



## مطالعه آزمایشگاهی و عددی ارتعاشات سازه‌های غوطه‌ور یک و دو درجه آزادی و مقایسه جذب انرژی آنها از امواج

امیررضا مقیمان<sup>1</sup>، انوشیروان فرشیدیان فر<sup>2</sup>، حمید معین فرد<sup>3</sup>\*

1- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد  
 2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد  
 3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد  
 \* مشهد، صندوق پستی 91775-1111، h\_moeenfar@um.ac.ir

### چکیده

در این مقاله با اندازه‌گیری آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی، اثر فرکانس، ارتفاع و طول موج امواج گرانشی پیشرونده بر ارتعاشات و انرژی دریافتی سامانه‌های نوسانی بریستول با یک و دو درجه آزادی به عنوان مدل انرژی در عمق‌های مختلف آب مورد مطالعه قرار گرفته است. آزمایش‌ها در یک کانال مجهز به سامانه موجساز باله‌ای که دارای وسایل اندازه‌گیری مشخصات موج می‌باشد، انجام شده است. شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم افزار کامسول که توانایی شبیه‌سازی برهم‌کنش محیط‌های فیزیکی را دارد برای جریان آشفته صورت گرفته است. مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی به دست آمده از این مطالعه با هم و نیز مقایسه آنها با نتایج سایر محققین در بازه وسیعی از پارامترهای امواج تطابق مطلوبی را نشان می‌دهد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که تغییر عمق اجسام غوطه‌ور از سطح آزاد آب اثر قابل توجهی بر رفتار ارتعاشی آنها دارد بطوریکه با افزایش عمق، دامنه نوسانات جسم به یک مقدار ماکزیمم افزایش و سپس کاهش می‌یابد. نتایج همچنین بیانگر اثر متفاوت عمق نسبی آب بر بازده سامانه‌های یک و دو درجه آزادی می‌باشد، بطوریکه افزایش عمق نسبی آب موجب افزایش بازده سامانه‌های یک درجه آزادی عمودی می‌گردد در حالیکه تاثیر قابل توجهی بر بازده سامانه‌های دو درجه آزادی ندارد. نتایج نشان می‌دهد که برای یک ارتفاع ثابت آب داخل کانال، افزایش فرکانس موجساز موجب افزایش ارتفاع و نیروی امواج تولیدی و در نتیجه افزایش دامنه ارتعاشات جسم غوطه‌ور در دو راستای عمودی و افقی می‌گردد.

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
 دریافت: 17 شهریور 1395  
 پذیرش: 29 مهر 1395  
 ارائه در سایت: 06 آذر 1395  
 کلید واژگان:  
 انرژی موج  
 سامانه نوسانی بریستول  
 موجساز باله‌ای  
 فرکانس موج  
 ارتفاع موج

## Experimental and Numerical Study of vibration in submerged structures with multi-degree-of-freedom and comparing the efficiency of wave's energy absorption

AmirReza Moghiman, Anooshiravan Farshidianfar, Hamid Moeenfar<sup>\*</sup>

Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University, Mashhad, Iran.  
 \* P.O.B. 91775-1111, Mashhad, Iran, h\_moeenfar@um.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
 Received 07 September 2016  
 Accepted 20 October 2016  
 Available Online 26 November 2016

### Keywords:

Wave's energy  
 Bristol oscillatory system  
 paddle-type wave-maker  
 wave frequency  
 Wave height

### ABSTRACT

In this study, the effects of frequency, height and wavelength of progressive gravity waves on vibration and energy absorption of the single- and two-degree of freedom Bristol oscillating cylinder systems have been investigated experimentally and numerically in different depths of water. The experiments were carried out in channel equipped with both a paddle-type wave-maker and wave features measurement tools. Numerical simulations were conducted in COMSOL software assigned to simulate interactions between physical environments for turbulent flow. Making a comparison between the numerical and experimental conclusions compared to the other researchers' results demonstrates desired matching in a wide range of waves' parameters. It can be seen in the findings that changes in depth of submerged objects from free surface of water has considerable influence on their vibration behavior, so that by rising in depth, the oscillations amplitude increases to a maxima and then decreases. The obtained results indicate the different effects of relative depth under the submerged buoy on the efficiency of the single- and two-degree of freedom systems; so that increasing water height causes rise in the efficiency of single degree of freedom systems, but it does not have a significant influence on two degree of freedom systems. The results also show that expanding the wave-maker frequency for a constant height of water in channel causes the energy and height of the generated waves to rise so that oscillations amplitude of submerged buoy rise in vertical and horizontal line.

## 1- مقدمه

سازه در یک مدل می‌باشد. انجام این کار توسط کدهای موجود، کاری بسیار مشکل می‌باشد اما استفاده از نرم‌افزار کامسول می‌تواند از پیچیدگی‌های آن بکاهد. آنها با مقایسه نتایج عددی با نتایج تحلیلی نشان دادند که نرم‌افزار کامسول از توانایی خوبی برای مدلسازی پدیده انتشار امواج و تقابل سیال با سازه برخوردار است. در سال 1392 ترابی و همکاران تأثیر راستای پیشروی موج بر نوسانات ناشی از گردابه‌ی رایزر سکوی نیمه شناور امیرکبیر را مورد مطالعه قرار دادند [11]. نویسندگان نخست با استفاده از نرم‌افزار آکوا<sup>2</sup>، مقادیر عملکرد دامنه‌ی پاسخ سکوی نیمه‌شناور امیرکبیر را در هشت راستای مختلف محاسبه و نتایج را در نرم‌افزار اورکافلکس<sup>3</sup> وارد کردند. سپس با استفاده از مدل نوسانگر دنباله‌ی میلان، نوسانات ناشی از گردابه فرافکنی رایزر امیرکبیر تحت اثر شرایط محیطی دریای خزر با دوره بازگشت 1 ساله و با اعمال کشش فوقانی 5000 کیلو نیوتن را مطالعه نمودند. فرکانس ارتعاشات عرضی رایزر نیز با بکارگیری روش تبدیل فوریه‌ی سریع روی تاریخچه زمانی نوسانات عرضی رایزر در ترازهای مختلف آن محاسبه گردید. در این مطالعه منحنی‌های پوش نوسانات عرضی بی‌بعد رایزر در جهات مختلف مقایسه شده‌اند و ارتعاشات آن برای ترازهای مختلف از کف دامنه محاسبه شده است. در سال 2012 فینگان و گاگینز با استفاده از نرم افزار تجاری انسیس<sup>4</sup>، حرکت یک موجساز باله‌ای<sup>5</sup> در آب را شبیه‌سازی کردند [12]. آنها نشان دادند که شبیه سازی تولید امواج با موجساز باله‌ای در این نرم افزار محدود به اعداد موج بدون بعد کمتر از 0.2 است. آنها برای رفع این مشکل محل لولای موجساز باله‌ای را به سطح بالاتری منتقل کردند و توانستند این محدودیت را بهبود بخشند. علی پریزاده و همکاران در سال 1393 رفتار هیدروالاستیک سازه‌های یکپارچه و متشکل از دو و سه بخش را در برابر امواج منظم سینوسی آب به صورت آزمایشگاهی بررسی نمودند [13]. مدل آزمایشگاهی آنها از جنس آلومینیوم با طول، عرض و ارتفاع به ترتیب 2، 0.55 و 0.04 متر ساخته و اتصال بین بخش‌ها به صورت مفصل مدل شد. موج‌های ایجاد شده، منظم و دارای دوره تناوب 0.67، 0.8، 0.91، 1.01 و 1.1 ثانیه بوده‌اند. در مخزن تولید موج، کرنش‌ها و جابه‌جایی قائم مدل آزمایشگاهی را در نقاط مختلف آن اندازه‌گیری کردند. نتایج آنها نشان داد که در هر یک از مدل‌ها، جابه‌جایی در امواج با طول موج بلندتر بیشتر است. همچنین تنش در مدل‌های چند بخشی، نسبت به مدل پیوسته، کاهش چشمگیری داشته و مقدار آن تقریباً نصف شده است. هیکنین و همکاران [14] در سال 2013 با ارائه یک تحلیل تئوری بر مبنای تئوری جریان پتانسیل، اثر پارامترهای مختلف از جمله ارتفاع و دوره تناوب موج و قطر سیلندر بر راندمان استوانه بریستول را بررسی کردند. عنبرسوز و همکاران در سال 2014 با استفاده از حل عددی مبتنی بر حل کامل معادلات ناویراستوکس به پیش‌بینی رفتار یک مبدل انرژی استوانه‌ای شکل غوطه‌ور در آب پرداختند [15]. آنها نشان دادند که مقدار انرژی ذخیره شده در امواج تیز با افزایش ارتفاع موج کاهش می‌یابد. آنها همچنین نشان دادند که بازده جذب انرژی توسط استوانه همراه با افزایش فرکانس موج افزایش می‌یابد. در سال 2015 سریرام و همکاران به مقایسه امواج تجربی با مدل‌های مرتبه یک و دو تئوری موجساز پرداختند [16]. آنها امواج آزمایشگاهی را با دو فرکانس 0.86 و 1.8 توسط یک باله پیستونی در یک عمق ثابتی از آب تولید کردند. آنها نشان دادند که نتایج حل عددی مرتبه دو موجساز مطابقت بسیار خوبی با نتایج اندازه‌گیری دارد و علت

امواج آب نمادی از نیروهای اعمالی به سیال می‌باشند که تمایل به جابجایی و تغییر شکل سطح آزاد آن دارند. حرکت امواج در سطح آب برلایه‌های زیر سطح اثر گذاشته و موجب نوسان آن‌ها می‌گردد. وقتی موج از یک مکان به مکان دیگر حرکت می‌کند، مولکول‌های آب حول یک مکان ثابت ارتعاش نموده و انرژی بدون انتقال ماده از یک مکان به مکان دیگر منتقل می‌گردد. با توجه به شدت نیروی‌های اعمال شده به سیال، امواج در اندازه‌ها و اشکال مختلف تولید می‌شود [1]. دریاها و اقیانوس‌ها اصلی‌ترین منبع امواج آب در طبیعت می‌باشند که از منابع مهم انرژی تجدیدپذیر می‌باشند. حدود 72 درصد سطح کره زمین با آب دریاها و اقیانوس‌ها پوشانیده شده است و توان جهانی امواج حدود 8000 تا 80000 تریلیون وات ساعت بر سال تخمین زده می‌شود [2]. نواحی با امواج مطلوب در عرض جغرافیایی 30 درجه قرار دارند و کشور ایران با داشتن خط ساحلی بسیار طولانی (بیش از 1800 کیلومتر در جنوب) و جزایر متعدد و قرار گرفتن در عرض جغرافیایی مناسب، می‌تواند از این انرژی هم در سواحل و هم در آب‌های عمیق استفاده نماید. ارزیابی‌های انجام شده ظرفیت تولیدی نیروگاه امواج در مکان‌های مذکور را بیش از 200 مگاوات برآورد می‌نمایند [3، 4]. استفاده موثر از انرژی امواج در عمق‌های مختلف آب از مهم‌ترین اهداف پژوهشگران بوده و تجهیزات مختلفی برای جذب انرژی امواج طراحی و ارائه گردیده است. در این تجهیزات سعی شده است با استفاده از مکانیک امواج آب از نیروی امواج که از مهم‌ترین نیروهای محیطی می‌باشند و قادرند در سطحی وسیع به سازه‌های غوطه‌ور و شناور نیرو وارد نمایند، برای تولید انرژی استفاده گردد [5].

