یادداشت فنی

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

امیر طاهرخانی[۱] ، حسن اکبری[۲*]

[۱] دانشجوی کارشناشی ارشد گرایش سازه های دریایی دانشگاه تربیت مدرس
[۲] استادیار گروه مهندسی عمران گرایش سازه های دریایی دانشگاه تربیت مدرس؛ Akbari.h@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۹/۱۴
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۹/۰۵

کلمات کلیدی:
موج‌شکن کیسونی
شرط مرزی اصلاح‌شده
هیدرودینامیک ذرات هموار
شرط مرز دینامیکی

چکیده

بررسی عکس‌العمل موج‌شکن‌ها در برابر امواج حدی، 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 شبیه-سازی 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.

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

Amir Taherkhani[1], Hassan Akbari[2*]

[1] MSc student in marine structures, Tarbiat Modares University
[2] Assistant Professor at Tarbiat Modares University, email address: 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.

۱ - مقدمه

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

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-18]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.28.4.3]

دیگر مقاطع بتنی کیسون و گسیختگی دایروی بستر توده‌سنگی می‌گردد. بطور کلی، می‌توان خرابی این سازه را وابسته به خرابی کیسون بتنی و یا خرابی وابسته به بستر توده‌سنگی در نظر گرفت [۱] که تحقیقات انجام شده بیشتر متمرکز بر مودهای خرابی وابسته به کیسون بتنی بوده‌است. در این راستا Yuan-Zhan و همکاران[۲] در مطالعاتی آزمایشگاهی اندرکنش امواج منظم و کیسون بتنی مستقر برروی بستر توده‌سنگی را مورد بررسی قرار داده و هم‌چنین با توسعه مدلی عددی این مسئله را شبیه‌سازی کرده‌اند. در مطالعات آزمایشگاهی دیگری که توسط Esteban و همکاران[۳] صورت گرفته، خرابی ناشی از لغزش افقی موج‌شکن کیسونی تحت برخورد با امواج منفرد مورد بررسی قرار گرفته‌است.

مدل‌سازی عددی جابه‌جایی موج‌شکن مرکب دارای دو بخش مدل-سازی اندرکنش سیال با جسم صلب شناور و اعمال نیروی اصطکاک بین کیسون بتنی و بستر توده‌سنگی می‌باشد. 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 روش‌های عددی اویلری حجم سیال (VOF) و حجم محدود (FVM) مورد مطالعه قرار گرفته‌است.

Manenti و Panizzo [۷] با استفاده از روش عددی لاگرانژی هیدرودینامیک ذرات هموار و به‌کارگیری شرط مرز صلب ذرات مجازی یکی از مدل‌های آزمایشگاهی مربوط به اندرکنش جسم شناور صلب و امواج منظم در شرایط دور از ساحل، در تحقیق Ruol و Martinelli [۸] را شبیه‌سازی کرده‌اند. jian و همکاران[۹] در تحقیقی، از مدل تراکم‌ناپذیر توسعه‌یافته برای شبیه‌سازی برخورد جریان شکست سد با سازه صلب ثابت و متحرک استفاده کرده‌اند. هم‌چنین Rogers و همکاران[۱۰] با استفاده از روش عددی هیدرودینامیک ذرات هموار تراکم‌پذیر جزئی در نرم‌افزار SPHysics، مدلی عددی را برای شبیه‌سازی حرکت دوبعدی موج‌شکن کیسونی قرارگرفته برروی بستر نفوذناپذیر در محیط ساحلی و با درنظر گرفتن شکست موج، توسعه داده‌اند. شرط مرزی صلب مورد استفاده برای شبیه‌سازی حرکت جسم صلب، شرط مرزی نیروی تدافعی معرفی‌شده توسط Monaghan و Kos [۱۱] می‌باشد. در این تحقیق نیروی اصطکاک بین کیسون بتنی و بستر غیرقابل نفوذ نیز شبیه‌سازی-شده که با تعریف سرعت حدی[۲] این نیروی اصطکاک به سه قسمت نیروی اصطکاک استاتیکی، دینامیکی و میانی[۳] تقسیم شده‌است و متناسب با رابطه سرعت جسم صلب و سرعت حدی، نیروی اصطکاک از حالت استاتیکی به میانی و از میانی به دینامیکی تغییر می‌کند..

