرژی جذب‌شده (ژول)	درصد حداکثر انرژی جذب‌شده
مخروط	638380	166974.21	26.15%
کپکروی	585770	174908/88	29.86%

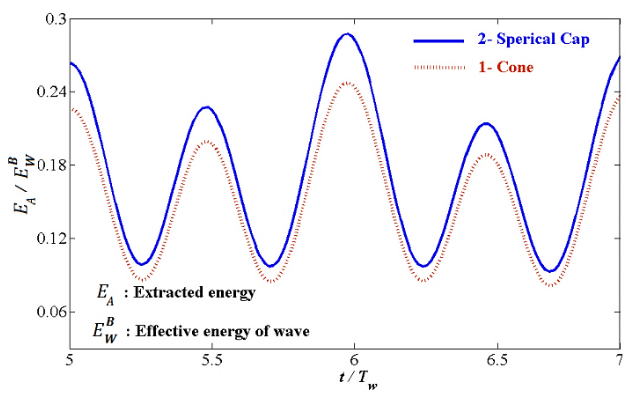

Fig. 11 The ratio of absorbed energy to the effective energy of wave on each moored buoy, E_A/E_W^B (In the time domain)

شکل 11 نسبت انرژی جذب‌شده از موج (E_A) به انرژی مؤثر موج بر هر بویه (E_W^B)، (در حوزه زمان)

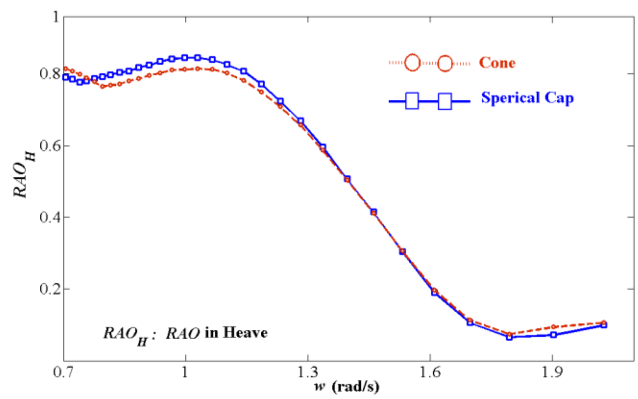

Fig. 12 Response Amplitude Operator (*RAO*) in heave for moored model with cone and special-cap buoy

شکل 12 عملگر پاسخ هیو برای بویه مهارشده با هندسه غوطه‌وری مخروط و کپ‌کروی

مقادیر دامنه حرکت سرج برای بویه مخروطی مهارشده و بویه کپ‌کروی در شکل 13 نشان داده شده (در محدوده زمانی که حداکثر دامنه هیو رخ داده است) و مقادیر مشابه برای سرعت هیو نیز در شکل 14 نشان داده شده است.

دو روش دیگر برای محاسبه انرژی استحصالی از موج در حوزه فرکانس برای پژوهش‌های آینده پیشنهاد می‌شود. روش نخست استفاده از متوسط دامنه حرکت هیو و سرج بویه در هر موج است که به این روش متوسط انرژی استحصالی در هر پریود موج محاسبه می‌گردد. روش دوم پیشنهادی محاسبه انرژی استحصالی توسط هر بویه مهارشده در محدوده رخ داد حداکثر دامنه حرکت سرج بویه است. بدان معنا که ملاک زمان رخ داد حداکثر دامنه حرکت سرج برای بویه مهارشده باشد.

مقادیر نسبت E_A/E_W^B بیانگر نسبت انرژی استحصال‌شده از موج (توسط دو مدل مهارشده) به انرژی مؤثر موج برخوردی به هر مدل است. مقادیر این نسبت در حوزه فرکانس در شکل 15 نشان داده شده است. این نسبت مقادیر درصد انرژی جذب‌شده توسط مدل مهارشده با بویه مخروطی و بویه کپ‌کروی را در فرکانس‌های مختلف موج بیان می‌کند.

