

Research Paper

Numerical Investigation of Wave Production due to Mass Slip Using Finite Volume Method and Overset Mesh

Ghasem Mokhtarzadeh¹, Shamsa Basirat^{2*}, Jalal Bazargan³ and Ehsan Delavari²

1. Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Isfahan 81346, Iran

2. Assistant prof., Department of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Isfahan 81346, Iran

3. Associate prof., Departments of Civil Engineering, University of Zanjan, Zanjan 4513956111, Iran

Received: 2021/01/21

Revised: 2021/01/25

Accepted: 2021/06/25

Use your device to scan and read the article online



DOI:

10.30495/wej.2022.27135.2291

Keywords:

Wave, slip body, fluid- structure interaction, dam

Abstract

Introduction: Impulsive waves (i.e., tsunamis) can be generated by sudden displacements of volumes of water induced by earthquakes, landslides, and volcanic eruptions, impacts of asteroids and gradients of atmospheric pressure.

Methods: we present a new method for numerically modelling landslide-generated tsunamis in OpenFOAM® by using a new approach based on the Overset mesh technique. This technique, which is based on the use of two (or more) numerical domains, is new in the coastal engineering field and appears to be extremely powerful to model the interaction between a moving body and one or more fluids. Indeed, the accurate resolution around the moving body (i.e., body-fitted approach), guaranteed by this method, and offers a great advantage to study the momentum exchange between the body and the water.

Findings: The results have been presented for the dimensionless distance and the normalized geometry of the landslide in the range 5 to 7, 1 to 2, respectively. These numbers have been normalized by the aid of the height of the landslide (a). According to the results of simulations, the tsunamis process is divided into three stages, which were analyzed in details with considering the interactions between the solid and the water reservoir.

Citation: Ghasem Mokhtarzadeha, Shamsa Basirat, Jalal Bazarganb and Ehsan Delavari. a Water Conflict and Its Management Strategies Among Users of Shared Water Wells: The Case Study of Farmers in Bahar County of Hamadan Province. Water Resources Engineering Journal. 2022; 15(54): 43-56.

***Corresponding author:** Shamsa Basirat

Address: Department of Civil Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Isfahan

Tell: +989125325229

Email: basirat.sh@pci.iaun.ac.ir

Extended Abstract

Introduction

An inclined embankment of a water body contains a mass of material, the landslide material is triangular in shape with width b and height a . Initially, the mass is above the water surface. It moves under the influence of gravity downwards. The mass slides along the embankment until it reaches an impact location where it stops (depth H). The symbol s represents the streamwise direction of flow. The symbol h represents the initial height of the mass above the impact location. The moving mass initiates a wave (represented by the dashed line drawn a top the free surface location). are not affected by the dimension of the domain. The overset mesh method is based on the use of two (or more) domains. The outer one (i.e. background domain) allows the motion of one or more inner domains (i.e. floating domains) that contain a solid body. The mutual exchange of information between the two domains is achieved by interpolation. Therefore, the two domains, which overlap each other, can be used to simulate different features of the hydrodynamics problem at hand.

Materials and Methods

The open-source field operation and manipulation (OpenFOAM) CFD software package version 1912 was used to perform the numerical simulations. The OpenFOAM code is written in C++ and uses the finite-volume discretization method to solve the conservation equations of mass and momentum, along with the equations of state. The base code of the solver is overInterDyFoam (Jasak 2009). This solver can take into account different mesh movement models. The second-order upwind scheme is used to handle the convective terms except the phase-fraction term which is discretized using the Vanleer second-order scheme. The Gauss-linear second-order approach is employed to deal with the diffusion terms. Due to the three-dimensional nature of this study, the computational domain is enclosed by three boundaries. No-slip and the fixed-flux pressure conditions are imposed at the

landslide walls, and non-reflective-boundary conditions at the background walls and the far-field boundaries. The landslide is triangular with the dimensions $a = 0.2$ m and $b = 0.5$ m. It is initially at rest, at the distance 2 m from the reservoir bottom.