در این ارتباط تحقیقات گسترده‌ای به روش مدلسازی فیزیکی و اندازه‌گیری‌های میدانی جهت تعیین رفتار سازه‌های ثابت و یا در حال حرکت و مشخص کردن عکس‌العمل آنها در برابر امواج برخوردی صورت گرفته است. مرتضی نقی‌پور و همکاران در سال 1387 اثرات امواج تصادفی بر پایه‌های استوانه‌ای شکل با سطح زبر را مورد بررسی قرار دادند [6]. آنها سینماتیک ذرات آب را توسط تئوری موج غیر خطی مرتبه پنجم استوکس تخمین زدند و در نهایت با بکارگیری روش شناسایی سیستم، ضرایب هیدرودینامیکی موجود در معادله موریسون را محاسبه نمودند. هیروشی کونیسو در سال 2010 نیروهای اعمالی بر یک تونل غوطه‌ور در آب را به روش‌های تجربی و تحلیلی محاسبه نمود [7]. وی با استفاده از محاسبات خود نشان داد در صورتی که همزمان از معادلات موریسون و روش المان مرزی استفاده شود نتایج دقیقی بدست می‌آید. وی همچنین ثابت کرد که بر یک تونل غوطه‌ور در آب نیروهای اینرسی و درگ بطور همزمان اثر می‌کنند. شن و چن در سال‌های 2008 و 2011 به منظور بررسی اثر امواج بر اجسام جامد غوطه‌ور از ترکیب روش نسبت حجمی سیال و مرز مغروق استفاده کردند [8، 9]. آنها با استفاده از این روش اثر نسبت‌های منظری مختلف مانع مغروق بر نیروی اعمالی به آن و نیز شکل سطح آزاد آب را بررسی کردند. در سال 2010 جنگ و همکاران یک روش یکپارچه برای مدلسازی انتشار امواج اقیانوسی بر تغییر شکل سازه‌های غوطه‌ور ساحلی با استفاده از نرم‌افزار کامسول<sup>1</sup> ارائه کردند [10]. در این مطالعه آنها از معادلات ناویراستوکس، پروالاستیک بایوت و تئوری سازه‌های مکانیکی به ترتیب برای بدست آوردن انتشار امواج، عکس‌العمل بستر آزمایش و تغییر فرم سازه مکانیکی غوطه‌ور استفاده کردند. نوآوری پژوهش آنها یکپارچه‌سازی مودهای انتشار امواج، بستر آزمایش و

<sup>2</sup>AQWA<sup>3</sup>Orcaflex<sup>4</sup>Ansys<sup>5</sup>Flap type wave maker<sup>1</sup>Cmsol

که در آن  $\varphi(x, z)$  معرف تابع پتانسیل است و مکان محورهای مختصات در شکل 1 نشان داده شده است.

شرایط مرزی مورد نیاز برای حل معادله موج عبارتند از شرط مرزی سطح آزاد سیال (سینماتیک و دینامیک)، شرط مرزی جانبی و شرط مرزی بستر. شرط مرزی سینماتیک در سطح آزاد عبارتست از:

$$w = \frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} \Big|_{z=\eta(x,t)} \quad (2)$$

در این رابطه  $w$  و  $u$  به ترتیب سرعت سیال در جهت  $z$  و  $x$  و  $\eta$  شکل موج تولید شده می‌باشد. با اعمال معادله برنولی روی سطح آزاد سیال معادله 1 بصورت زیر به دست می‌آید:

$$-\frac{\partial \varphi}{\partial z} + \frac{1}{2}(u^2 + w^2) + \frac{p_n}{\rho} + gz = C(t) \quad (3)$$

که در آن چگالی سیال،  $g$  شتاب گرانش و  $p_n$  فشار روی سطح آزاد می‌باشد که مقدار آن ثابت و اغلب بصورت نسبی صفر در نظر گرفته می‌شود. سرعت جریان در جهت عمود بر بستر موج برابر با صفر می‌باشد:

$$w = 0 \rightarrow \frac{\partial \varphi}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

شرایط مرزی جانبی برای امواج متناوب به صورت زیر اعمال می‌شود:

$$\psi(x, t) = \psi(x, t + T) \quad (5)$$

با مشخص شدن و خطی‌سازی شرط مرزی سطح آزاد، معادله 1 با استفاده از روش تفکیک متغیرها حل شده و تابع پتانسیل و شکل سطح آزاد آب به صورت زیر بدست می‌آید [20]:

$$\varphi = \frac{Hg \cosh(k(h+z))}{2\sigma \cosh(kh)} \cos(kx) \cos(\sigma t) \quad (6)$$

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx) \cos(\sigma t) \quad (7)$$

در روابط (6) و (7)،  $H$  ارتفاع موج،  $g$  شتاب جاذبه و مقدار  $\sigma$  بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\sigma^2 = gk \tanh(kh) \quad (8)$$

موج فوق در هیچ جهتی منتشر نمی‌شود و همواره در نقاط مشخصی دارای گره‌هایی ثابت می‌باشد. بنابراین رابطه (6) شکل یک موج ایستا را ارائه می‌دهد.

### 2-1-2- امواج پیشرونده

برای تعیین معادله یک موج پیشرونده (که در این مقاله این نوع امواج مورد بررسی قرار گرفته است) موج ایستای دیگری مانند رابطه (9) در نظر گرفته می‌شود [19]:

$$\varphi = \frac{Hg \cosh(k(h+z))}{2\sigma \cosh(kh)} \sin(kx) \cos(\sigma t) \quad (9)$$

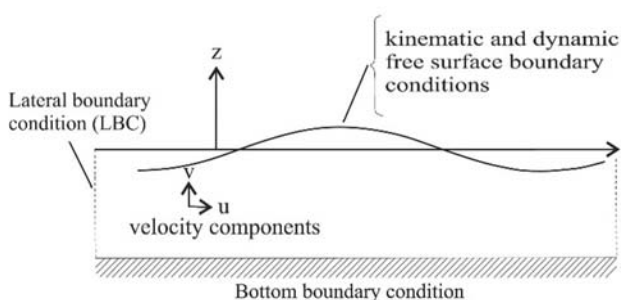


Fig. 1 Waveform in two-dimensional coordinate system and boundary conditions

شکل 1 شکل موج در دستگاه مختصات دوبعدی و شرایط مرزی

آن نیز در نظر گرفتن ترم‌های بیشتری در رابطه تئوری موجساز می‌باشد. در سال 2015 لانگ‌چن و همکاران یک مدل عددی دو بعدی محاسبه اندرکنش سیال و سازه بر پایه معادلات ناویراستوکس را برای یک بستر موجساز سه‌بعدی گسترش دادند [17]. آنها در محاسبات خود انواع امواج منظم و نامنظم را در اعماق نسبی آب 0.3، 1.4 و 3.21 بررسی نمودند. نتایج آنها بیانگر موفقیت آمیز بودن روش مذکور برای تحلیل مسائل برخورد امواج با سازه می‌باشد. در سال 2015 چنگ‌وی و همکاران [18] اثر عمق نسبی آب و تیزی موج را بر میرایی امواج توسط نوعی پوشش گیاهی به روش آزمایشگاهی مطالعه نمودند. آنها عمق نسبی آب را در محدوده 0.45 تا 1.49 و تیزی امواج را بین بازه 0.03 تا 0.18 در نظر گرفتند. آنها نشان دادند که میرایی امواج با افزایش تیزی موج و عمق نسبی آب افزایش می‌یابد بطوریکه در محدوده آب‌های با عمق نسبی 0.45 تا 1.49 با دو برابر شدن تیزی امواج مقدار میرایی نیز تا دو برابر افزایش می‌یابد.

همانطور که مشاهده می‌شود مطالعات آزمایشگاهی و عددی که تا کنون مورد بررسی قرار گرفته‌اند اکثراً به بررسی اندرکنش سیال و سازه و تعیین نیروهای اعمالی بر سازه‌های شناور و غوطه‌ور در آب می‌پردازند در حالیکه ارتعاشات و سینماتیک اجسام شناور و غوطه‌ور در سیالات کمتر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. از سوی دیگر به علت آنکه تجهیزات آزمایشگاهی بسترهای تولید موج، پیچیده و گرانبه می‌باشند این امر باعث گردیده است محققین کمتری به سوی انجام تحقیقات آزمایشگاهی در این زمینه گام بردارند. مطالعات عددی صورت گرفته نیز عموماً با فرض معادلات حاکم بر جریان پتانسیل و یا جریان سیال آرام که از حل معادلات ناویر-استوکس بدست می‌آیند انجام شده‌اند. عدم در نظر گرفتن اثرات جریان آشفته که رفتاری نوسانی و ساختاری گردابه‌ای همراه با اتلافات زیاد می‌باشد، می‌تواند موجب انحراف پاسخ‌ها از مقادیر واقعی گردد. همچنین طبیعت تصادفی امواج و وجود ترم‌های غیرخطی در روابط بر پیچیدگی مساله افزوده و تعیین دقیق اندرکنش امواج با سازه نیاز به مطالعه و تحقیق بیشتری دارد. هدف از این پژوهش، بررسی آزمایشگاهی و عددی اثر امواج آب در شرایط هیدرودینامیکی مختلف بر ارتعاشات سامانه‌های نوسانی یک و دو درجه آزادی غوطه‌ور با هدف مقایسه راندمان جذب انرژی از امواج آب می‌باشد. در این مطالعه برای اولین بار سامانه یک درجه آزادی بریستول به منظور مقایسه راندمان جذب انرژی آن با سامانه دو درجه آزادی بریستول در عمق‌های نسبی مختلف آب طراحی و مورد استفاده قرار گرفته است.

