



# بررسی عددی عملکرد نوسانگر جاذب رفت و برگشتی موج با استفاده از روش کسر حجمی سیال

حمیدرضا متحدی<sup>1</sup>، مرتضی انبارسوز<sup>2</sup>، محمد پسندیده فرد<sup>3\*</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه مهندسی فناوری های نوین قوچان، قوچان

3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

\* مشهد، صندوق پستی 9177948974، mpfard@um.ac.ir

## اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 17 بهمن 1395

پذیرش: 27 اردیبهشت 1396

ارائه در سایت: 25 خرداد 1396

کلید واژگان:

نوسانگر جاذب رفت و برگشتی موج

انرژی امواج دریا

شبیه سازی عددی

شبکه بندی غیرمتحرک

## چکیده

در این پژوهش به ارائه و بررسی کارایی و دقت یک روش جدید برای شبیه سازی عددی دو بعدی نوسانگر جاذب رفت و برگشتی موج پرداخته می شود. نوسانگر جاذب رفت و برگشتی موج تجهیزاتی با یک درجه آزادی است که در عمق متوسط دریا و نزدیک ساحل نصب می شوند و حرکت زاویه ای رفت و برگشتی داشته و برای جذب انرژی امواج دریا به کار می روند. روش شبیه سازی به کار رفته بر مبنای روش کسر حجمی سیال است. در روش های رایج به دلیل ماهیت حرکت این وسیله از روش کسر حجمی سیال و شبکه بندی متحرک استفاده می شود، ولی در روش به کار رفته برای این پژوهش از شبکه بندی ثابت و غیرمتحرک استفاده شده است که موجب افزایش سهولت آماده سازی و سرعت محاسبات می شود. نتایج این شبیه سازی عددی با داده های آزمایشگاهی و نتایج شبیه سازی عددی با روش شبکه بندی متحرک مقایسه شده است که دقت بالای این روش را نشان می دهد. اعتبارسنجی در شرایط سخت و با امواج تیز انجام شده است. شبیه سازی در این شرایط به دقت بسیار بالای روش عددی نیازمند است. همچنین نیروهای خارجی از جمله نیروی سیستم جذب قدرت هم در شبیه سازی لحاظ شده است. ضریب جذب، شرایط جذب انرژی و اثر جذب انرژی بر زاویه، سرعت زاویه ای و پدیده به هم کوفتن نوسانگر جاذب رفت و برگشتی موج هم بررسی می شود. در پایان اثر ارتفاع موج و ضریب سیستم جذب قدرت بر ضریب جذب و میزان انرژی جذب شده توسط نوسانگر جاذب رفت و برگشتی موج برای امواجی با دوره نوسان یکسان بررسی می شود.

## Numerical study of the performance of an oscillating wave surge converter using volume of fluid method

Hamid Reza Mottahedi<sup>1</sup>, Morteza Anbarsooz<sup>2</sup>, Mohammad Pasandideh-Fard<sup>1\*</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Quchan University of Advanced Technology, Quchan, Iran.

\* P.O.B. 9177948974 Mashhad, Iran, mpfard@um.ac.ir

## ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 07 March 2017  
Accepted 17 May 2017  
Available Online 15 June 2017

**Keywords:**  
Oscillating Wave Surge Converter (OWSC)  
Surface Wave Energy  
Numerical Modeling  
Structured Grid Mesh

## ABSTRACT

This study, deals with the investigation of the accuracy and performance of a novel method for simulation of oscillating wave surge converter (OWSC). The OWSC is an instrument with one degree of freedom mounted in near shore areas which oscillates back and forth. This device is used to harvest sea wave energy. The developed model is based on the well-known volume of fluid (VOF) method. Due to the nature of the OWSC motion, the VOF method in conjunction with unstructured dynamical grid mesh has been used in the literature. But in this study, a structured grid mesh is employed which facilitates the numerical preparation and the speed of simulation process. The results are compared with the experimental data and the results of numerical method in the literature by dynamical grid mesh. This comparison shows the high accuracy of the developed model in this study. The model validation is performed in an extreme condition with steep waves which need an accurate numerical scheme. The external forces including power take off (PTO) forces are also simulated. The capture factor, energy absorption condition and the effect of PTO on angle, angular velocity and slamming of the OWSC are also investigated. Finally, the effect of wave height and the PTO stiffness on the capture factor and absorbed energy by the OWSC for waves with a specific period are investigated.

## 1- مقدمه

در سال 1974 میلادی توسط سالتر [1] مورد توجه دوباره قرار گرفت. روش های گوناگون برای استحصال انرژی از امواج سطحی ابداع شده است. عمدتاً هر مورد برای عمق و شرایط دریایی خاص مناسب است. امواج سطحی در مسیر حرکت خود از مناطق عمیق به مناطق کم عمق تر انرژی خود را از دست می دهند. فولی و همکاران [2] و وایتکر و فولی [3] با نشان دادن این

انرژی امواج دریا به عنوان یکی از منابع انرژی های تجدیدپذیر در نظر گرفته می شود. کیفیت انرژی این منبع بیشتر از انرژی خورشیدی و مقدار انرژی نسبت به حجم ماده جابه جا شده در آن بیش از باد است. با این که ایده استفاده از انرژی امواج دریا به سال های دور باز می گردد، ولی در عصر حاضر

Please cite this article using:

H. R. Mottahedi, M. Anbarsooz, M. Pasandideh-Fard, Numerical study of the performance of an oscillating wave surge converter using volume of fluid method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 6, pp. 265-276, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

است. اشمیت و السایسر [11] روشی اصلاح شده با استفاده از نرم‌افزار این‌فوم<sup>11</sup> جهت شبیه‌سازی حرکت نوسانگر جاذب رفت و برگشتی موج و براساس روش کسر حجمی سیال و شبکه‌بندی متحرک را ارائه کردند. وی و همکاران [12] در ادامه پژوهش پیشین آن‌ها [10] عملکرد نوسانگر جاذب رفت و برگشتی موج را در شرایط امواج تیز و در شرایطی که پدیده به هم کوافتن میان آب و نوسانگر جاذب رفت و برگشتی موج رخ می‌دهد، بررسی کرده‌اند. این بررسی به روش کسر حجمی سیال با شبکه‌بندی متحرک و به صورت دو بعدی انجام گرفته است. شرایط پدیده به هم‌کوافتن یکی از حساس‌ترین شرایط در شبیه‌سازی عددی این گونه موارد است که نیازمند دقت عددی بالاست. در راستای پژوهش‌های صورت گرفته برای شبیه‌سازی نوسانگر جاذب رفت و برگشتی موج، آبادی و همکاران [13] به شبیه‌سازی عملکرد یک نوسانگر جاذب رفت و برگشتی موج چند قسمتی<sup>12</sup> پرداختند که هر قسمت از آن به طور مستقل می‌تواند حرکت کند. آن‌ها از روش کسر حجمی سیال برای محاسبه سطح آزاد سیال و از روش مرز مغروق<sup>13</sup> برای شبیه‌سازی حرکت اجسام جامد استفاده کردند.

در پژوهش ساسون و همکاران [14] قابلیت روش‌های کسر حجمی سیال و هیدرودینامیک ذرات هموار برای شبیه‌سازی پدیده به هم‌کوافتن بررسی شده و نتایج نشان‌دهنده دقت قابل قبول هر دو روش است. در پژوهش آن‌ها بیان شده که دقت روش کسر حجمی سیال اندکی بهتر بوده، ولی دشواری شبکه‌بندی در روش کسر حجمی سیال اشکال اساسی استفاده از این روش است. با توجه به توانمندی و دقت بالای روش کسر حجمی سیال و نیز رغبت پژوهش‌گران به آن در شبیه‌سازی نوسانگر جاذب رفت و برگشتی موج در پژوهش حاضر به معرفی و بررسی دقت روشی براساس کسر حجمی سیال با شبکه‌بندی ثابت برای شبیه‌سازی نوسانگر جاذب رفت و برگشتی موج پرداخته شده است. این روش برخلاف روش‌های هیدرودینامیک ذرات هموار، کسر حجمی سیال به همراه مرز مغروق و کسر حجمی سیال به همراه شبکه‌بندی متحرک، در نرم‌افزارهای تجاری مشاهده نشده و این پژوهش با استفاده از تولید کد عددی، به زبان برنامه‌نویسی فورترن<sup>14</sup> انجام شده است. این روش بر مبنای روش کسر حجمی سیال و از شبکه‌بندی متحرک بی‌نیاز است. علاوه بر برخورداری از مزایای روش کسر حجمی سیال، مشکلات شبکه‌بندی متحرک را ندارد. در مبحث امواج سطحی این روش توسط سعادت‌نسب و همکاران [15] برای شبیه‌سازی تولید موج غیرخطی و نامنظم استفاده شد که مقایسه نتایج حاصل شده با داده‌های تحلیلی و سایر نتایج عددی، دقت بالای روش در پیش‌بینی امواج تولیدی را نشان داد.

استفاده از روش کسر حجمی سیال با شبکه‌بندی ثابت برای شبیه‌سازی تونل موج با نوسانگر جاذب رفت و برگشتی موج تاکنون توسط محققین مورد بررسی قرار نگرفته است. اثرات میزان گشتاور اعمال شده توسط سیستم جذب قدرت<sup>15</sup> بر ضریب جذب، میزان جذب انرژی و پدیده به هم‌کوافتن در ارتفاع‌های موج مختلف کمتر مورد بررسی قرار گرفته که در این پژوهش به آن پرداخته شده، همچنین اثر جذب قدرت بر احتمال رویداد پدیده به هم‌کوافتن بررسی شده که این موضوع نیز در ادبیات موضوع مشاهده نشده است.

در پژوهش حاضر برای بررسی اعتبارسنجی و صحت روش، مقایسه میان

حقیقت که افت انرژی موج از مناطق دور از ساحل<sup>1</sup> تا مناطق نزدیک ساحل<sup>2</sup> تنها کمتر از 20% است و در عوض هزینه‌های نصب و نگهداری تجهیزات جذب انرژی امواج به مقدار بسیار زیادی کاهش می‌یابد، اهمیت مناطق نزدیک ساحل به عنوان یک منبع انرژی پاک را متذکر شدند.

