

# اندرکنش دینامیکی موج و موج‌شکن کیسونی با در نظر گرفتن جابجایی‌های لغزشی بزرگ در مختصات لاگرانژی بدون المان

امیر طاهرخانی<sup>۱</sup>، حسن اکبری<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد گرایش سازه‌های دریایی دانشگاه تربیت مدرس  
<sup>۲</sup> استادیار گروه مهندسی عمران گرایش سازه‌های دریایی دانشگاه تربیت مدرس؛ Akbari.h@modares.ac.ir

| اطلاعات مقاله   | چکیده  |
|---|--|
| ناریخچه مقاله:<br>تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۹/۱۴<br>تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۹/۰۵                   | بررسی عکس‌العمل موج‌شکن‌ها در برابر امواج حدى، امری مهم در مهندسی و طراحی سازه‌های دریایی است. در تحقیق حاضر، عملکرد موج‌شکن کیسونی در اندرکنش با امواج مطالعه شده است. در این راستا، روشی موثر و نو برای اعمال اصطکاک استاتیکی و دینامیکی در مرز لغزشی کیسون معرفی شده و با اعمال آن در روش هیدرودینامیک ذرات هموار و اصلاح شرایط مرزی، رفتار دینامیکی موج‌شکن کیسونی شبیه‌سازی شده است. تطابق نتایج مدل ارائه شده با مقادیر آزمایشگاهی و مدل عددی مرتبط، نشان دهنده توانمندی این مدل در شبیه‌سازی مناسب نیروی وارد بر کیسون و جابه‌جایی افقی آن است. همچنین، در این تحقیق مقایسه‌ای بین سه شرط مرز صلب مورد استفاده در روش عددی هیدرودینامیک ذرات هموار انجام گرفته که این مقایسات نشان می‌دهد شرط مرز صلب دینامیکی علاوه بر کاهش زمان محاسباتی، توانایی خوبی در شبیه‌سازی مسائل اندرکنش جسم صلب و سیال را دارد. |
| کلمات کلیدی:<br>موج‌شکن کیسونی<br>شرط مرزی اصلاح‌شده<br>هیدرودینامیک ذرات هموار<br>شرط مرز دینامیکی |  |

## Wave Interaction with Caisson Breakwater Considering Large Sliding Movements in Mesh-Free Lagrangian Coordinate

Amir Taherkhani<sup>1</sup>, Hassan Akbari<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> MSc student in marine structures, Tarbiat Modares University

<sup>2</sup> Assistant Professor at Tarbiat Modares University, email address: [Akbari.h@modares.ac.ir](mailto:Akbari.h@modares.ac.ir)

### ARTICLE INFO

#### Article History:

Received: 5 Dec. 2017

Accepted: 26 Nov. 2018

#### Keywords:

Caisson breakwater  
Modified boundary condition  
Smoothed Particle Hydrodynamic  
Dynamic boundary condition

### ABSTRACT

An important point in design of coastal structures is their structural response to design waves. In this study, wave interaction with a caisson breakwater is studied numerically by means of a modified SPH method. An efficient method is introduced to take into account the static and dynamic sliding forces at the interface boundary beneath the caisson. After a validation test, a time history analysis is done to investigate the structural response of a caisson breakwater against waves. The results are compared with experimental data as well as with similar numerical outcomes. There are good compatibilities between the experiments and the predicted values regarding both caisson movements and applied wave forces. In addition, three different solid boundary conditions are applied and it is concluded that utilizing a dynamic boundary condition is computationally efficient and numerically appropriate for modeling the problems involve with solid-fluid interactions.

سنگی تشکیل می‌شوند و مودهای خرابی آن، شامل موارد مختلفی نظیر لغزش و دوران کیسون بتنی، آب‌شستگی و جابه‌جایی سنگ-های بزرگ بستر توده‌سنگی، خرابی دیوارهای روبرویی و آسیب‌های

### ۱- مقدمه

موج‌شکن‌های کیسونی سازه‌هایی برای محافظت از ساحل می‌باشند که عمدتاً از قرار گرفتن بلوک‌های عظیم بتنی بر روی بستر توده-

سازای اندرکنش موج و جسم صلب، اصلاح رویکرد اعمال نیروی اصطکاک بین کیسون و بستر نفوذناپذیر و در نهایت مقایسه سه شرط مرز صلب ذرات مجازی، نیروی تدافعی و شرط مرزی دینامیکی در مسئله اندرکنش سیال و جسم صلب می باشد. در این راستا در تحقیق حاضر، مدلی عددی توسعه یافته و نتایج مدل عددی توسعه یافته برای مسئله اندرکنش موج منظم و جسم صلب شناور در آب عمیق، با نتایج مدل عددی دیگری که با اعمال شرط مرز صلب ذرات مجازی<sup>۴</sup> توسعه یافته، مورد مقایسه قرار گرفته است و هم چنین نتایج مدل عددی تحقیق حاضر برای مسئله اندرکنش موج منظم و موج شکن کیسونی مستقر بر بستر نفوذناپذیر با در نظر گرفتن نیروی اصطکاک در محیط ساحلی، با نتایج مدل عددی SPH دیگری که با اعمال شرط مرز صلب نیروی تدافعی<sup>۵</sup> توسعه یافته، مقایسه شده است. در نهایت کارایی مدل توسعه یافته در تحقیق حاضر برای شبیه سازی اندرکنش سیال و جسم صلب در حالت امواج خطی و هم چنین نحوه اعمال نیروی اصطکاک در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته و سه روش اعمال شرط مرز صلب در روش SPH با یکدیگر مقایسه شده است.