با توجه به مطالعات پیشین و اهمیت مسئله اندرکنش امواج با سازه‌های ساحلی در مهندسی سواحل، هدف تحقیق حاضر شبیه-سازی 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 می‌باشد. در این راستا در تحقیق حاضر، مدلی عددی توسعه یافته و نتایج مدل عددی توسعه‌یافته 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[۴] توسعه یافته، مورد مقایسه قرار گرفته‌است و هم‌چنین نتایج مدل عددی تحقیق حاضر برای مسئله اندرکنش موج منظم و موج‌شکن کیسونی مستقر بر بستر نفوذناپذیر با درنظر گرفتن نیروی اصطکاک در محیط ساحلی، با نتایج مدل عددی SPH دیگری که با اعمال شرط مرز صلب نیروی تدافعی[۵] توسعه یافته، مقایسه شده‌است. در نهایت کارایی مدل توسعه‌یافته در تحقیق حاضر برای شبیه‌سازی اندرکنش سیال و جسم صلب در حالت امواج خطی و هم‌چنین نحوه اعمال نیروی اصطکاک در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته و سه روش اعمال شرط مرز صلب در روش SPH با یکدیگر مقایسه شده‌است.

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

۲ - فرمولاسیون روش عددی هیدرودینامیک ذرات هموار

هیدرودینامیک ذرات هموار، روش لاگرانژی بدون‌شبکه‌ای با کاربرد فراوان در زمینه دینامیک محاسباتی سیالات است که در آن دامنه محاسباتی به ذرات گسسته‌ای تقسیم می‌شود. ذرات همسایه برای هر ذره به‌وسیله تابع وزنی به نام تابع کرنل[۶] یا هموارساز مشخص می‌شوند. تابع کرنل، تابعی از فاصله بی‌بعد بین ذرات، $q = \frac{r}{h}$، می-باشد که r فاصله بین دو ذره و h طول هموارساز[۷] تابع کرنل است. در تحقیق حاضر از تابع کرنل معرفی‌شده توسط Wendland[۱۲]، استفاده شده‌است.

در روش هیدرودینامیک ذرات هموار، مقدار یک کمیت در موقعیت مکانی خاص با توجه به همسایگی موقعیت مکانی موردنظر، از رابطه زیر به‌دست می‌آید.

$$F(r_a) = \sum_b F(r_b) \frac{m_b}{\rho_b} W(r_a - r_b) \qquad (۱)$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.28.4.3]

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

۳ – معادلات حاکم

معادلات حاکم بر مسئله اندرکنش سیال و جسم صلب را می‌توان 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 زاویه‌ای $\vec{\Omega}$ باشد، با توجه به روابط (۲) و (۳) که معادلات دینامیک جسم صلب نیوتن را نشان می‌دهند، می‌توان حرکت جسم صلب را مورد بررسی قرارداد. لازم به ذکر است که در این تحقیق با توجه به بررسی لغزش کیسون، از معادله دوران صرفنظر شده و استفاده نمی‌گردد.

$$M\frac{d\vec{V}}{dt}=\sum_k m_k\vec{f}_k \qquad (۲)$$

$$I\frac{d\vec{\Omega}}{dt}=\sum_k m_k(\vec{r}_k-\vec{R}_0)\vec{f}_k \qquad (۳)$$

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 می‌شود.

$$\vec{f}_k=\sum_a \vec{f}_{ka} \qquad (۴)$$

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

$$m_k\vec{f}_{ka}=-m_a\vec{f}_{ak} \qquad (۵)$$

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 به‌دست آمده و با انتگرال‌گیری از این رابطه در زمان ذرات جسم صلب حرکت می‌کنند.

$$\vec{u}_k=\vec{V}+\vec{\Omega}(\vec{r}_k-\vec{R}_0) \qquad (۶)$$

۳-۲- معادلات ناویراستوکس

معادلات حاکم بر جریان سیال در این تحقیق معادلات شناخته شده ناویراستوکس شامل پیوستگی و اندازه‌حرکت می‌باشددر روش هیدرودینامیک ذرات هموار تراکم‌پذیر جزئی، جرم ذرات در طول زمان شبیه‌سازی ثابت بوده و تنها چگالی ذرات تغییر می‌کند. تغییرات چگالی با حل معادله پیوستگی به صورت رابطه زیر نمایش داده شده‌است، به‌دست می‌آید.

