



## شبیه‌سازی عددی یک مبدل انرژی موج چرخان در نزدیکی ساحل

عباس دشتی منش<sup>1\*</sup>، آرمان اسفندیاری<sup>2</sup>، فاطمه روشن<sup>2</sup>، علیرضا کاظمی پور اسفراجانی<sup>3</sup>، آرشام صفری نژاد<sup>3</sup>

1- استادیار، مهندسی دریا، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی دریا، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر

3- دانشجوی کارشناسی، مهندسی دریا، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر

\*بوشهر، صندوق پستی 7516913817، a.dashtimanesh@pgu.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 18 مهر 1395  
پذیرش: 25 آذر 1395  
ارائه در سایت: 15 دی 1395  
کلید واژگان:

مبدل انرژی موج چرخان  
شبیه‌سازی عددی  
مش مورفینگ  
امواج منظم

گسترش مبدل‌های انرژی موج یکی از چالش‌های مهمی است که اخیراً معماران دریایی با آن مواجه بوده‌اند. یکی از مهم‌ترین رویکردها پیش از ساخت مبدل‌های انرژی موج آن است که مدل مفهومی آن‌ها در نرم‌افزارهای دینامیک سیالات محاسباتی مورد ارزیابی قرار بگیرند؛ بنابراین، در این مقاله یک مدل نوآورانه از مبدل انرژی موج ارائه گردیده و عملکرد هیدرودینامیکی مبدل پیشنهادی در خلیج فارس بررسی شده است. جهت شبیه‌سازی دقیق دینامیک مبدل انرژی موج، از تکنیک مش مورفینگ استفاده شده است. از آنجایی که مبدل ارائه شده یک طراحی نوآورانه بوده و مدل آزمایشگاهی برای اعتبارسنجی آن در دسترس نبوده است، تلاش شده است تا چیدمان عددی با استفاده از مسائل آزمایشگاهی مشابه که ویژگی‌های مختلف مسئله موردنظر را دارا هستند، مورد صحت سنجی قرار بگیرند. سپس، چندین هندسه مختلف شامل پدال تخت، فویل، نیم کره کوچک و بزرگ برای مبدل انرژی موج به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته و پدال نیم کره کوچک به عنوان بهترین هندسه ممکن جهت محاسبات نهایی تعیین شده است. تعداد پدال‌ها نیز پارامتر دیگری بوده است که مورد ارزیابی قرار گرفته و مدل هشت پدالی به عنوان انتخاب بهینه تشخیص داده شده است. در انتها، مبدل انرژی موج بهینه در نه موج مختلف شبیه‌سازی گردیده و نتایج به صورت کامل ارائه شده‌اند.

## Numerical simulation of a near-shore rotating wave energy converter

Abbas Dashtimanesh<sup>\*</sup>, Arman Esfandiari, Fatemeh Roshan, Alireza Kazemipour Esferjani, Arsham Safarinezhad

Department of Engineering, Persian Gulf University, Bushehr, Iran

\*P.O.B.7516913817, Bushehr, Iran, a.dashtimanesh@pgu.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 09 October 2016  
Accepted 15 December 2016  
Available Online 04 January 2017

#### Keywords:

Rotating wave energy converter  
Numerical simulation  
Mesh morphing  
Regular waves

### ABSTRACT

Development of wave energy converters (WEC) is one of the main challenges that naval architectures have recently encountered. One of the most important approaches before construction of WECs is the evaluation of their conceptual models in computational fluid dynamics (CFD) software. Therefore, in the current article, an innovative model of wave energy converter is presented and hydrodynamic performance of proposed model in the Persian Gulf has been examined. For accurate simulation of dynamics of WEC, mesh morphing technique is utilized. Since the presented WEC is an innovative design and there is no experimental result for validation purpose, we have tried to verify the numerical setup using similar experimental problems which have the various characteristics of the considered problem. Then, several different geometries including flat and foil pedals, and big and small semi-spherical pedals as a part of WEC have been analyzed, numerically. Small semi-spherical pedal has been determined as the best possible geometry. Number of pedals is another parameter which has been studied and eight pedals model has been recognized as the optimum choice. Finally, optimum WEC has been simulated in nine different waves and the results have been presented.

### 1- مقدمه

تبدیل انرژی مکانیکی امواج به توان الکتریکی استفاده می‌شوند. مبدل‌ها انواع مختلفی مثل جاذب نقطه‌ای، ستون نوسانگر، تضعیف کننده و ... دارند که انتخاب درست آن باید بر اساس ویژگی‌های منطقه‌ای و زیست محیطی صورت گیرد [4,5]. با توجه به مقاله کوکا و همکاران [6]، تا سال 2013، 147 نوع مبدل انرژی موج ساخته شده و یا در حال توسعه وجود دارد که این تعداد با توجه به مقاله ماگاکنا و یوهلن [7] تا سال 2015 به 170 عدد رسیده

هزینه‌های بسیار بالا در تولید انرژی، محدودیت در منابع سوخت‌های فسیلی و همچنین آلودگی ایجاد شده ناشی از این نوع سوخت‌ها بشر را در قرن‌های اخیر به استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر مجبور ساخته است [1,2]. از میان انرژی‌های تجدیدپذیر، امواج دریا منبع بسیار مهمی به شمار می‌روند که مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است [3]. مبدل‌های انرژی موج برای

است.

از سوی دیگر، نیروی موج را می‌توان نیرویی قابل اعتمادتر نسبت به انرژی‌های تجدیدپذیر دیگر مانند انرژی خورشیدی و بادی دانست زیرا چگالی آن نسبت به نیروهای دیگر بسیار بیشتر است [8]. همچنین، مناطقی با شار انرژی موج ثابت یا متوسط، مناسب‌تر از مکان‌هایی هستند که در آن منابع پر انرژی‌تر اما ناپایدار وجود دارد [9] زیرا موج در حالت ناپایدار و با انرژی زیاد به مبدل آسیب جدی وارد خواهد کرد. پس مناطق نزدیک به ساحل و با عمق کم، مکان‌های بسیار مناسب برای قرار دادن مبدل هستند. در این مناطق ارتفاع موج کم و انرژی تولیدی موج منظم‌تر می‌باشد. تعمیر و نگهداری آسان و در دسترس بودن، از دیگر مزایای استفاده از مبدل در نزدیکی ساحل می‌باشد [10, 11]. آزمایشات گسترده انجام شده توسط استراگاک و همکاران [12] بر روی مبدل انرژی جاذب نقطه‌ای در آب آرام نمونه‌ای از مبدل‌های تست شده در آب کم عمق می‌باشد. مدل‌های توربینی نیز قابلیت استفاده در نزدیکی ساحل را دارا می‌باشند. از اولین کاربردهای مدل توربینی می‌توان از ابداعات فردی به نام پوشاکس نام برد که با استفاده از ستون نوسانگر آب، نیروی برق خانه خود را تأمین می‌کرد [13].

بنابراین، محققان حاضر تلاش نمودند مدلی را طراحی و شبیه‌سازی نمایند که با توجه به ویژگی‌های خلیج فارس و جغرافیای سواحل بوشهر، بازدهی مطلوبی را برای تولید الکتریسیته داشته باشد. این مبدل به صورت یک چرخ دوار که چند پدال پیرامون آن قرار گرفته‌اند، طراحی شده است. مبدل بر مبنای شکست موج عمل می‌کند. سواحل بوشهر در برخی از نقاط حالت صخره مانند داشته و به صورت طبیعی موجب شکست غیرمعمول امواج می‌شوند. امواج شکسته شده دارای نیروی ضربه‌ای بسیار زیادی هستند و قادرند تا با برخورد با پدال‌های تعبیه شده، چرخ دوار را به حرکت درآورند. برای اطمینان از کارکرد صحیح مبدل در این نوع امواج، قبل از ساخت مدل اصلی، شبیه‌سازی عددی مبدل طراحی شده برای پیش‌بینی حرکات مبدل انجام گرفته و نتایج آن در طراحی اصلی مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

با بررسی منابع مختلف مشاهده می‌شود که شبیه‌سازی عددی مبدل‌های انرژی موج در سالیان اخیر افزایش یافته است. با این وجود، در اینجا هدف آن نیست که بخش وسیعی از مراجع موجود در زمینه شبیه‌سازی عددی مبدل‌های انرژی موج بررسی گردد. بلکه با توجه به ویژگی‌های خاص مبدل طراحی شده، هدف اصلی یافتن راهکارهای مطلوب برای شبیه‌سازی عددی و اعتبارسنجی مدل عددی پیشنهادی خواهد بود.

در هر صورت، استفاده از روش‌های عددی در زمینه مبدل‌های انرژی موج پیشینه بلندی ندارد. با این وجود، بسیاری از محققین نظیر نیومن [14] مسائل متعددی در حوزه اندرکنش اجسام شناور و امواج را به صورت عددی مدل‌سازی نموده‌اند. برای بررسی و تحلیل دستگاه‌های مبدل انرژی موج نیز تکنیک‌ها و روش‌های عددی مختلفی به کار گرفته شده است [15, 16]. کیم و همکاران [17] با استفاده از روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی به شبیه‌سازی عددی جریان ورودی به مبدل انرژی دریایی پرداخته و نتایج را با مدل‌های آزمایشگاهی تست شده مقایسه نمودند. انبارسوز و همکاران [18] نیز شبیه‌سازی مبدل‌های انرژی دریایی را ادامه داده و با مدل کردن یک نوع مبدل انرژی سیلندری در درون آب و تحت اثر امواج غیرخطی سعی بر بررسی عددی مبدل‌ها در حالت ناپایدار کردند. شبیه‌سازی‌ها برای مبدل‌های انرژی دریایی در چند سال اخیر به سرعت گسترش یافته‌اند و انواع متنوعی از این مبدل‌ها توسط افراد مختلف شبیه‌سازی شدند. گومز و همکاران [19] به

شبیه‌سازی حرکات مبدل جاذب نقطه‌ای و در شرایط موج نامنظم پرداخته و قدرت نیروی جذب شده موج را مورد محاسبه قرار دادند. ژو و همکاران [20] نیز مبدل انرژی موج دوک را در بازه فرکانسی موج شبیه‌سازی کردند و حالات ایجاد ماکزیمم نیروی وارد شده به مبدل را مطالعه نمودند. مبدل موج آونگی نوع دیگری از مبدل انرژی بود که توسط هنگ‌ژو و هوئی [21] شبیه‌سازی شد که پاسخ حرکت آونگ را در سه موج مختلف بدست آورده و برای نشان دادن بازده مبدل آن را با 5 موج مختلف شبیه‌سازی کرده و نشان دادند که با افزایش دوره تناوب و ارتفاع موج بازده این مبدل کاهش می‌یابد.