در بخش ۲ فرمولاسیون روش عددی SPH و در بخش ۳ معادلات حاکم در مسئله ارائه شده است. در بخش ۴ شرایط مرزی که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته، توضیح داده شده است. در بخش ۵ نتایج مدل عددی بدون نیروی اصطکاک برای مسئله اندرکنش امواج منظم و جسم صلب شناور و هم چنین نتایج مدل عددی توسعه یافته با اعمال نیروی اصطکاک ارائه شده و با نتایج آزمایشگاهی و عددی مشابه، مقایسه شده است. در نهایت در بخش ۶ به نتیجه گیری از نتایج مدل عددی توسعه یافته و مقایسات انجام شده پرداخته شده است.

## ۲ - فرمولاسیون روش عددی هیدرودینامیک ذرات هموار

هیدرودینامیک ذرات هموار، روش لاگرانژی بدون شبکه ای با کاربرد فراوان در زمینه دینامیک محاسباتی سیالات است که در آن دامنه محاسباتی به ذرات گسسته ای تقسیم می شود. ذرات همسایه برای هر ذره به وسیله تابع وزنی به نام تابع کرنل<sup>۶</sup> یا هموارساز مشخص می شوند. تابع کرنل، تابعی از فاصله بی بعد بین ذرات،  $q = \frac{r}{h}$  می باشد که  $r$  فاصله بین دو ذره و  $h$  طول هموارساز<sup>۷</sup> تابع کرنل است. در تحقیق حاضر از تابع کرنل معرفی شده توسط Wendland [۱۲]، استفاده شده است.

در روش هیدرودینامیک ذرات هموار، مقدار یک کمیت در موقعیت مکانی خاص با توجه به همسایگی موقعیت مکانی مورد نظر، از رابطه زیر به دست می آید.

$$F(r_a) = \sum_b F(r_b) \frac{m_b}{\rho_b} W(r_a - r_b) \quad (1)$$

دیگر مقاطع بتنی کیسون و گسیختگی دایروی بستر توده سنگی می گردد. بطور کلی، می توان خرابی این سازه را وابسته به خرابی کیسون بتنی و یا خرابی وابسته به بستر توده سنگی در نظر گرفت [۱] که تحقیقات انجام شده بیشتر متمرکز بر موده های خرابی وابسته به کیسون بتنی بوده است. در این راستا Yuan-Zhan و همکاران [۲] در مطالعاتی آزمایشگاهی اندرکنش امواج منظم و کیسون بتنی مستقر بر روی بستر توده سنگی را مورد بررسی قرار داده و هم چنین با توسعه مدلی عددی این مسئله را شبیه سازی کرده اند. در مطالعات آزمایشگاهی دیگری که توسط Esteban و همکاران [۳] صورت گرفته، خرابی ناشی از لغزش افقی موج شکن کیسونی تحت برخورد با امواج منفرد مورد بررسی قرار گرفته است. مدل سازی عددی جابه جایی موج شکن مرکب دارای دو بخش مدل - سازی اندرکنش سیال با جسم صلب شناور و اعمال نیروی اصطکاک بین کیسون بتنی و بستر توده سنگی می باشد. اندرکنش جسم صلب شناور و سیال توسط محققینی مانند Panahi و همکاران [۴]، Kleefsman و همکاران [۵] و Hadzic و همکاران [۶] با استفاده از روش های عددی اویلری حجم سیال (VOF) و حجم محدود (FVM) مورد مطالعه قرار گرفته است.

Manenti و Panizzo [۷] با استفاده از روش عددی لاگرانژی هیدرودینامیک ذرات هموار و به کارگیری شرط مرز صلب ذرات مجازی یکی از مدل های آزمایشگاهی مربوط به اندرکنش جسم شناور صلب و امواج منظم در شرایط دور از ساحل، در تحقیق Ruol و Martinelli [۸] را شبیه سازی کرده اند. jian و همکاران [۹] در تحقیقی، از مدل تراکم ناپذیر توسعه یافته برای شبیه سازی برخورد جریان شکست سد با سازه صلب ثابت و متحرک استفاده کرده اند. هم چنین Rogers و همکاران [۱۰] با استفاده از روش عددی هیدرودینامیک ذرات هموار تراکم پذیر جزئی در نرم افزار SPHysics، مدلی عددی را برای شبیه سازی حرکت دوبعدی موج شکن کیسونی قرار گرفته بر روی بستر نفوذناپذیر در محیط ساحلی و با در نظر گرفتن شکست موج، توسعه داده اند. شرط مرزی صلب مورد استفاده برای شبیه سازی حرکت جسم صلب، شرط مرزی نیروی تدافعی معرفی شده توسط Kos و Monaghan [۱۱] می باشد. در این تحقیق نیروی اصطکاک بین کیسون بتنی و بستر غیرقابل نفوذ نیز شبیه سازی شده که با تعریف سرعت حدی<sup>۲</sup> این نیروی اصطکاک به سه قسمت نیروی اصطکاک استاتیکی، دینامیکی و میانی<sup>۳</sup> تقسیم شده است و متناسب با رابطه سرعت جسم صلب و سرعت حدی، نیروی اصطکاک از حالت استاتیکی به میانی و از میانی به دینامیکی تغییر می کند.