Findings

It was found that blocks with a small height create a minimal solitary wave due to their lower impact momentum. Results of Figures 18 and 19 indicate that with an increase in the block height, the wave profile increases because of the increased mass (and thus momentum) of the block upon impact. An increasing box height causes an increase of the momentum. The wave height increases with increasing momentum. Results are displayed at a time of 0.7 s. The crest of the wave increases from 0.29 m to 0.34 m as the box height increases from 0.4 m to 0.55 m. Also, the crest profile is stretched along the vertical direction. Behaviors of the crest profile significantly affect the vortex under the wave.

A free-falling dense block that impacts a water surface creates a single wave which differs from a landslide wave. The elevation of the wave is greater than the landslide wave due to the greater energy transfer to the water.

As the landslide density and the dimensionless distance of the landslide increase, the magnitude of the wave increases. Also, with the decrease in water depth, the wave elevation increases.

Discussion

The main focus of the present paper is on the generation of landslide-induced impulse waves and Scott Russell waves. Three different positions have been selected based on the simulations conducted for a VOF and overset mesh using the OpenFOAM C++ library. Three-dimensional simulations of the impulse wave formation for landslide densities ranging from 2,100 to 2,900 kg/m³ and Scott Russell waves for densities ranging from 1,800 to 3,300 kg/m³ were carried out. It is found that the formation of water waves corresponding to a landslide density of 2,500 kg/m³ is consistent with recent

experimental results. The present study opens exciting possibilities for future research relating to the design of dam reservoir. The coupling the overset mesh technique overcomes a drawback of the overset mesh method as far as the modelling of a solid body moving in contact with an impermeable surface. The proposed numerical method can be used for Scott Russell wave generation. The landslide-induced impulse wave process is characterized by three stages. In this study, we focused on the first stage; however, the three stages are: - Formation of the single wave, - Propagation of the wave.

Conclusion

The impulse product parameter P applies to landslides and to granular and block impulse waves. Numerical results based on P indicate that the largest waves occur for a block sinking into the water (Figure 20). These large waves are a negative phenomenon, particularly for dam reservoirs.

Ethical Considerations compliance with ethical guidelines

The cooperation of the participants in the present study was voluntary and accompanied by their consent.

Funding

No funding.

Authors' contributions

Design and conceptualization: Ghasem Mokhtarzadeh, Shamsa Basirat, Jalal Bazargan, Ehsan Delavari
Supervision and final writing: Shamsa Basirat.

Conflicts of interest

The authors declared no conflict of interest.

مقاله پژوهشی

بررسی عددی تولید موج ناشی از لغزش توده با استفاده از روش حجم محدود و شبکه بندی روی هم‌رونده

قاسم مختارزاده^۱، شمس بصیرت^{۲*}، جلال بازرگان^۳ و احسان دلاوری^۲

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران.

۲. استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران.

۳. دانشیار، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

چکیده

مقدمه: در این تحقیق، تأثیر پارامترهای مختلف بر روی تک موج ایجاد می‌شود از لغزش جسم و ورود آن به آب بررسی شده‌اند.

روش: برای حل مسئله، از روش ترکیبی حجم محدود سیال (VOF) و شبکه بندی بر روی هم‌رونده استفاده شد. شبکه بندی بر روی هم‌رونده نوعی شبکه متحرک (Dynamic Mesh) می‌باشد که قادر است دو شبکه را در حالی که بر روی هم می‌لغزند، خواص سیال را نیز محاسبه کند. با لغزش آزاد جسم بر روی سطح شیب دار و ورود به داخل آب، تک موج تشکیل می‌گردد که در راستای طول کانال منتشر می‌شود و سپس با مرور زمان از بین می‌رود. تأثیر پارامترهایی مانند چگالی لغزنده، ارتفاع رهاشدن لغزنده و عمق آب بر ارتفاع موج تشکیل شده موثر هستند.

یافته‌ها: پروفیل موج به دست آمده در سه زمان مختلف تطابق بسیار خوبی با نتایج تجربی مطالعات پیشین نشان داد و بیشترین درصد خطای به دست آمده ۴ درصد گزارش گردید. طبق نتایج به دست آمده، با افزایش چگالی لغزنده از ۲۱۰۰ تا ۲۹۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و ارتفاع بی‌بعد رهاشدن لغزنده جعبه از ۵ الی ۷، ارتفاع تک موج ضربه‌ای به ترتیب ۲۴ و ۲۰ درصد افزایش یافت. علاوه بر این، با افزایش عمق بی‌بعد از ۴ الی ۶ ارتفاع تک موج ضربه‌ای ۱۰ درصد کاهش یافت. همچنین با دوبرابر نمودن نسبت ارتفاع لغزنده‌ی مثلی شکل به قاعده، ۱۴ درصد ارتفاع موج کاهش یافت.