$$\frac{d\rho_a}{dt}=\sum_b m_b\mathbf{v}_{ab}.\nabla_a W_{ab} \qquad (۷)$$

Monaghanو Joe[۱۳] برای محاسبه فشار ذرات سیال از معدله حالت زیر استفاده کرده‌اند که مقدار فشار هر ذره را متناسب با چگالی آن محاسبه می‌کند.

$$P=b\left(\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{\gamma}-1\right),\ b=\frac{{C_0}^2\rho_0}{\gamma} \qquad (۸)$$

در رابطه فوق $\gamma=7$ و ρ_0 چگالی مبنا که برای آب برابر با $1000 kg/m3$ است و C_0 سرعت صوت در چگالی مبنا و ۱۰ برابر حداکثر سرعت سیال درنظر گرفته می‌شود تا نوسانات چگالی کمتر از ۱٪ باشد. همچنین با استفاده از لزجت مصنوعی[۸] معرفی‌شده توسط Monaghanو Joe [۱۴] رابطه ممنتوم به صورت زیر بازنویسی می‌شود.

$$\frac{d\mathbf{v}_a}{dt}=-\sum_b m_b\left(\frac{P_a+P_b}{\rho_a.\rho_b}+\Pi_{ab}\right)\nabla_a W_{ab}+g \qquad (۹)$$

که در رابطه فوق Π_{ab} لزجت مصنوعی می‌باشد که مقدار آن برابر است با:

$$\Pi_{ab}=\begin{cases}\dfrac{-\alpha\bar{c}_{ab}\mu_{ab}}{\bar{\rho}_{ab}} & \mathbf{v}_{ab}.\mathbf{r}_{ab}<0\\ 0 & \mathbf{v}_{ab}.\mathbf{r}_{ab}>0\end{cases} \qquad (۱۰)$$

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 $\mathbf{v}_k$ به‌ترتیب موقعیت و سرعت ذره موردنظر می‌باشند. $\bar{c}_{ab}$ سرعت متوسط صوت بین دو ذره است و μ_{ab} از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$\mu_{ab}=\frac{h\mathbf{v}_{ab}.\mathbf{r}_{ab}}{(\mathbf{r}^2{}_{ab}+\eta^2)},\ \eta^2=0.01h^2 \qquad (۱۱)$$

مطابق Altomare و همکاران[۱۵] در این تحقیق از مقدار ۰,۰۱ برای α استفاده شده‌است.

۴- شرایط مرزی

شکل ۱ نمای شماتیکی از دیاگرام آزاد نیروهای وارد بر مکعبی صلب برروی بستر صلبی را نشان می‌دهد که در معرض برخورد با

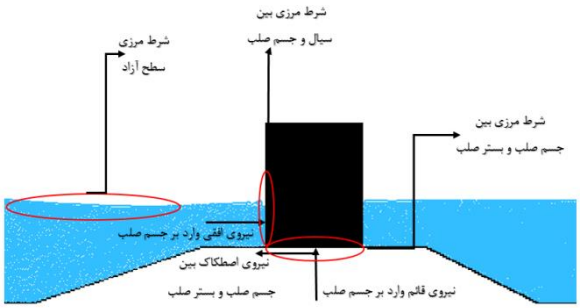
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.28.4.3]

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

۴-۱- شرط مرزی سطح آزاد

ذراتی که در سطح آزاد سیال قرار دارند، نسبت به ذرات داخلی سیال، دارای ذرات همسایه کمتری بوده و به‌دلیل شکسته شدن تابع کرنل در سطح آزاد، این ذرات دچار افت چگالی می‌شوند که معیار افت چگالی بیشتر از ۱۰٪ چگالی مبنا، در این تحقیق برای شناسایی سطح آزاد استفاده شده است.