با توجه به مطالعات پیشین و اهمیت مسئله اندرکنش امواج با سازه های ساحلی در مهندسی سواحل، هدف تحقیق حاضر شبیه -

### ۳-۲- معادلات ناپویراستوکس

معادلات حاکم بر جریان سیال در این تحقیق معادلات شناخته شده ناپویراستوکس شامل پیوستگی و اندازه حرکت می باشد در روش هیدرودینامیک ذرات هموار تراکم پذیر جزئی، جرم ذرات در طول زمان شبیه سازی ثابت بوده و تنها چگالی ذرات تغییر می کند. تغییرات چگالی با حل معادله پیوستگی به صورت رابطه زیر نمایش داده شده است، به دست می آید.

$$\frac{d\rho_a}{dt} = \sum_b m_b \mathbf{v}_{ab} \cdot \nabla_a W_{ab} \quad (7)$$

Monaghan و [۱۳] Joe برای محاسبه فشار ذرات سیال از معادله حالت زیر استفاده کرده اند که مقدار فشار هر ذره را متناسب با چگالی آن محاسبه می کند.

$$P = b \left( \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right), \quad b = \frac{C_0^2 \rho_0}{\gamma} \quad (8)$$

در رابطه فوق  $\gamma = 7$  و  $\rho_0$  چگالی مینا که برای آب برابر با  $1000 \text{ kg/m}^3$  است و  $C_0$  سرعت صوت در چگالی مینا و  $10$  برابر حداکثر سرعت سیال در نظر گرفته می شود تا نوسانات چگالی کمتر از  $1\%$  باشد. همچنین با استفاده از لزجت مصنوعی<sup>۸</sup> معرفی شده توسط Monaghan و Joe [۱۴] رابطه منتموم به صورت زیر بازنویسی می شود.

$$\frac{d\mathbf{v}_a}{dt} = - \sum_b m_b \left( \frac{P_a + P_b}{\rho_a \rho_b} + \Pi_{ab} \right) \nabla_a W_{ab} + \mathbf{g} \quad (9)$$

که در رابطه فوق  $\Pi_{ab}$  لزجت مصنوعی می باشد که مقدار آن برابر است با:

$$\Pi_{ab} = \begin{cases} \frac{-\alpha \bar{c}_{ab} \mu_{ab}}{\bar{\rho}_{ab}} & \mathbf{v}_{ab} \cdot \mathbf{r}_{ab} < 0 \\ 0 & \mathbf{v}_{ab} \cdot \mathbf{r}_{ab} > 0 \end{cases} \quad (10)$$

در رابطه فوق  $\mathbf{r}_{ab} = \mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b$  و  $\mathbf{v}_{ab} = \mathbf{v}_a - \mathbf{v}_b$  هستند که  $\mathbf{r}_k$  و  $\mathbf{v}_k$  به ترتیب موقعیت و سرعت ذره مورد نظر می باشند.  $\bar{c}_{ab}$  سرعت متوسط صوت بین دو ذره است و  $\mu_{ab}$  از رابطه زیر محاسبه می گردد.

$$\mu_{ab} = \frac{h \mathbf{v}_{ab} \cdot \mathbf{r}_{ab}}{(r_{ab}^2 + \eta^2)}, \quad \eta^2 = 0.01 h^2 \quad (11)$$

مطابق Altomare و همکاران [۱۵] در این تحقیق از مقدار  $0.01$  برای  $\alpha$  استفاده شده است.

### ۴- شرایط مرزی

شکل ۱ نمای شماتیکی از دیباگرام آزاد نیروهای وارد بر مکعبی صلب بر روی بستر صلبی را نشان می دهد که در معرض برخورد با

که در این رابطه  $F(r_a)$  مقدار کمیت مورد نظر برای ذره  $a$ ،  $F(r_b)$  مقدار کمیت مورد نظر برای ذره  $b$ ،  $r_a$  و  $r_b$  به ترتیب موقعیت مکانی ذره  $a$  و  $b$  و  $m_b$  مقدار جرم ذره  $b$  و  $\rho_b$  مقدار چگالی این ذره است.

### ۳- معادلات حاکم

معادلات حاکم بر مسئله اندرکنش سیال و جسم صلب را می توان به دو قسمت معادلات حاکم بر حرکت جسم صلب و معادلات حاکم بر جریان سیال تقسیم کرد.

#### ۳-۱- معادلات حرکت جسم صلب

اگر جسم صلب دارای جرم  $M$ ، سرعت  $\vec{V}$ ، ممان اینرسی  $I$  و سرعت زاویه ای  $\vec{\Omega}$  باشد، با توجه به روابط (۲) و (۳) که معادلات دینامیک جسم صلب نیوتن را نشان می دهند، می توان حرکت جسم صلب را مورد بررسی قرار داد. لازم به ذکر است که در این تحقیق با توجه به بررسی لغزش کیسون، از معادله دوران صرف نظر شده و استفاده نمی گردد.

$$M \frac{d\vec{V}}{dt} = \sum_k m_k \vec{f}_k \quad (2)$$

$$I \frac{d\vec{\Omega}}{dt} = \sum_k m_k (\vec{r}_k - \vec{R}_0) \vec{f}_k \quad (3)$$

در روابط فوق  $m_k$  جرم هر ذره جسم صلب،  $\vec{f}_k$  نیروی وارد بر هر ذره جسم صلب از طرف ذرات سیال اطراف آن،  $\vec{r}_k$  موقعیت هر ذره جسم صلب و  $\vec{R}_0$  موقعیت مرکز جرم جسم صلب است. مقدار نیروی وارد بر هر ذره جسم صلب از طرف ذرات سیال اطراف آن،  $\vec{f}_k$  از رابطه زیر محاسبه می شود.

$$\vec{f}_k = \sum_a \vec{f}_{ka} \quad (4)$$

که در رابطه فوق  $\vec{f}_{ka}$  مقدار نیروی واحد جرم وارد بر ذره جسم صلب  $k$  از طرف ذره سیال  $a$  می باشد و براساس قانون سوم حرکت نیوتن، مقدار نیروی وارد بر ذره جسم صلب از طرف ذره سیال برابر با رابطه زیر محاسبه می شود.

$$m_k \vec{f}_{ka} = -m_a \vec{f}_{ak} \quad (5)$$

در نهایت با حل معادلات حرکت مقدار  $\vec{V}$  و  $\vec{\Omega}$  برای جسم صلب در هر گام زمانی محاسبه شده و سرعت حرکت هر ذره جسم صلب،  $\vec{u}_k$  مطابق زیر به دست آمده و با انتگرال گیری از این رابطه در زمان ذرات جسم صلب حرکت می کنند.

$$\vec{u}_k = \vec{V} + \vec{\Omega} (\vec{r}_k - \vec{R}_0) \quad (6)$$

که مقدار نیروی محرک برابر مقدار نیروی اصطکاک استاتیکی شود جسم شروع به حرکت می کند و پس از آن، حرکت از حالت استاتیکی به حالت دینامیکی تغییر می کند. مقدار ضریب اصطکاک استاتیکی همواره بیشتر از ضریب اصطکاک دینامیکی می باشد [۱۹].