انرژی استحصالی از موج (E_A) براساس رابطه (3) محاسبه شده و انرژی مؤثر موج بر هر بویه (E_W^B) در فرکانس‌های مختلف براساس روابط (7-10) به‌دست‌آمده است. مقادیر متوسط و حداکثر درصد جذب انرژی موج توسط دو بویه مهارشده در جدول 4 ارائه شده است. درمجموع آنالیز نتایج در حوزه

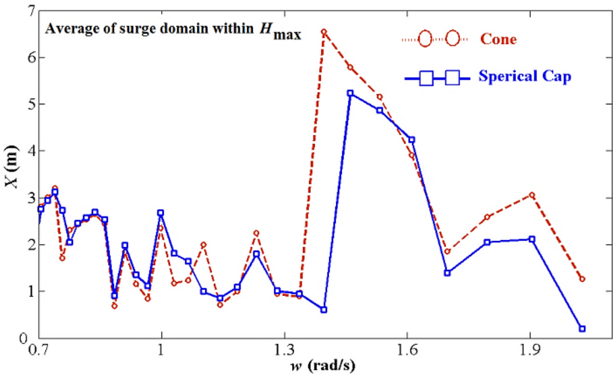

Fig. 13 Average of motion domain in surge within occurred time of the maximum heave for two models

شکل 13 دامنه متوسط حرکت سرج در محدوده زمان رخ داد حداکثر دامنه هیو برای دو بویه مهارشده

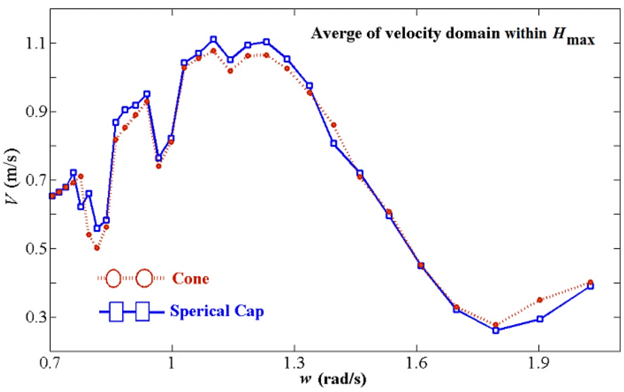

Fig. 14 Average of velocity domain in heave within occurred time of the maximum heave for two models

شکل 14 دامنه متوسط سرعت هیو در محدوده زمان رخ داد حداکثر دامنه حرکت هیو برای دو بویه مهارشده (حوزه فرکانس)

جدول 4 درصد متوسط و حداکثر انرژی جذب‌شده توسط دو مدل مهارشده با بویه مخروطی و بویه کپ‌کروی (در حوزه فرکانس)

Table 4 The ratio of the maximum and average absorbed energy to the effective energy of wave by each model

هندسه بویه	حداکثر % نسبت E_A/E_W^B	متوسط % نسبت E_A/E_W^B
بویه مخروطی	31.04%	20.50%
بویه کپ‌کروی	34.16%	22.71%

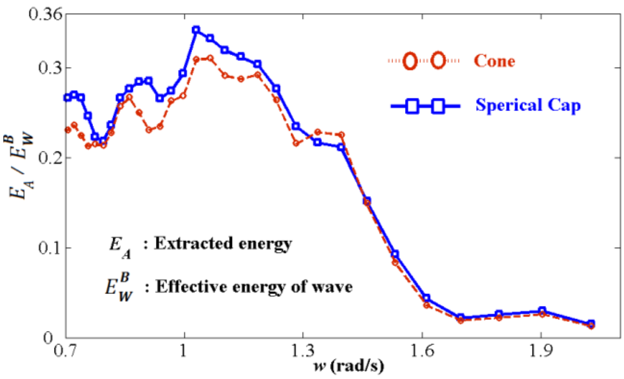

Fig. 15 The ratio of absorbed energy to the effective energy of wave on each moored buoy (in the frequency domain)

شکل 15 نسبت انرژی استحصالی از موج به انرژی مؤثر موج بر هر بویه مهارشده (در حوزه فرکانس)

فرکانس به طور متوسط مبدل مهارشده با بویه کپ‌کروی حدود 2.21% نسبت مبدل مهارشده با بویه مخروطی در جذب انرژی موج موفق‌تر و حداکثر این اختلاف حدود 3.12% است.