## 2- معادلات حاکم

### 2-1-2- معادلات حاکم برای جریان ایده‌آل

امواج واقعی آب در یک سیال لزج و روی یک بستر نامنظم با نفوذپذیری متغیر منتشر می‌شوند. در مواردی که بدنه اصلی سیال تقریباً غیرچرخشی باشد با توجه به تراکم ناپذیری بودن آب در فشارهای معمولی، می‌توان از اثرات لزجت آن صرف‌نظر و سیال را ایده‌آل فرض کرده و با استفاده از تئوری جریان پتانسیل یک تابع پتانسیل سرعت و یک تابع جریان برای بررسی مسائل مرتبط با امواج تعریف نمود.

### 2-1-1- امواج ایستا

معادله لاپلاس در دستگاه مختصات کارتزین عبارتست از [19]:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left[ \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right] = \bar{B}_i - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j' \right] \quad (13)$$

برای محاسبه تنش‌های رینولدز از مدل آشفتگی  $k-w$  برای مدلسازی تقابل جریان سیال با سازه استفاده شده است. در جدول 1 مقادیر عددی پارامترهای به کار رفته در مدل  $k-w$  و شبیه‌سازی ارائه گردیده است.

### 3-2- نیروی امواج

گرچه مطالعات گسترده‌ای برای تعیین نیروهای وارده از موج بر اجسام غوطه‌ور انجام شده اما تاکنون یک روش محاسبه‌ی جامع برای تعیین اثر متقابل موج و سازه در شرایط مختلف هیدرودینامیکی ارائه نشده که در مورد آن توافق کامل وجود داشته باشد. موريسون در سال 1950 نیروی امواج را به طور کلی شامل نیروهای اینرسی و پسا در نظر گرفت و رابطه زیر را برای بدست آوردن نیروی امواج ارائه داد [22]:

$$F = F_D + F_L = \frac{1}{2} C_D \rho A u |u| + C_M \rho v \frac{Du}{Dt} \quad (14)$$

در این رابطه  $u$  و  $v$  به ترتیب سرعت موج در راستای افقی و عمودی و  $C_D$  و  $C_M$  به ترتیب ضرایب پسا و اینرسی می‌باشند که با توجه به خصوصیات امواج و سطح سازه تغییر می‌کنند. بنابراین برای تعیین نیروی امواج ابتدا باید آزمایش‌هایی برای تعیین این ضرایب انجام گیرد تا امکان محاسبه نیروی موج فراهم گردد.

### 4-2- عمق نسبی آب و تیزی امواج

متغیر بی‌بعد عمق نسبی یک پارامتر مهم برای تعیین عمق آب‌های موجدار می‌باشد. این متغیر طبق رابطه زیر از تقسیم ارتفاع آب بستر موج بر طول موج بدست می‌آید [19]:

$$\begin{cases} \frac{h}{L} < 0.05: \text{ عمق نسبی کم} \\ \frac{h}{L} > 0.5: \text{ عمق نسبی زیاد} \end{cases} \quad (15)$$

که در رابطه فوق  $h$  ارتفاع آب از بستر و  $L$  طول موج آب می‌باشد با حرکت موج به سمت ساحل، کاهش طول موج کمتر از کاهش ارتفاع آب می‌باشد. تیزی موج نسبت ارتفاع موج به طول موج تعریف می‌شود. اورسل و همکاران [23] تیزی امواج را توسط روابط زیر به دو بخش امواج با تیزی کم و امواج با تیزی زیاد تقسیم کردند:

$$0.002 \leq H/L \leq 0.03 \quad \text{امواج با تیزی کم} \quad (16)$$

$$0.045 \leq H/L \leq 0.048 \quad \text{امواج با تیزی زیاد} \quad (17)$$

جدول 1 مقادیر عددی پارامترهای مدل  $k-w$  و شبیه‌سازی

مقدار	پارامتر
0.52	$\alpha$
0.5	$\alpha_k^*$
0.5	$\sigma_w$
0.072	$\beta_0$
0.09	$\beta_0^*$
0.41	$k_v$
5.2	B
0.001kg/ms	$\mu_{\text{water}}$
1000kg/m <sup>3</sup>	$\rho_{\text{water}}$
950kg/m <sup>3</sup>	$\rho_{\text{cylinder}}$
35N/m	$k_s$
1N	$f_d$

معادله پتانسیل فوق پاسخی دیگر برای معادله لاپلاس (معادله 1) باتوجه به شرایط مرزی مشخص شده در بخش 1-2 می‌باشد. تفاوت این معادله با پاسخ شماره 6 اختلاف فاز 90 درجه‌ای جملات  $x$  و  $t$  می‌باشد. به طور مشابه معادله جابجایی سطح آزاد آب برای تابع پتانسیل فوق بصورت زیر محاسبه می‌شود [19]:

$$\eta(x, t) = \frac{1}{g} \frac{\partial \varphi}{\partial t} \Big|_{z=0} = -\frac{H}{2} \sin(kxs) \sin(\sigma t) \quad (10)$$

با توجه به خطی بودن معادله لاپلاس و صادق بودن اصل جمع پاسخ‌ها برای معادلات خطی، با تفاضل معادله (6) از رابطه (9) پاسخ جدیدی برای معادله لاپلاس (یعنی معادله 1) بصورت زیر بدست می‌آید [20]:

$$\begin{aligned} \varphi &= \frac{Hg \cosh(k(h+z))}{2\sigma \cosh(kh)} (\cos kx \cos \sigma t) \\ &= \frac{Hg \cosh(k(h+z))}{2\sigma \cosh(kh)} \sin(kx - \sigma t) \end{aligned} \quad (11)$$

این معادله پتانسیل سرعت، دارای جوابی است که جابجایی سطح آزاد آب را به صورت زیر نمایش می‌دهد [20]:

$$\eta(x, t) = \frac{1}{g} \frac{\partial \varphi}{\partial t} \Big|_{z=0} = \frac{H}{2} \cos(kx - \sigma t) \quad (12)$$

با رسم معادله (12) در دو زمان متفاوت (شکل 2) دیده می‌شود که این شکل از موج با زمان حرکت می‌کند و بنابراین پاسخی برای نمایش یک موج پیشرونده می‌باشد. شکل 2 همچنین جابجایی موقعیت سطح آزاد سیال را با توجه به رابطه 12 برای دو زمان متفاوت نمایش می‌دهد.

همچنین مشخصات هندسی یک موج آب پیشرونده شامل طول موج، ارتفاع موج و ارتفاع آب از سطح بستر در شکل 3 نشان داده شده است.

### 2-2- معادلات حاکم بر جریان آشفتنه

از آنجا که متغیرهای حاضر در معادلات جریان آشفتنه بسیار نوسانی می‌باشند و حل عددی آن‌ها نیاز به گام‌های زمانی بسیار کوچک دارد، میانگین زمانی معادلات به روش عددی حل می‌شود. از طرفی محاسبه میانگین زمانی معادلات موجب ظهور ترم‌های مجهول به نام تنش‌های آشفتگی یا تنش‌های رینولدز به شکل  $\rho \bar{u}_i \bar{u}_j'$  در معادلات می‌گردد [21]:

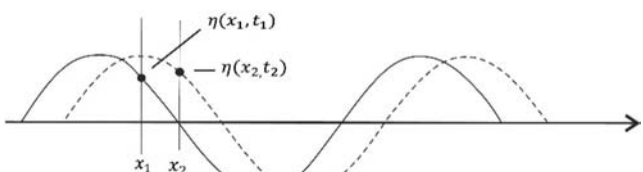


Fig. 2 An example of a wave that is moving at two different times

شکل 2 نمونه‌ای از یک موج در حال پیشروی در دو زمان مختلف

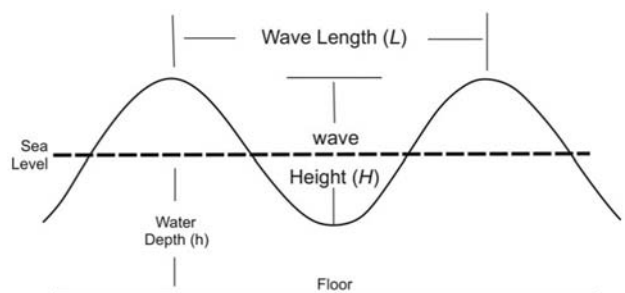


Fig. 3 geometrical specifications of water waves

شکل 3 مشخصات هندسی موج آب

در روابط فوق  $H$  و  $L$  به ترتیب ارتفاع و طول موج می‌باشند.