تجهیزات معمول برای جذب انرژی امواج در مناطق نزدیک ساحل، نوسانگر جاذب رفت و برگشتی موج<sup>3</sup> نام دارند که در بستر دریا لولا می‌شوند و با یک درجه آزادی به سمت ساحل و دریا حرکت زاویه‌ای رفت و برگشتی دارند و در حین این حرکت انرژی امواج دریا را جذب می‌کنند. مروری بر پژوهش‌هایی که درباره نوسانگر جاذب رفت و برگشتی موج انجام شده در تحقیق وایتکر و همکاران [4] آمده است. بررسی‌ها بر عملکرد نوسانگر جاذب رفت و برگشتی موج تا به امروز ادامه دارد. بسیاری از این بررسی‌ها به روش تئوری و بر مبنای جریان پتانسیل بوده مانند پژوهش فولی و همکاران [5] که در آن پارامترها و ضرایب اساسی توسط نرم‌افزاری تجاری به نام ومیت<sup>4</sup> که بر مبنای جریان پتانسیل عمل می‌کند به دست آمده است، همچنین رنزی و دیاس [6] مدلی بر مبنای جریان پتانسیل برای پیش‌بینی حرکت و ضریب جذب نوسانگر جاذب رفت و برگشتی موج ارائه کردند. اشکال اصلی روش جریان پتانسیل عدم پیش‌بینی اثرات گرانی<sup>5</sup> و آثار غیرخطی است و نتایج حاصل از این روش‌ها به صورت کامل با مدل آزمایشگاهی و مدل اصلی تطابق ندارد.

مدل دیگری که در سال‌های اخیر بنا به دلایل یادشده برای شبیه‌سازی نوسانگر جاذب رفت و برگشتی موج بیشتر به آن توجه شده شبیه‌سازی عددی است. در این روش اثرات گرانی و آثار غیرخطی نیز دیده می‌شود و به مدل آزمایشگاهی بسیار نزدیک‌تر است، ولی مشکل اصلی در شبیه‌سازی این تجهیزات نیاز به شبکه‌بندی متحرک<sup>6</sup> است. رفیعی و دیاس [7] براساس روش هیدرودینامیک ذرات هموار<sup>7</sup> (که در آن شبیه‌سازی بدون شبکه‌بندی صورت می‌گیرد) حرکت و گشتاور وارد بر یک مدل آزمایشگاهی از نوسانگر جاذب رفت و برگشتی موج که در یک تونل موج<sup>8</sup> عمل می‌کرد را به صورت عددی برآورد کردند و نتایج را با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه کردند. در این پژوهش به عدم دقت مناسب روش‌های مبتنی بر فرض سیال بدون گرانی در برآورد برهم‌کنش‌های میان سیال و نوسانگر جاذب رفت و برگشتی موج تأکید شده است. در پژوهش ییلاقی و همکاران [8] نیز با روش هیدرودینامیک ذرات هموار به شبیه‌سازی عددی پدیده به هم‌کوافتن<sup>9</sup> برای نوسانگر جاذب رفت و برگشتی موج پرداخته شده است. در پژوهش او و همکاران [9] از مدل شبیه‌سازی کسر حجمی سیال<sup>10</sup> به همراه شبکه‌بندی متحرک برای شبیه‌سازی عددی نوسانگر جاذب رفت و برگشتی موج استفاده شده است و نتایج با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شده که دقت بالای این روش مدل‌سازی را نشان می‌دهد، ولی این روش مشکل شبکه‌بندی متحرک را همچنان دارد. در پژوهش او و همکاران [10] که به همان روش شبیه‌سازی کار پیشین آن‌ها [9] انجام شده است، اثرات گرانی بررسی شده و نتیجه‌گیری‌های حاصل از نتایج نشان‌دهنده اثر قابل ملاحظه اثرات گرانی

<sup>1</sup> Off Shore

<sup>2</sup> Near Shore

<sup>3</sup> Oscillating Wave Surge Converter (OWSC)

<sup>4</sup> WAMIT

<sup>5</sup> Viscosity

<sup>6</sup> Dynamic Grid Mesh

<sup>7</sup> Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)

<sup>8</sup> Wave Flume

<sup>9</sup> Slamming

<sup>10</sup> Volume Of Fluid (VOF)

<sup>11</sup> OpenFOAM

<sup>12</sup> Modular Oscillating Wave Surge Converter (Modular OWSC)

<sup>13</sup> Immersed Boundary Method (IBM)

<sup>14</sup> Fortran

<sup>15</sup> Power Take Off (PTO)

### 3-2- نوسانگر جاذب رفت و برگشتی موج

تصویر شماتیک نوسانگر جاذب رفت و برگشتی شبیه‌سازی شده در این پژوهش در شکل 2-b نمایش داده شده است. ارتفاع آن از محل لولا که در مرکز نیم‌دایره پایین قرار دارد 0.31 و عرض آن 0.0875 متر است. چگالی این نوسانگر جاذب رفت و برگشتی موج  $219 \text{ kg/m}^3$  در نظر گرفته شده که نیروی شناوری ناشی از این چگالی عامل ایجاد گشتاور بازگرداننده<sup>2</sup> نوسانگر جاذب رفت و برگشتی موج است.

### 4-2- شرایط مرزی و اولیه

شرط اولیه در شرایط آرام و با توزیع سرعت صفر است که نوسانگر جاذب رفت و برگشتی موج در شرایط زاویه صفر (عمود بر خط افق) قرار دارد. شرط مرزی عدم لغزش<sup>3</sup> بر دیواره‌های سمت چپ و راست و کف تونل موج حاکم است، همچنین شرایط مرزی روی مرز اجسام جامد (در این‌جا موج‌ساز و نوسانگر جاذب رفت و برگشتی موج) نیز شرط عدم لغزش است. ضلع بالایی هم به هوای آزاد در فشار اتمسفریک باز و فشار در مرز بالایی موج‌ساز برابر با فشار یک اتمسفر است.

### 3- قوانین حاکم

#### 1-1-3 فاز مایع

در این شبیه‌سازی برای سیال‌ها فرض عدم تراکم‌پذیری در نظر گرفته شده است. این فرض برای فاز مایع کاملاً قابل قبول و این فرض مانند اغلب قریب به اتفاق شبیه‌سازی‌های تونل موج در این‌جا نیز به دلیل تغییرات کم فشار در فاز گازی و نیز اثر کم فاز گازی در این مسئله معتبر است. پس با در نظر گرفتن این فرض و اعمال قوانین بقای جرم و تکانه به معادلات پیوستگی و ناویر استوکس مطابق روابط (5,6) می‌رسیم [17].

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \vec{V} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot \vec{\tau} + \vec{g} + \frac{1}{\rho} \vec{F}_b \quad (6)$$

که در آن رابطه (6) به شرح زیر است.

$$\vec{\tau} = \mu [(\nabla \vec{V}) + (\nabla \vec{V})^T] \quad (7)$$

در آن  $\vec{V}$  بردار سرعت،  $P$  فشار،  $\rho$  چگالی و  $\vec{\tau}$  تانسور تنش است. همچنین  $\vec{g}$ ،  $\vec{F}_b$  و  $\mu$  به ترتیب بردار شتاب جاذبه زمین و بردار نیروی حجمی<sup>4</sup> و گرانیوی متحرک<sup>5</sup> است.

به دلیل استفاده از ساختار شبکه‌بندی غیرمتحرک برای ردیابی فاز مایع از روش کسر حجمی سیال استفاده می‌شود که در آن از یک متغیر به نام کسر حجمی مایع ( $f_{liq}$ ) برای این منظور استفاده می‌شود. این متغیر مطابق رابطه (8) تعریف می‌شود [18].

$$\begin{cases} f_{liq} = 0 & \text{بیرون فاز مایع} \\ 0 < f_{liq} < 1 & \text{در مرز فاز مایع} \\ f_{liq} = 1 & \text{داخل فاز مایع} \end{cases} \quad (8)$$

پس متغیر کسر حجمی مایع به عنوان یک متغیر در کل حوزه حل تعریف می‌شود و از دیدگاه لاگرانژی هر متغیر نسبت داده شده به جرم سیال تغییر نمی‌کند و به عبارت دیگر مشتق لاگرانژی آن نسبت به زمان صفر و به صورت رابطه (9) است [17].

نتایج این شبیه‌سازی با داده‌های پژوهش وی و همکاران [12] که در آن پدیده به هم کوفتن رخ می‌دهد انجام شده است. مقایسه با این پژوهش به این دلیل است که شبیه‌سازی رویداد به هم کوفتن نیازمند حساس‌ترین و دقیق‌ترین شبیه‌سازی‌هاست و در پژوهش وی و همکاران [12] داده‌های عددی و آزمایشگاهی در شرایط به هم کوفتن فراهم است.

در این مقاله نخست به معرفی حوزه حل و شرایط اولیه و مرزی پرداخته می‌شود، پس از آن قوانین حاکم و نحوه تفکیک فازهای مایع و جامد و گاز و سپس نحوه گسسته‌سازی معادلات حاکم و نحوه شبکه‌بندی توضیح داده خواهد شد. در پایان هم داده‌ها و نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها ارائه می‌شود.

### 2- حوزه حل و شرایط مرزی و اولیه

#### 1-2- تونل موج

هدف این پژوهش مدل‌سازی عددی یک تونل موج که به یک نوسانگر جاذب رفت و برگشتی موج در سمت راست تونل موج و در فاصله 13.2 متر از دیواره سمت چپ مجهز است و یک موج‌ساز در فاصله یک متری از دیواره سمت چپ تونل موج قرار دارد (شکل 1). همچنین در دو سمت چپ و راست این تونل دو ناحیه گیرنده موج<sup>1</sup> قرار دارد که انرژی موج را جذب کرده و انعکاس دوباره موج را به حداقل می‌رسانند. تصویر شماتیک موج‌ساز و نوسانگر جاذب رفت و برگشتی موج در شکل 2 نمایش داده شده است. ضلع بالایی موج‌ساز باز بوده و با هوای اتمسفریک ارتباط دارد. در شرایط اولیه سطح آب در تونل موج تا ارتفاع 0.305 متر بالای کف تونل موج و در حالت سکون است که در آن توزیع سرعت در تمام حوزه حل صفر است. شرایط و اطلاعات این تونل موج مطابق پژوهش وی و همکاران [12] است تا بتوان صحت‌سنجی روش عددی ارائه شده را با مقایسه نتایج به دست آمده با نتایج عددی و تجربی ارائه شده در پژوهش فوق مورد بررسی قرار داد.