11- نتیجه گیری

راندمان در مبدل‌های تک بدنه جاذب نقطه‌ای انرژی موج به عملکرد دینامیکی بویه و سیستم ژنراتور خطی آن‌ها وابسته است. مقایسه عملکرد دینامیکی دو بویه با هندسه مخروطی و کپ‌کروی (نیم‌کره ناقص) در امواج منظم- غیرخطی و تأثیر دینامیک آن‌ها بر راندمان مبدل تک بدنه به‌عنوان مسئله این تحقیق مورد نظر بوده است.

در تحقیق حاضر فرآیند جذب انرژی موج در یک مبدل جاذب نقطه‌ای به یک سیستم فنر- میراگر خطی شبیه‌سازی‌شده و دو هندسه برای بویه آن در نظر گرفته شده است. جرم بویه‌ها و سطح تلاقی آن‌ها با آب یکسان در نظر گرفته شده و انرژی مؤثر موج بر هر مبدل مدل‌سازی‌شده با توجه به مشخصات هندسی بویه آن محاسبه شده است. یکسان‌سازی شرایط محیطی و مدل‌سازی موردبحث قرارگرفته است.

پاسخ هیو و سرج مدل مهارشده به امواج غیرخطی (استوکس مرتبه دوم) و نیز سرعت هیو آن در حوزه زمان و فرکانس به‌دست‌آمده است، سپس تغییر طول کابل مهاری در هر بازه زمانی و انرژی مؤثر موج بر هر مدل محاسبه شده است. نتایج مهم حاصل از تحقیق به شرح زیر است.

1- یک روش پیشنهاد شده است تا خطای مقایسه هیدرودینامیک بویه‌ها با یکدیگر و بررسی تأثیر دینامیک آن‌ها بر راندمان مبدل مدل‌سازی شده، کاهش یابد و شرایط مقایسه یکسان شود.

2- یکسان‌سازی شرایط محیطی، مدل‌سازی و مشخصات فیزیکی بویه‌ها، جهت مقایسه دینامیک آن‌ها در برخورد با موج، تفاوت مهم بین پژوهش‌های مشابه بیان‌شده و پژوهش حاضر است.

3- سه روش برای محاسبه انرژی استحصالی از موج در حوزه فرکانس پیشنهاد شده است. هر روش یک محدوده انرژی جذب‌شده را توصیف می‌کند. براساس این روش‌ها حداکثر و متوسط انرژی استحصالی از موج در حوزه فرکانس توسط مبدل مدل‌سازی شده قابل‌محاسبه است.

4- حداکثر پاسخ دینامیکی بویه مهارشده با هندسه کپ‌کروی در جهت قائم و افق (هیو و سرج) به ترتیب حدود 4.4% و 11.3% بیشتر از مدل دیگر است.

5- متوسط و حداکثر درصد جذب انرژی موج توسط مبدل مدل‌سازی‌شده با بویه کپ‌کروی به ترتیب حدود 2.2% و 3.71% در حوزه فرکانس و حدود 2.5% و 3.12% در حوزه زمان بیشتر از مدل دیگر بوده است.

این دو مدل به‌طور متوسط حدود 20.5% تا 24.95% از انرژی مؤثر موج برخوردی را جذب کرده‌اند.

12- مراجع

[1] A. Dashtimanesh, A. Esfandiari, F Roshan, A. R. Kazemipour Esferjani, A. Safarinezhad, Numerical simulation of a near-shore rotating wave energy converter, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 1, pp. 75-85, 2017. (in Persian فارسی)

[2] A. F. D. Falcão, Wave energy utilization: A review of the technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, No. 3, pp. 899-918, 2010.

[3] Y. Yi-Hsiang, L. Ye, Reynolds-Averaged Navier–Stoke simulation of the heave performance of a two-body floating-point absorber wave energy system, *Computers & Fluids*, Vol. 73, No. 15, pp. 104-114, 2013.