شکل ۱ - نمای شماتیک شرایط مرزی موجود در مدل‌سازی

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 معرفی‌شده توسط Crespo و همکاران[۱۶] استفاده شده‌است. این شرط مرزی نسبت به شرایط مرزی نیروی تدافعی و ذرات مجازی به مراتب زمان محاسباتی کمتری دارد. در این روش روابط روش عددی هیدرودینامیک ذرات هموار برای تمام ذرات مرز و سیال حل شده و کمیت‌های ذرات در هر گام زمانی محاسبه می‌شود ولی مقدار سرعت برای ذرات مرز صلب ثابت برابر صفر قرار می‌گیرد تا ذرات مرز جابه‌جا نشوند ویا در این روش می‌توان تابع حرکتی به ذرات مرز صلب داد که برای ذرات پدل[۱۰] 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 می‌باشد. فرم ساده این قانون بیان می‌کند که نیروی اصطکاک بین دو جسم از ضرب نیروی قائم تماس بین دو جسم در ضریب اصطکاک به‌دست می‌آید و این نیرو در خلاف جهت حرکت جسم به آن وارد می‌شود[۱۸]. هم‌چنین تا زمانی که نیروی محرک وارد بر جسم صلب از مقدار نیروی اصطکاک استاتیکی کمتر باشد، جسم صلب حرکتی نداشته و زمانی که مقدار نیروی محرک برابر مقدار نیروی اصطکاک استاتیکی شود جسم شروع به حرکت می‌کند و پس از آن، حرکت از حالت استاتیکی به حالت دینامیکی تغییر می‌کند. مقدار ضریب اصطکاک استاتیکی همواره بیشتر از ضریب اصطکاک دینامیکی می‌باشد[۱۹].

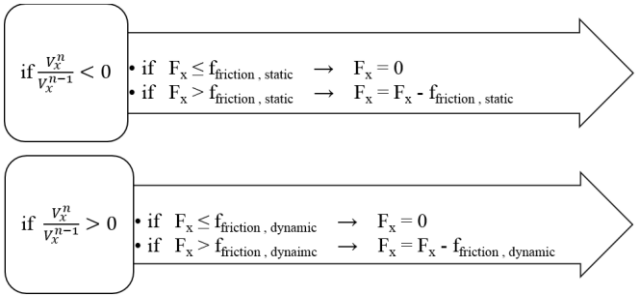
یکی دیگر از رویکردهای در نظر گرفتن انتقال نیروی اصطکاک از حالت استاتیکی به حالت دینامیکی، انتخاب سرعتی حدی می‌باشد [۲۰]. Rogers و همکاران[۱۰] در مدل عددی خود برای شبیه‌سازی حرکت کیسون متحرک بر اثر اندرکنش با امواج منظم از این رویکرد استفاده کرده‌اند و برای جلوگیری از ایجاد خطا در مدل و حرکات غیرفیزیکی جسم، حالتی انتقالی را بین دو حالت استاتیکی و دینامیکی در نظر گرفته‌اند. با توجه به این‌که روش دقیقی برای محاسبه سرعت حدی در اعمال نیروی اصطکاک ارائه نشده‌است 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 می‌شود.

$$f_{friction} = \mu * F_z$$
$$\rightarrow \begin{cases} f_{friction,static} = \mu_{static} * F_z \\ f_{friction,dynamic} = \mu_{dynamic} * F_z \end{cases} \quad (۱۲)$$

که در رابطه فوق μ ضریب اصطکاک استاتیکی یا دینامیکی و F_z نیروی قائم وارد بر کیسون بتنی می‌باشد. ضریب اصطکاک دینامیکی بر پایه مطالعات آزمایشگاهی Yuan − Zhan و همکاران[۲] برابر با ۰٫۵ ($\mu_{dynamic} = 0.5$) و ضریب اصطکاک استاتیکی متناسب با مقدار پیشنهادشده توسط Tanimoto و Takahashi[۲۱] برابر با ۰٫۶ ($\mu_{static} = 0.6$) در نظر گرفته شده‌است. همان‌طور که در قسمت‌های قبل توضیح داده شد، در تحقیقات پیشین این روند اعمال نیروی اصطکاک مورد استفاده قرار نگرفته است. شکل ۲ فلوچارت مربوط به نحوه اعمال نیروی اصطکاک بین کیسون بتنی و بستر صلب در رویکرد اصلاح‌شده مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد. اگر نیروی افقی وارد بر جسم صلب از نیروی اصطکاک کمتر باشد، نیروی افقی نتوانسته بر نیروی اصطکاک غلبه کند و مقدارش صفر می‌گردد و اگر نیروی افقی وارد بر جسم صلب از نیروی اصطکاک بیشتر باشد، مقدار نیروی اصطکاک از نیروی افقی وارد بر جسم کاسته می‌شود. 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 می‌باشد. 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 شده‌است.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.28.4.3]