#### 2-2- موج‌ساز

در لحظه شروع و آغاز به کار موج‌ساز با یک شیب حرکت می‌کند تا به شرایط حداکثری نوسان خود برسد. تابع حرکت موج‌ساز بر مبنای تئوری جریان پتانسیل در رابطه (1) آمده است [16].

$$\theta(t) = \xi(t) \cdot \text{Re} \left[ \frac{a}{c(\omega)} e^{i\omega t} \right] \quad (1)$$

در آن روابط (1) به شرح زیر است.

$$\xi(t) = \begin{cases} \sin\left(\frac{\pi t}{2T_r}\right) & t \leq T_r \\ 1 & t > T_r \end{cases} \quad (2)$$

$$c(\omega) = \frac{2 \sinh(kh)}{kh + \sinh(kh) \cosh(kh)} \psi(kh) \quad (3)$$

تابع  $\psi(kh)$  در رابطه (4) آمده است.

$$\psi(kh) = \left( \sinh(kh) + \frac{1 - \cosh(kh)}{k(h-l)} \right) \quad (4)$$

در روابط (4-1)  $\theta(t)$  تابع زاویه موج‌ساز نسبت به خط عمود،  $t$  زمان و  $\omega$   $2\pi \cdot T^{-1}$  مدت زمان یک دوره کامل نوسان موج‌ساز است.  $T_r$  هم مدت زمانی است که از لحظه آغاز کار تا رسیدن دامنه حرکت موج‌ساز به مقدار نهایی به طول می‌انجامد. در این پژوهش  $T_r = 3T$  در نظر گرفته شده (مشابه پژوهش وی و همکاران [12]) است.  $h$  عمق آب در حالت آرام،  $k$  هم عدد موج و با رابطه  $k = 2\pi \cdot \lambda^{-1}$  که در آن  $\lambda$  طول موج است تعیین می‌شود.

هم مطابق شکل 2-a برابر 0.5 متر است.

<sup>1</sup> Damping Zone

<sup>2</sup> Restoring Torque

<sup>3</sup> No-Slip Condition

<sup>4</sup> Body Force

<sup>5</sup> Dynamic Viscosity

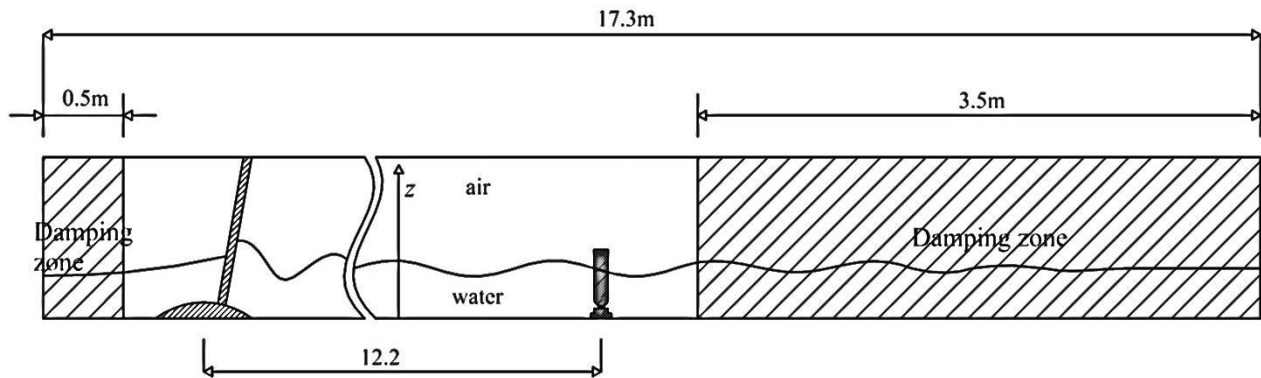


Fig. 1 Computational domain of the simulation

شکل 1 حوزه حل برای شبیه‌سازی انجام‌شده

مشتق لاگرانژی آن نیز مشابه رابطه (9) صفر و به صورت روابط (11,10) است.

$$\begin{cases} f_{\text{Solid}} = 0 & \text{بیرون فاز جامد} \\ 0 < f_{\text{Solid}} < 1 & \text{در مرز فاز جامد} \\ f_{\text{Solid}} = 1 & \text{داخل فاز جامد} \end{cases} \quad (10)$$

$$\frac{Df_{\text{Solid}}}{Dt} = \frac{\partial f_{\text{Solid}}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla f_{\text{Solid}} = 0 \quad (11)$$

در این شرایط به دلیل آن که فاز جامد به صورت سیال در نظر گرفته شده است، سرعت‌های مختلف در کل ناحیه جامد پخش شده که این با حقیقت مسئله سازگاری ندارد. پس از محاسبه توزیع سرعت در هر گام زمانی مقدار متوسط سرعت خطی و سرعت زاویه‌ای ابتدا به دست آمده و سپس به تمامی سلول‌هایی که در ناحیه جامد قرار دارند همان سرعت خطی و سرعت زاویه‌ای به دست آمده به صورت روابط (13,12) اعمال می‌شود.

$$m_s \vec{V}_s = \int \rho \vec{V} dV \quad (12)$$

$$I_s \vec{\omega}_s = \int \rho \vec{r} \times \vec{V} dV \quad (13)$$

در روابط (13,12) انتگرال‌ها بر سلول‌های داخل ناحیه جامد که در آن‌ها  $m_s$  و  $I_s$  به ترتیب جرم جسم جامد و اینرسی دورانی حول مرکز دوران جسم جامد مورد نظر است، همچنین  $\vec{V}_s$  و  $\vec{\omega}_s$  به ترتیب بردار سرعت خطی و بردار سرعت دورانی جسم جامد است. شرط بدون لغزش هم با قرار دادن مقادیر بالای گرانیوی به نواحی شامل فاز جامد حاصل می‌شود.

### 3-3- فاز گاز

با توجه به وجود سه فاز گاز، مایع و جامد در مسئله و تعیین متغیرهای کسر حجمی مایع و کسر حجمی جامد، ردیابی فاز گاز هم امکان‌پذیر است به گونه‌ای که اگر کسر حجمی مایع و کسر حجمی جامد هر دو صفر باشند نشان‌دهنده فاز گاز است.

تعیین متغیرهای ترمودینامیکی و ترموفیزیکی مانند چگالی و گرانیوی برای هر سلول که ممکن است یک فاز داشته باشد یا در مرز بین دو یا هر سه فاز واقع شده باشد، مشابه با دو رابطه زیر که به ترتیب برای به دست آوردن چگالی و گرانیوی متحرک و به صورت روابط (15,14) به دست می‌آید.

$$\rho = f_{\text{liq}} \cdot \rho_{\text{liq}} + (1 - f_{\text{liq}} - f_{\text{Solid}}) \rho_g + f_{\text{Solid}} \cdot \rho_{\text{Solid}} \quad (14)$$

$$\mu = f_{\text{liq}} \cdot \mu_{\text{liq}} + (1 - f_{\text{liq}} - f_{\text{Solid}}) \mu_g + f_{\text{Solid}} \cdot \mu_{\text{Solid}} \quad (15)$$

در این معادلات به ترتیب زیرنویس‌های Solid، liq و g نشان‌دهنده جامد، مایع و گاز است.

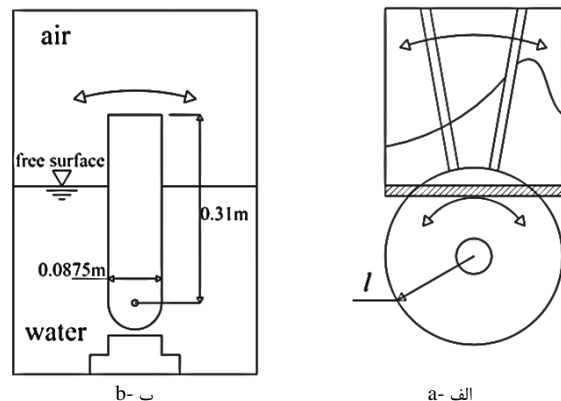


Fig. 2 Schematic of wave maker (right) and OWSC (left)

شکل 2 الف- تصویر شماتیک موج‌ساز ب- تصویر نوسانگر جاذب رفت و برگشتی موج

$$\frac{Df_{\text{liq}}}{Dt} = \frac{\partial f_{\text{liq}}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla f_{\text{liq}} = 0 \quad (9)$$

### 2-3- فاز جامد

در این فاز شرایط بدون لغزش بر دیواره وجود دارد. روش رایج برای شبیه‌سازی این نوع جامد که حرکت وابسته به سیال دارد و شرط مرزی بدون لغزش روی مرز آن اعمال می‌شود، ایجاد شبکه‌بندی متحرک به همراه روش کسر حجمی سیال است که این شبکه متحرک عامل ایجاد خطا و هزینه زیاد محاسبات محسوب می‌شود [19]. در این پژوهش شبیه‌سازی براساس شبکه‌بندی غیرمتحرک انجام می‌شود. مدل‌های مختلفی از این روش شبیه‌سازی جامد با حرکت آزاد در سیال بدون شبکه‌بندی متحرک ارائه شده است که از جمله می‌توان به پژوهش گلووینسکی و همکاران [21,20] و همچنین پاتانکار [22]، پاتانکار و همکاران [23] و شرما و پاتانکار [24] اشاره کرد. روش مورد استفاده در این پژوهش توسط میرزایی و پسندیده‌فرد [25] ارائه شده که مدلی اصلاح‌شده براساس پژوهش شرما و پاتانکار [24] است. این روش با نام حوزه حل مجازی<sup>1</sup> شناخته می‌شود. در این روش دقیقاً مشابه روش کسر حجمی سیال کل حوزه حل شامل فازهای گاز و مایع و جامد، سیال در نظر گرفته می‌شود و معادلات سیال (روابط 5-7) بر تمام حوزه حل اعمال می‌شود. برای ردیابی جامد یک متغیر به نام کسر حجمی جامد ( $f_{\text{Solid}}$ ) در نظر گرفته می‌شود که مشابه کسر حجمی سیال تعریف شده و

<sup>1</sup> Fast Fictitious Domain (FFD)

#### 4- روش عددی

##### 1-4- گسسته‌سازی معادلات حاکم

برای گسسته‌سازی معادلات حاکم از روش گسسته‌سازی سه مرحله‌ای استفاده می‌شود [25]. در مرحله اول از هر گام زمانی با داشتن توزیع سرعت و نیروی حجمی از گام زمانی پیشین، جملات جابه‌جایی و نیروهای حجمی معادلات ناویر استوکس مطابق رابطه (16) در نظر گرفته می‌شود.

$$\frac{\bar{V}^{n+1/3} - \bar{V}^n}{\delta t} = -(\bar{V} \cdot \nabla \bar{V})^n + \frac{1}{\rho^n} \bar{F}_b^n + \bar{g} \quad (16)$$

در آن بالانویس‌های  $n$  و  $n+1/3$  به ترتیب نشان‌دهنده گام زمانی و نخستین مرحله گسسته‌سازی و  $\delta t$  نشان‌دهنده طول گام زمانی است. توزیع سرعت مرحله اول از حل این رابطه به صورت صریح به‌دست می‌آید.