یکی دیگر از رویکردهای در نظر گرفتن انتقال نیروی اصطکاک از حالت استاتیکی به حالت دینامیکی، انتخاب سرعتی حدی می باشد [۲۰]. Rogers و همکاران [۱۰] در مدل عددی خود برای شبیه سازی حرکت کیسون متحرک بر اثر اندرکنش با امواج منظم از این رویکرد استفاده کرده اند و برای جلوگیری از ایجاد خطا در مدل و حرکات غیرفیزیکی جسم، حالتی انتقالی را بین دو حالت استاتیکی و دینامیکی در نظر گرفته اند. با توجه به این که روش دقیقی برای محاسبه سرعت حدی در اعمال نیروی اصطکاک ارائه نشده است در تحقیق حاضر از سرعت حدی برای اعمال نیروی اصطکاک استفاده نشده است و نیروی اصطکاک بین کیسون بتنی و بستر،  $f_{friction}$ ، از رابطه زیر محاسبه می شود.

$$f_{friction} = \mu * F_z$$

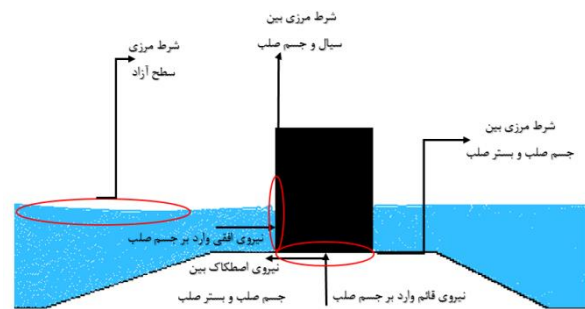
$$\rightarrow \begin{cases} f_{friction,static} = \mu_{static} * F_z \\ f_{friction,dynamic} = \mu_{dynamic} * F_z \end{cases} \quad (12)$$

که در رابطه فوق  $\mu$  ضریب اصطکاک استاتیکی یا دینامیکی و  $F_z$  نیروی قائم وارد بر کیسون بتنی می باشد. ضریب اصطکاک دینامیکی بر پایه مطالعات آزمایشگاهی Yuan – Zhan و همکاران [۲] برابر با  $0.5$  ( $\mu_{dynamic} = 0.5$ ) و ضریب اصطکاک استاتیکی متناسب با مقدار پیشنهاد شده توسط Tanimoto و Takahashi [۲۱] برابر با  $0.6$  ( $\mu_{static} = 0.6$ ) در نظر گرفته شده است. همان طور که در قسمت های قبل توضیح داده شد، در تحقیقات پیشین این روند اعمال نیروی اصطکاک مورد استفاده قرار نگرفته است. شکل ۲ فلوجارت مربوط به نحوه اعمال نیروی اصطکاک بین کیسون بتنی و بستر صلب در رویکرد اصلاح شده مورد استفاده در این تحقیق را نشان می دهد. اگر نیروی افقی وارد بر جسم صلب از نیروی اصطکاک کمتر باشد، نیروی افقی نتوانسته بر نیروی اصطکاک غلبه کند و مقدارش صفر می گردد و اگر نیروی افقی وارد بر جسم صلب از نیروی اصطکاک بیشتر باشد، مقدار نیروی اصطکاک از نیروی افقی وارد بر جسم کاسته می شود. اگر سرعت جسم صفر باشد و در واقع جسم ثابت باشد، نیروی اصطکاک وارد بر آن استاتیکی بوده و اگر جسم دارای سرعت باشد، نیروی اصطکاک وارد بر آن دینامیکی می باشد. از آنجایی که با توجه به گسسته بودن حل در مدل عددی ممکن است مقدار سرعت برابر با صفر محاسبه نشود، در این تحقیق با در نظر گرفتن نسبت سرعت در دو گام زمانی متوالی این شرط ارضا شده است.

سیال قرار دارد. هر یک از این سه شرط مرزی مورد نمایش در ادامه به صورت جداگانه توضیح داده شده اند.

#### ۴-۱- شرط مرزی سطح آزاد

ذراتی که در سطح آزاد سیال قرار دارند، نسبت به ذرات داخلی سیال، دارای همسایه کمتری بوده و به دلیل شکسته شدن تابع کرنل در سطح آزاد، این ذرات دچار افت چگالی می شوند که معیار افت چگالی بیشتر از  $10\%$  چگالی مبنای، در این تحقیق برای شناسایی سطح آزاد استفاده شده است.