پس در این مقاله، هدف اصلی شبیه‌سازی عددی یک مبدل انرژی موج جهت شناسایی شرایط هیدرودینامیکی مبدل تحت تأثیر امواج مختلف خواهد بود. طراحی مبدل موردنظر کاملاً نوآورانه بوده و در نتیجه شبیه‌سازی‌های مربوطه منحصر به فرد خواهند بود. بدین منظور با استفاده از نرم‌افزارهای دینامیک سیالات موجود، دامنه حرکتی مبدل انرژی موج در امواج منظم بررسی گردیده است. شبیه‌سازی عددی با استفاده از روش حجم محدود و حجم سیال انجام خواهد شد. با توجه به حل معادلات دینامیک جسم صلب و حرکات جسم و به تبع آن وجود مش متحرک، تکنیک مش مورفینگ به کار گرفته می‌شود. از سوی دیگر، این مبدل با تعداد پدال‌های مختلف و هندسه‌های پدالی متفاوت، در امواجی با مشخصات گوناگون شبیه‌سازی شده و بازدهی آن در امواج مختلف استخراج خواهد شد.

## 2- بیان مسئله

مبدل اصلی طراحی شده به صورت چرخ دوار می‌باشد که دارای 8 پدال است (شکل 1). هندسه پدال‌ها که در تماس با سطح آب است می‌تواند متفاوت باشد. مادامی که موج در آستانه فروپاشی قرار می‌گیرد و به پدال نیمه مغروق برخورد می‌کند، نیروی قابل توجهی به پدال وارد شده و موجب چرخش مبدل می‌شود. در این شرایط، جهت شبیه‌سازی مبدل تنها در نظر گرفتن یک درجه آزادی دورانی حول محور چرخش کافی است.

شبیه‌سازی عددی مبدل در نرم‌افزار استارسی‌سی‌ام<sup>1</sup> صورت گرفته و تمرکز محاسبات بر هیدرودینامیک مبدل در موج بوده است. با توجه به کارکرد مبدل در نزدیکی ساحل، دریا به صورت امواج تنهای منظم مدل‌سازی می‌شود. ویژگی‌های امواج نیز منطبق بر شرایط دریایی خلیج فارس انتخاب شده‌اند. چیدمان عددی برای همه شبیه‌سازی‌ها به صورت یکسان در نظر گرفته شده و با انجام مطالعات همگرایی مش، یک مش مشابه و یکسان در تمام شبیه‌سازی‌ها استفاده می‌شود. بطور کلی، از ترکیب سه نوع مش مختلف سطحی، تریمر و مش لایه‌ای منشوری استفاده می‌شود. مش سطحی برای شبکه‌بندی سطح دامنه محاسباتی، مش تریمر برای اصلاح مش در سطح آزاد و 6 لایه مش منشوری، برای اصلاح مش در اطراف دیواره‌ها برای تمامی شبیه‌سازی‌های اعتبارسنجی و خود مبدل انتخاب شده‌اند. جزئیات بیشتر شبیه‌سازی برای هر مسئله به‌طور مجزا در بخش مربوطه بیان گردیده است.

از سوی دیگر، نوع حرکتی که برای مدل قرار داده شد، حرکت مورفینگ بود تا با ثابت نگه‌داشتن دامنه محاسباتی، خود جسم که دارای حرکت چرخشی در یک جهت می‌باشد را به دوران مجبور کند. همچنین در این شبیه‌سازی مقدار گام زمانی برای بهبود همگرایی و افزایش دقت حل مسئله، 0.001 ثانیه انتخاب شده است و برای حل معادلات حاکم نیز از حلگر ضمنی و ناپایدار استفاده می‌گردد. همچنین، جریان حول مبدل به صورت متقارن در نظر گرفته می‌شود تا محاسبات انجام شده برای مبدل در شبیه‌سازی سه

<sup>1</sup> Star- CCM+

مطرح بوده است. در روش حجم سیال برای هر جزء حجمی یا سلول، یک معادله دیفرانسیل حل می‌شود که نهایتاً مقدار جزء حجم سیال، در هر سلول معین می‌گردد. در تعیین سطح آزاد به روش حجم سیال از یک تابع متغیر به نام  $F$  استفاده می‌شود که جزء حجم سیال نامیده می‌شود. شکل این تابع دیفرانسیلی در حالت دو بعدی به صورت زیر می‌باشد [23]:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} + v \frac{\partial F}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

در حل معادله فوق در سلولی که سیال آب باشد مقدار  $F$  برابر یک ولی در سلول هوا این مقدار برابر صفر است. در سلول‌های موجود در سطح آزاد این مقدار بین صفر و یک متغیر می‌باشد.

به هنگام استفاده از معادلات ناویراستوکس و معادلات حجم سیال، پارامترهای لزجت و چگالی سیال در هر سلول طبق روابط زیر معین می‌گردد، که در سلول‌های سطحی ترکیب دو فاز سیال در چگالی و لزجت هر سلول دیده می‌شود،

$$\rho = \sum_{i=1}^n F_i \rho_i \quad (7)$$

$$\mu = \sum_{i=1}^n F_i \mu_i \quad (8)$$

### 3-3- معادلات موج

موجی که برای این مدل انتخاب شده موج مرتبه اول است که بر اساس تقریب درجه اول از تئوری امواج استوکس مدل می‌شود. این تقریب قادر به تولید امواجی است که دارای نوسان سینوسی منظم هستند. این تئوری با استفاده از معادلات (9) تا (14) مدل موج مشخص را تولید می‌کند [24]:

معادله سرعت افقی،

$$v_h = a\omega \cos(Kx - \omega t) e^{kz} \quad (9)$$

معادله سرعت عمودی،

$$v_v = a\omega \sin(Kx - \omega t) e^{kz} \quad (10)$$

معادله ارتفاع سیال،

$$\eta = a \cos(Kx - \omega t) \quad (11)$$

که در این معادلات  $a$  دامنه موج،  $\omega$  فرکانس موج،  $k$  اندازه بردار موج و  $z$  فاصله عمودی از سطح سیال می‌باشد.

همچنین پریود و طول موج نیز با استفاده از روابط زیر بیان شده،

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (12)$$

$$\lambda = \frac{2\pi}{K} \quad (13)$$

و رابطه پراکندگی برای امواج مرتبه اول در آب‌های محدود با عمق  $d$  به صورت زیر نوشته می‌شود،

$$T = \left[ \frac{g}{2\pi\lambda} \tanh\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\right) \right]^{-1/2} \quad (14)$$

### 4- اعتبارسنجی

پیش از ارائه نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی مبدل انرژی موج، می‌بایست اعتبار چیدمان عددی موردنظر بررسی گردد. با توجه به این که نتایج آزمایشگاهی مبدل انرژی موج موردنظر در دسترس نیست، در اینجا سه مسئله مختلف که ویژگی‌های مسئله اصلی را دارا هستند، جهت اعتبارسنجی مدل عددی مورد استفاده قرار گرفته که عبارت‌اند از:

اعتبارسنجی اول: شبیه‌سازی یک استوانه‌ای دو بعدی در سطح آزاد که در امواج شماره 1 و 2 انجام شده است (جدول 1). شباهت این شبیه‌سازی با مدل اصلی وجود سطح آزاد و موج است.

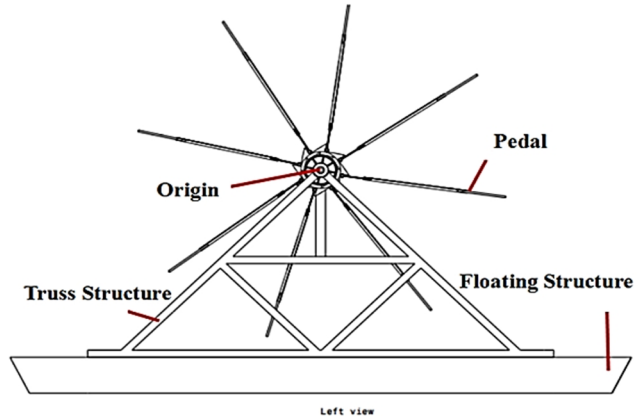


Fig. 1 A view of the designed wave energy converter with flat pedals

شکل 1 نمایی از مبدل موج طراحی شده با پدال تخت

بعدی فقط برای نیمی از بدنه صورت گرفته و از حجم محاسبه کاسته شود. برای مدل‌سازی سطح آزاد، روش حجم سیال به کار گرفته شده است. سیال آب در این شبیه‌سازی دارای چگالی  $997 \text{ kg/m}^3$  و ویسکوزیته  $1.83 \times 10^{-4} \text{ kg/ms}$  و هوا دارای چگالی  $1.185 \text{ kg/m}^3$  و ویسکوزیته  $1.83 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$  می‌باشد.

### 3- معادلات حاکم

معادله حاکم بر پدیده‌های سیالاتی در هیدرودینامیک دریا، معادلات ناویر-استوکس هستند. با استفاده از فرم معادلات ناویراستوکس متوسط گیری شده رینولدز، معادلات حاکم عبارت خواهند بود از [22]:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + g_i \quad (2)$$

در این معادلات  $P$  و  $g$  به ترتیب سرعت، فشار و شتاب جاذبه هستند و  $\nu$  ویسکوزیته سینماتیکی را نشان می‌دهد.