شکل ۲- فلوچارت نحوه اعمال نیروی اصطکاک

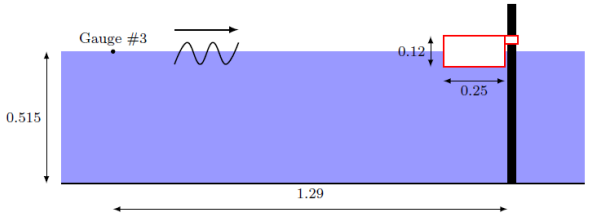
در این فلوچارت V_x^n سرعت کیسون بتنی در راستای x در گام زمانی n و F_x نیروی وارد بر کیسون بتنی از طرف موج در راستای x و سپس نبر.یی است که برای جابجایی کیسون استفاده می‌شود.

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 شده‌است. 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 شده‌است، 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 شده‌است. سپس نتایج شبیه‌سازی مسئله اندرکنش امواج منظم و موج‌شکن کیسونی قرارگرفته برروی 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 شده‌است.

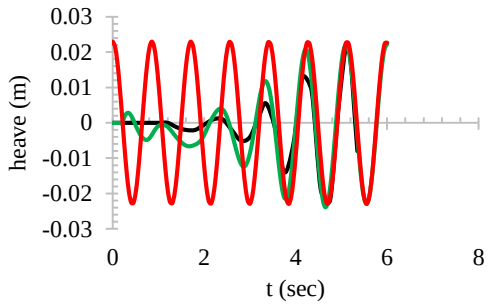
۵-۱- مسئله اندرکنش دوبعدی امواج منظم و جسم صلب شناور در آب عمیق (بدون نیروی اصطکاک)

در این قسمت از تحقیق تنظیمات آزمایشگاهی Ruol و Martinelli [۸] برای یک مکعب صلب شناور که با استفاده از شمع‌های 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 شده‌است. فاصله اولیه ذرات ۰,۰۰۷۵ متر بوده و حدود ۶۲۰۰۰ ذره برای مدلسازی استفاده 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 جابه-جایی افزایش یافته تا به مقدار بیشینه‌ای تقریباً برابر با ۲ سانتی‌متر رسیده‌است. 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 می تواند باعث بهبود نتایج گردد. علی ایحال، با گذشت زمان، نتایج دو مدل عددی به یکدیگر نزدیک شده که می تواند به دلیل پایدار شدن شرایط موج باشد.



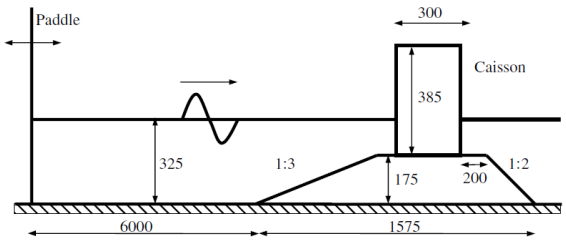
شکل ۴- نتایج نوسانات جابه‌جایی قائم موج‌شکن شناور نسبت به زمان؛ (——) نتایج مدل عددی تحقیق حاضر، (——) نتایج مدل عددی Manenti و Panizzo [۷]، (——) نتایج مدل آزمایشگاهی Martinelli و Ruol [۸]

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 برروی بستر توده‌سنگی را در فضایی آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار داده‌اند، در نظر گرفته شده‌است. طول، عرض و ارتفاع کیسون به-ترتیب برابر با ۴۰ ، ۳۰ و ۳۷,۵ سانتی‌متر بوده‌است 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