[4] M. Alves, H. Traylor, A. J. N. A. Sarmento, Hydrodynamic optimization of a wave energy converter using a heave motion buoy, *Proceedings of the 7th European Wave and Tidal Energy Conference*, Porto, Portugal, September 11-13, 2007.

[5] P. J. B. Beirao, Design and analysis of buoy geometries for a wave energy converter, *Energy and Environmental Engineering*, Vol. 5, No. 2, pp. 1-11, 2014.

[6] G. D. Backer, M. Vantorre, P. F. Beels, J. D. Rouck, Bottom slamming on heaving point absorber wave energy devices, *Marine Science and Technology*, Vol. 15, No. 4, pp. 119-130, 2010.

[7] P. Jeremiah, L. Yucheng, Power absorption modeling and optimization of a point absorbing wave energy converter using numerical method, *Energy Resources Technology*, Vol. 136, No. 2, pp. 201-207, 2014.

[8] K. Budal, J. Falnes, A resonant point absorber of ocean-wave power, *Journal of Nature*, Vol. 918, No. 5517, pp. 478-489, 1975.

[9] C. C. Mei, Power extraction from water waves, *Ship Research*, Vol. 20, No. 2, pp. 63-66, 1976.

[10] P. C. Vicente, A. F. D. Falcão, Nonlinear dynamics of a tightly moored point-absorber wave energy converter, *Ocean Engineering*, Vol. 59, pp. 20-36, 2013.

[11] S. Fortum, *Thchnology of Seabased Wave Energy*, Accessed on 5 October 2016; http://www.seabased.com/en/technology/seabased-wave-energy.

[12] M. Negahdari, H. Dalayeli, M. Moghaddas, Modeling and analysis point absorber for buoy wave energy converter using heave motion, *Marine Technology*, Vol. 2, No. 2, pp. 42-53, 2015. (in Persian فارسی)

[13] W. Finnegan, M. Meere, J. Goggins, The wave excitation forces on a truncated vertical cylinder in water of infinite depth, *Fluids and Structures*, Vol. 40, pp. 201-213, 2013.

[14] A. Abbasnia, M. Ghiasi, A fully nonlinear wave interaction with an array of submerged cylinders by NURBS numerical wave tank and acceleration potential, *Ships and Offshore Structures*, Vol. 9, No. 4, pp. 404-417, 2014.

[15] R. A. Watai, F. Ruggeri, C. M. P. Sampaio, A. Simos, Development of a time domain boundary element method for numerical analysis of floating bodies, *the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 37, No. 5, pp. 1569-1589, 2015.

[16] L. Johanning, G. H. Smith, J. Wolfram, Measurements of static and dynamic mooring line damping and their importance for floating WEC devices, *Ocean Engineering*, Vol. 34, No. 14, pp. 1918-1934, 2007.

[17] A. F. D. Falcão, P. C. Vicente, L. M. Gato, A. P. Justino, Dynamics of arrays of floating point-absorber wave energy converters with inter-body and bottom slack-mooring connections, *Applied Ocean Research*, Vol. 31, No. 4, pp. 267-281, 2009.

[18] R. Maximilian, M. Magaña, O. Sawodny, T. K. Brekken, Power optimisation of a point absorber wave energy converter by means of linear model predictive control, *Renewable Power Generation*, Vol. 8, No. 2, pp. 203-215, 2014.

[19] A. R. Moghiman, A. Farshidianfar, H. Moeenfard, Experimental and Numerical Study of vibration in submerged structures with multi-degree-of-freedom and comparing the efficiency of wave's energy absorption, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 12, pp. 103-113, 2016. (in Persian فارسی)

[20] R. G. Dean, R. A. Dalrymple, *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*, Vol 2, pp. 93-99, Florida: World Scientific Publishing Co Inc, 2000.

[21] K. Sadeghi, Significant guidance for design and construction of marine and offshore structures, *GAU Journal of Social & Applied Sciences*, Vol. 4, No. 7, pp. 65-92, 2008.