### 3-1- مدل جریان آشفته

برای حل رژیم جریان آشفته از مدل K-Epsilon استفاده شده است. این مدل یک مدل دو معادله‌ای است که برای مسائل هیدرودینامیک دریا یک مدل مناسب محسوب می‌شود. معادله انرژی جنبشی ( $K$ ) و نرخ میرایی انرژی جنبشی ( $\epsilon$ ) معادله‌هایی هستند که برای حل این مدل تشریح می‌گردند،

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad (3)$$

که  $C_\mu$  در این معادله عددی ثابت بوده و  $K$  و  $\epsilon$  از رابطه‌های زیر بدست می‌آیند،

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + P_k - \rho \epsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + \frac{\epsilon}{k} (C_{\epsilon 1} P_k - C_{\epsilon 2} \rho \epsilon) \quad (5)$$

که در آن  $C_{\epsilon 1}$  و  $C_{\epsilon 2}$  ضریب‌های تجربی و  $\sigma_k$  و  $\sigma_\epsilon$  به ترتیب اعداد پراکتل و اشمیت آشفته هستند.  $P_k$  نیز تولید کننده اغتشاش به دلیل نیروی ویسکوز است.  $\mu$  ویسکوزیته کل،  $\mu_t$  ویسکوزیته آشفته،  $\rho$  چگالی سیال و  $u_j$  سرعت جریان آشفته است.

### 3-2- روش حجم سیال

تعیین سطح مشترک دو فاز سیال در بسیاری از مسائل هیدرودینامیکی

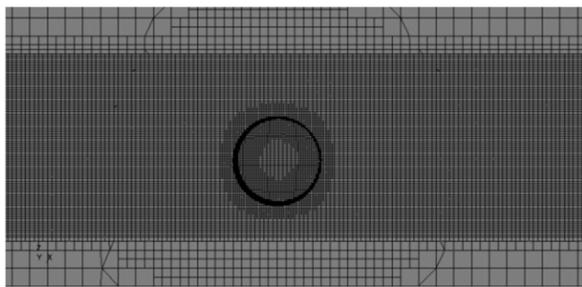


Fig. 2 Mesh distribution along computational domain and around the body

شکل 2 توزیع مش در طول دامنه محاسباتی و اطراف جسم

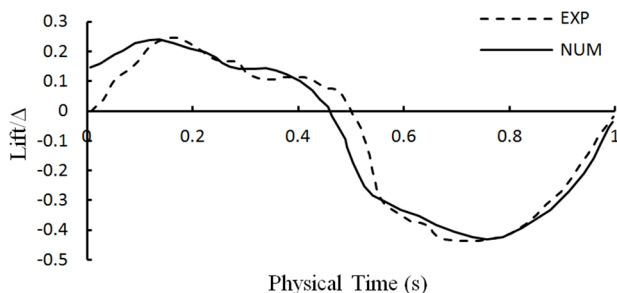


Fig. 3 Diagram of experimental and numerical results of relative vertical force exerted on the cylinder under the influence of wave 1

شکل 3 نمودار نتایج تجربی و عددی نیروی عمودی نسبی وارد بر استوانه تحت تأثیر موج 1

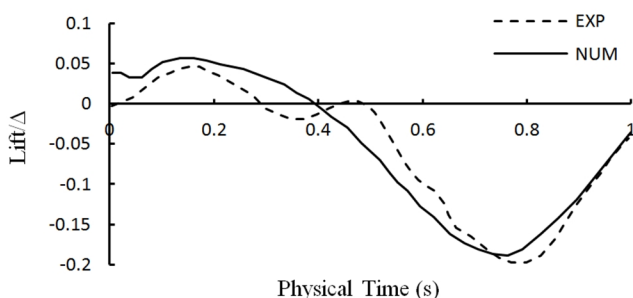


Fig. 4 Diagram of experimental and numerical results of relative vertical force exerted on the cylinder under the influence of wave 2

شکل 4 نمودار نتایج تجربی و عددی نیروی عمودی نسبی وارد بر استوانه تحت تأثیر موج 2

بین موج و جسم استخراج می‌گردد. بارچ به شکل مکعب مستطیل به طول 0.9 متر، عرض 0.3 متر و ارتفاع 0.1 متر است و دامنه محاسباتی به طول 22 متر، عرض 0.9 متر و ارتفاع 1.2 متر وجود دارد (شکل 5).

مطابق "شکل 5" در سمت راست دامنه محاسباتی یک ساحل به شیب 1:5.5 وجود داشته و امواج شماره 3، 4 و 5 از سمت چپ دامنه در نظر گرفته شده به عرض جسم برخورد داده می‌شوند. بارچ می‌تواند در اثر این برخورد،

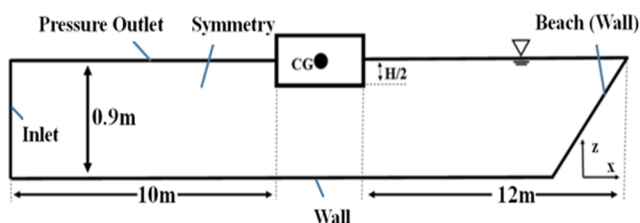


Fig. 5 The initial geometry of the computational domain

شکل 5 هندسه اولیه دامنه محاسباتی

جدول 1 مشخصات امواج شبیه‌سازی شده

Table 1 Simulated waves characteristics

موج 5	موج 4	موج 3	موج 2	موج 1	
2.2	1.0	1.35	3.9	3.9	طول موج (متر)
0.06	0.029	0.027	0.05	0.125	ارتفاع موج (متر)
0.83	0.8	0.93	3.817	3.817	فرکانس (هرتز)
2.85	6.28	4.65	1.61	1.61	عدد موج
0.05	0.05	0.05	0.1875	0.125	آبخور جسم (متر)

اعتبارسنجی دوم: بارچ دوبعدی دارای درجه آزادی حرکت رول در سطح آزاد و در امواج شماره 3، 4 و 5 مدل‌سازی شده است (جدول 1). شباهت این مسئله با نمونه‌ی اصلی وجود سطح آزاد امواج و همچنین حرکت جسم است. اعتبارسنجی سوم: شبیه‌سازی جسم سه بعدی در سطح آزاد با موج شماره 1 که با یک درجه آزادی حرکت انجام شده است. شباهت این مسئله با مدل اصلی سه بعدی بودن و آزادی حرکت است.

#### 4-1- استوانه دو بعدی در امواج منظم

در اینجا اثرات امواج منظم بر یک استوانه افقی در حالت دو بعدی شبیه‌سازی شده و نیروهای وارد بر جسم با نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی دیکسون و همکاران [25] مقایسه می‌گردد. استوانه‌ی افقی به قطر 0.25 متر و طول 0.12 متر است که در دو شبیه‌سازی تحت تأثیر موج‌های 1 و 2 قرار می‌گیرد (جدول 1). در حل عددی با توجه به تقارن جسم و جریان سیال تنها به مدل سازی نیمی از استوانه اکتفا می‌شود. دامنه محاسباتی به شکل مکعب مستطیل با طول 16 متر، عرض 0.21 متر و ارتفاع 1.5 متر در نظر گرفته می‌شود. شرایط مرزی برای صفحه ورودی در حالت ورودی جریان، صفحه خروجی و بالا در حالت فشار خروجی و صفحه کف و کناری در حالت دیواره قرار گرفته‌اند.

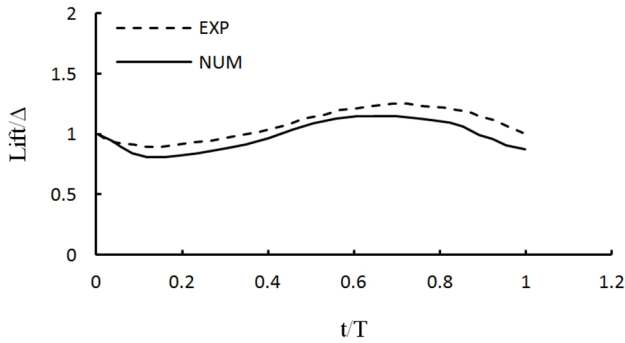
در اطراف جسم و در طول دامنه محاسباتی همانند "شکل 2" تعداد 255000 سلول برای حل معادلات استفاده شده است. با توجه به لزوم بررسی سطح آزاد و رخ دادن اندرکنش بین جسم و سطح آزاد، در این ناحیه از مش ریزتری استفاده شده است. در صورتی که در فواصل دورتر با کاهش اثرات متقابل جسم و جریان، سلول‌های مش بزرگ‌تری در نظر گرفته شده‌اند.

در "شکل‌های 3 و 4"، نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با داده‌های آزمایشگاهی دیکسون و همکاران [25] در امواج موردنظر مقایسه شده است. محور عمودی نسبت نیروی لیفت به وزن استوانه است و محور افقی تغییرات زمانی را به صورت بدون بعد نشان می‌دهد. واضح است که شبیه‌سازی عددی توانسته است نیروی هیدرودینامیکی وارد بر استوانه افقی در امواج را به خوبی محاسبه نماید. این اعتبارسنجی از جهت محاسبه درست نیروهای امواج بر مبدل انرژی موج اهمیت دارد و می‌توان آن را مبنایی برای شبیه‌سازی عددی مبدل انرژی موج در نظر گرفت.