### 5-2- محاسبه راندمان انرژی امواج

انرژی جذب شده توسط استوانه در یک دوره تناوب،  $E_{abs}$ ، را می‌توان با استفاده از رابطه زیر محاسبه کرد [24]:

$$E_{abs} = \int_t^{t+T} P_{abs}(t) dt = \int_t^{t+T} \vec{F}_{wave}(t) \cdot \vec{V}_s(t) dt \quad (18)$$

که در آن  $P_{abs}(t)$  توان لحظه‌ای جذب شده توسط استوانه،  $\vec{F}_{wave}(t)$  نیروی لحظه‌ای موج که بر استوانه وارد می‌شود و  $\vec{V}_s(t)$  سرعت استوانه می‌باشد. نیروی کلی که به استوانه وارد می‌شود، علاوه بر نیروهای موج شامل نیروهای خارجی (نیروهای فنر و دمپر) و نیروی بویانسی نیز می‌باشد. با توجه به قانون دوم نیوتن معادله حرکت استوانه برابر است با:

$$\vec{F}_{tot}(t) = \vec{F}_{spring}(t) + \vec{F}_{damper}(t) + \vec{F}_{buoyancy}(t) + \vec{F}_{wave}(t) = M_s \frac{d\vec{V}_s(t)}{dt} \quad (19)$$

بنابراین نیروی موج را می‌توان به شکل زیر بازنویسی کرد:

$$\vec{F}_{wave}(t) = M_s \frac{d\vec{V}_s(t)}{dt} - \vec{F}_{spring}(t) - \vec{F}_{damper}(t) - \vec{F}_{buoyancy}(t) \quad (20)$$

راندمان جذب انرژی عبارتست از نسبت توان متوسط جذب شده،  $\bar{P}_{abs}$ ، به انرژی کل متوسط موج،  $\bar{P}_w$ ، که با استفاده از رابطه زیر معرفی می‌گردد [23]:

$$\eta = \frac{\bar{P}_{abs}}{\bar{P}_w} = \frac{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} P_{abs}(t) dt}{\frac{1}{8} \rho_w g H^2 c_g} \quad (21)$$

با توجه به حرکت پروردیک استوانه بریستول، نیروهای فنر، بویانسی و اینرسی تأثیری بر راندمان آن نخواهند داشت [24]. به عبارت دیگر:

$$\frac{1}{T} \left[ \int_t^{t+T} \vec{F}_{spring}(t) \cdot \vec{V}_s(t) dt \right] = 0 \quad (22)$$

$$\frac{1}{T} \left[ \int_t^{t+T} \vec{F}_{buoyancy}(t) \cdot \vec{V}_s(t) dt \right] = 0 \quad (23)$$

$$\frac{1}{T} \left[ \int_t^{t+T} M_s \frac{d\vec{V}_s(t)}{dt} \cdot \vec{V}_s(t) dt \right] = 0 \quad (24)$$

بنابراین راندمان را می‌توان با استفاده از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$\eta = \frac{\frac{1}{T} \left[ \int_t^{t+T} -\vec{F}_{damper}(t) \cdot \vec{V}_s(t) dt \right]}{\frac{1}{8} \rho_w g H^2 c_g} \quad (25)$$

با توجه به رابطه نیروی دمپر برحسب سرعت استوانه داریم:

$$\vec{F}_{damper}(t) = c \vec{V}_s(t) \quad (26)$$

با جایگذاری سرعت گروه موج و نیز رابطه (31) در رابطه (30)، راندمان

انرژی استوانه بریستول به صورت زیر بدست می‌آید [23]:

$$\eta = \frac{\frac{1}{T} \left[ \int_t^{t+T} c \vec{V}_s \cdot \vec{V}_s dt \right]}{\frac{1}{8} \rho_w g H^2 c_g} = \frac{\frac{1}{T} \left[ \int_t^{t+T} c_x u_s^2 dt + \int_t^{t+T} c_y v_s^2 dt \right]}{\left( \frac{1}{8} \rho_w g H^2 \right) \frac{1}{2} \cdot \frac{L}{T} \left[ 1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right]} \quad (27)$$

که در آن  $L$  طول موج،  $h$  عمق آب و  $K$  عدد موج است که به صورت زیر

$$k = \frac{2\pi}{L} \quad (28)$$

### 3- تجهیزات آزمایشگاهی تولید موج و لوازم اندازه گیری

آزمایش‌ها در یک بستر موج به طول 10 متر، با سطح مقطع مستطیلی به عمق 0.6 متر و عرض 0.5 متر در گروه مکانیک دانشگاه فردوسی مشهد جهت مطالعه رفتار انواع موج آب در شرایط مختلف طراحی و ساخته شده است. ارتفاع آب در کانال در آزمایش‌های مختلف بین 25 و 45 سانتیمتر تغییر داده شد. با توجه به تعریف عمق نسبی آب (رابطه 15) می‌توان با تغییر طول موج و ارتفاع آب در کانال مورد آزمایش، عمق‌های نسبی مختلف را ایجاد نمود. در شکل 4 تصویر و طرحواره‌ای از این بستر موجساز نشان داده شده است. در ادامه به معرفی دقیق‌تر این بستر موج، نحوه تولید و جذب امواج و همچنین تجهیزات اندازه‌گیری و دقت آنها پرداخته می‌شود.

#### 3-1- سامانه تولید امواج

تولید امواج در بستر آزمایشگاهی توسط یک موجساز باله‌ای که به کف کانال لولا شده، انجام می‌شود. همانطور که در شکل 5 نشان داده شده است، باله‌ی موجساز با استفاده از یک مکانیزم چهار میله‌ای به یک موتور الکتریکی متصل گردیده است. موتور الکتریکی استفاده شده، یک موتور سه فاز با توان حداکثر 2 اسب بخار می‌باشد که دور آن با استفاده از یک اینورتر<sup>1</sup> با قابلیت اتصال به رایانه، قابل تنظیم است. صفحه‌ای که به موتور متصل شده دارای حفره‌هایی است که با تغییر محل اتصال لینک به آن می‌توان بازه‌های حرکتی مختلفی را برای موجساز باله‌ای ایجاد کرد. با تغییر دور موتور و بازه حرکتی موجساز و همچنین تغییر ارتفاع آب در کانال می‌توان بازه گسترده‌ای از امواج با فرکانس و ارتفاع‌های مختلف موج تولید کرد. برای جذب امواج و جلوگیری از برگشت آنها، در انتهای کانال از یک سطح شیبدار که با سنگ‌ریزه انباشته شده استفاده گردیده است.

#### 3-2- مشخصات فنر و دمپر

برای دستیابی به ثابت فنرها و ضریب استهلاک دمپره‌ای مورد استفاده در آزمایش‌ها، از فنرهای مارپیچی و دمپره‌های اصطکاکی استفاده شده است. فنرها ابتدا با توجه به ثابت فنر مورد نیاز طراحی و ساخته شدند و سپس برای اطمینان از مقدار ثابت موردنظر، توسط دستگاه کشش مورد تست و ارزیابی قرار گرفتند. برای اندازه‌گیری ثابت فنر و نیروی اصطکاک دمپر، دستگاه کشش زوئیک-زد-250 مورد استفاده قرار گرفت. این دستگاه توانایی انجام عملیات کشش و فشار قطعات با دقت بسیار بالا را دارا می‌باشد. دقت جایجایی فک‌های دستگاه 1 میکرون و دقت اندازه‌گیری نیروی اعمالی، حداقل 0.01 نیوتن است. با توجه به میزان انرژی‌ای که توسط دمپر در یک



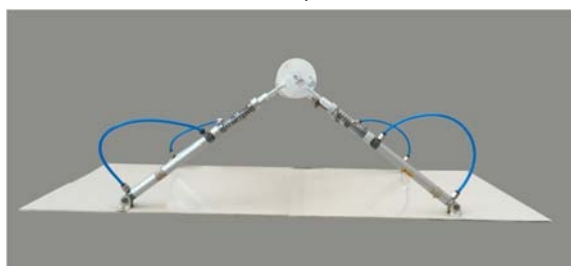
Fig. 4 A picture and scheme of bed wave maker

شکل 4 تصویر و طرحواره‌ای از بستر موجساز

<sup>1</sup>. Invertor



(الف)



(ب)

**Fig.6** Oscillating systems a) one degree of freedom system b) two degree of freedom system

شکل 6 سیستم‌های نوسانی الف) سامانه یک درجه آزادی ب) سامانه دو درجه آزادی

### 3-5- دقت اندازه‌گیری آزمایش‌ها

در جدول 2 کمیت‌های اندازه‌گیری، وسایل اندازه‌گیری و دقت هر یک از آنها ارائه گردیده است. به منظور کاهش خطای ناشی از اندازه‌گیری آزمایش‌ها چندین مرتبه تکرار شده و مقدار میانگین نتایج اندازه‌گیری شده به عنوان پاسخ ثبت گردیده است. همچنین محل قرارگیری سیستم ارتعاشی، ارتفاع سنج موج و دوربین ثبت اطلاعات به گونه‌ای تعیین شده است که دارای فاصله حداکثری از موجساز و جاذب موج باشند تا در صورت وجود امواج بازتابی، کمترین اثر را بر روی داده‌های اندازه‌گیری شده داشته باشند.

### 4- شبیه‌سازی عددی

مدلسازی عددی تولید امواج و رفتار سازه در اثر امواج برخوردی به کمک

جدول 2 کمیت‌های اندازه‌گیری شده، وسایل و دقت اندازه‌گیری

**Table 2** Measured quantities, instruments and measuring accuracy

دقت	وسیله اندازه‌گیری	کمیت اندازه‌گیری
±1/0 mm	موج سنج مقاومتی	ارتفاع موج
±1/0 rpm	اینورتر	فرکانس موج
±1/0 mm	کولیس	ابعاد استوانه
±1/0 gr	ترازوی گرمی	وزن استوانه
±1/0 mm	مترسنج	عمق آب
±0/01 N	نیرو سنج (دستگاه زونیک-زد-250)	ثابت فنر
±0/001 mm	موقعیت سنج (دستگاه زونیک-زد-250)	موقعیت استوانه
±0/01 N	نیرو سنج (دستگاه زونیک-زد-250)	ضریب دمپر اصطکاکی
100 فریم بر ثانیه	دوربین سرعت بالا	موقعیت استوانه



**Fig.5** paddle-type wave-maker system

شکل 5 سامانه تولید امواج باله‌ای

دوره تناوب مستهلک می‌شود، رابطه‌ی بین نیروی اصطکاک در دمپر اصطکاکی و ضریب دمپینگ در دمپر لزج از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$C_{eq} = \frac{4F_c}{\pi\omega X} \quad (29)$$

که در آن  $X$  دامنه حرکت نوسانی،  $F_c$  نیروی اصطکاک و  $C_{eq}$  ضریب دمپینگ معادل می‌باشد. در این پژوهش مقدار ثابت هر یک از فنرها 35 N/m و نیروی اصطکاکی هریک از دمپرها 1 نیوتن در نظر گرفته شده است.