شکل ۱ - نمای شماتیک شرایط مرزی موجود در مدل سازی

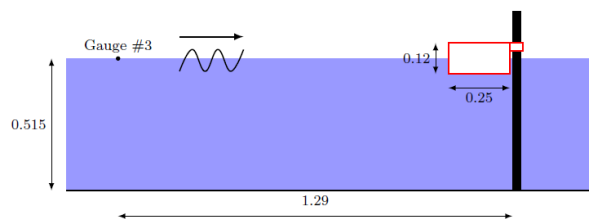
#### ۴-۲- شرط مرزی بین سیال و جسم صلب

در تحقیق حاضر برای اعمال شرط مرزی بین سیال و جسم صلب از شرط مرزی دینامیکی معرفی شده توسط Crespo و همکاران [۱۶] استفاده شده است. این شرط مرزی نسبت به شرایط مرزی نیروی تدافعی و ذرات مجازی به مراتب زمان محاسباتی کمتری دارد. در این روش روابط عددی هیدرودینامیک ذرات هموار برای تمام ذرات مرز و سیال حل شده و کمیت های ذرات در هر گام زمانی محاسبه می شود ولی مقدار سرعت برای ذرات مرز صلب ثابت برابر صفر قرار می گیرد تا ذرات مرز جابه جا نشوند و یا در این روش می توان تابع حرکتی به ذرات مرز صلب داد که برای ذرات پدل<sup>۱۰</sup> تولیدکننده موج [۱۷] استفاده گردد.

#### ۴-۳- اصلاحیه شرط مرزی بین جسم صلب و بستر صلب

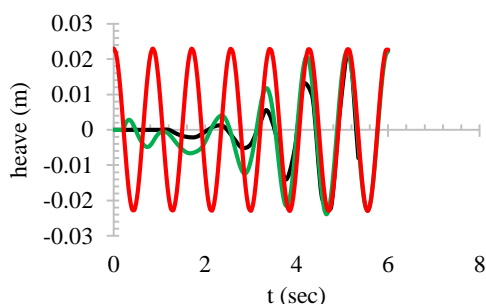
در تحقیق حاضر شرط مرزی بین جسم صلب و بستر صلب با در نظر گرفتن ضریب اصطکاک استاتیکی و دینامیکی و با استفاده از شرط مرزی دینامیکی، این شرط مرزی اصلاح شده است. حرکت جسم صلبی که با جسم صلب دیگری در تماس است با قانون Coulomb قابل معرفی می باشد. فرم ساده این قانون بیان می کند که نیروی اصطکاک بین دو جسم از ضرب نیروی قائم تماس بین دو جسم در ضریب اصطکاک به دست می آید و این نیرو در خلاف جهت حرکت جسم به آن وارد می شود [۱۸]. هم چنین تا زمانی که نیروی محرک وارد بر جسم صلب از مقدار نیروی اصطکاک استاتیکی کمتر باشد، جسم صلب حرکتی نداشته و زمانی

شده است. با انتخاب  $CFL=0.2$ ، زمان محاسباتی حدود ۹۰ ساعت بوده است.



شکل ۳- نمای مسئله اندرکنش امواج منظم و جسم صلب شناور

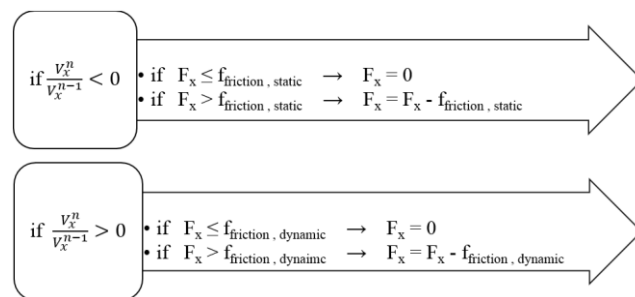
با توجه به شکل ۴ که نتایج مربوط به جابه‌جایی‌های قائم جسم شناور را در طول زمان شبیه‌سازی نشان می‌دهد، مشاهده می‌شود که با شروع شبیه‌سازی جسم از حالت سکون شروع به حرکت سینوسی در راستای قائم کرده و با گذشت زمان دامنه این جابه‌جایی افزایش یافته تا به مقدار بیشینه‌ای تقریباً برابر با ۲ سانتی‌متر رسیده است. می‌توان مشاهده کرد که نتایج مدل عددی توسعه‌یافته نسبت به نتایج مدل عددی برپایه شرط مرز ذرات مجازی به نتایج آزمایشگاهی نزدیک‌تر می‌باشد. به نظر می‌رسد شرط مرز دینامیکی مورد استفاده در تحقیق حاضر می‌تواند باعث بهبود نتایج گردد. علی‌ایحال، با گذشت زمان، نتایج دو مدل عددی به یکدیگر نزدیک شده که می‌تواند به دلیل پایدار شدن شرایط موج باشد.



شکل ۴- نتایج نوسانات جابه‌جایی قائم موج‌شکن شناور نسبت به زمان؛ (—) نتایج مدل عددی تحقیق حاضر، (—) نتایج مدل عددی Manenti و Panizzo [۷]، (—) نتایج مدل آزمایشگاهی Martinelli و Ruol [۸]

### ۵-۲- مسئله اندرکنش دوبعدی امواج منظم و جسم صلب شناور در آب عمیق (بدون نیروی اصطکاک)

در این قسمت، مطابق شکل ۵ تنظیمات آزمایشگاهی Yuan-Zhan و همکاران [۲] که جابه‌جایی افقی کیسونی بتنی قرارگرفته بر روی بستر توده‌سنگی را در فضایی آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار داده‌اند، در نظر گرفته شده است. طول، عرض و ارتفاع کیسون به ترتیب برابر با ۴۰، ۳۰ و ۳۷٫۵ سانتی‌متر بوده است و با مصالحی با چگالی ۱۴۴۰ کیلوگرم بر مترمکعب پر شده است. عمق آب درون فلوم موج ۰٫۳۲۵ متر بوده و امواج دارای دوره تناوب ۱٫۳ ثانیه و ارتفاع ۰٫۱۶۷ متر می‌باشند. فاصله اولیه ذرات ۰٫۰۲۵ متر بوده و حدود ۱۳۰۰۰ ذره به کار رفته است. خروجی مدل عددی تحقیق



شکل ۲- فلوجارت نحوه اعمال نیروی اصطکاک

در این فلوجارت  $V_x^n$  سرعت کیسون بتنی در راستای  $x$  در گام زمانی  $n$  و  $F_x$  نیروی وارد بر کیسون بتنی از طرف موج در راستای  $x$  و سپس نبریی است که برای جابه‌جایی کیسون استفاده می‌شود.