#### 4-2- شبیه‌سازی بارچ دو بعدی در سطح آزاد

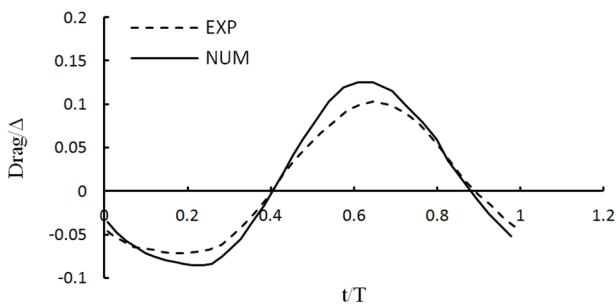
اگرچه نتایج به دست آمده در اعتبارسنجی اول مناسب است اما برای حصول اطمینان از چیدمان عددی باید شبیه‌سازی‌های سه بعدی و با آزادی حرکت جسم نیز انجام شود؛ بنابراین، یک بارچ<sup>1</sup> با حرکت رول و تحت اثر امواج شماره 3، 4 و 5 شبیه‌سازی شده و نمودار لیفت و درگ ناشی از اندرکنش

<sup>1</sup> Barge



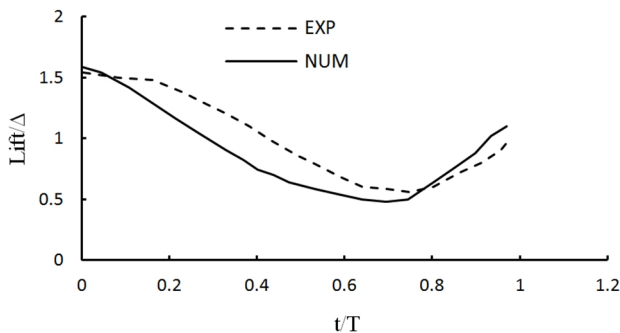
**Fig. 8** Comparison of experimental and numerical results of lift force exerted on the barge under the influence of wave 4

شکل 8 مقایسه نتایج عددی و تجربی نیروی لیفت وارد بر بارج تحت اثر موج 4



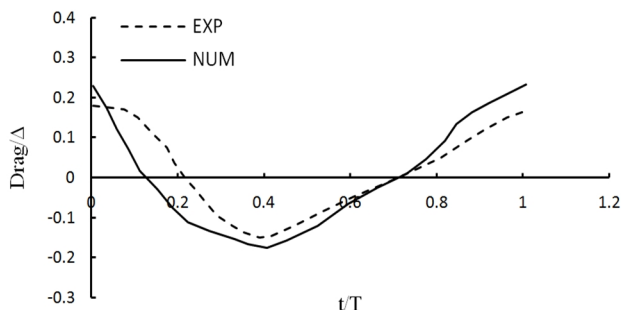
**Fig. 9** Comparison of experimental and numerical results of drag force exerted on the barge under the influence of wave 4

شکل 9 مقایسه نتایج عددی و تجربی نیروی درگ وارد بر بارج تحت اثر موج 4



**Fig. 10** Comparison of experimental and numerical results of lift force exerted on the barge under the influence of wave 5

شکل 10 مقایسه نتایج عددی و تجربی نیروی لیفت وارد بر بارج تحت اثر موج 5



**Fig. 11** Comparison of experimental and numerical results of drag force exerted on the barge under the influence of wave 5

شکل 11 مقایسه نتایج عددی و تجربی نیروی درگ وارد بر بارج تحت اثر موج 5

اعتبارسنجی نهایی شود. این جسم دارای حرکت هیو آزاد بوده و تحت تأثیر موج شماره 1 قرار گرفته است. نتایج به دست آمده با داده‌های هو و همکاران [27] مقایسه می‌گردد. مدل از یک نیم کره به قطر 0.3 متر تشکیل

در جهت رول دوران کند. شرایط مرزی نیز در "شکل 5" نشان داده شده است.

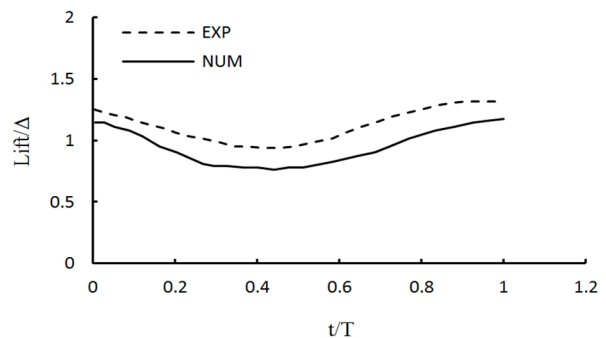
نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی جانگ و همکاران [26] مقایسه می‌شود. با توجه به "شکل 6" که مقادیر نیروی لیفت آزمایشگاهی و عددی را در موج شماره 3 نشان می‌دهد، مقدار 5% خطای محاسباتی در شبیه‌سازی عددی به دست می‌آید. خطای اندازه‌گیری شده برای نیروی درگ نیز برای موج شماره 3 به طور میانگین 8% خواهد بود که در "شکل 7" مشاهده می‌شود.

نیروهای وارد بر بارج در موج شماره 4 با دقت بسیار خوبی شبیه‌سازی شده است. همان‌طور که در "شکل 8" مشاهده می‌شود خطای شبیه‌سازی عددی برای مقدار لیفت اندک بوده و مقدار میانگین خطا 6% است. نیروی درگ محاسبه شده نیز که در "شکل 9" نشان داده شده است، دارای دقت مناسبی می‌باشد و رفتاری شبیه به رفتار نیروی درگ در حالت آزمایشگاهی را دارد.

این شبیه‌سازی‌ها برای موج 5 نیز انجام شده و نتایج در "شکل‌های 10 و 11" گزارش شده‌اند. برای این موج خطای اندازه‌گیری به نسبت حالت‌های قبل کمی افزایش یافت و به طور میانگین 20% خطا برای هر دو نیروی لیفت و درگ وجود دارد. به‌طور کلی، نتایج به دست آمده بیانگر اعتبار نسبتاً مطلوب چیدمان و شبیه‌سازی عددی است و می‌توان از آن در مدل‌سازی مسئله اصلی استفاده کرد.

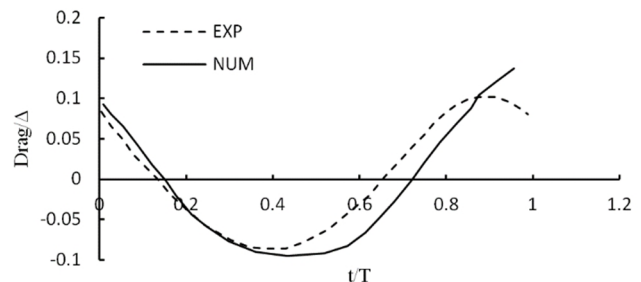
#### 3-4- شبیه‌سازی سه بعدی

پس از اطمینان از دقت مطلوب در مسائل قبلی، یک هندسه سه بعدی با حرکت هیو<sup>1</sup> در سطح آزاد نیز برای شبیه‌سازی انتخاب شد تا فرایند



**Fig. 6** Comparison of experimental and numerical results of lift force exerted on the barge under the influence of wave 3

شکل 6 مقایسه نتایج عددی و تجربی نیروی لیفت وارد بر بارج تحت اثر موج 3



**Fig. 7** Comparison of experimental and numerical results of drag force exerted on the barge under the influence of wave 3

شکل 7 مقایسه نتایج عددی و تجربی نیروی درگ وارد بر بارج تحت اثر موج 3

<sup>1</sup> Heave

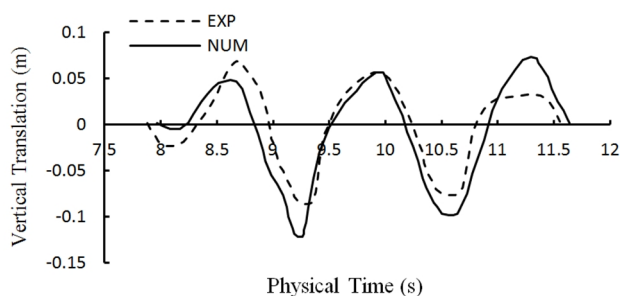


Fig. 15 Diagram of the Vertical displacement along the z-axis under the influence of wave 1

شکل 15 نمودار جابجایی عمودی جسم در راستای محور z تحت تأثیر موج شماره 1

برای انجام شبیه‌سازی مبدل انرژی موج استخراج گردید. شبیه‌سازی مبدل انرژی موج در حجمی گسترده با شبیه‌سازی‌های زیاد و با در نظر گرفتن جوانب مختلف انجام گرفته است تا مدل بهینه انتخاب گردیده و بتوان حداکثر بازدهی را از مدل انتخاب شده استخراج کرد. بدین منظور، شبیه‌سازی‌ها در سه حالت مختلف تک پدالی، سه پدالی و هشت پدالی انجام شد و هر کدام از این حالات نیز خود در شرایط مختلفی مورد ارزیابی قرار گرفتند. تمامی این شبیه‌سازی‌ها با یک دامنه محاسباتی در آب کم عمق و در شرایط نزدیک به ساحل انجام گرفت تا شرایط واقعی تا حد امکان بازسازی شود (شکل 16).

در دامنه محاسباتی در نظر گرفته شده ساحل به صورت دیواره در نظر گرفته شده و برای اجتناب از بازگشت آب، دمپینگ به اندازه‌ی ثابت 9 متر اعمال شده است. کف دریا نیز به صورت دیواره بدون لغزش در نظر گرفته شده تا به شرایط آب کم عمق نزدیک باشد. طول دامنه محاسباتی 15 متر و ارتفاع آن 4 متر در نظر گرفته شده و مدل در 1.5 متری از کف دریا قرار گرفته است. به دلیل متقارن بودن جسم، یک صفحه تقارن برای دامنه محاسباتی استفاده شده است تا فقط نیمی از جسم را مدل کند و از حجم محاسبات عددی کاسته شود. شرایط مرزی استفاده شده و نوع آن‌ها نیز در جدول 2 آورده شده است. مشابه با بخش اعتبارسنجی، صفحه ورودی به صورت سرعت جریان و صفحه خروجی با فشار هیدرواستاتیکی مدل‌سازی شده‌اند. شرایط مرزی دیگر نیز به طور کامل در جدول 2 آورده شده است. یکبار دیگر این بر این نکته تأکید می‌شود که نتایج آزمایشگاهی برای مبدل انرژی مورد نظر وجود ندارد و اعتبار حل عددی با مسائل مشابه مورد بررسی قرار گرفته است.