در مرحله دوم براساس توزیع سرعت به‌دست آمده در مرحله اول، عبارت گرانیوی رابطه بقای تکانه، در نظر گرفته شده و توزیع سرعت در مرحله دوم محاسبه می‌شود. این مرحله به طور ضمنی انجام می‌شود، زیرا با توجه به مقداری زیاد گرانیوی در فاز جامد، حل صریح این رابطه نیاز به گام زمانی بسیار کوچکی دارد [26]. روش گسسته‌سازی در مرحله دوم به صورت رابطه (17) است.

$$\frac{\bar{V}^{n+2/3} - \bar{V}^{n+1/3}}{\delta t} = \frac{1}{\rho^n} \nabla \cdot \mu \left[ (\nabla \bar{V}^{n+2/3}) + (\nabla \bar{V}^{n+2/3})^T \right] \quad (17)$$

در این رابطه  $n+2/3$  نشان‌دهنده مرحله دوم است.

مرحله سوم هم به عبارت فشار مربوط است. باید توزیع فشار و توزیع سرعت در گام زمانی  $n+1$  به‌دست آیند. پس آخرین مرحله رابطه ناویر استوکس را طبق رابطه (18) به صورت گسسته‌سازی شده می‌نویسیم.

$$\frac{\bar{V}^{n+1} - \bar{V}^{n+2/3}}{\delta t} = \frac{-1}{\rho^n} \nabla p^{n+1} \quad (18)$$

$n+1$  هم نشان‌دهنده گام زمانی بعدی است. در این مرحله دو توزیع مجهول فشار و سرعت در گام زمانی بعدی را داریم و نیاز به رابطه دیگری است که آن هم رابطه پیوستگی است. رابطه پیوستگی بر توزیع سرعت گام  $n+1$  باید به صورت رابطه (19) برقرار باشد.

$$\nabla \cdot \bar{V}^{n+1} = 0 \quad (19)$$

با ضرب داخلی عملگر دل<sup>1</sup> در دو طرف رابطه (18) و ادغام رابطه (19) در رابطه (18)، رابطه (20) حاصل می‌شود.

$$\nabla \cdot \left[ \frac{1}{\rho^n} \nabla p^{n+1} \right] = \frac{\nabla \cdot \bar{V}^{n+2/3}}{\delta t} \quad (20)$$

با داشتن توزیع سرعت مرحله دوم از رابطه (20) توزیع فشار در گام زمانی  $n+1$  به‌دست می‌آید و با قرار دادن این توزیع فشار در رابطه (18) توزیع سرعت در گام زمانی  $n+1$  هم به‌دست می‌آید. پس با داشتن توزیع سرعت و فشار در هر گام زمانی، توزیع سرعت و فشار در گام زمانی بعد تعیین می‌شود. شرایط توزیع سرعت اولیه برای شروع فرآیند حل عددی در بخش‌های پیشین توضیح داده شده است.

سرعت در ناحیه جامد پس از به‌دست آمدن توزیع سرعت با استفاده از روابط (13,12) اصلاح می‌شود، سپس با استفاده از روابط (11,9) مقدار پارامترهای کسر حجمی مایع و کسر حجمی جامد برای سلول‌ها در گام زمانی جدید به‌دست می‌آید.

##### 2-4- نیروهای حجمی

رابطه حرکت نوسانگر جاذب رفت و برگشتی موج در رابطه (21) آمده است.

$$(I_o + I_{addo})\ddot{\theta} = (C_w + C_{PTO})\dot{\theta} + K\theta + M_w \quad (21)$$

در این رابطه  $I$  اینرسی دورانی نوسانگر جاذب رفت و برگشتی موج و زیرنویس  $o$  در یک پارامتر نشانگر محاسبه آن پارامتر نسبت به مرکز دوران نوسانگر جاذب رفت و برگشتی موج (لولا) است.  $I_{add}$  اینرسی دورانی اضافه شده در اثر حرکت شتابدار نوسانگر جاذب رفت و برگشتی موج در آب و  $\theta$  زاویه نوسانگر جاذب رفت و برگشتی موج نسبت به خط عمود بر افق است.  $C_w$  و  $C_{PTO}$  به ترتیب ضریب پسا<sup>2</sup> به دلیل حرکت نوسانگر جاذب رفت و برگشتی موج در سیال و ضریب سیستم جذب قدرت به دلیل جذب انرژی از طریق پمپ‌های هیدرولیک سیستم جذب قدرت است. در این پژوهش فرض شده که سیستم جذب قدرت از طریق گیرنده‌های هیدرولیکی به صورت زاویه‌ای حرکت کرده و گشتاوری معادل  $M_{PTO} = C_{PTO}\dot{\theta}$  را به نوسانگر جاذب رفت و برگشتی موج وارد می‌کند.  $K$  هم ضریب سختی فنر زاویه‌ای است که در صورت لزوم برای افزایش گشتاور بازگرداننده نوسانگر جاذب رفت و برگشتی موج به آن مجهز می‌شود. در این‌جا به دلیل زیاد بودن گشتاور بازگرداننده ناشی از نیروی شناوری فرض بر عدم استفاده از فنر است.  $M_w$  هم گشتاور اعمال شده بر نوسانگر جاذب رفت و برگشتی موج از طرف آب که شامل گشتاور اعمال شده توسط موج و گشتاور وارد شده توسط نیروی شناوری است. این گشتاور به صورت ضمنی با حل معادلات ناویر استوکس و اعمال روابط (8-15) و به‌دست آوردن حرکت جسم جامد خود به‌خود اعمال می‌شود و نیاز به حل رابطه اضافه‌ای نیست.

روش عددی استفاده‌شده اثر تمامی جملات رابطه (21) به جز دو عبارت  $K\theta$  و  $C_{PTO}\dot{\theta}$  که در حل عددی توضیح داده شده را به صورت ضمنی محاسبه می‌کند، دلیل این است که ماهیت سایر عبارت‌های رابطه (21) از برهم‌کنش میان سیال و جسم جامد ناشی می‌شود که در معادلات حاکم اعمال می‌شود، ولی دو عبارت بیان‌شده نیروهای خارجی است. اثر آن‌ها برای شبیه‌سازی اثر این عبارات به صورت نیروهای حجمی ( $\bar{F}_b^n$ ) در نظر گرفته شده است. به این ترتیب که در رابطه (16) نیروی حجمی در سلول‌هایی که در فضای جسم جامد مورد نظر قرار دارد به صورت رابطه (22) جای‌گذاری می‌شود.

$$\bar{F}_b^n = C_{PTO}\bar{\omega}_s^n + K\theta^n \quad (22)$$

در آن  $\bar{\omega}_s^n$  سرعت زاویه‌ای در گام زمانی  $n$ -ام است که طبق رابطه (13) به‌دست می‌آید.  $\theta^n$  هم زاویه نوسانگر جاذب رفت و برگشتی موج در گام زمانی  $n$ -ام است که با ضرب سرعت زاویه‌ای در اندازه گام زمانی به‌دست می‌آید. برای شرایط اولیه همان‌طور که در بخش‌های پیشین بیان شد زاویه در گام زمانی ابتدایی برای نوسانگر جاذب رفت و برگشتی موج برابر صفر است ( $\theta = 0$ ). در این مسئله برای موج‌ساز به آن دلیل که حرکت مشخص و دیکته شده دارد، تنها تابع حرکت آن مطابق آن‌چه در بخش‌های پیشین توضیح داده شد به عنوان ورودی شبیه‌سازی اعمال می‌شود و نیازی به اعمال و یا محاسبه نیروهای خارجی نیست.

در این تحقیق اثر کشش سطحی نیز در نظر گرفته شده است. این اثر با در نظر گرفتن نیروی کشش سطحی به عنوان نیروی حجمی که به سلول‌های مرزی میان آب و هوا وارد و در نظر گرفته می‌شود [19].

##### 5- شبکه‌بندی و گام زمانی

###### 1-5- شبکه‌بندی

در این مسئله از شبکه‌بندی ثابت و غیرمتحرک، همچنین در این بررسی از

<sup>2</sup> Drag

<sup>1</sup> Del Operator

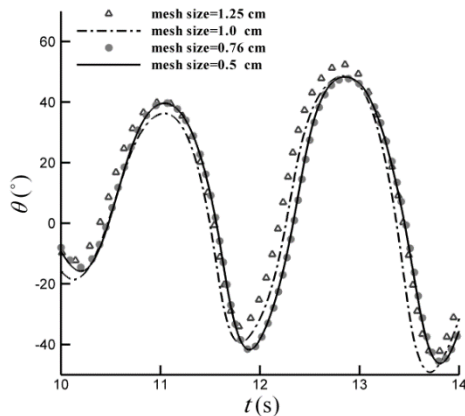


Fig. 4 Time variation of the OWSC angular position

شکل 4 استقلال شبکه و همگرایی در زاویه نوسانگر جاذب رفت و برگشتی موج

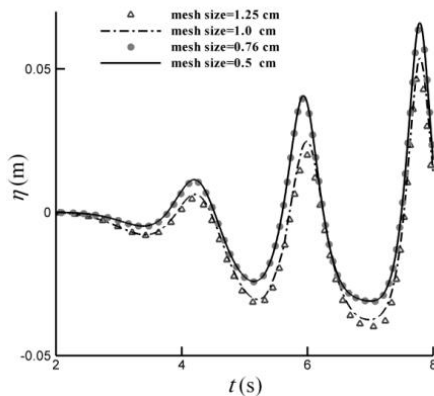


Fig. 5 Mesh independency for water surface elevation

شکل 5 استقلال شبکه و همگرایی در میزان بالا آمدگی سطح آب

## 6- بحث و نتایج

### 1-6- مقایسه و اعتبارسنجی

در این بخش هدف شبیه‌سازی تونل موج نمایش داده شده در شکل 1 است. شرایط شروع حرکت موج‌ساز در بخش‌های پیشین توضیح داده شده است. در این پژوهش دوره نوسان (T) 1.9 ثانیه در نظر گرفته شده است. دوره نوسان موج تولیدی با دوره نوسان موج‌ساز برابر است و هیچ‌گونه نیروی فنی یا سیستم جذب قدرت به نوسانگر جاذب رفت و برگشتی موج وارد نمی‌شود. در این شرایط پدیده به هم‌کوفتن در اثر امواج تیز به صورت متناوب رخ می‌دهد. شکل‌های 6 و 7 نمودار ارتفاع آب نسبت به سطح اولیه را برای دو نقطه در تونل موج نشان می‌دهند. در شکل‌های 6 و 7 مقایسه میان داده‌های تجربی و عددی وی و همکاران [12] و نتایج عددی شبیه‌سازی پژوهش حاضر انجام شده است. همان‌طور که از شکل‌های 6 و 7 پیداست نتایج حاصل از این شبیه‌سازی نسبت به نتایج عددی وی و همکاران [12] که با شبکه متحرک انجام شده به نتایج تجربی نزدیک‌تر است.