### ۵- نتایج مدل عددی

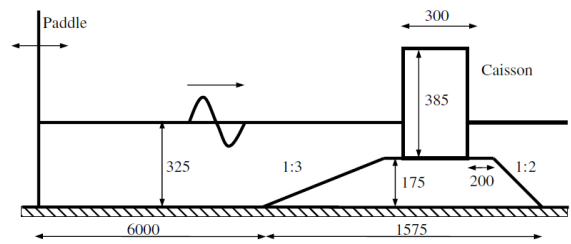
ابتدا قابلیت مدل عددی توسعه‌یافته و شرط مرز صلب مورد استفاده برای شبیه‌سازی اندرکنش امواج منظم و جسم صلب مکعبی شکل بدون در نظر گرفتن نیروی اصطکاک مورد بررسی قرار گرفته و سپس اصلاح مرز بین جسم صلب و بستر نفوذناپذیر صحت‌سنجی شده است. ابتدا نتایج شبیه‌سازی مسئله اندرکنش امواج منظم و جسم صلب شناور در آب عمیق که توسط Manenti و Panizzo [۷] و با استفاده از شرط مرز صلب ذرات مجازی در روش عددی SPH شبیه‌سازی شده است، با استفاده از مدل عددی توسعه‌یافته در تحقیق حاضر، بدون اعمال نیروی اصطکاک، ارائه شده و این نتایج با نتایج مدل عددی Manenti و Panizzo [۷] و همچنین نتایج مدل آزمایشگاهی Ruol و Martinelli [۸] مقایسه شده است. سپس نتایج شبیه‌سازی مسئله اندرکنش امواج منظم و موج‌شکن کیسونی قرارگرفته بر روی بستر نفوذناپذیر، با استفاده از مدل عددی توسعه‌یافته در تحقیق حاضر، با اعمال نیروی اصطکاک، مورد بررسی قرار گرفته و این نتایج با نتایج مدل عددی Rogers و همکاران [۱۰] که همین مسئله را با استفاده از شرط مرز صلب نیروی تدافعی در روش عددی SPH شبیه‌سازی کرده‌اند و همچنین نتایج آزمایشگاهی Yuan-Zhan و همکاران [۲] مقایسه شده است.

### ۵-۱- مسئله اندرکنش دوبعدی امواج منظم و جسم صلب شناور در آب عمیق (بدون نیروی اصطکاک)

در این قسمت از تحقیق تنظیمات آزمایشگاهی Ruol و Martinelli [۸] برای یک مکعب صلب شناور که با استفاده از شم‌های پهلوگیری از حرکت افقی مکعب صلب جلوگیری شده و در معرض امواج منظم با تناوب ۰٫۸۷ ثانیه و ارتفاع ۰٫۰۵ متر قرار دارد، مطابق شکل ۳ در نظر گرفته شده است. فاصله اولیه ذرات ۰٫۰۷۵ متر بوده و حدود ۶۲۰۰۰ ذره برای مدلسازی استفاده

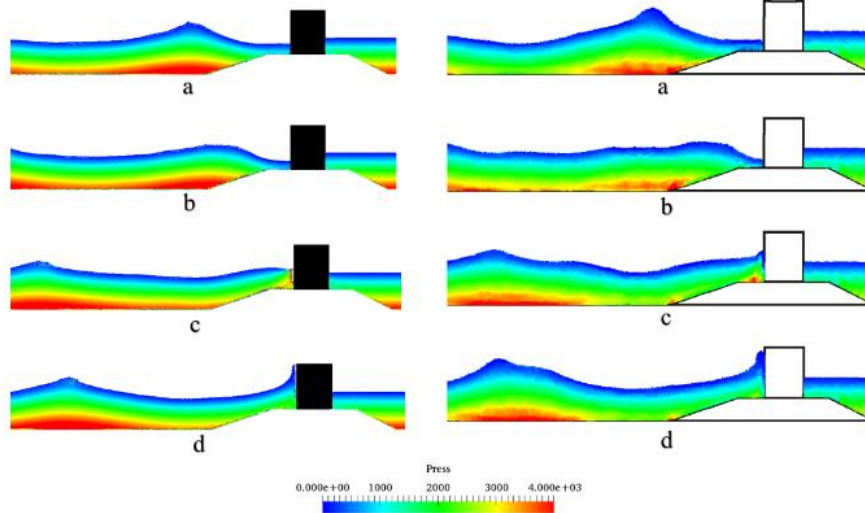
عقب بوده و با برخورد موج بعدی کیسون حرکت دیگری روبه جلو دارد. با مقایسه نتایج می توان مشاهده کرد که مدل های عددی روند حرکت کیسون را به خوبی پیش بینی کرده اند ولی از لحاظ مقادیر کمی این نتایج دارای خطا هستند که یکی از دلایل آن، عدم مدل سازی نفوذپذیری بستر کیسون باشد. هم چنین مطابق شکل ۸ نیروی افقی وارد بر کیسون تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. لازم به ذکر است که برخلاف مطالعه حاضر، Rogers و همکاران [۱۰] با تعریف یک سرعت حدی به عنوان پارامتر کالیبراسیون، شرایط انتقال اصطکاک استاتیکی به دینامیکی را در نظر گرفتند اگر چه مقدار دقیقی برای محاسبه این سرعت حدی ارائه نشده است. با مقایسه نتایج می توان نتیجه گرفت که اولاً اعمال شرط مرزی دینامیکی برای شبیه سازی اندرکنش سیال و جسم شناور صلب، با وجود اینکه در محاسبه مقادیر حداکثر نیروی وارد بر جسم صلب دارای خطا بوده، کارآمد می باشد و ثانیاً نحوه اعمال نیروی اصطکاک در این تحقیق (در نظر گرفتن ضریب اصطکاک استاتیکی و دینامیکی به جای تنها در نظر گرفتن ضریب اصطکاک استاتیکی) نتایج قابل قبولی را ارائه می دهد.