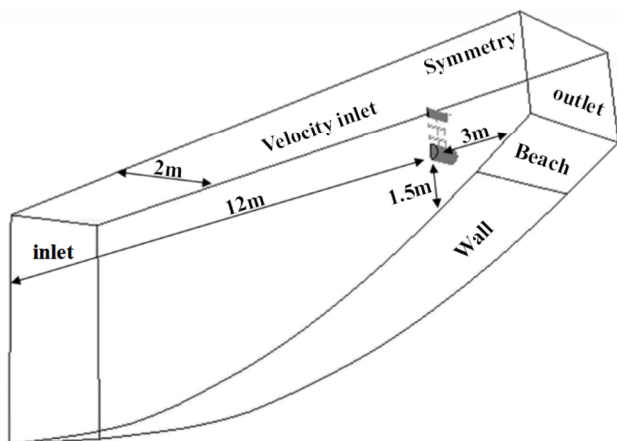


Fig. 16 Computational domain

شکل 16 دامنه محاسباتی

شده که یک استوانه به همین قطر و ارتفاع 0.15 متر روی آن قرار دارد. دامنه‌ی محاسباتی یک مکعب به ابعاد  $0.35 \times 0.24 \times 0.35$  متر است و عمق آب نسبت به سطح آزاد 0.5 متر در نظر گرفته می‌شود. آب‌خورد اولیه‌ی جسم 0.15 متر است. در "شکل 12" شرایط مرزی این شبیه‌سازی بیان گردیده که صفحه ورودی، کف و بالا به صورت جریان ورودی، صفحه خروجی به صورت فشار خروجی و صفحه روبرو به صورت صفحه تقارن در نظر گرفته شده‌اند. "شکل 12" سطح آزاد ناشی از برخورد موج با جسم را نیز نشان می‌دهد.

نمودارهای موجود در "شکل‌های 13، 14 و 15" دقت نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی عددی انجام شده را در مقایسه با نتایج حاصل از مطالعات هو و همکاران [27] نشان می‌دهند. "شکل 13" نمودار نیروی هیدرو بر حسب زمان را نشان داده و همان‌طور که مشاهده می‌شود دقت محاسباتی قابل قبول است. "شکل 14 و 15" نمودار سرعت و جابجایی عمودی جسم را تحت تأثیر موج شماره 1 نشان می‌دهند. با توجه به اینکه مسائل مربوط به بخش اعتبارسنجی، هدف اصلی این مقاله نبوده و تنها جهت بررسی اعتبار چیدمان عددی بکار گرفته شده‌اند، تنها تلاش شده تا اعتبار تقریبی محاسبات و چیدمان عددی پیشنهادی برای حل مسئله اصلی به اثبات برسد. هرچند که با وجود میزانی از خطا در محاسبات عددی، می‌توان نتایج شبیه‌سازی‌ها را نتایج قابل قبولی دانست.

## 5- نتایج

پس از اعتبار سنجی مدل‌های دو بعدی و سه بعدی، چیدمان عددی معتبری

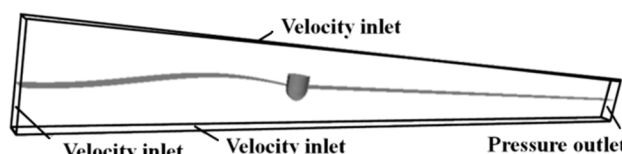


Fig. 12 Boundary conditions at simulation of the three-dimensional body

شکل 12 شرایط مرزی در شبیه‌سازی جسم سه بعدی

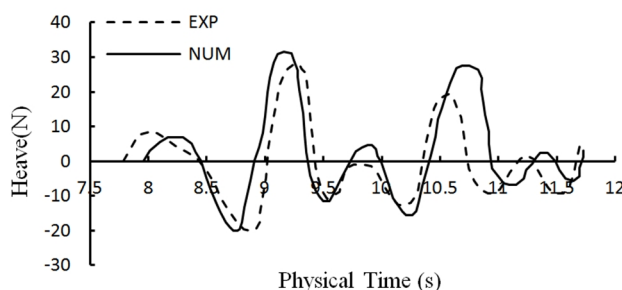


Fig. 13 Diagram of heave relative to time for 3D simulation

شکل 13 نمودار نیروی هیدرو بر حسب زمان برای شبیه‌سازی سه بعدی

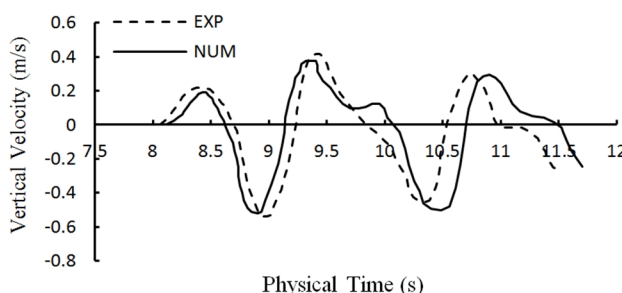


Fig. 14 Diagram of Vertical velocity under the influence of wave 1

شکل 14 نمودار سرعت عمودی جسم تحت تأثیر موج شماره 1



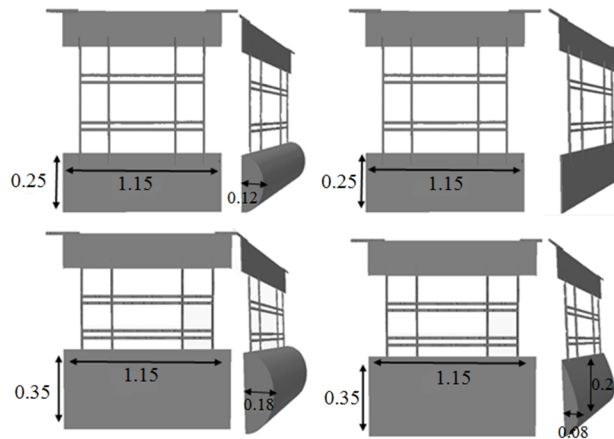


Fig. 17 Simulated geometries

شکل 17 هندسه‌های شبیه‌سازی شده

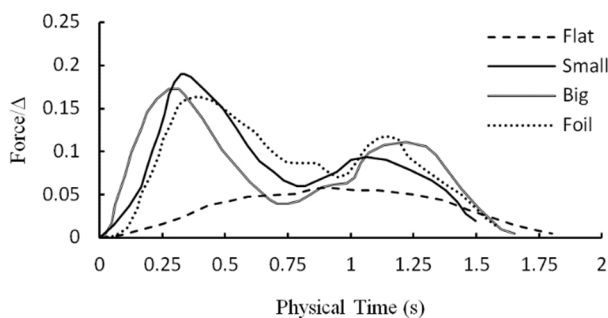


Fig. 18 The forces exerted on each four pedals relative to time

شکل 18 نیروهای وارد بر هر چهار پدال نسبت به زمان

متر به پدال در حالت اولیه می‌باشد. در این حالت نیرویی که موج به هر چهار پدال وارد می‌کند در "شکل 20" نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در پدال‌های نیم کره کوچک و پدال فویل با گذشت زمان 0.3 ثانیه، نیرویی به اندازه 0.17 به پدال وارد می‌شود که در مقایسه با حالت قبل، نیروی کمتری به پدال اعمال می‌گردد. این مسئله می‌تواند ناشی از وجود جریان آب در پشت پدال در زمان ابتدای حرکت باشد. نیروی وارد بر پدال تخت نمی‌تواند گشتاور مورد نیاز برای نوسان مبدل را فراهم کند.

نیروهایی که از طرف موج بر پدال‌ها وارد می‌شود باعث چرخش یا نوسان پدال‌ها و تولید انرژی خواهد شد. مقدار این چرخش به شکل هندسه پدال‌ها بستگی دارد. همان‌طور که در "شکل 21" مشاهده می‌شود، هر سه پدال نیم کره کوچک، بزرگ و فویل با توجه به این که نیروهای مختلفی به آن‌ها وارد می‌شود اما رفتار نوسانی شبیه به هم دارند. این پدال‌ها پس از گذشت 1 ثانیه

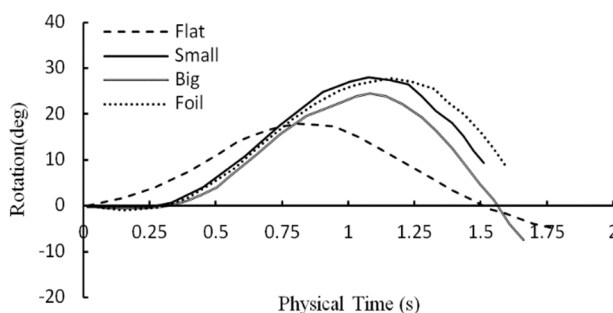


Fig. 19 Rotation angle of each four pedals relative to time

شکل 19 مقدار زاویه چرخش هر چهار پدال نسبت به زمان

جدول 2 شرایط مرزی دامنه محاسباتی

Table 2 Boundary condition of computational domain

صفحه دامنه	شرایط مرزی	نوع
بدنه مبدل	دیواره	بدون لغزش
صفحه ورودی	سرعت ورودی جریان	سرعت عمودی
صفحه خروجی	فشار خروجی جریان	فشار هیدرواستاتیکی
صفحه بالا	سرعت ورودی جریان	سرعت مماسی
صفحه پایین	دیواره	بدون لغزش
صفحه پشت دامنه	سرعت ورودی جریان	سرعت مماسی
صفحه روبرویی	صفحه تقارن	تقارن در مرکز
ساحل	دیواره	----

### 5-1- تک پدال

مبدل انرژی موج طراحی شده می‌تواند با تعداد پدال‌های مختلفی مدل‌سازی شود. در واقع، شبیه‌سازی عددی می‌تواند اثرات تعداد پدال‌ها بر عملکرد مبدل انرژی موج را مشخص نماید. از این رو، در گام نخست، مبدل انرژی موج با تنها یک پدال مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. از سوی دیگر، هندسه خود پدال و به خصوص بخش خیس آن نیز می‌تواند یک موضوع مجزا برای تحقیق و بررسی جهت بهینه‌سازی عملکرد مبدل انرژی موج باشد. بنابراین، برای شروع شبیه‌سازی از 4 نوع هندسه پدال که در "شکل 17" نشان داده شده‌اند، استفاده خواهد شد. این پدال‌ها به صورت پدال تخت، پدال نیم کره با ابعاد بزرگ، پدال نیم کره با ابعاد کوچک و پدال فویل مانند با ابعاد نشان داده در "شکل 17" هستند. با بررسی شرایط محیطی خلیج فارس و مشاهده و اندازه‌گیری شکست امواج در ساحل بوشهر، این نتیجه به دست آمد که پدال‌های مورد نظر در ارتفاع موج 0.3 متر، دوره تناوب 2.5 ثانیه و طول موج 9.75 متر شبیه‌سازی شوند.