در پژوهش وی و همکاران [12] ذکر شده که پارامترهای عمومی حرکت نوسانگر جاذب رفت و برگشتی موج در اندازه شبکه‌بندی متحرک مستطیلی، به اندازه  $\Delta x = 1.0$  cm و  $\Delta y = 3.4$  cm در تونل موج و اندازه  $\Delta d = 0.46$  cm بر سطح جامد به همگرایی می‌رسد. در آن پژوهش بیان شده که به دلیل آن‌که به هم‌کوفتن پدیده‌ای محلی است، همگرایی برای به‌دست آوردن حداکثر فشار محلی محاسبه نشده و برای دقت بیشتر از شبکه‌بندی متحرک

شبکه‌بندی مربعی استفاده شده که در تمام حوزه حل یکسان است.

در بررسی‌های انجام‌شده در پژوهش حاضر حرکت نوسانگر جاذب رفت و برگشتی موج و پارامترهای موج تولید شده مانند ارتفاع، در شبکه ثابت و غیرمتحرک مربعی با اندازه ضلع  $\Delta x = \Delta y = 0.76$  cm به همگرایی می‌رسد. وضوح تصاویر شبیه‌سازی با شبکه با اندازه ضلع  $\Delta x = \Delta y = 0.5$  cm در پدیده به هم‌کوفتن بیشتر است؛ بنابراین در این شبیه‌سازی از شبکه‌بندی ثابت و غیرمتحرک مربعی با اندازه ضلع  $\Delta x = \Delta y = 0.5$  cm استفاده شده است. شکل 3 تصویر این شبکه ثابت برای بخشی از حوزه حل که در آن هر سه فاز مایع، جامد و گاز وجود دارد را نشان می‌دهد. شکل‌های 4 و 5 نشان‌دهنده همگرایی نتایج شبیه‌سازی برای اندازه‌های مختلف شبکه هستند. شکل 4 همگرایی نتایج مربوط به زاویه نوسانگر جاذب رفت و برگشتی و شکل 5 نتایج مربوط به همگرایی ارتفاع سطح آب نسبت به سطح اولیه را نمایش می‌دهند.

### 5-2- گام زمانی

با توجه به این‌که جملات جابه‌جایی به صورت صریح در معادلات اعمال شده حل معادلات دارای محدودیت گام زمانی است. مقدار اندازه حرکت زاویه‌ای نباید در هر گام زمانی بیشتر از یک سلول محاسباتی جابه‌جا شود. حداکثر عدد کورانت<sup>1</sup> باید یک باشد که سبب محدود شدن اندازه گام زمانی به صورت رابطه (23) می‌شود.

$$\max \left[ \frac{|u_{ij}| \delta t}{\Delta x}, \frac{|v_{ij}| \delta t}{\Delta y} \right] < \text{Courant Number} \quad (23)$$

در این پژوهش عدد کورانت برابر با 0.3 در نظر گرفته شده است [27]. این شرط برای تمامی سلول‌های محاسباتی و در هر گام زمانی اعمال می‌شود. در رابطه بالا  $u_{ij}$  و  $v_{ij}$  به ترتیب مؤلفه افقی و عمودی بردار سرعت در سلول مورد نظر است. همچنین استفاده از روش صریح برای اعمال اثر نیروی کشش سطحی بر معادلات، زمانی پایدار است که گام زمانی شرط رابطه (24) را ارضاء کند [28].

$$\delta t < \sqrt{\frac{\rho}{2\pi\sigma}} \min[(\Delta x)^{3/2}, (\Delta y)^{3/2}] \quad (24)$$

در این رابطه  $\sigma$  ضریب کشش سطحی آب است. گام زمانی علاوه بر این‌که باید دو شرط فوق را ارضاء کند باید از مقدار یک صدم دوره موج تولیدی کمتر باشد ( $\delta t < 0.01T$ ) [19]. پس برای تعیین گام زمانی باید هر سه شرط بالا ارضاء شود.

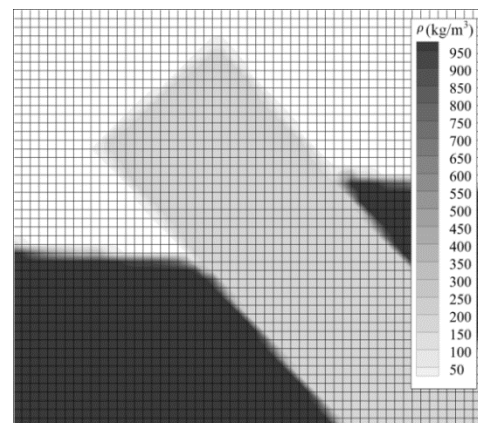


Fig. 3 Grid resolution and density distribution

شکل 3 شبکه‌بندی و توزیع چگالی در حوزه حل

<sup>1</sup> Courant Number



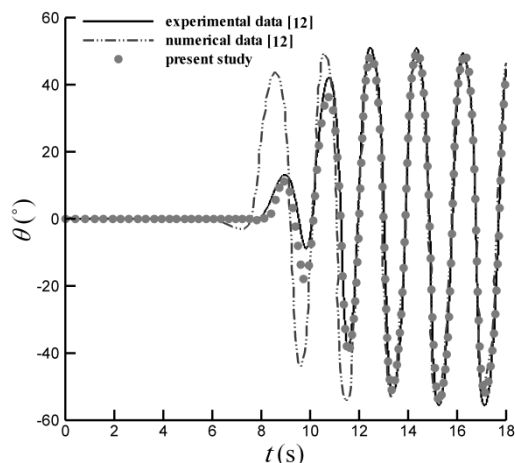


Fig. 8 Angle of rotation for OWS

شکل 8 زاویه نوسانگر جاذب رفت و برگشتی موج

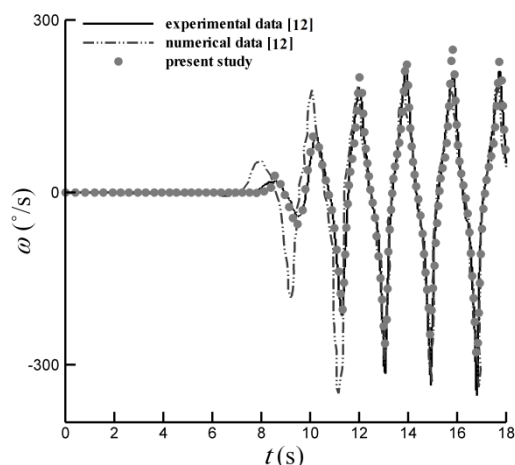


Fig. 9 The OWS angular velocity

شکل 9 سرعت زاویه‌ای نوسانگر جاذب رفت و برگشتی موج

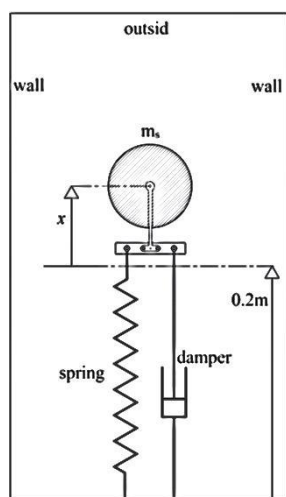


Fig. 10 Schematics of described spring and damper

شکل 10 تصویر شماتیک سیستم فنر و میراگر بررسی شده

تحلیلی می‌تواند درستی روش اعمال نیروی به‌کار رفته در این پژوهش را نشان دهد. نوسان پارامتر میرایی نسبی در این حرکت به صورت  $\zeta$  تعریف می‌شود که در آن  $C_{cr}$  میرایی بحرانی است که به صورت

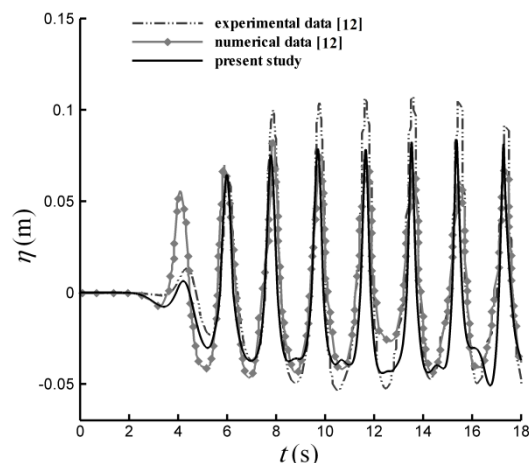


Fig. 6 Water surface elevation in 6.18m from left side wall

شکل 6 میزان بالآمدگی سطح آب در 6.18m از دیواره سمت چپ

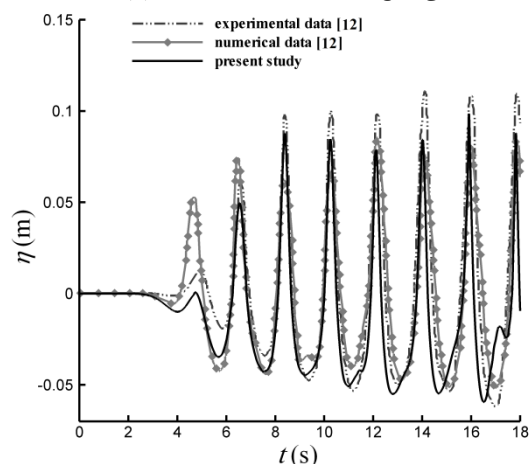


Fig. 7 Water surface elevation in 7.08m from left side wall

شکل 7 میزان بالا آمدگی سطح آب در 7.08m از دیواره سمت چپ

مربعی با اندازه  $\Delta x = \Delta y = 0.5 \text{ cm}$  در تونل موج و  $\Delta d = 0.23 \text{ cm}$  سطح جامد استفاده شده است.