نتیجه گیری: براساس نتایج این تحقیق، مسلماً به هنگام طراحی سدها، تک موج‌های ضربه‌ای ایجاد شده در مخازن سد، اهمیت فوق العاده‌ای دارد و می‌بایست مخازن سدی با عمق معمولی و تپه‌های مشرف با ارتفاع نسبتاً کم با شیب ملایم، مد نظر طراحان باشد. همچنین می‌بایست جنس خاک تپه‌های مشرف به مخازن سدها نیز مورد مطالعه جامع قرار بگیرد.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۰۲

تاریخ داوری: ۱۳۹۹/۱۱/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۰۴

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید



DOI:
10.30495/wej.2022.27135.2291

واژه‌های کلیدی:

موج، لغزش جسم، اندرکنش سازه و سیال، سد.

* نویسنده مسئول: شمس بصیرت

نشانی: گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران.

تلفن: ۰۹۱۲۵۳۲۵۲۲۹

پست الکترونیکی: basirat.sh@pci.iaun.ac.ir

مقدمه

وقوع زمین لرزه، لغزش اجرام، فوران آتش فشان و برخورد شهاب سنگ زمین، امواج ضربه‌ای را در داخل سدها به وجود می‌آورند که باعث جابه‌جایی ناگهانی حجم وسیعی از آب می‌گردد. در میان این مکانیزم‌ها، لغزش توده‌های سنگی از دامنه‌ی شیب‌دار کوه‌ها به داخل مخازن سدها، از همه رایج تر است. پدیده لغزش و برخورد توده‌های سنگی به داخل مخازن سدها و رودخانه‌ها باعث به‌وجود آمدن موج بالا رونده می‌گردد که به مراتب، اثرات تخریبی بالاتری نسبت به سایر امواج دارد. با گذشت زمان، این امواج در تخریب اسکلت سدها نقش بسیار مهمی را ایفا می‌کنند. ضرورت مطالعات جامع در رابطه با لغزش اجرام و سقوط به داخل آب و تشکیل موج ضربه‌ای، باعث شده تا محققان زیادی در این باره تحقیق نمایند (۸، ۹، ۱۰، ۱۶، ۲۹).

از جمله‌ی این تحقیقات می‌توان به کار هنریچ (۱۹۹۲) اشاره نمود. هنریچ (۱۹۹۲) به مدل‌سازی لغزش جسم صلب و ورود آن به داخل آب مخزن پرداخت (۱۱). در تحقیق وی، جسم با سطح مقطع مستطیلی روی سطح لغزیده و با ورود به داخل آب، باعث تولید موج ضربه‌ای می‌شد. نتایج کار وی با سایر کارهای تجربی مشابه، تطابق بسیار خوبی داشت و توانست نشان دهد که شکل جسم لغزنده تأثیر قابل ملاحظه‌ای در ارتفاع موج ضربه‌ای دارد. از دیگر کارهایی که در رابطه با لغزش جسم و ورود به داخل آب انجام گرفته است می‌توان به مطالعات عطایی آشتیانی و شبیری (۲۰۰۷)، فریتز و همکاران (۲۰۰۳) و وانگ و همکاران (۲۰۱۸) اشاره کرد (۳، ۷، ۲۶). همچنین تانگ و همکاران (۲۰۱۹) نیز به بررسی عددی تولید تک‌موج ضربه‌ای با استفاده از روش سلول هارمونیک چند جمله‌ای^۱ پرداختند (۲۵). آنها توانستند اثبات کنند که روش پیشنهادی، دقت بالایی در مدل‌سازی انواع تک‌موج‌ها، تداخل امواج با یکدیگر و تداخل سازه‌ها و امواج ۲ با در نظر گرفتن جریان موج به صورت جریان پتانسیل دارد. ویژگی بارز روش سلول هارمونیک چند جمله‌ای، این می‌باشد که جریان آزاد سیال و مرزهای ثابت، در یک شبکه بندی ثابت غوطه ور^۲ شده‌اند و مشکلات تعریف مرز جامد را تا حد قابل توجهی کاهش می‌دهند. رابی سالو و همکاران (۲۰۲۰) به مدل‌سازی تولید موج ضربه‌ای سونامی با استفاده از روش قطعات سنگی (گرانولار)^۴ پرداختند (۲۳). کار آنها با توجه به اینکه با واقعیت هم‌خوانی زیادی با واقعیت داشت، نتایج به مراتب متفاوت‌تری نسبت به حالت صلب داشت.