از سوی دیگر، مقدار آبخور پدال فاکتور مهمی در ایجاد نیروی لازم جهت چرخش مبدل می‌باشد. به همین دلیل شبیه‌سازی برای این مدل‌ها، در دو حالت آبخور مختلف بررسی شدند. در حالت اول پدال مورد نظر بدون آبخور در نظر گرفته شد تا از نیروی سیالی که در پشت پدال ایجاد می‌شود جلوگیری شود. در حالت دیگر، فرض می‌شود که پدال دارای یک آبخور اولیه باشد.

"شکل 18" نمودار نیروی وارد شده توسط موج بر پدال‌ها را نشان می‌دهد. به پدال تخت نیروی کمی وارد می‌شود که این امر بیانگر آن است که پس از برخورد موج به پدال و چرخش آن، تجمع حجم زیادی از آب در پشت پدال موجب افزایش نیروی مقاومت و کاهش چرخش پدال می‌شود. پدال‌های نیم کره کوچک، بزرگ و فویل به دلیل شباهتی تقریبی که در هندسه دارند، نیروی مشابهی با اندازه متوسط 0.19 از طرف موج دریافت می‌کنند. در این میان نیرویی که به پدال نیم‌کره کوچک وارد می‌شود کمی بیشتر از مدل‌های دیگر بوده و در نتیجه بازدهی بیشتری نسبت به دیگر پدال‌ها خواهد داشت.

"شکل 19" نیز نمودار مقدار زاویه چرخش هر چهار پدال را نسبت به زمان نشان می‌دهد. همان‌طور که پیش‌بینی می‌شد مقدار زاویه چرخش پدال تخت با توجه به نیروی ماکزیمم 0.07 که به آن وارد می‌شد چرخش کمی به اندازه 17 درجه است. از طرفی سه پدال دیگر رفتار حرکتی مشابه داشته و نوسان نسبت مناسبی با نیروی موج پیدا می‌کنند.

حالت دومی که برای شبیه‌سازی تک پدال‌ها در نظر گرفته شد قرار دادن قسمتی از پدال در آب و یا به عبارتی اضافه کردن آبخور به اندازه 0.1

چرخش کمی نیز دارند؛ اما مناسب‌ترین پدال برای ساخت مبدل، پدال نیم‌کره کوچک است که نیرویی به اندازه 0.12 پس از گذشت 0.3 ثانیه از طرف موج دریافت می‌کند و این نیرو پس از گذشت 1.5 ثانیه مبدل را به اندازه 80 درجه می‌چرخاند. با قرار دادن 10 سانتی‌متر آبخور برای پدال در حالت اولیه شرایط نیروی وارد شده و همچنین مقدار چرخش پدال‌ها تغییر زیادی خواهد داشت. همان‌طور که در "شکل 24" مشاهده می‌شود مقدار نیروی وارد بر پدال‌ها در هندسه تخت و فویلی تغییر چندانی ایجاد نشد اما نیروی وارد بر پدال نیم‌کره بزرگ افزایش یافت اما بازهم چرخش مناسبی برای تولید انرژی ندارد. چرخش 50 درجه‌ای نیز برای پدال نیم‌کره کوچک بازده بسیار کمی دارد (شکل 25). پس عملاً قرار دادن پدال در درون آب ایده مناسبی محسوب نمی‌شود و بازدهی خوبی نخواهد داشت.

پس از بررسی انواع هندسه تک پدالی و سه پدالی در حالت‌های بدون آبخور و با آبخور، اکنون مدلی با بازدهی زیاد انتخاب می‌شود تا برای طراحی و شبیه‌سازی اصلی مورد تست قرار بگیرد. با توجه به مقایسه‌های انجام شده می‌توان دریافت که پدال نیم‌کره کوچک در حالت بدون آبخور، هم از لحاظ زاویه چرخش و هم از لحاظ اعمال بیشترین نیرو از طرف موج به آن می‌تواند بازدهی بسیار بهتری نسبت به دیگر مدل‌ها داشته باشد. پس برای شبیه‌سازی اصلی از مدل نیم‌کره با ابعاد کوچک در امواج مختلف استفاده خواهد شد.

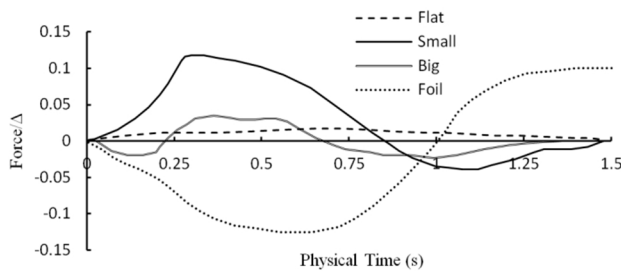


Fig. 22 The forces exerted on each four pedals relative to time

شکل 22 نیروهای وارد بر هر چهار نوع پدال نسبت به زمان

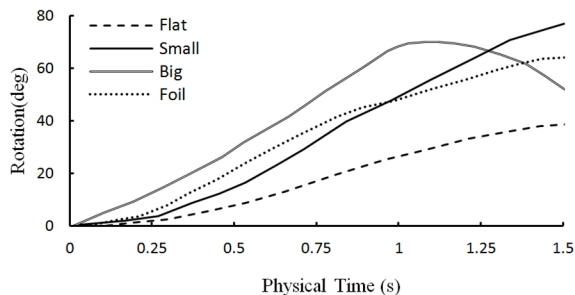


Fig. 23 Rotation angle of each four pedals relative to time

شکل 23 مقدار زاویه چرخش هر چهار نوع پدال نسبت به زمان

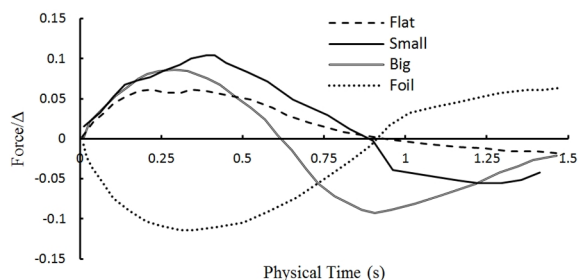


Fig. 24 The forces exerted on each four pedals relative to time

شکل 24 نیروهای وارد بر هر چهار نوع پدال نسبت به زمان

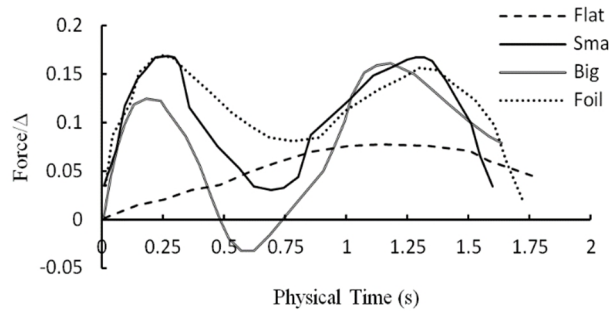


Fig. 20 The forces exerted on each four pedals relative to time

شکل 20 نیروهای وارد بر هر چهار پدال نسبت به زمان

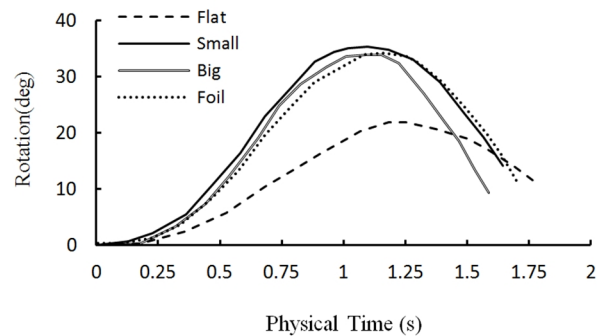


Fig. 21 Rotation angle of each four pedals relative to time

شکل 21 مقدار زاویه چرخش هر چهار پدال نسبت به زمان

به اندازه 35 درجه توسط موج به چرخش وادار می‌شوند.

همان‌گونه که مشاهده شد، به پدال‌ها در حالت بدون آبخور نیروی بیشتری از طرف موج برای ایجاد گشتاور اعمال شد. در این حالت بیشترین نیرو به پدال نیم‌کره کوچک وارد می‌شود که این پدال را به پدالی پر بازده تبدیل می‌کند. این شبیه‌سازی‌ها در حالت تک پدالی صرفاً برای اندازه‌گیری نیروی موج و بررسی گشتاور مورد نیاز جهت انتخاب صحیح ژنراتور انجام شد. در ادامه، مبدل انرژی موج با سه و هشت پدال نیز مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

## 2-5- شبیه‌سازی مبدل انرژی موج در حالت سه پدالی

پس از بررسی تک پدال‌ها و مقایسه آن‌ها با یکدیگر، مدل مناسب برای طراحی اصلی انتخاب شد اما برای اطمینان بیشتر از مدل انتخاب شده سعی شد تا این مقایسه برای هر چهار هندسه با سه پدال نیز انجام شود. ضمن اینکه تأثیر تعداد پدال‌ها نیز به تدریج آشکار خواهد شد. یکی دیگر از دلایل استفاده از سه پدال برای شبیه‌سازی، مشاهده نوع چرخش پدال‌ها با توجه به نیروی گرانشی است که عدم تقارن پدال‌ها به سیستم وارد می‌کند. موجی که برای برخورد به پدال انتخاب شده است همان موج استفاده شده در تک پدال‌ها بوده و از همان شرایط موجود در تک پدال‌ها برای این شبیه‌سازی استفاده شده است. موج دارای دامنه 0.3 متر و دوره تناوب 2.5 ثانیه بوده و براساس مراجع مربوطه انتخاب شده است. تمامی نتایج این شبیه‌سازی‌ها در 1.5 ثانیه ابتدایی حرکت خود استخراج شده‌اند تا در یک شرایط یکسان مقایسه‌ها انجام شود. ضمناً، با گذشت زمان نتایج تکرار می‌شوند. انجام شبیه‌سازی‌ها در حالت بدون آبخور با نتایج جالبی که در "شکل‌های 22 و 23" مشاهده می‌شود، روبرو بود. مجموعه سه پدالی برای هندسه تخت همانند حالت تک پدالی دارای بازده مناسبی نیست. همان‌طور که مشاهده می‌شود به این نوع پدال نیروی بسیار اندکی به اندازه 0.01 وارد شده که