### 3-3- طراحی سیستم‌های نوسانی جذب انرژی

سامانه‌های برداشت انرژی امواج معمولا با توجه به ارتفاع امواج برخوردی و مکان قرارگیری سامانه طراحی می‌شوند. به دلیل آنکه در آب‌های کم عمق نیروی افقی امواج و در آب‌های عمیق نیروی عمودی امواج نیروی‌های غالب می‌باشند [19]، در این پژوهش دو سامانه نوسانی یک و دو درجه آزادی بریستول در آب‌های با عمق‌های نسبی مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. مولد انرژی بریستول شامل یک استوانه مغروق در آب است که محور آن عمود بر راستای حرکت موج قرار می‌گیرد تا حرکت استوانه در دو راستای افقی و عمودی را فراهم کرده و نیرو محرکه پمپ‌های هیدرولیک را ایجاد کند. شکل 6 سامانه‌های یک و دو درجه آزادی بریستول را نشان می‌دهد. لازم به توضیح است که در عمل در هر مکان تعداد زیادی از این نوع سامانه برای تامین انرژی لازم در داخل آب دریا قرار می‌گیرند. آزمایش‌ها توسط استوانه‌های پلی اتیلنی با چگالی 950 کیلوگرم بر مترمکعب و قطرهای 60، 80 و 100 میلیمتر که توسط فنرها و دمپرها اصطکاکی نگهداری می‌شوند، انجام شده است.

### 3-4- پردازش تصویر

در این پژوهش تغییرات موقعیت مرکز استوانه بر حسب زمان با استفاده از عکسبرداری سرعت بالا و عملیات پردازش تصویر تعیین شده است. عکسبرداری مورد نیاز با استفاده از یک دوربین CCD ساخت شرکت پوینت گری، مدل گرس هاپر با رزولوشن 1384×1036 انجام گردید. دوربین CCD از طریق یک کابل IEEE-1394b به یک دریافت کننده فریم متصل شده که از طریق آن می‌توان تنظیمات دوربین را تغییر داد و عکس‌ها را در کامپیوتر ذخیره نمود.



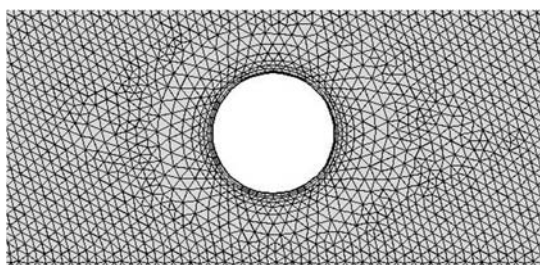


Fig. 8 Enlargement of mesh around the Bristol cylinder

شکل 8 بزرگنمایی شبکه اطراف استوانه بریستول

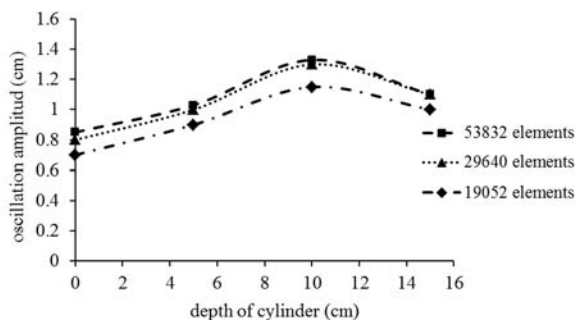


Fig.9 Bristol cylinder oscillations different elements number

شکل 9 نوسانات استوانه بریستول برحسب تعداد المان‌های متفاوت

$$S = 2h \times \tan\left(\frac{\Delta\theta}{2}\right) \quad (30)$$

که در این رابطه  $\Delta\theta$  بازه زاویه‌ی حرکت موجساز است. مقایسه نتایج در دو شکل 10 و 11 نشان می‌دهد که تطابق خوبی بین نتایج اندازه‌گیری آزمایشگاهی بدست آمده در این پژوهش با نتایج تئوری موجساز و نتایج اورسل و همکاران وجود دارد. مقایسه نتایج در دو شکل فوق نشان می‌دهد که در آب‌های عمیق تئوری موجساز مقادیر بالاتری را نسبت به دو منبع دیگر محاسبه می‌کند که این اختلاف به دلیل ساده‌سازی‌هایی است که تئوری موجساز در محاسبات تحلیلی استفاده می‌نماید. همچنین اختلاف بین نتایج آزمایشگاهی این پژوهش و نتایج اورسل و همکاران با نتایج تئوری موجساز را می‌توان به خطای نتایج تئوری در محاسبه طول موج با استفاده از رابطه پراکندگی نسبت داد زیرا با افزایش تیزی موج خطای محاسبه طول موج افزایش می‌یابد.

### 5-2- نتایج اندازه‌گیری آزمایشگاهی

5-2-1- تاثیر ارتفاع آب کانال و فرکانس موج بر دامنه ارتعاشات سامانه یک درجه آزادی

در شکل‌های 12 و 13 نتایج آزمایشگاهی تاثیر عمق و قطر استوانه بر دامنه ارتعاشات سامانه یک درجه آزادی بریستول برای ارتفاع 25 سانتیمتر آب کانال به ترتیب برای امواج با فرکانس 1 و 1.3 هرتز نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که دامنه نوسانات استوانه با افزایش عمق استوانه تا یک مقدار ماکزیمم افزایش و سپس کاهش می‌یابد. همچنین دیده می‌شود که افزایش قطر استوانه باعث افزایش دامنه ارتعاشات آن می‌گردد. این به علت افزایش سطح استوانه و در نتیجه افزایش سطح برخورد موج با آن می‌باشد که موجب افزایش نیروی موج بر استوانه گردیده است. این نتایج در تطابق کامل با رابطه پیشنهادی موریسون (رابطه 14) برای پیش‌بینی مقدار نیروی امواج بر اجسام غوطه‌ور می‌باشد که آن بیان می‌کند با افزایش سطح برخورد موج با جسم، نیروی وارده بر جسم افزایش می‌یابد. همچنین نتایج در دو شکل 12 و

نرم‌افزار کامسول انجام شده است. این نرم‌افزار توانایی حل معادلات دیفرانسیل سیستم‌های غیرخطی را به روش اجزاء محدود در فضاهای یک، دو و سه بعدی دارد. قابلیت مهم این نرم‌افزار توانایی تحلیل و مدلسازی تقابل محیط‌های فیزیکی مختلف مانند جریان سیال با سازه می‌باشد. با توجه به تقارن محوری مجموعه سیستم موجساز و نیز سامانه‌های جذب انرژی امواج، شبیه‌سازی به صورت دوبعدی انجام گردیده است. نمایی از هندسه و شبکه و شرایط مرزی مربوطه در شکل 7 نشان داده شده است. در شکل 8 شبکه بزرگنمایی شده در اطراف استوانه بریستول، نمایش داده شده است. همانطور که از شرایط مرزی نشان داده شده در شکل 7 مشخص می‌باشد در این شبیه‌سازی برای تولید امواج همانند موجساز باله‌ای از شرط مرز نوسانی ابتدای کانال استفاده شده که فرکانس و دامنه حرکت آن قابل کنترل می‌باشد. به منظور عدم بازگشت امواج تولیدی و تداخل با امواج عبوری، برای انتهای کانال شرط مرز آزاد در نظر گرفته شده است. برای سطح آزاد سیال شرط مرزی به گونه‌ای انتخاب شده است که سیال قابلیت تغییر ارتفاع در صورت تشکیل موج را خواهد داشت.

از دیگر تنظیمات ضروری جهت شبیه‌سازی تقابل امواج و سامانه نوسانی تعیین ضرایب فنر و دمپر در راستاهای عمودی و افقی و همچنین چگالی و قطر استوانه و مشخص نمودن درجات آزادی حرکت سامانه نوسانی می‌باشد. به منظور محاسبه اندرکنش سازه با جریان سیال مدل آشفتگی  $k - \omega$  با هدف مقایسه با نتایج آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است.

به منظور بررسی استقلال شبکه و صحت نتایج شبیه‌سازی در این پژوهش از مش مثلثی با اندازه‌های المان متفاوت 0.003، 0.005، 0.01، 0.01 استفاده شده است که هر یک از این شبکه‌ها به ترتیب دارای 19052، 29640، 53832 المان در حوزه حل می‌باشند. در شکل 9 مقادیر نوسانات استوانه بریستول را در ارتفاع آب 25 سانتیمتر برای سه شبکه با اندازه المان - های متفاوت نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود بکارگیری شبکه ریزتر از 26640 سلول تغییر محسوس در پاسخ‌ها ایجاد نمی‌کند که این موضوع مستقل بودن حل از شبکه را بیان می‌کند.

### 5- نتایج و بحث

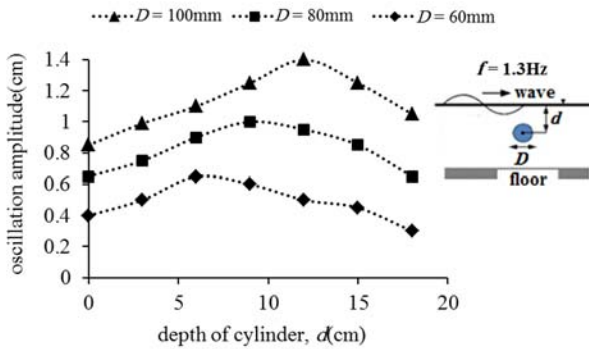
#### 5-1- اعتبارسنجی تولید امواج

به منظور اعتبار سنجی روش استفاده شده برای تولید امواج، نتایج بدست آمده در این پژوهش با نتایج اورسل و همکاران [23] و نتایج تئوری موجساز [19] برای امواج با تیزی کم و امواج با تیزی زیاد به ترتیب در شکل‌های 8 و 9 مقایسه شده است. در این شکل‌ها نسبت ارتفاع موج به کورس حرکتی باله موجساز برحسب مقادیر عمق نسبی آب رسم شده که بر روی شکل‌ها محدوده آب‌های کم عمق و با عمق زیاد نیز مشخص شده است. در این نمودارها  $h$  عمق آب،  $L$  طول موج،  $H$  ارتفاع موج و  $S$  کورس حرکتی باله موجساز است که از رابطه زیر محاسبه می‌شود:



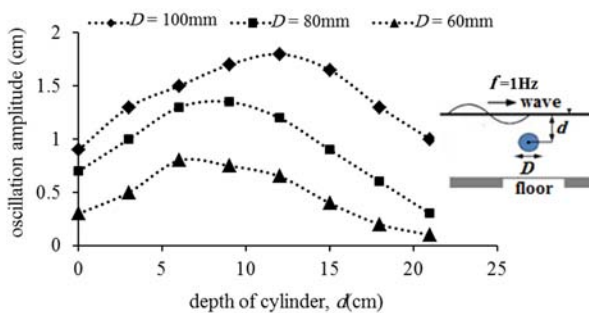
Fig. 7 A view of geometry, meshing and boundary conditions

شکل 7 نمایی از هندسه، شبکه بندی و شرایط مرزی



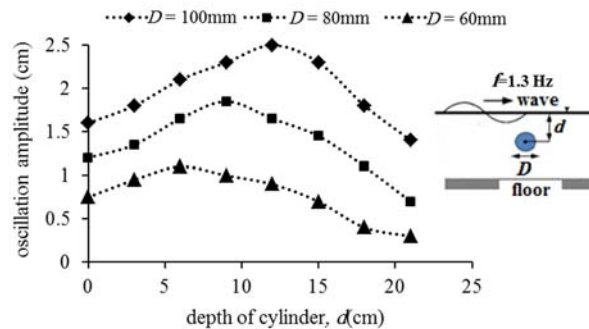
**Fig. 13** The effect of depth and diameter of the submerged cylinder on its oscillation amplitude in 25 centimeters water height, 1.3 Hz frequency for single degree of freedom system

شکل 13 تاثیر عمق و قطر استوانه بر دامنه ارتعاشات آن در شرایط ارتفاع آب 25 سانتیمتر، فرکانس موج 1.3 هرتز برای سامانه یک درجه آزادی



**Fig. 14** The effect of depth and diameter of the submerged cylinder on its oscillation amplitude in 35 centimeters water height, 1Hz frequency for single degree of freedom system

شکل 14 تاثیر عمق و قطر استوانه بر دامنه ارتعاشات آن در شرایط ارتفاع آب 35 سانتیمتر، فرکانس موج 1 هرتز برای سامانه یک درجه آزادی

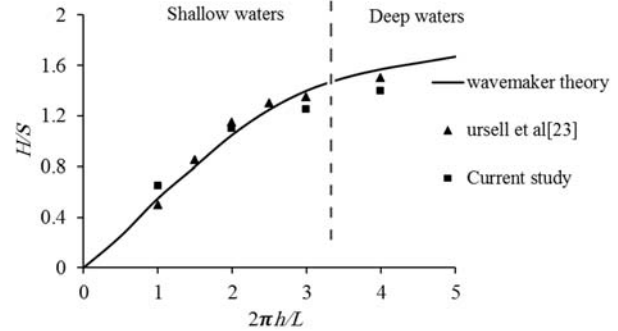


**Fig. 15** The effect of depth and diameter of the submerged cylinder on its oscillation amplitude in 35 centimeters water height, 1.3 Hz frequency for single degree of freedom system

شکل 15 تاثیر عمق و قطر استوانه بر دامنه ارتعاشات آن در شرایط ارتفاع آب 35 سانتیمتر، فرکانس موج 1.3 هرتز برای سامانه یک درجه آزادی  
سامانه یک درجه آزادی بریستول می‌گردد.

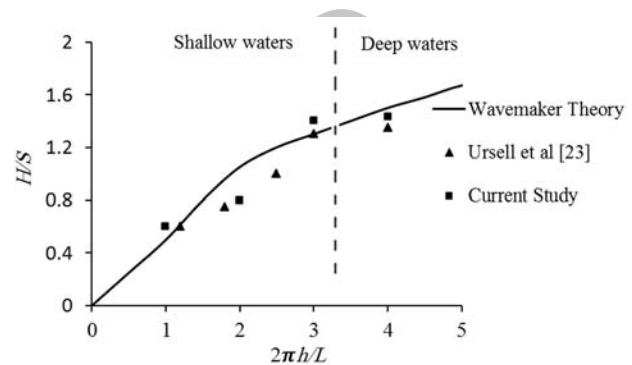
5-2-2- نتایج آزمایشگاهی سامانه دو درجه آزادی

در شکل های 16 و 17 نتایج آزمایشگاهی دامنه ارتعاشات افقی و عمودی سامانه دو درجه آزادی بریستول بر حسب عمق استوانه برای امواج با فرکانس 1 هرتز و ارتفاع‌های آب کانال به ترتیب 25 و 35 سانتیمتر از کف بستر ترسیم شده است. نتایج نشان می‌دهد که عمق استوانه تاثیر مهمی بر



**Fig. 10** Comparing the experimental results of the present project with other researchers' ones for low sharp waves ( $H/L < 0.03$ )

شکل 10 مقایسه نتایج آزمایشگاهی پروژه حاضر با نتایج سایر محققین برای امواج با تیزی کم ( $H/L < 0.03$ )

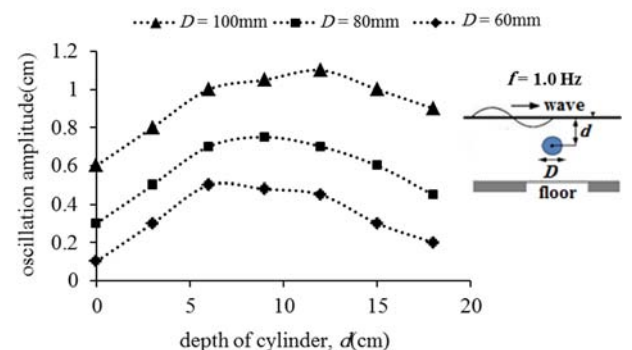


**Fig. 11** Comparing the experimental results of the present project with other researchers' ones for sharp waves ( $H/L > 0.04$ )

شکل 11 مقایسه نتایج آزمایشگاهی پروژه حاضر با نتایج سایر محققین برای امواج با تیزی زیاد ( $H/L > 0.04$ )

13 نشان می‌دهد که با افزایش فرکانس موج دامنه نوسانات استوانه افزایش می‌یابد.

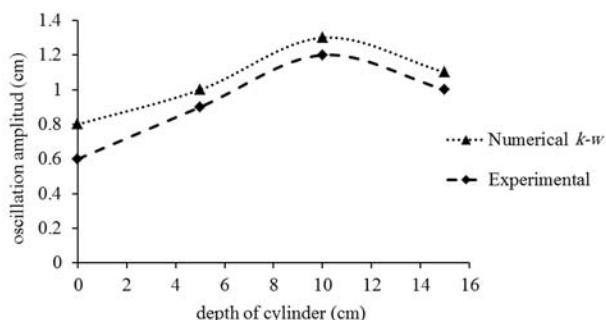
در شکل‌های 14 و 15 نتایج آزمایشگاهی تاثیر عمق و قطر استوانه بر دامنه ارتعاشات سامانه یک درجه آزادی بریستول برای ارتفاع 35 سانتیمتر آب کانال به ترتیب برای امواج با فرکانس 1 و 1.3 هرتز نشان داده شده است. مقایسه نتایج شکل‌های 12 و 13 با نتایج به ترتیب شکل‌های 14 و 15 نشان می‌دهد که افزایش ارتفاع آب کانال موجب افزایش دامنه نوسانات



**Fig. 12** The effect of depth and diameter of the submerged cylinder on its oscillation amplitude in 25 centimeters water height, 1Hz frequency for single degree of freedom system

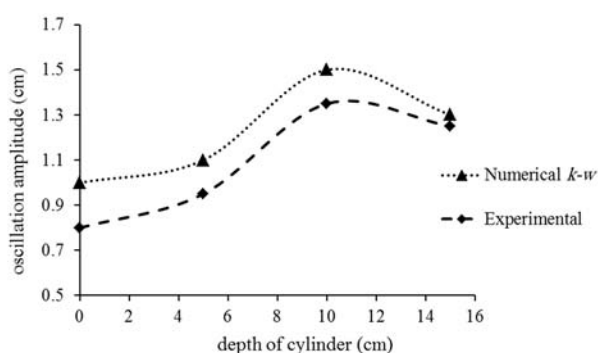
شکل 12 تاثیر عمق و قطر استوانه مغروق بر دامنه ارتعاشات آن در ارتفاع آب 25 سانتیمتر، فرکانس موج 1 هرتز برای سامانه یک درجه آزادی





**Fig. 18** Comparing the oscillation amplitude of experimental results with numerical ones in 25 centimeters water depth, 1 Hz frequency for single degree of freedom system ( $h/L < 0.05$ )

شکل 18 مقایسه دامنه ارتعاشات نتایج آزمایشگاهی با نتایج عددی در عمق آب 25 سانتیمتر و فرکانس 1 هرتز برای سامانه یک درجه آزادی ( $h/L < 0.05$ )



**Fig. 19** Comparing the oscillation amplitude of experimental results with numerical ones in 35 centimeters water depth and 1 Hz frequency for single degree of freedom system ( $h/L > 0.5$ )

شکل 19 مقایسه دامنه ارتعاشات نتایج آزمایشگاهی با نتایج عددی در عمق 35 سانتیمتر و فرکانس 1 هرتز برای سامانه یک درجه آزادی ( $h/L > 0.5$ )

سامانه یک درجه آزادی به ترتیب در آب‌های با عمق نسبی زیاد و آب‌های با عمق نسبی کم مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج حاصل از مدلسازی عددی تطابق رضایت‌بخشی وجود دارد، بنابراین مدل آشفتگی  $k-\omega$  توانایی شبیه‌سازی مسائل اندرکنش سازه و سیال را با دقت بالا دارا می‌باشد.

### 2-3-5- مقایسه نتایج شبیه‌سازی راندمان سامانه‌های یک و دو درجه آزادی با نتایج آزمایشگاهی

شکل‌های 20 و 21 به مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی راندمان انرژی سامانه‌های یک و دو درجه آزادی بریستول در آب‌های با عمق نسبی کم و عمق نسبی زیاد می‌پردازند. در دو شکل مشاهده می‌شود نتایج شبیه‌سازی عددی تطابق رضایت‌بخشی با نتایج آزمایشگاهی دارد. همانطور که در دو شکل فوق مشاهده می‌شود راندمان انرژی سامانه‌های بریستول با مشخصات فیزیکی ثابت، کاملاً وابسته به عمق آن‌ها در آب می‌باشد. در شکل 20 مشاهده می‌شود که راندمان سامانه دو درجه آزادی بریستول در آب‌های با عمق نسبی کم حدود 60 درصد بیشتر از راندمان سامانه یک درجه آزادی می‌باشد که این اختلاف راندمان ناشی از نقش موثر نیروهای افقی نسبت به نیروهای عمودی امواج در آب‌های با عمق نسبی کم می‌باشد.

مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی دو شکل 20 و 21 نشان می‌دهد که با افزایش عمق نسبی آب راندمان انرژی سامانه دو درجه آزادی تقریباً ثابت و

ارتعاشات دارد، بطوریکه با افزایش عمق استوانه دامنه ارتعاشات تا یک مقدار ماکزیمم افزایش می‌یابد و سپس روندی کاهشی دارد. همچنین در شکل‌های 16 و 17 مشاهده می‌شود که با افزایش ارتفاع آب کانال مقدار دامنه نوسانات عمودی نسبت به نوسانات افقی افزایش بیشتری می‌یابد که می‌توان چنین استدلال نمود که با افزایش ارتفاع آب و در نتیجه افزایش اینرسی امواج، انرژی نیروی عمودی موج نسبت به نیروی افقی آن بیشتر می‌شود.

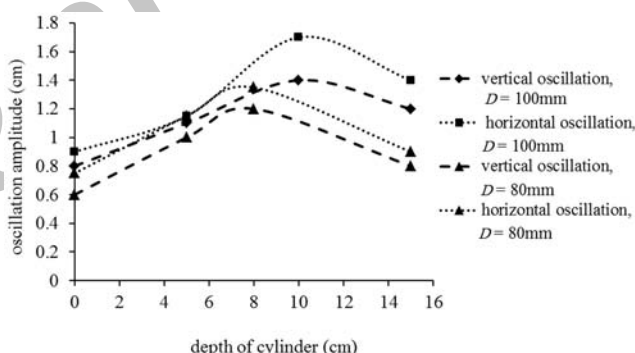
در شکل‌های فوق اثر قطر (حجم) سامانه نوسانی بر دامنه ارتعاشات نیز مورد بررسی قرار گرفته است. همانطور که مشاهده می‌شود مشابه سامانه‌های یک درجه آزادی (شکل‌های 10 تا 13) با افزایش قطر استوانه دامنه نوسانات افزایش پیدا می‌کند، که این نتیجه با رابطه ریاضی موریسون (رابطه 14) که بیان می‌کند مقدار نیروهای اینرسی و درگ (و در نتیجه نوسانات استوانه) با افزایش قطر استوانه افزایش می‌یابد مطابقت دارد.

### 3-5- نتایج شبیه‌سازی عددی و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی

#### 1-3-5- مقایسه نتایج شبیه‌سازی دامنه ارتعاشات سامانه یک درجه آزادی با نتایج آزمایشگاهی

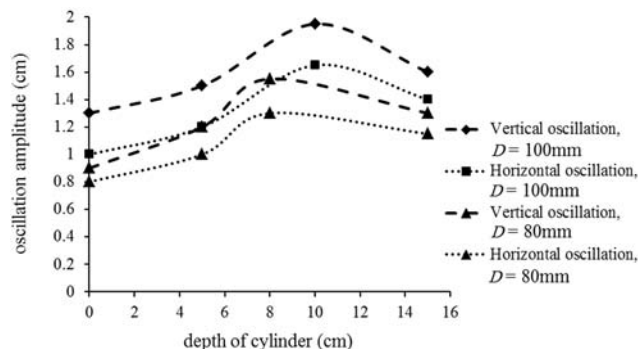
با توجه به اینکه مشخصات جریان سیال در شرایط آزمایشگاهی در محدوده اعداد رینولدز بزرگتر از 2000 قرار دارد، شبیه‌سازی برای جریان آشفتگی با استفاده از مدل آشفتگی  $k-\omega$  انجام شده است.

در شکل‌های 18 و 19 نتایج شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی برای



**Fig. 16** The effect of depth and diameter of the submerged cylinder on its oscillation amplitude in 25 centimeters water height, 1 Hz frequency for two degree of freedom system

شکل 16 تاثیر عمق و قطر استوانه بر دامنه ارتعاشات در شرایط فرکانس موج 1 هرتز، ارتفاع آب 25 سانتیمتر برای سامانه دو درجه آزادی



**Fig. 17** The effect of depth and diameter of the submerged cylinder on its oscillation amplitude in 35 centimeters water height, 1 Hz frequency for two degree of freedom system

شکل 17 تاثیر عمق و قطر استوانه بر دامنه ارتعاشات در شرایط فرکانس موج 1 هرتز، ارتفاع آب 35 سانتیمتر برای سامانه دو درجه آزادی

می‌تواند باعث کاهش دقت محاسبات عددی نسبت به حالت اندازه‌گیری واقعی گردد.

#### 5-4- بررسی اثر فرکانس موجساز بر ارتعاشات سامانه بریستول

در شکل‌های 22 و 23 اثر فرکانس موجساز بر ارتعاشات سامانه‌های یک و دو درجه آزادی استوانه بریستول به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. همانطور که در شکل‌های 22 و 23 مشاهده می‌شود افزایش فرکانس تولید موج تا زمانی که با فرکانس طبیعی سیستم برابر گردد باعث افزایش دامنه ارتعاشات استوانه بریستول می‌گردد. همچنین مشاهده می‌شود که افزایش فرکانس تولید موج بیشتر از فرکانس طبیعی سامانه نوسانی موجب کاهش اندک دامنه ارتعاشات استوانه می‌گردد.

#### 6- نتیجه گیری نهایی

امواج آب یکی از منابع تجدید پذیر انرژی می‌باشند که علیرغم مطالعات نسبتاً گسترده در مورد آنها به دلیل طبیعت پیچیده ساختار امواج نیازمند گسترش مطالعات با اندازه‌گیری‌های میدانی و شبیه‌سازی عددی می‌باشد. در این پژوهش با استفاده از روش‌های اندازه‌گیری آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی اثر پارامترهای موج بر ارتعاشات سامانه‌های یک و دو درجه آزادی بریستول مطالعه و بازده جذب انرژی آنها مقایسه شده است. برای مدلسازی تقابل جریان سیال و سازه از نرم افزار مهندسی کامپوز که مختص اندرکنش

راندمان انرژی سامانه یک درجه آزادی افزایش یافته و به راندمان سامانه دو درجه آزادی نزدیک می‌شود. مقایسه راندمان سامانه یک درجه آزادی در دو شکل 20 و 21 آشکار می‌کند که راندمان این سامانه در آب‌های با عمق نسبی زیاد حدود 40 درصد افزایش پیدا کرده است. بنابراین استفاده از سامانه‌های یک درجه آزادی به علت سادگی ساخت و هزینه اولیه کمتر و راندمان انرژی مشابه نسبت به سیستم‌های دو درجه آزادی، در آب‌های با عمق نسبی زیاد می‌تواند توصیه گردد.

مقایسه نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی انجام شده در این پژوهش که در شکل‌های 18 تا 21 نشان داده شده از نظر کیفی و کمی تطابق رضایت‌بخشی را نشان می‌دهند، بطوریکه از نظر کیفی نحوه تغییر متغیرها در نتایج دو روش بسیار مشابه می‌باشد و از نظر کمی در عمق‌هایی که استوانه غوطه‌ور می‌شود (یعنی عمق‌های بیش از سه سانتیمتر) حداکثر اختلاف نتایج دو روش کمتر از 10 درصد و در عمق‌های کمتر از 3 سانتیمتر که استوانه حالت شناوری دارد حداکثر اختلاف نتایج 18.5 درصد می‌باشد. آنجا که اصولاً استوانه بریستول یک سامانه نوسانی مستغرق می‌باشد، نتایج به دست آمده از دو روش برای شرایط استوانه مستغرق به هم نزدیک می‌باشد. لازم به توضیح است که در حالت شناوری استوانه، روش شبیه‌سازی عددی توانایی محاسبه تاثیر شکست موج روی استوانه را نداشته که آن باعث کاهش دقت در محاسبه نیروی موج و پیش‌بینی رفتار استوانه شده و در نتیجه موجب افزایش اختلاف نتایج دو روش عددی و تجربی می‌گردد. همچنین شبیه‌سازی دوبعدی پدیده تولید و انتشار موج که در عمل سه بعدی می‌باشد،

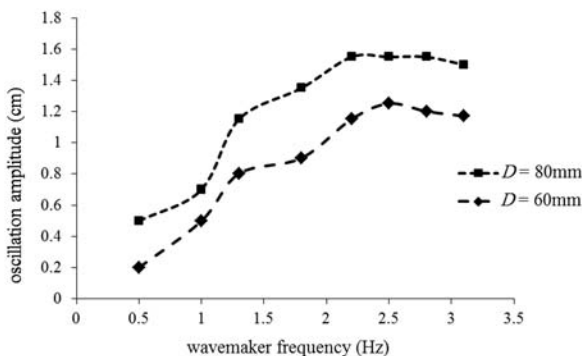


Fig. 22 The impact of wavemaker frequency on the vibrations of one degree of freedom system in 25cm water depth

شکل 22 تاثیر فرکانس موجساز بر دامنه ارتعاشات سامانه یک درجه آزادی در عمق آب 25 سانتیمتر

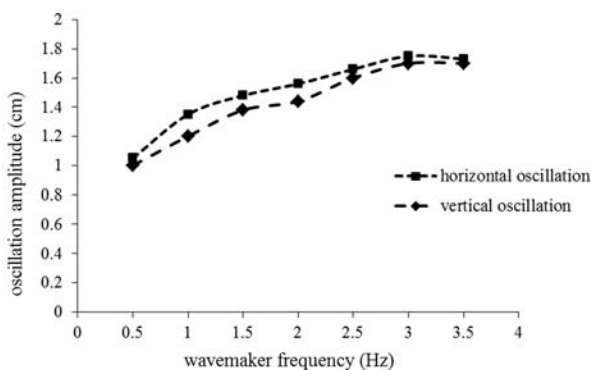


Fig. 23 The impact of wavemaker frequency on the vibrations of two degree of freedom system in 25cm water depth