پدیده به‌هم‌کوفتن در این اندازه شبکه رخ می‌دهد و این پدیده قابل توضیح است. با این توضیح و در نظر گرفتن اندازه شبکه‌بندی مربعی و ثابت به‌کار رفته در پژوهش حاضر (با اندازه ضلع  $\Delta x = \Delta y = 0.5 \text{ cm}$ )، قابلیت این روش در شبیه‌سازی موج تولیدی حتی در شرایط تولید امواج تیز (در آن‌ها اثرات غیرخطی بیشتر است) بیشتر آشکار می‌شود. شکل 8 زاویه نوسانگر جاذب رفت و برگشتی را نسبت به خط عمود نشان می‌دهد.

در شکل 8 میان نتایج عددی و تجربی پژوهش وی و همکاران [12] با نتایج این شبیه‌سازی مقایسه شده است که از نظر دقت مشابه روش شبکه مش متحرک و از دقت بالایی برخوردار است. شکل 9 سرعت زاویه‌ای نوسانگر جاذب رفت و برگشتی موج را نشان می‌دهد. مقایسه میان نتایج تجربی و عددی در این شکل حاکی از صحت شبیه‌سازی است. برای اعتبارسنجی روش اعمال نیروی خارجی یک جسم جامد به جرم  $(m_s)$  که به یک فنر خطی و یک میراگر هیدرولیکی متصل، شبیه‌سازی شده است. این سیستم بررسی شده در محفظه‌ای که بالای آن به هوای اتمسفریک باز است نوسان می‌کند. تصویر شماتیک این سیستم در شکل 10 آمده است. حرکت نوسانی این نوسانگر تحت اثر دو نیروی خارجی فنر و میراگر است. شبیه‌سازی عددی این سیستم با روش به‌کار رفته در این پژوهش و مقایسه نتایج حاصل با نتایج

ضریب سیستم جذب قدرت و ارتفاع موج نشان می‌دهد. ضریب سیستم جذب قدرت بهینه با افزایش ارتفاع موج افزایش می‌یابد. شکل 15 ضریب جذب نوسانگر جاذب رفت و برگشتی موج را نسبت به ارتفاع موج و ضریب سیستم جذب قدرت نمایش می‌دهد. برای محاسبه ضریب جذب از رابطه (25) استفاده می‌شود.

$$CF = \frac{E_{\text{absorbed}}}{E_{\text{wave}}} \quad (25)$$

در آن  $CF^1$  ضریب جذب و  $E_{\text{absorbed}}$  انرژی جذب شده توسط سیستم جذب قدرت است.  $E_{\text{wave}}$  نیز مقدار انرژی عبوری توسط موج از مقطع تونل موج در نقطه اتصال نوسانگر جاذب رفت و برگشتی موج است و این دو انرژی از روابط (27,26) تعیین می‌شوند.

$$E_{\text{absorbed}} = \int C_{\text{PTO}} \dot{\theta}^2 \cdot dt \quad (26)$$

$$E_{\text{wave}} = \int_0^t \int_0^\eta \rho u \left( 0.5(u^2 + v^2) + g \left( z - \frac{h}{2} \right) \right) f_{\text{liq}} \cdot dz \cdot dt \quad (27)$$

که  $u$  و  $v$  به ترتیب اندازه مؤلفه افقی و مؤلفه عمودی بردار سرعت و  $\eta$  مقدار بالا آمدگی سطح آب<sup>2</sup> است.

رابطه (27) بر این اساس حاصل می‌شود که مجموع انرژی پتانسیل و جنبشی جرم عبوری از مقطع تونل موج نسبت به آب در حالت سکون محاسبه شده و با انتگرال گیری از آن تا زمان مورد نظر مقدار انرژی عبوری از مقطع تونل موج در طول بازه زمانی به دست می‌آید. شکل‌های 16 و 17 به ترتیب نشان‌دهنده زاویه و سرعت زاویه‌ای نوسانگر جاذب رفت و برگشتی موج در شرایط مختلف سیستم انتقال قدرت و حرکت آزاد است. براساس شکل 17 احتمال رخداد پدیده به هم کوفتن در این حالت به دلیل کاهش شدید سرعت زاویه‌ای در حالت جذب انرژی کاهش می‌یابد. همان‌طور که از این دو شکل معلوم است (به ویژه شکل 17) اعمال سیستم جذب قدرت حتی با میزان ضریب کم، مقادیر سرعت زاویه‌ای را به مقدار بسیار قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد. همان‌طور که در این پژوهش مشاهده شد و در بسیاری از منابع مانند پژوهش وی و همکاران [12] بیان شده، سرعت‌های زاویه‌ای بالا عامل اصلی پدیده به هم کوفتن نوسانگر جاذب رفت و برگشتی موج است و با اعمال مقادیر بسیار کم سیستم جذب قدرت هم احتمال رویداد به هم کوفتن بسیار کاهش می‌یابد. با مشاهده شکل 17 و نمودارهای مختلف آن برای انواع ضرایب سیستم جذب قدرت مشخص است که با افزایش ضریب سیستم جذب قدرت با این‌که سرعت‌های زاویه‌ای کاهش می‌یابد، ولی شیب کاهش آن کم می‌شود. با افزایش ضریب سیستم جذب قدرت با این‌که انرژی جذب شده و ضریب جذب افزایش می‌یابد، اما در زمینه کاهش احتمال رویداد پدیده به هم کوفتن اثرش کم می‌شود. در شرایط امواج شدید (در آن حالت پدیده به هم کوفتن رخ می‌دهد) با افزایش ضریب سیستم جذب قدرت، مقادیر زیاد نیرو به نوسانگر جاذب رفت و برگشتی موج و مخصوصاً به لولا و پایه آن وارد می‌شود. حذف سیستم جذب قدرت در شرایط امواج شدید هم موجب افزایش احتمال به هم کوفتن می‌شود که تنش‌های بسیار زیادی به بدنه نوسانگر جاذب رفت و برگشتی موج وارد می‌شود. در شرایط امواج شدید به جای حذف سیستم جذب قدرت، با قرار دادن ضریب سیستم جذب قدرت در مقادیر پایین می‌توان جلوی پدیده به هم کوفتن را تا حد زیادی گرفته و از اعمال تنش‌های بالا به لولا و پایه و بدنه نوسانگر جاذب رفت و برگشتی موج اجتناب کرد.

$C_{\text{cr}} = \sqrt{m_s K_s}$  تعریف می‌شود [29].  $K_s$  ثابت فنر خطی است. جزئیات بیشتر در مرجع [29] ارائه شده است. شکل 11 مقایسه نتایج تحلیلی و شبیه‌سازی که حاکی از دقت مناسب روش اعمال نیروهای خارجی است.

## 2-6- پدیده به هم کوفتن

با این شبیه‌سازی پدیده به هم کوفتن نیز قابل بررسی است. این پدیده در مدت زمانی بسیار کوتاه رخ می‌دهد و برای شبیه‌سازی آن نیاز است تا دقت روش عددی به کار رفته بالا باشد. شکل 12 تصاویر مختلف در یک بازه زمانی بسیار کوتاه (حدود 0.72 ثانیه) را نشان می‌دهد که در این بازه پدیده به هم کوفتن رخ می‌دهد. در شکل 12 هم تصاویر تجربی و عددی پژوهش وی و همکاران [12] و هم تصاویر حاصل از پژوهش حاضر برای نمایش پدیده به هم کوفتن قابل مشاهده است. ابتدا در اثر موج ورودی نوسانگر جاذب رفت و برگشتی موج به سمت ساحل می‌رود (شکل a-12) و پس از عبور موج، نوسانگر جاذب رفت و برگشتی موج در اثر نیروی شناوری به سمت دریا شتاب می‌گیرد (شکل b-12 و c-12) و بدلیل اختلاف سطح آب در دو طرف نوسانگر جاذب رفت و برگشتی موج (شکل d-12) شتاب مضاعف به سمت دریا پیدا می‌کند و با شدت به آب برخورد می‌کند (شکل e-12 تا g-12). این فرآیند پدیده به هم کوفتن نوسانگر جاذب رفت و برگشتی موج است. تصاویری از تمام حوزه حل در زمان‌های مختلف در شکل 13 آمده که در زمان 15 ثانیه پدیده به هم کوفتن قابل مشاهده است.

## 3-6- جذب انرژی و ضریب جذب

در این بخش به بررسی مقدار جذب انرژی توسط نوسانگر جاذب رفت و برگشتی موج و ضریب جذب آن پرداخته می‌شود. در بخش‌های پیشین عملکرد نوسانگر جاذب رفت و برگشتی موج به صورت آزاد (بدون اعمال نیروی سیستم انتقال قدرت) بود، ولی در این بخش با اعمال گشتاور از طریق سیستم جذب قدرت شرایط جذب انرژی شبیه‌سازی شده است. در این بخش نیز فرض بر آن است که دوره نوسان 1.9 ثانیه و ارتفاع سطح آب در حالت سکون 0.305 متر است. شرایط عملکرد موج‌ساز مشابه شرایط بخش‌های پیشین است. شکل 14 نمودار مقدار انرژی جذب شده بر واحد طول نوسانگر جاذب رفت و برگشتی موج در 20 ثانیه عملکرد موج‌ساز را نسبت به