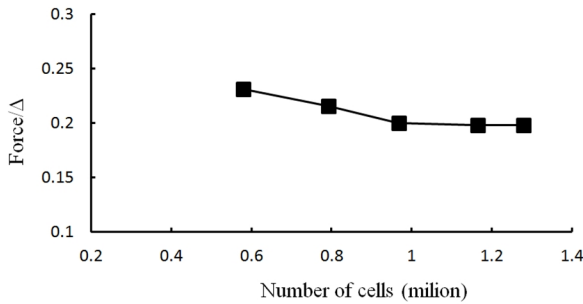


Fig. 27 Mesh independence at wave number 4

شکل 27 استقلال از مش در موج شماره 4

پدیده‌هایی نظیر شکست موج در این مسئله رخ می‌دهد. "شکل 29" نمودار شبیه‌سازی‌های انجام شده برای هر 9 موج ذکر شده را نشان می‌دهد. در این شکل محور افقی شماره موج و محور عمودی زمان چرخش مبدل را نشان می‌دهد. با دقت در این شکل میزان بازدهی مبدل در شرایط مختلف را می‌توان بررسی نمود. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش دامنه موج، سرعت چرخش زیادتر می‌شود. برای مثال سرعت چرخش در موج‌های 7، 8 و 9 که دامنه موج 1 متری دارند بسیار بیشتر از دیگر موج‌ها با دامنه کمتر است؛ اما با مقایسه پریود موج‌ها با یکدیگر مشخص شد که هرچه پریود موج کمتر باشد، زمان چرخش نیز کمتر می‌شود و در نتیجه سرعت چرخش افزایش می‌یابد. دلیل چرخش سریع مبدل با پریود کم موج این است که در این حالت موج در زمان کمی به مبدل نیرو وارد کرده و سپس از مبدل جدا شده و در نتیجه از مقاومت آب کاسته شده و سرعت چرخش پدال‌ها افزایش می‌یابد.

بهینه‌ترین موج برای حرکت دادن پدال‌ها موج شماره 7 می‌باشد. با برخورد این موج به مبدل، سرعت چرخش افزایش بسیاری یافته و در 2.8 ثانیه مبدل را به اندازه یک دور کامل می‌چرخاند. این موج دارای کم‌ترین پریود موج و بیشترین دامنه موج می‌باشد؛ اما موج شماره 3 دارای کم‌ترین دامنه موج در بیشترین حالت پریود موج می‌باشد. مبدل در این موج برای چرخش به اندازه یک دور کامل به 20 ثانیه زمان نیاز دارد که زمان بسیار زیادی برای چرخش یک دور مبدل محسوب می‌شود و کم‌ترین بازدهی را برای خواهد داشت.

سرعت چرخش مبدل رابطه مستقیمی با مقدار نیروی وارد شده از طرف موج دارد. این رابطه را در "شکل 30" که مقدار ماکزیم نیروی وارد بر مبدل در هر 9 موج ذکر شده را نشان می‌دهد، می‌توان درک کرد. نیروهای وارد بر مبدل در ارتفاع موج‌های بالا نیروهای نسبتاً شدیدی هستند که برای ساخت مبدل و برای جلوگیری از خسارت، این نیروها مدنظر قرار خواهد گرفت.

این نیروها باعث تولید توان در مبدل می‌شوند. نیروهای امواج شبیه‌سازی می‌توانند به‌طور متوسط توانی به اندازه 400 وات ساعت تولید کنند اما بیشترین توان تولیدی توسط مبدل طراحی شده به‌طور متوسط

160 وات ساعت می‌باشد که این مقادیر در پریودهای موج پایین حاصل می‌گردد. پس همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، مبدل طراحی شده در پریودهای پایین موج بازدهی بسیار مناسب‌تری دارد. طبق "شکل 31" بیشترین توان تولیدی در پریود موج 2 ثانیه ایجاد شده و با افزایش پریود موج، توان تولیدی کاهش می‌یابد. پس می‌توان نتیجه گرفت که طراحی مبدل انرژی موج مورد نظر برای خلیج فارس که دارای موج‌هایی با ارتفاع و پریود کم است می‌تواند مؤثر و کارا باشد. با راه‌اندازی مزرع‌ای از نمونه اصلی مبدل و بهینه‌سازی بیشتر آن می‌توان نیروگاه چند کیلوواتی تولید برق را

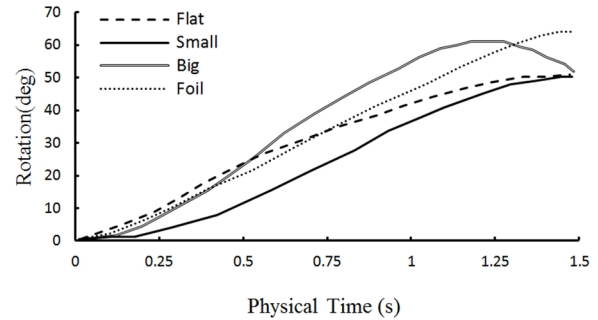


Fig. 25 Rotation angle of each four pedals relative to time

شکل 25 مقدار زاویه چرخش هر چهار نوع پدال نسبت به زمان

### 3-5- شبیه‌سازی مبدل انرژی موج با هشت پدال

پس از انتخاب پدال نیم کره کوچک به عنوان پدال اصلی، اکنون به بررسی و شبیه‌سازی مجموعه کامل 8 پدالی این نوع هندسه در امواج مختلف پرداخته می‌شود و رفتار حرکتی آن در شرایط مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. امواجی که برای شبیه‌سازی این مدل انتخاب شده است شامل 9 موج مختلف است که در جدول 3 نشان داده شده‌اند.

این مدل نیز با شرایط دامنه محاسباتی ساحل و در نظر گرفتن ناحیه دمپینگ تهیه شده و فقط بازه گسترده‌تری از امواج جهت انجام شبیه‌سازی‌ها انتخاب گردیده است. نوع شبکه‌بندی نیز برای این مدل تغییر نکرده و همان‌طور که "شکل 26" نوع مش را در طول دامنه محاسباتی و مدل نشان می‌دهد، تعداد 958602 سلول محاسباتی برای شبیه‌سازی استفاده می‌شود. ضمن اینکه مطالعات همگرایی مش به منظور بررسی اثر اندازه مش بر روی نتایج مسئله، در موج شماره 4 برای مبدل با 8 پدال کامل صورت گرفته است. برای این کار از 5 نوع مش مختلف با تعداد مش  $A = 571007$ ،  $B = 783880$ ،  $C = 958602$ ،  $D = 1157144$  و  $E = 1273229$  استفاده شده است. "شکل 27" چگونگی تغییرات مقدار نیرو را با تغییر تعداد مش‌ها نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که تعداد مش 958602 مناسب‌ترین مش برای انجام شبیه‌سازی مبدل موج در این حالت می‌باشد.

"شکل 28" نمونه‌ای از مبدل شبیه‌سازی شده و نوع قرارگیری آن در موج با ارتفاع 0.5 متر را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود

جدول 3 مشخصات امواج منظم برای شبیه‌سازی سیستم 8 پدالی

Table 3 Characteristics of regular waves to simulate the 8 pedal system

شماره موج	دامنه موج (متر)	دوره تناوب (ثانیه)	طول موج (متر)
1	0.25	2	6.25
2	0.25	4	25
3	0.25	6	56
4	0.50	2	6.25
5	0.50	4	25
6	0.50	6	56
7	1	2	6.25
8	1	4	25
9	1	6	56

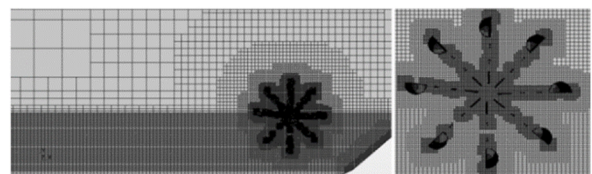


Fig. 26 Mesh distribution along computational domain and around the wave energy converter

شکل 26 توزیع مش در طول دامنه محاسباتی و در اطراف مبدل انرژی موج

که توسط نویسندگان طراحی شده بود، مورد توجه قرار گرفت. یک مدل عددی بر مبنای مطالعات گذشته و روش‌های معمول استخراج گردید و مورد استفاده قرار گرفت. جهت اعتبارسنجی مدل عددی نیز از سه مسئله مختلف که ویژگی‌های کلی مسئله اصلی را دارا بودند استفاده شد و مشاهده گردید که چیدمان عددی ایجاد شده از دقت مناسبی برخوردار است.

شبیه‌سازی‌های انجام شده ابتدا با مدل کردن مبدل انرژی موج تک پدالی با 4 هندسه مختلف (پدال تخت، پدال نیم کره کوچک، پدال نیم کره بزرگ و پدال فویلی) در آب‌خوره‌های مختلف و موج مشخص انجام شد و با شبیه‌سازی عددی، این هندسه‌ها با یکدیگر مقایسه شدند. با توجه به مطالعات پیشین، میزان چرخش مبدل و نیروی وارد شده بر آن از خروجی‌های اصلی محاسبات انجام شده بودند. ضمن این‌که زمان چرخش مبدل و اثرات ویژگی‌های مختلف موج نیز مورد توجه قرار گرفتند. پس از بررسی‌های انجام شده مشخص شد که پس از گذشت 0.3 ثانیه مقدار نیرویی به اندازه 0.2 به پدال نیم کره کوچک وارد کرده و باعث چرخش آن به اندازه 28 درجه می‌شود. این پدال در حالت بدون آب‌خور، پربازده‌ترین پدال برای تک پدالی‌ها بود. شبیه‌سازی‌ها برای حالت 3 پدالی این هندسه‌ها نیز انجام شد. همان‌طور که پیش‌بینی می‌شد پدال نیم کره کوچک با نیروی 0.12 که به آن وارد می‌شود، به اندازه 80 درجه پس از 1.5 ثانیه به راحتی می‌چرخد که نسبت به پدال‌های دیگر نتیجه مطلوب‌تری محسوب می‌شود. پس از این انجام این مرحله، پدال نیم کره کوچک برای ساخت مدل اصلی انتخاب و مورد شبیه‌سازی قرار گرفت. این شبیه‌سازی در 9 موج مختلف انجام شد و پس از انجام تمامی شبیه‌سازی‌ها در موج‌های مختلف مشخص شد که با وارد شدن نیرویی اندک به مبدل انرژی، این مبدل می‌تواند به چرخش خود ادامه دهد؛ اما اگر مبدل انرژی موج در موجی با دامنه زیاد و پیروی کم قرار بگیرد، سرعت چرخش آن چندین برابر می‌شود. مبدل انرژی موج یاد شده هم‌اکنون در مرحله ساخت و آزمایش قرار دارد و نتایج آن در آینده نزدیک منتشر خواهد شد.