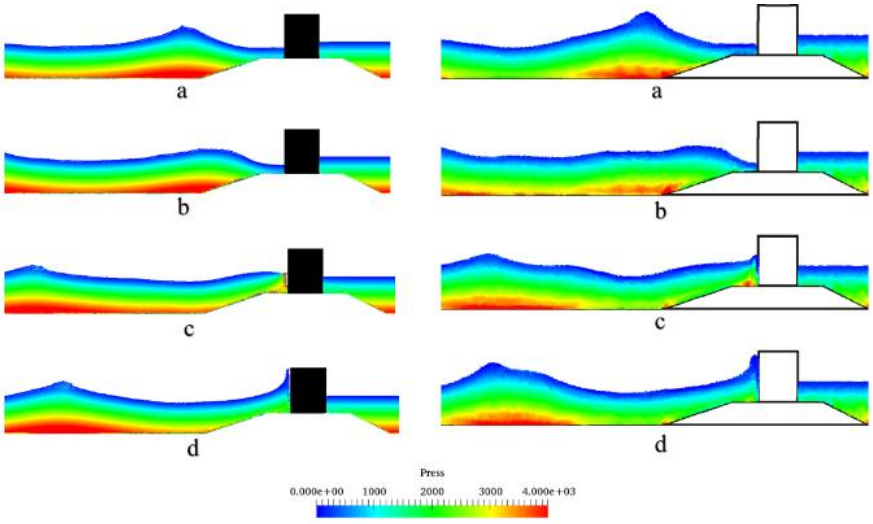
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-18]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.28.4.3]

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

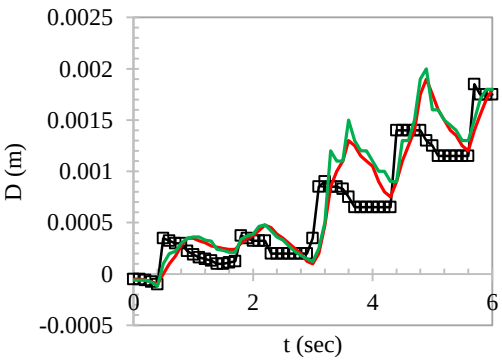


شکل ۵- نمای شماتیک مسئله شبیه‌سازی‌شده عددی اندرکنش موج منظم و موج‌شکن کیسونی

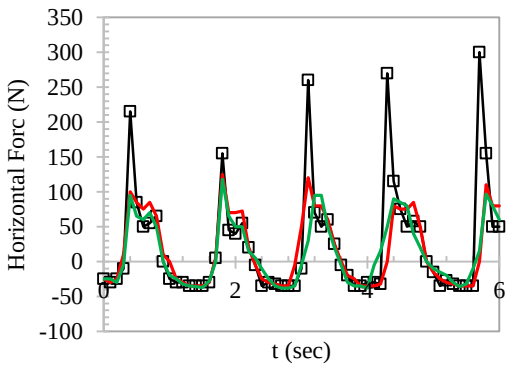
در ادامه، جابه‌جایی موج‌شکن کیسونی تحت اثر برخورد امواج منظم در طول زمان محاسباتی در شکل ۷ ارائه و با نتایج مدل عددی Rogers و همکاران[۱۰] و مدل آزمایشگاهی Yuan-Zhan و همکاران[۲] مقایسه شده‌است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که با برخورد موج با موج‌شکن کیسونی، کیسون شروع به حرکت کرده و زمانی که موج به عقب برگشته و سطح سیال پشت کیسون پایین‌تر از سطح سیال جلوی آن باشد، این حرکت رو به عقب بوده و با برخورد موج بعدی کیسون حرکت دیگری روبه‌جلو دارد. با مقایسه نتایج می‌توان مشاهده کرد که مدل‌های عددی روند حرکت کیسون را به‌خوبی پیش‌بینی کرده‌اند ولی از لحاظ مقادیر کمی این نتایج دارای خطا هستند که یکی از دلایل آن، عدم مدل‌سازی نفوذپذیری بستر کیسون باشد. هم‌چنین 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 می‌توان نتیجه گرفت که اولاً اعمال شرط مرزی دینامیکی برای شبیه‌سازی اندرکنش سیال و جسم شناور صلب، با وجود اینکه در محاسبه مقادیر حداکثر نیروی وارد بر جسم صلب دارای خطا بوده، کارآمد می‌باشد 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 می‌دهد.



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



شکل ۷- جابه‌جایی افقی کیسون نسبت به زمان؛ مدل عددی تحقیق حاضر (—)، مدل عددی Rogers و همکاران[۱۰] (—) و مدل آزمایشگاهی Yuan-Zhan و همکاران[۲] (—▫—)



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] (—▫—)

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.28.4.3]

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 برروی بستری نفوذناپذیر شبیه-سازی 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 شده است. 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 مدل سازیرا 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 برروی بستر نفوذناپذیر را پیش‌بینی کرده‌است.

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

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.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.28.4.3]

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.
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.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1397.14.28.4.3]