شکل 23 تاثیر فرکانس موجساز بر دامنه ارتعاشات سامانه دو درجه آزادی در عمق آب 25 سانتیمتر

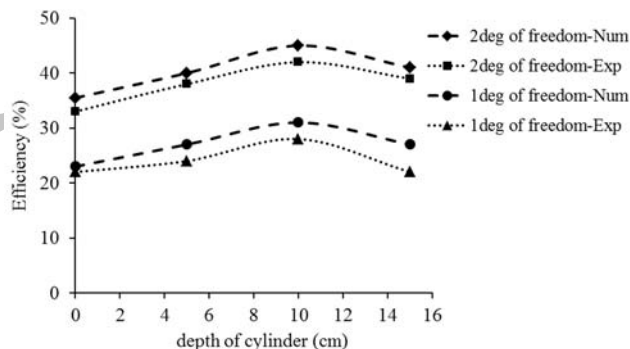


Fig. 20 The experimental and numerical comparison of single and two degree of freedom systems in shallow waters ( $h/L < 0.05$ )

شکل 20 مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی راندمان سامانه‌های یک و دو درجه آزادی در آب‌های با عمق نسبی کم ( $h/L < 0.05$ )

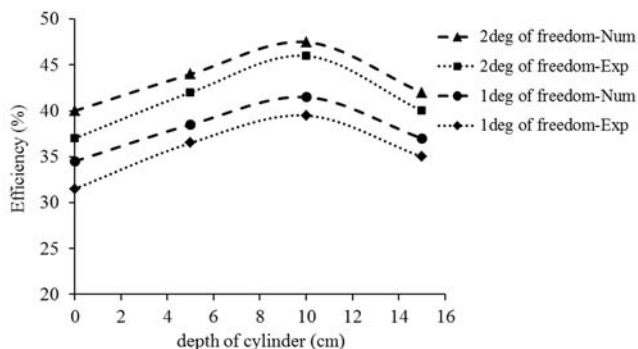


Fig. 21 The experimental and numerical comparison of single and two degree of freedom systems in deep waters ( $h/L > 0.5$ )

شکل 21 مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی راندمان سامانه‌های یک و دو درجه آزادی در آب‌های با عمق نسبی زیاد ( $h/L > 0.5$ )

علائم یونانی

$\eta$	موقعیت سطح آزاد آب (m)
$\mu$	لزجت دینامیکی ( $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ )
$\rho$	چگالی ( $\text{kgm}^{-3}$ )
$\Phi$	تابع پتانسیل

8- مراجع

- [1] M.T. Pontes, L. Cavaleri, D. Mollison, Ocean waves: energy resource assessment, *Marine Technology Society*, Vol. 36, No. 4, pp. 42-51, 2002.
- [2] M. Ghodsi, Y. Honarpajoh, M. Sameti, Investigation of the technology of Wave energy converters, *First Conference on renewable and clean energies*, Tehran, 2013. (in Persian فارسی)
- [3] H.R. Abediaminloei, S. Abbasi, Investigation of wave energy absorption systems, *The first Conference of Environment, Energy and Clean Technology*, Tehran, 2011. (in Persian فارسی)
- [4] F. Zabihian, Evaluation of sea wave energy and build and test a model for the extraction of this energy, *19th International Conference on Electricity*, Tehran, 2005. (in Persian فارسی)
- [5] J. Brooke, *Wave Energy Conversion*, First Edition, pp. 180-225, Amsterdam: Elsevier, 2003.
- [6] M. Naghipour, M. J. Ketabdari, M. Valinataj, Estimation of wave hydrodynamic forces on marine slender bodies using SI method, *Sea Engineering*, Vol. 8, pp. 35-46, 2008. (in Persian فارسی)
- [7] H. Kunisu, Evaluation of wave force acting on Submerged Floating Tunnels, *Procedia Engineering*, Vol.45, No. 4, pp. 3-11, 2010.
- [8] L. Shen, E.-S. Chan, Numerical simulation of fluid-structure interaction using a combined volume of fluid and immersed boundary method, *Ocean Engineering*, Vol. 35, No. (8-9), pp. 939-952, 2008.
- [9] L. Shen, E.-S. Chan, Numerical simulation of nonlinear dispersive waves propagating over a submerged bar by IB-VOF model, *Ocean Engineering*, Vol. 38, No. 38, pp. 319-328, 2011.
- [10] D. S. Jeng, X. D. Luo, J. S. Zhang, Integrated model for ocean waves propagating over marine structures on a porous seabed, *Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference*, Paris, 2010.
- [11] P. Torabi, A. M. Gharabaghi, M. R. Chenaghlu, Numerical study on the effect of direction of wave advance on the vortex induced vibration on Amirkabir on semi-submersible platform riser, *National Conference of cross-shore industry*, Tehran, 2013. (in Persian فارسی)
- [12] W. Finnegan, J. Goggins, Numerical simulation of linear water waves and wave-structure interaction. *Ocean Engineering*, Vol. 43, No. 43, pp. 23-31, 2012.
- [13] A. Parizzade, M. J. Khanjani, M. Rezaeizadeh, Experimental study of Hydroelastic behaviors in large floating interlockled and multicomponent structures with joint connections against waves, *Modares Civil Engineering*, Vol. 15, No. 3, pp. 129-139, 2014. (in Persian فارسی)
- [14] H. Heikkinen, M. J. Lampinen, J. Boling, Analytical study of the interaction between waves and cylindrical wave energy converters oscillating in two modes, *Renewable Energy*, Vol. 50, No. 50, pp. 150-160, 2013.
- [15] M. Anbarsooz, M. Passandideh-Fard, M. Moghiman, Numerical simulation of a submerged cylindrical wave energy converter, *Renewable Energy*, Vol. 64, No. 1, pp.132-143, 2014.
- [16] V. Sriram, T. Schlurmann, S. Schimmels, Focused wave evolution using linear and second order wavemaker theory, *Applied Ocean Research*, Vol. 53, No. 3, pp. 279-296, 2015.
- [17] C. Yen-Lung, H. Shih-Chun, Generation of 3D water waves using mass source wavemaker applied to Navier-Stokes model, *Coastal Engineering*, Vol. 109, No. 8, pp. 76-105, 2015.
- [18] W. Cheng Wu, D. T. Cox, Effects of wave steepness and relative water depth on wave attenuation by emergent vegetation, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol. 164, No.4, pp. 443-450, 2015.
- [19] R.G. Dean, R.A. Dalrymple, *Water wave mechanics for engineers and scientists*, Second Edition, pp. 98-134, Singapore: World Scientific publishing, 1984.
- [20] J. N. Hunt, Direct solution of wave dispersion equation, *the water way port coastal and ocean division*, Vol. 105, No. 7, pp.457-459, 1999.
- [21] M. Lesieur, *Turbulence in Fluids*, Fourth Edition, pp. 420-438, New York: Springer, 2008.
- [22] J.R. Morison, The force exerted by surface waves on piles, *American Institute of Mining & Metallurgical Engineerings*, Vol. 189, No. 3, pp. 147-154, 1950.
- [23] F. Ursell, R.G. Dean, Y.S. Yu, Forced small-amplitudewater waves: Acomparison of theory and experiment, *Fluid Mechanics*, Vol. 7, No. 1, pp. 32-53, 1960.
- [24] W. R. Dean, On the reflexion of surface waves by a submerged circular cylinder, *Mathematical proceeding of the cambridge philosophical society*, Vol. 16, No. 2, pp. 451-472, 1963.

محیط‌های فیزیکی مختلف است استفاده شده است. بر اساس نتایج بدست آمده در این پژوهش می‌توان نتیجه گرفت:

- نتایج نشان می‌دهد که با افزایش قطر (در نتیجه افزایش سطح) استوانه، دامنه نوسانات افزایش می‌یابد که این با معادله موریسون که بیان می‌کند افزایش سطح برخورد آب با استوانه باعث افزایش نیروی اعمالی به جسم می‌گردد تطابق دارد.
- عمق سامانه‌های نوسانی بریستول (یک و دو درجه آزادی) تاثیر مهمی بر دامنه ارتعاشات سازه دارد. نتایج نشان می‌دهد دامنه نوسانات با افزایش عمق سامانه از سطح آزاد سیال، تا یک مقدار ماکزیمم افزایش و سپس کاهش پیدا می‌کند. مکان عمق مربوط به نوسانات ماکزیمم به اندازه یک قطر استوانه مورد آزمایش، پایین‌تر از سطح آزاد سیال قرار دارد.
- در مقادیر فرکانس کوچکتر از فرکانس طبیعی سامانه نوسانی، افزایش فرکانس موجساز موجب افزایش دامنه نوسانات سامانه می‌گردد.
- در آب‌های با عمق نسبی کم راندمان سامانه دو درجه آزادی بریستول حدود 60 درصد بیش از راندمان سامانه یک درجه آزادی می‌باشد.
- افزایش عمق نسبی آب موجب افزایش راندمان سامانه یک درجه آزادی تا 40 درصد می‌گردد. درحالیکه تاثیر قابل توجهی بر راندمان سامانه دو درجه آزادی ندارد بطوریکه راندمان دو سامانه در عمق‌های نسبی زیاد به یکدیگر نزدیک می‌شوند. بنابراین، با توجه به امتیازات سامانه یک درجه آزادی از نظر سادگی مکانیزم، پایین بودن هزینه تهیه و نگهداری و نیز با توجه به اینکه در عمل تعداد سامانه‌های نصب شده در داخل دریا برای جذب انرژی زیاد می‌باشد، پیشنهاد می‌گردد در آب‌های با عمق نسبی زیاد از سامانه یک درجه آزادی استفاده شود.

7- فهرست علائم

$c$	ضریب دمپینگ
$C_d$	ضریب پسا
$C_M$	ضریب اینرسی
$D$	عمق آب
$D$	قطر استوانه
$G$	شتاب جاذبه
$H$	ارتفاع آب از بستر
$H$	ارتفاع موج
$K$	عدد موج
$k_s$	ثابت فنر
$L$	طول موج
$P$	فشار ( $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$ )
$t$	زمان
$T$	دوره تناوب موج
$u_s$	مولفه افقی سرعت
$v_s$	مولفه عمودی سرعت
$V_s$	بردار سرعت جسم جامد
$X$	محور مختصات افقی
$Y$	محور مختصات عمودی