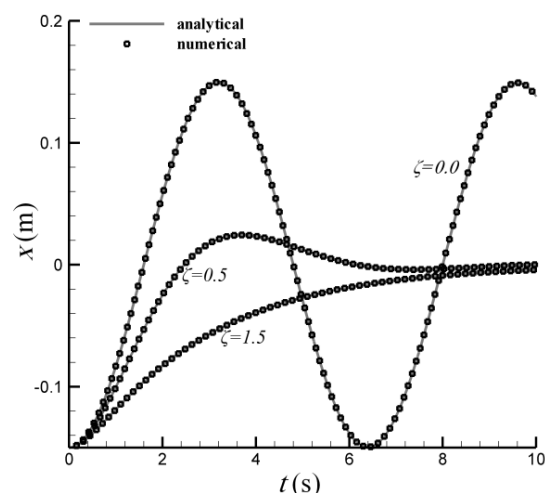


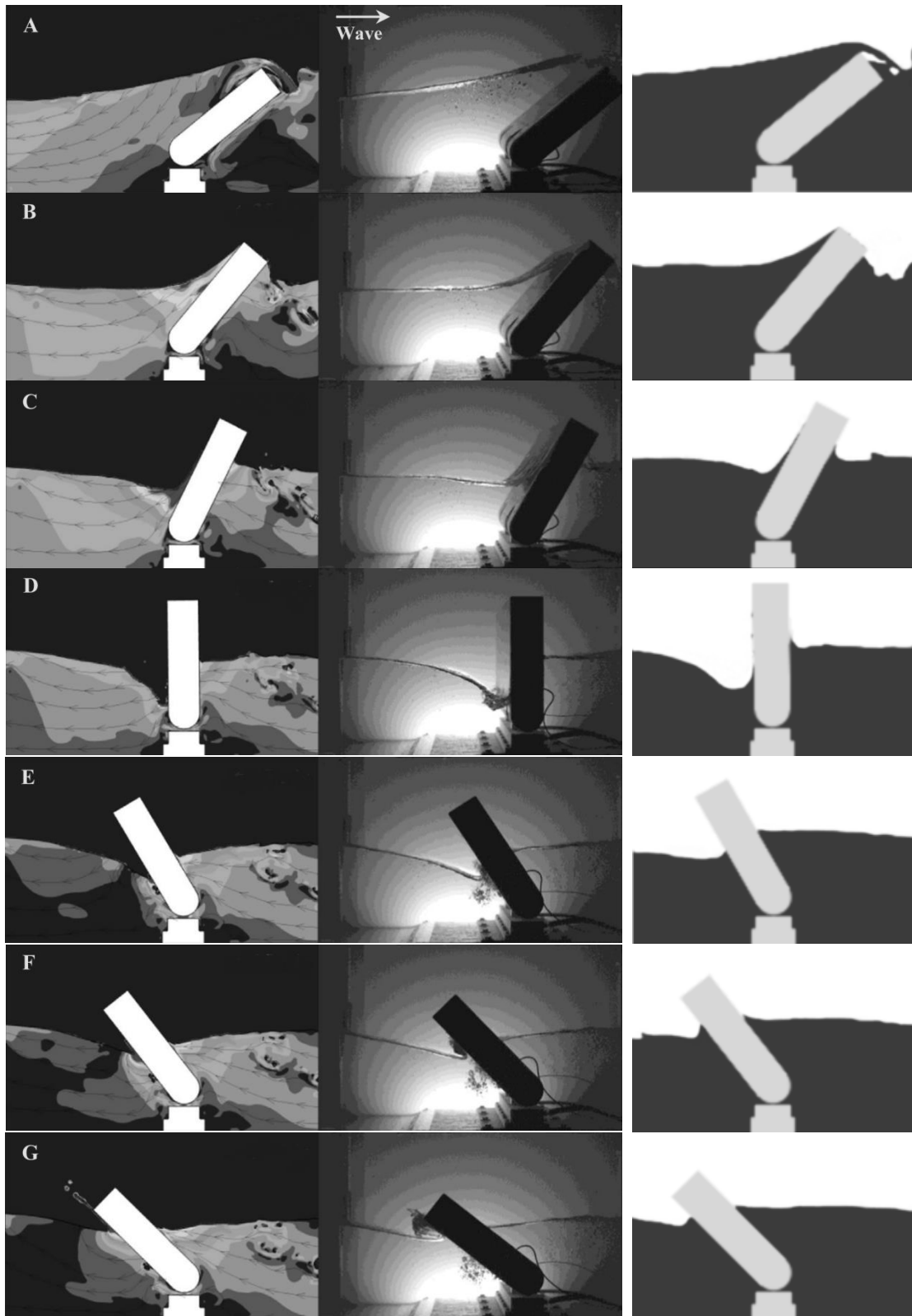
Fig. 11 Comparison of numerical and theoretical results for the described oscillating system

شکل 11 داده‌های عددی و داده‌های تئوری برای سیستم نوسانی بررسی شده

<sup>1</sup> Capture Factor

<sup>2</sup> Water Surface Elevation





**Fig. 12** Slamming phenomenon in present study (right), numerical (left) and experimental (middle) study of Wei et al. [12]

شکل 12 مقایسه کیفی نتایج مربوط به پدیده به هم کوفتن از پژوهش حاضر (راست) و نتایج عددی (چپ) و تجربی (وسط) پژوهش وی و همکاران [12]

#### 7- نتیجه گیری

در این پژوهش از روشی جدید برای شبیه سازی نوسانگر جاذب رفت و برگشتی موج استفاده شده است. اعتبار این مدل در شرایط سخت (امواج تیز و حرکت نوسانگر جاذب رفت و برگشتی با سرعت و نیروهای زیاد) مورد

بررسی قرار گرفت که در همه موارد دقت نتایج قابل قبول بوده و در حد نتایج شبیه سازی با کسر حجمی سیال و شبکه بندی متحرک است. حتی در مواردی مانند میزان بالا آمدگی سطح آب دقت آن از روش کسر حجمی سیال با شبکه بندی متحرک بالاتر است. این روش بر مبنای روش کسر

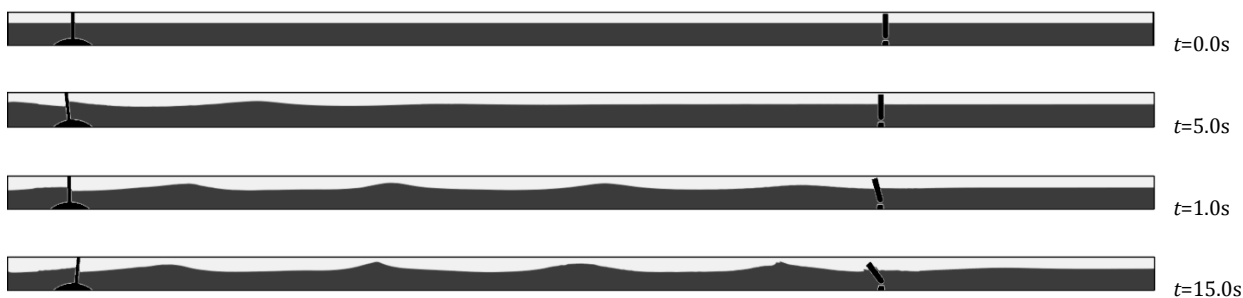


Fig. 13 Some figures of whole of the domain in several different times

شکل 13 چند تصویر از کل حوزه حل در چند زمان متفاوت

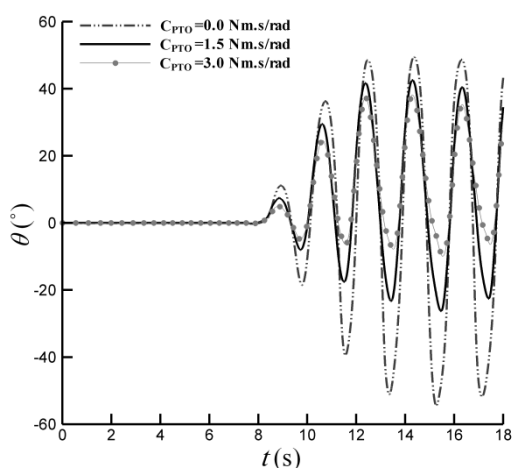


Fig. 16 Angle of the OWSC for different PTO systems

شکل 16 زاویه نوسانگر جاذب رفت و برگشتی موج برای ضرایب مختلف سیستم جذب قدرت

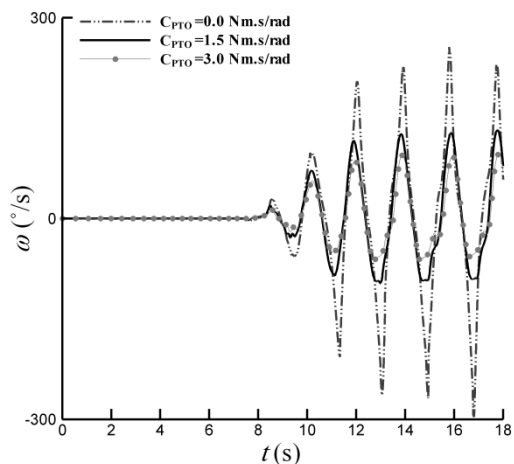


Fig. 17 Angular velocity of the OWSC for different PTO systems

شکل 17 سرعت زاویه‌ای نوسانگر جاذب رفت و برگشتی موج برای ضرایب مختلف سیستم جذب قدرت

• سهولت شبیه‌سازی هندسه‌های مختلف نوسانگر جاذب رفت و برگشتی موج

همچنین اثر شرایط جذب انرژی از نوسانگر جاذب رفت و برگشتی موج بر مبنای این روش مورد بررسی قرار گرفت که نتایج زیر حاصل شد.