لی و همکاران (۲۰۲۰) نیز به بررسی تجربی ائتلاف انرژی گردابه‌ی ایجاد شده به هنگام تشکیل تک‌موج ضربه‌ای پرداختند (۱۴). آنها توانستند نشان دهند که انرژی موج ضربه‌ای منتشر شده کاملاً وابسته به انرژی گردابه‌ی ایجاد شده در زیر موج است. خیه و استوسر (۲۰۲۰) نیز به شبیه‌سازی عددی گردابه‌های بزرگ ۵ شکست ۶ تک‌موج ضربه‌-ای پرداختند. با توجه به ماهیت پیچیده‌ی شکست موج و از بین رفتن آن در طول کانال، آنها توانستند نشان دهند روش LES با وجود زمان

شبیه‌سازی زیاد، دقت بسیار بالاتری نسبت به روش‌های توربولانسی دومعادله‌ای دارد (۳۲).

کیم و همکاران (۲۰۱۹) نیز به بررسی عددی خطرات ناشی از سونامی که با استفاده از لغزش و ورود اجسام به داخل خلیج مکزیکو اتفاق افتاده بود، پرداختند. آنها پیشنهادهایی برای ساخت سدهای آن منطقه ارائه نمودند و به باز طراحی برخی از آن سدها پرداختند (۱۳). وو و همکاران (۲۰۱۶) به مطالعه‌ی تولید تک موج ضربه‌ای حاصل از حرکت پیستونی تولید کننده‌ی موج پرداختند (۳۰). آنها مدل بهبود یافته‌ای از حرکت پیستونی تولید کننده‌ی موج را پیشنهاد دادند که نقاط ضعف در کارهای گذشته را به طور کامل پوشش می‌داد (۳۱).

رومانو و همکاران (۲۰۲۰) به مدل‌سازی عددی و بررسی فیزیکی تولید موج ناشی از لغزش جسم بر روی سطح شیب دار پرداختند. کار آنها با نتایج تجربی و تحلیلی تطابق بسیار خوبی داشت. آنها نشان دادند که با فرو رفتن جسم لغزنده به داخل آب، در ابتدا گردابه‌ای بیضی شکل تشکیل می‌شود و رفته رفته این گردابه به شکل دایره در می‌آید و در انتها نیز از بین می‌رود (۲۲).

خو و دانگ (۲۰۲۱) با استفاده از روش SPH-DEM به مدل‌سازی موج ضربه‌ای ناشی از لغزش جسم بر روی سطح شیب دار پرداختند. نتایج کار آنها بیانگر این مطلب بود که روش بدون شبکه بندی SPH در صورتی که با روش DEM ادغام شود، می‌توان زمان حل را تا حد قابل توجهی کاهش دهد (۳۳).

دی لا آسانشین و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از مدل لایه‌ای ساواژ-هاتر^۷ به شبیه‌سازی سونامی ناشی از لغزش جسم بر روی سطح شیب دار پرداختند (۴). دی لا آسانشین و کاسترو (۲۰۱۷) نیز با استفاده از روش شبکه بندی تطابقی به شبیه‌سازی تشکیل موج ضربه‌ای ناشی از لغزش جسم پرداختند. در شبکه بندی تطابقی، جسم در حال لغزش قادر است تا شبکه بندی اطراف خود را حذف و با شبکه بندی جدیدی جایگزین نماید (۵).