## 7- تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله بر خود واجب می‌دانند تا مراتب تقدیر و تشکر خود از ستاد توسعه فناوری و صنایع دانش‌بنیان دریایی جهت حمایت مالی از پروژه تحت عنوان "توسعه مبدل انرژی موج مبتکرانه با ترکیب صفحات نوسانگر و مواد پیزوالکتریک" با شماره موافقت‌نامه 11/77647 را ابراز نمایند.

## 8- مراجع

- [1] C. Mandil, World Energy Outlook, *In International Energy Symposium*, Tokyo, Japan, November 9, 2004.
- [2] H. Sadeghi, A. Azar, S. Khaksar Astaneh, Optimization of energy resources supply to produce electricity, the prospect of Iran on the horizon 1404, *The Economic Research, Tarbiat Modarres University*, Vol. 15, No. 13, pp. 91-118, 2015. (in Persian)
- [3] H. Fatemi, A. Riasi, A. Nourbakhsh, Parametric study of ocean wave turbine (Wells type) over the floating oscillating platform: A numerical analysis, *Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 13, pp. 77-85, 2014. (in Persian)
- [4] B. Drew, A. Plummer, M. N. Sahinkaya, A review of the wave energy converter technology, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, Vol. 223, No. 8, pp. 887-902, 2009.
- [5] C. G. Soares, J. Bhattacharjee, D. Karmakar, Overview and prospects for development of wave and offshore wind energy, *Journal of Brodogradnja*, Vol. 65, No. 2, pp. 91-113, 2014.
- [6] K. Koca, A. Kortenhaus, H. Oumeraci, B. Zanuttigh, E. Angelelli, M. Cantu, R. Suffredini, G. Franceschi, Recent advances in the development of wave energy converters, *9th European Wave and Tidal Energy Conference (EWTEC)*, Aalborg, Denmark, September 2-5, 2013.
- [7] D. Magagna, A. Uihlein, Ocean energy development in Europe: Current

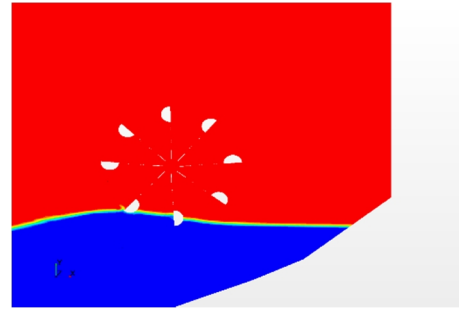


Fig. 28 A view of a simulated wave converter

شکل 28 نمایی از مبدل شبیه‌سازی شده در موج

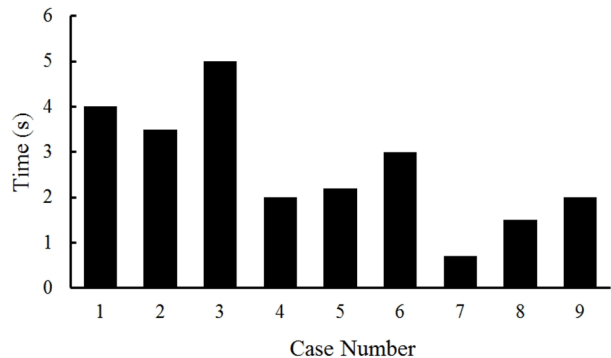


Fig. 29 The rotation time up to 90 degrees under the influence of different waves

شکل 29 زمان چرخش مبدل تا 90 درجه تحت تأثیر موج‌های مختلف

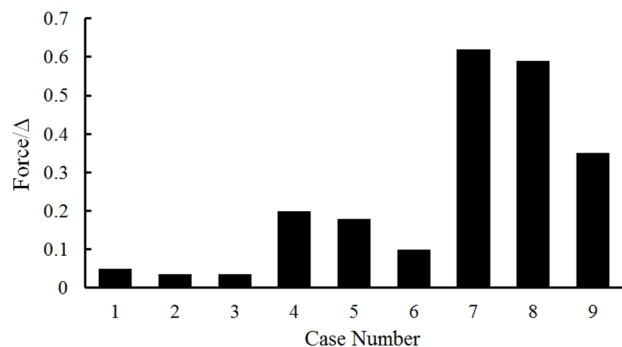


Fig. 30 the forces exerted on converter under the influence of different waves

شکل 30 نیروی وارد شده به مبدل تحت تأثیر امواج مختلف

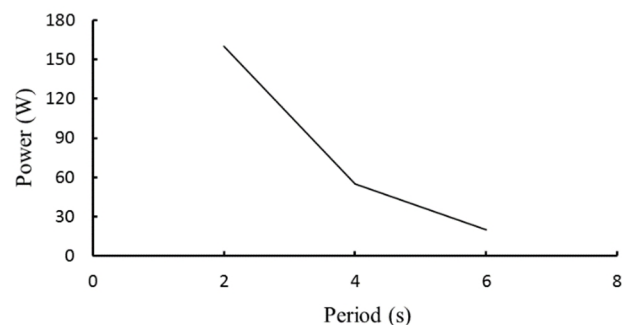


Fig. 31 Power product of wave energy converter

شکل 31 توان تولیدی مبدل موج

تأسیس نمود.

## 6- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله یک چیدمان عددی برای ارزیابی عددی یک مبدل انرژی موج

- wave energy converter by CFD and MATLAB codes, *conference publication of Fluid Machinery and Fluid Engineering*, January, 2014.
- [18] M. Anbarsooz, M. Passandideh-Fard, M. Moghiman, Numerical simulation of a submerged cylindrical wave energy converter, *International Journal of Renewable Energy*, Vol. 64, No. 14, pp. 132-143, 2014.
- [19] V. Gómez, R. Guanche, C. Vidal, I. Eguinoa, Numerical simulation of a submerged wave energy converter under irregular wave conditions, *Oceans Conference*, Spain, pp. 1-10, Jun 6-9, 2011.
- [20] Y. Yingxue, L. Hailong, W. Jinming, Z. Liang, Numerical Simulation of Duck Wave Energy Converter, *Key Engineering Materials*, ISSN, 1662-9795, Vol. 693, No. 74, pp. 484-490, 2016.
- [21] H. Hongzhou, L. Hui, Numerical simulation of the pendulum system in a buoy pendulum wave energy converter, *Energy Procedia*, Vol. 61, No. 31, pp. 2030 – 2033, 2014.
- [22] J. N. Newman, *Marine Hydrodynamics*, pp. 50-58, United States of America, Maple-Vail, 1977.
- [23] C. W. Hirt, B. D. Nichols, Volume Of Fluid (VOF) method for the Dynamics of free boundaries, *Journal of Computational Physics*, Vol. 39, No. 1, pp. 201-221, 1981.
- [24] *Star-CCM+ User-Guide version 402*, Accessed on 5 may 2006; <https://www.scribd.com/doc/193836790/Star-CCM-User-Guide>
- [25] A. G. Dixon, A. Greated, S. H. Salter, Wave forces on partially submerged cylinders, *Journal of Waterway, Port. C. ASCE*, Vol. 105, No. 4, pp. 421-438, 1979.
- [26] K. H. Jung, K. A. Chang, E. T. Huang, Two-dimensional flow characteristics of wave interactions with a fixed rectangular structure, *Ocean Engineering*, Vol. 31, No. 8, pp. 975-998, 2004.
- [27] Z. Z. Hu, D. M. Causon, C. G. Mingham, L. Qian, Numerical simulation of floating bodies in extreme free surface waves, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 11, No. 2, pp. 519-527, 2011.
- status and future perspectives, *International Journal of Marine Energy*, Vol. 11, No. 30, pp. 84-104, 2015.
- [8] J. Villate, Situación actual de las energías marinas y perspectivas de futuro, *Seminario Anual de Automática, Electrónica e Instrumentación*, Braga, Portugal, July 11-13, 2010.
- [9] V. Comett, A global wave energy resource assessment, *The Eighteenth International Offshore and Polar Engineering Conference*, Vancouver, Canada, July 6-11, 2008.
- [10] A. Falcao, Wave energy utilization: a review of the technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, No. 3, pp. 899-918, 2010.
- [11] B. Czech, P. Bauer, Wave energy converter concepts: design challenges and classification, *Industrial Electronics Magazine, IEEE*, Vol. 6, No. 2, pp. 4-16, 2012.
- [12] V. Stratigaki, P. Troch, T. Stallard, D. Forehand, J. P. Kofoed, M. Folley, M. Benoit, A. Babarit, J. Kirkegaard, Wave basin experiments with large wave energy converter arrays to study interactions between the converters and effects on other users in the sea and the coastal area, *Journal of Energies*, Vol. 7, No. 2, pp. 701-734, 2014.
- [13] M. McCormick, *Ocean Wave Energy Conversion*, pp. 22-23, United States of America, Dover Publications, 2007.
- [14] J. Newman, The interaction of stationary vessels with regular waves, in *Proceedings of 11th Symposium on Naval Hydrodynamics*, London, England, pp. 491-501, 1976.
- [15] M. Eriksson, J. Isberg, M. Leijon, Hydrodynamic modeling of a direct drive wave energy converter, *International Journal of Engineering Science*, Vol. 43, No. 17, pp. 1377-1387, 2005.
- [16] J. Falnes, A review of wave energy extraction, *Marine Structures*, Vol. 20, No. 4, pp. 185-201, 2007.
- [17] S. Y. Kim, B. H. Kim, Y. H. Lee, Numerical analysis of internal flow in the