حاضر و مدل عددی Rogers و همکاران [۱۰] برای میدان فشار سیال در ۴ گام زمانی در شکل ۶ نشان داده شده است.

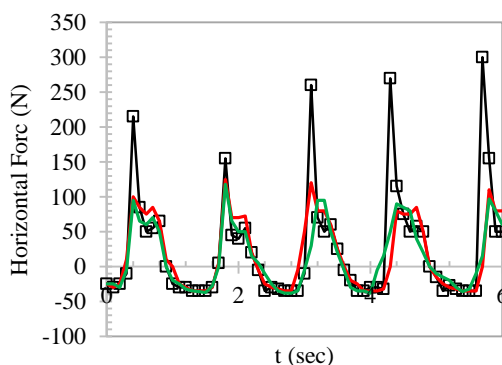


شکل ۵- نمای شماتیک مسئله شبیه سازی شده عددی اندرکنش موج منظم و موج شکن کیسونی

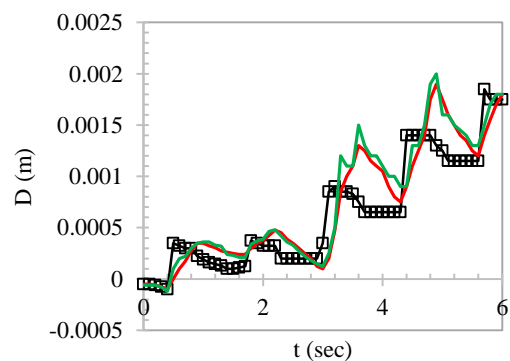
در ادامه، جابه جایی موج شکن کیسونی تحت اثر برخورد امواج منظم در طول زمان محاسباتی در شکل ۷ ارائه و با نتایج مدل عددی Rogers و همکاران [۱۰] و مدل آزمایشگاهی Yuan-Zhan و همکاران [۲] مقایسه شده است. با توجه به این شکل مشاهده می شود که با برخورد موج با موج شکن کیسونی، کیسون شروع به حرکت کرده و زمانی که موج به عقب برگشته و سطح سیال پشت کیسون پایین تر از سطح سیال جلوی آن باشد، این حرکت رو به



شکل ۶- فشار سیال؛ سمت راست: مدل عددی Rogers و همکاران [۱۰]، سمت چپ: مدل عددی تحقیق حاضر



شکل ۸- نیروی افقی وارد بر کیسون نسبت به زمان؛ مدل عددی تحقیق حاضر (—○—)، مدل عددی Rogers و همکاران [۱۰] (—●—) و مدل آزمایشگاهی Yuan-Zhan و همکاران [۲] (—□—)



شکل ۷- جابه جایی افقی کیسون نسبت به زمان؛ مدل عددی تحقیق حاضر (—○—)، مدل عددی Rogers و همکاران [۱۰] (—●—) و مدل آزمایشگاهی Yuan-Zhan و همکاران [۲] (—□—)

## ۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از روش عددی SPH و اعمال شرط مرزی دینامیکی، مدلی عددی برای شبیه‌سازی اندرکنش سیال و جسم صلب توسعه داده شده‌است. در این راستا، شرط مرزی بین جسم صلب و بستر نفوذناپذیر اصلاح شده و مسئله اندرکنش موج منظم و جسم صلب شناور در آب عمیق با استفاده از این مدل شبیه‌سازی و نتایج آن با نتایج مدلی عددی برپایه روش SPH و اعمال شرط مرزی ذرات مجازی و نتایج مدلی آزمایشگاهی مقایسه شده‌است که نتایج نشان می‌دهد شرط مرز صلب مورد استفاده در مدل عددی توسعه‌یافته در تحقیق حاضر توانایی شبیه‌سازی اندرکنش سیال و جسم صلب شناور را به خوبی دارا است. همچنین این مدل عددی نتایج دقیق‌تری را نسبت به مدل عددی برپایه روش SPH و استفاده از شرط مرز صلب ذرات مجازی ارائه می‌دهد. در ادامه تحقیق، با اصلاح مرز بین جسم صلب و بستر صلب با به‌کارگیری شرط مرز صلب دینامیکی و معرفی رویکردی موثر برای اعمال نیروی اصطکاک استاتیکی و دینامیکی بین موج‌شکن کیسونی و بستر نفوذناپذیر و اعمال آن در مدل عددی، مسئله اندرکنش امواج منظم و موج‌شکن کیسونی مستقر بر روی بستری نفوذناپذیر شبیه‌سازی شده‌است. نتایج مدل عددی تحقیق حاضر با نتایج مدل عددی دیگری برپایه روش SPH و استفاده از شرط مرزی نیروی تدافعی و همچنین با مدلی آزمایشگاهی مقایسه شده‌است. بر اساس نتایج به‌دست آمده، به نظر می‌رسد رویکرد معرفی‌شده در این تحقیق برای اصلاح اعمال نیروی اصطکاک و همچنین استفاده از شرط مرزی دینامیکی در مدل عددی می‌تواند نتایج مدل‌سازیرا بهبود بخشد بگونه‌ای که روند جابه‌جایی افقی کیسون و تغییرات نیروی افقی وارد بر کیسون با دقت مناسبی قابل پیش‌بینی باشد. در نهایت می‌توان نتایجی که از این تحقیق به‌دست آمده را به صورت زیر خلاصه کرد:

- ۱- استفاده از شرط مرزی دینامیکی در مسئله اندرکنش موج منظم و جسم صلب شناور در آب عمیق نتایج بهتری را نسبت به مدل عددی برپایه شرط مرزی ذرات مجازی ارائه می‌دهد و علاوه بر این برتری، شرط مرزی دینامیکی هزینه محاسباتی مدل عددی را نسبت به شرایط مرزی دیگر به مقدار قابل توجهی کاهش می‌دهد.
- ۲- اصلاح شرط مرزی بین جسم صلب و بستر نفوذناپذیر با به‌کارگیری شرط مرز صلب دینامیکی و رویکرد جدید اعمال نیروی اصطکاک معرفی‌شده در مدل عددی در این تحقیق به خوبی روند تغییرات نیروی افقی و جابه‌جایی افقی کیسون مستقر بر روی بستر نفوذناپذیر را پیش‌بینی کرده‌است.

۳- برخلاف تحقیقات پیشینی که اصطکاک بین کیسون بتنی و بستر صلب را شبیه‌سازی کرده‌اند، شرط مرزی معرفی‌شده در تحقیق حاضر علاوه بر کاهش زمان محاسباتی، رویکرد دقیق‌تری را برای اعمال نیروی اصطکاک بدون نیاز به پارامتر کالیبراسیون معرفی می‌کند.

۴- عدم در نظر گرفتن نفوذپذیری بستر موج‌شکن کیسونی باعث ایجاد خطا در نتایج لغزش افقی کیسون در مدل عددی این تحقیق و تحقیق Rogers و همکاران [۱۰] شده‌است که می‌توان در تحقیقات دیگری با در نظر گرفتن این نفوذپذیری و توسعه مدلی برای شبیه‌سازی جریان سیال درون محیط متخلخل این خطا را کاهش داد و اثرات نیروی روبه‌بالای سیال وارد بر کیسون را در نظر گرفت.

## ۸- مراجع

1. Goda, Y. and H. Takagi, *A reliability design method of caisson breakwaters with optimal wave heights*. Coastal Engineering Journal, 2000. 42(04): p. 357-387
2. Yuan-Zhan, W., C. Nan-Nan, and C. Li-Hua, *Numerical simulation on joint motion process of various modes of caisson breakwater under wave excitation*. International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering, 2006. 22(6): p. 535-545
3. Esteban, M., et al. *Laboratory experiments on the sliding failure of a caisson breakwater subjected to solitary wave attack*. in *The Eighth ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium*. 2008. International Society of Offshore and Polar Engineers.
4. Panahi, R., E. Jahanbakhsh, and M.S. Seif, *Development of a VoF-fractional step solver for floating body motion simulation*. Applied Ocean Research, 2006. 28(3): p. 171-181
5. Kleefsman, K., et al. *An improved volume-of-fluid method for wave impact problems*. in *The Fourteenth International Offshore and Polar Engineering Conference*. 2004. International Society of Offshore and Polar Engineers.
6. Hadžić, I., et al., *Computation of flow-induced motion of floating bodies*. Applied mathematical modelling, 2005. 29(12): p. 1196-1210
7. Manenti, S., et al. *SPH simulation of a floating body forced by regular waves*. in *Proceedings of 3rd SPHERIC Workshop*. 2008.
8. Ruol, P. and L. Martinelli, *Wave flume investigation on different mooring systems for floating breakwaters*, in *Coastal Structures 2007: (In 2 Volumes)*. 2009, World Scientific. p. 327-338.

15. Altomare, C., et al. *Numerical wave dynamics using Lagrangian approach: wave generation and passive & active wave absorption*. in *10th SPHERIC International Workshop*. 2015.
16. Crespo, A., M. Gómez-Gesteira, and R.A.J.C.-T.S.P.-. Dalrymple, *Boundary conditions generated by dynamic particles in SPH methods*. 2007. 5(3): p. 173.
17. Dalrymple, R.A. and O. Knio. *SPH modelling of water waves*. in *Coastal Dynamics' 2001, 01*.
18. Stewart, D.E., *Rigid-body dynamics with friction and impact*. SIAM review, 2000. 42(1): p. 3-39.
19. Olsson, H., et al., *Friction models and friction compensation*. European journal of control, 1998. 4(3): p. 176-195.
20. Kawachi, K., H. Suzuki, and F. Kimura. *Technical issues on simulating impulse and friction in three dimensional rigid body dynamics*. in *Computer Animation 98. Proceedings*. 1998. IEEE.
21. Tanimoto, K. and S. Takahashi, *Design and construction of caisson breakwaters—the Japanese experience*. Coastal engineering, 1994. 22(1-2): p. 57-77.
9. Jian, W., et al., *Smoothed particle hydrodynamics simulations of dam-break flows around movable structures*. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2016. 26(01): p. 33-40
10. Rogers, B.D., R.A. Dalrymple, and P.K. Stansby, *Simulation of caisson breakwater movement using 2-D SPH*. Journal of Hydraulic Research, 2010. 48(S1): p. 135-141
11. Monaghan, J. and A. Kos, *Solitary waves on a Cretan beach*. Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering, 1999. 125(3): p. 145-155.
12. Wendland, H., *Piecewise polynomial, positive definite and compactly supported radial functions of minimal degree*. Advances in computational Mathematics, 1995. 4(1): p 389-396.
13. Monaghan, J.J., *Simulating free surface flows with SPH*. Journal of computational physics 1994. 110(2): p. 399-406
14. Monaghan, J.J., *Smoothed particle hydrodynamics*. Annual review of astronomy and astrophysics, 1992. 30 (1): p. 543-574.