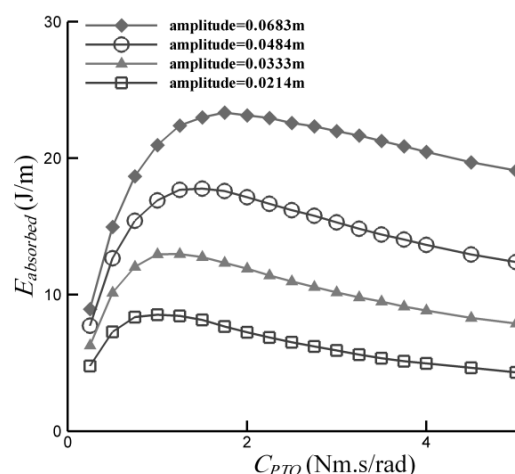


Fig. 14 Total absorbed energy at t=20s

شکل 14 انرژی کل جذب شده در زمان 20 ثانیه

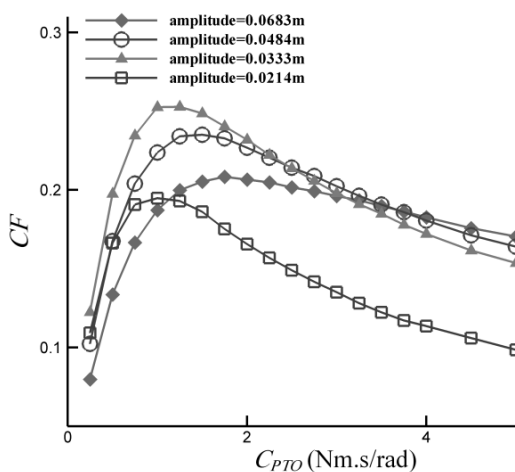


Fig. 15 Capture factor of OWSC

شکل 15 نمودار ضریب جذب نوسانگر جاذب رفت و برگشتی موج

حجمی سیال با شبکه‌بندی ثابت و روش یادشده از مزیت دقت روش کسر حجمی سیال برخوردار است، در حالی که مشکلات شبکه‌بندی متحرک برای محاسبات را ندارد. از مزایای این روش شبیه‌سازی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- سهولت آماده‌سازی محاسبات
- سرعت بالای محاسبات
- دقت بالای نتایج

$\Delta x$	طول شبکه
$\Delta y$	عرض شبکه
$\zeta$	میرایی نسبی
$\eta$	میزان بالا آمدگی سطح آب نسبت به حالت سکون
$\theta$	زاویه نسبت به خط عمود بر افق
$\lambda$	طول موج
$\mu$	ویسکوزیته متحرک
$\rho$	چگالی
$\sigma$	ضریب کشش سطحی
$\tau$	تنش
$\omega$	سرعت زاویه‌ای
$V$	حجم
	بالانویس‌ها
$\rightarrow$	بردار
$\leftrightarrow$	تانسور
$n$	گام زمانی n-ام
$n + 1$	گام زمانی n+1-ام
$n + 1/3$	اولین مرحله در هر گام زمانی
$n + 2/3$	دومین مرحله در هر گام زمانی
$T$	ترانهاده

- برای یک موج خاص یک ضریب سیستم جذب قدرت وجود دارد که حالت بهینه دارد که در آن مقدار ضریب جذب در مقدار بیشینه است و با افزایش یا کاهش ضریب سیستم جذب قدرت، ضریب جذب کاهش می‌یابد.
- در دوره نوسان خاص با افزایش ارتفاع موج این ضریب سیستم جذب قدرت بهینه افزایش می‌یابد.
- مورد بالا خود نشان‌دهنده اثر قابل توجه پارامترهای غیرخطی است. در صورت ناچیز بودن اثرات غیرخطی مقدار ضریب سیستم جذب قدرت بهینه با ثابت نگه داشتن دوره نوسان و طول موج باید ثابت باشد، ولی با ثابت نگه داشتن این پارامترها و تغییر ارتفاع موج، مقدار ضریب سیستم جذب قدرت بهینه تغییر می‌کند.
- در دوره نوسان خاص با افزایش و یا کاهش ارتفاع موج از یک مقدار مشخص حداکثر ضریب جذب کاهش می‌یابد. برای نمونه با افزایش ارتفاع موج از 0.0666m به 0.1366m حداکثر ضریب جذب از حدود 0.25 تا کمتر از 0.21 کاهش می‌یابد. با کاهش ارتفاع موج از 0.0666m به 0.0214m حداکثر ضریب جذب از 0.25 به کمتر از 0.2 کاهش می‌یابد.
- با جذب انرژی از نوسانگر جاذب رفت و برگشتی موج، سرعت زاویه‌ای به طور قابل ملاحظه‌ای کم می‌شود و احتمال رویداد پدیده به هم کوفتن کاهش می‌یابد.

## 8- فهرست علائم

$a$	دامنه
$C$	ضریب میرایی
$CF$	ضریب جذب
$E$	انرژی
$f$	کسر حجمی
$F$	نیرو
$g$	شتاب جاذبه
$h$	ارتفاع آب در حالت سکون
$I$	لختی دورانی
$k$	عدد موج
$K$	ثابت فنر
$l$	شعاع دایره پایین موج‌ساز
$m$	جرم
$M$	گشتاور
$\max$	تابع بیشینه
$\min$	تابع کمینه
$P$	فشار
$r$	شعاع
$\text{Re}$	تابع عدد حقیقی
$t$	زمان
$T$	دوره نوسان
$u$	مؤلفه افقی بردار سرعت
$v$	مؤلفه عمودی بردار سرعت
	علائم یونانی
$\delta t$	گام زمانی
$\Delta d$	طول شبکه مش متحرک روی سطح جسم جامد

## 9- مراجع

- [1] S. H. Salter, Wave power, *Nature*, Vol. 249, No. 5459, pp. 720-724, 1974.
- [2] M. Folley, T. Whittaker, A. Henry, The effect of water depth on the performance of a small surging wave energy converter, *Ocean Engineering*, Vol. 34, No. 8, pp. 1265-1274, 2007.
- [3] T. Whittaker, M. Folley, Nearshore oscillating wave surge converters and the development of Oyster, *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, Vol. 370, No. 1959, pp. 345-364, 2012.
- [4] T. Whittaker, D. Collier, M. Folley, M. Osterried, A. Henry, M. Crowley, The development of Oyster—a shallow water surging wave energy converter, *Proceedings of the 7th European Wave and Tidal Energy Conference*, Porto, Portugal, pp. 11-14, 2007.

- Engineers and Scientists*, pp. 170-212, world scientific publishing Co Inc, 1991.
- [17] P. K. Kundu, I. M. Cohen, *Fluid Mechanics 4th*, Elsevier, pp. 1-277, Oxford, 2008.
- [18] C. W. Hirt, B. D. Nichols, Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries, *Computational Physics*, Vol. 39, No. 1, pp. 201-225, 1981.
- [19] M. Anbarsooz, M. Passandideh-Fard, M. Moghiman, Fully nonlinear viscous wave generation in numerical wave tanks, *Ocean Engineering*, Vol. 59, No. 0, pp. 73-85, 2013.
- [20] R. Glowinski, T. W. Pan, T. I. Hesla, D. D. Joseph, A distributed Lagrange multiplier/fictitious domain method for particulate flows, *Multiphase Flow*, Vol. 25, No. 5, pp. 755-794, 1999.
- [21] R. Glowinski, T. Pan, T. Hesla, D. Joseph, J. Periaux, A fictitious domain approach to the direct numerical simulation of incompressible viscous flow past moving rigid bodies: Application to particulate flow, *Computational Physics*, Vol. 169, No. 2, pp. 363-426, 2001.
- [22] N. Patankar, A formulation for fast computations of rigid particulate flows, *Center for Turbulence Research Annual Research Briefs*, Vol. 2001, pp. 185-196, 2001.
- [23] N. A. Patankar, P. Singh, D. D. Joseph, R. Glowinski, T. W. Pan, A new formulation of the distributed Lagrange multiplier/fictitious domain method for particulate flows, *Multiphase Flow*, Vol. 26, No. 9, pp. 1509-1524, 2000.
- [24] N. Sharma, N. A. Patankar, A fast computation technique for the direct numerical simulation of rigid particulate flows, *Computational Physics*, Vol. 205, No. 2, pp. 439-457, 2005.
- [25] I. Mirzaei, M. Passandideh-Fard, Modeling free surface flows in presence of an arbitrary moving object, *Multiphase Flow*, Vol. 39, No. 0, pp. 216-226, 2012.
- [26] F. Harlow, A. Amsden, Fluid dynamics: A LASL monograph, *Mathematical Solutions for Problems in Fluid Dynamics*, Los Alamos Scientific Laboratory report LA 4700, 1971.
- [27] M. Bussmann, *A Three-Dimensional Model of an Impacting Droplet*, Thesis, National Library of Canada=Bibliothèque nationale du Canada, 2000.
- [28] J. Brackbill, D. B. Kothe, C. Zemach, A continuum method for modeling surface tension, *Computational Physics*, Vol. 100, No. 2, pp. 335-354, 1992.
- [29] S. S. Rao, F. F. Yap, *Mechanical Vibrations*, pp. 40-174, Addison-Wesley New York, 1995.
- [5] M. Folley, T. Whittaker, J. Van't Hoff, The design of small seabed-mounted bottom-hinged wave energy converters, *Proceedings of the 7th European Wave and Tidal Energy Conference*, Porto, Portugal, Vol. 455, 2007.
- [6] E. Renzi, F. Dias, Hydrodynamics of the oscillating wave surge converter in the open ocean, *Mechanics-B/Fluids*, Vol. 41, No. 0, pp. 1-10, 2013.
- [7] A. Rafiee, F. Dias, Two-dimensional and three-dimensional simulation of wave interaction with an oscillating wave surge converter, *International workshop on water waves and floating bodies (IWWWFB)*, 2013.
- [8] S. Yeylaghi, B. Moa, P. Oshkai, B. Buckham, C. Crawford, ISPH modelling of an oscillating wave surge converter using an OpenMP-based parallel approach, *Ocean Engineering and Marine Energy*, Vol. 2, No. 3, pp. 301-312, 2016.
- [9] Y. Wei, A. Rafiee, B. Elsaesser, F. Dias, Numerical simulation of an oscillating wave surge converter, *Proceeding of ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, pp. V001T01A012-V001T01A012, American Society of Mechanical Engineers, 2013.
- [10] Y. Wei, A. Rafiee, A. Henry, F. Dias, Wave interaction with an oscillating wave surge converter, part I: Viscous effects, *Ocean Engineering*, Vol. 104, No. 0, pp. 185-203, 2015.
- [11] P. Schmitt, B. Elsaesser, on the use of OpenFOAM to model oscillating wave surge converters, *Ocean Engineering*, Vol. 108, No. 0, pp. 98-104, 2015.
- [12] Y. Wei, T. Abadie, A. Henry, F. Dias, Wave interaction with an oscillating wave surge converter, Part II: Slamming, *Ocean Engineering*, Vol. 113, No. 0, pp. 319-334, 2016.
- [13] T. Abadie, F. Dias, Numerical study of wave interaction with a modular oscillating wave surge converter, *Proceeding of The 26th International Ocean and Polar Engineering Conference*, International Society of Offshore and Polar Engineers, 2016.
- [14] M. Sasson, S. Chai, G. Beck, Y. Jin, J. Rafieshahraki, A comparison between Smoothed-Particle Hydrodynamics and RANS Volume of Fluid method in modelling slamming, *Ocean Engineering and Science*, Vol. 1, No. 2, pp. 119-128, 2016.
- [15] M. Saadati Nasab, M. Anbarsooz, M. Passandideh-Fard, Numerical investigation of fully nonlinear irregular wave generation using a Flap-Type wavemaker, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 11, pp. 12-22, 2016. (in Persian فارسی)
- [16] R. G. Dean, R. A. Dalrymple, *Water Wave Mechanics for*