پانیزو و همکاران (۲۰۰۲) به بررسی تجربی موج‌های ضربه‌ای ناشی از سقوط و لغزش اجسام به داخل آب پرداختند. آنها توانستند روابط بین قدرت موج و برخی ویژگی‌های سطح شیب‌دار را با فرمول‌هایی تجربی بیان کنند (۱۹). در سالیان اخیر، روش‌های عددی مختلفی مانند ASPH برای شبیه‌سازی موج‌های ضربه‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از جمله‌ی این کارها می‌توان به مطالعات عطایی آشتیانی و شبیری (۳) و آلی و آسای (۲) اشاره کرد. در این روش، از شبکه بندی استفاده نمی‌شود و تنظیم شرایط مرزی نظیر ورودی‌ها و دیوارها نسبت به سایر روش‌های عددی دارای شبکه‌بندی بسیار دشوار می‌باشد و همچنین هزینه‌های محاسباتی بسیار بالایی نیز دارد (۲، ۱۴). لذا در این تحقیق، برای پوشش این خلأ، یک روش عددی جدید ارائه شده است.

نرم افزار OpenFOAM این قابلیت را در خود دارد تا انواع موج منظم و نامنظم بر پایه قواعد استوکس را پیاده کند (۱۸)، ولی کتابخانه‌های مورد استفاده در آنها، هیچ‌کدام قابلیت تشکیل موج ضربه‌ای ناشی از

⁵ Large eddy simulation

⁶ Breaking

⁷ Savage-Hutter

⁸ Smoothed-particle hydrodynamics

¹ Harmonic Polynomial Cell (HPC)

² FSI

³ immersed

⁴ granular

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha U) = 0 \quad (1)$$

تابع کسر حجمی برای محاسبه خواص سیال در نقاط شبکه به صورت روابط (۲) و (۳) استفاده می‌شود (۱۳).

$$\rho = \alpha \rho_l + (1 - \alpha) \rho_g \quad (2)$$

$$\mu = \alpha \mu_l + (1 - \alpha) \mu_g \quad (3)$$

شبکه‌بندی روی هم‌رونده این قابلیت را دارد تا با استفاده از درون‌یابی، خواص به دست آمده در نقاط شبکه را به طور هم‌زمان حل و به هم مرتبط نماید. در رابطه با روش شبکه‌بندی روی هم‌رونده در بخش ۲-۳ به طور مفصل بحث شده است. روابط (۴) و (۵) نیز به ترتیب معادلات پیوستگی جرم و مومنتوم را نشان می‌دهند که در آن‌ها بردار U سرعت با واحد متر بر ثانیه (m/s) ، فشار با واحد پاسکال (Pa) ، f نیروهای حجمی، ρ چگالی با واحد کیلوگرم بر متر مکعب (kg/m^3) ، t زمان با واحد ثانیه (s) و μ ویسکوزیته دینامیک بر حسب پاسکال ثانیه $(Pa \cdot s)$ می‌باشد (۱، ۶، ۱۲).

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (4)$$

$$\rho \frac{DU}{Dt} = \rho f - \nabla P + \mu \nabla^2 U \quad (5)$$

با توجه به تداخل سازه و سیال به هنگام ورود جسم به آب و ماهیت اغتشاشی (آشفته) لغزش جسم بر روی سطح شیب دار و ورود به داخل آب و اهمیت انرژی جنبشی اغتشاشی، می‌بایست از یک مدل اغتشاشی مناسب استفاده نمود. انتخاب مدل اغتشاشی مناسب در این شبیه‌سازی می‌تواند تأثیر به‌سزایی بر دقت نتایج حل داشته باشد. مخصوصاً به هنگام ورود جسم به داخل آب و اندرکنش شدید سازه و سیال، این مدل آشفتگی تأثیر بسیار فراوانی در تولید ارتفاع مناسب موج دارد. معادلات انتقال متغیرهای اغتشاشی در مدل $k - \epsilon$ استاندارد به صورت روابط (۶) و (۷) می‌باشد (۱، ۶، ۱۲).

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial (\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k - \rho \epsilon \quad (6)$$

$$\frac{\partial \rho \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha_\epsilon \mu_{eff} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G_k - \rho C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (7)$$

که G_k برابر با $\mu_t S^2$ و μ_t نیز دارای مقدار $\rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$ می‌باشد. در روابط (۶) و (۷)، G_k بیانگر تولید انرژی جنبشی آشفتگی (k) به واسطه وجود نیروهای لزجی در مسیر لغزش جسم صلب است. ϵ و S به ترتیب بیانگر نرخ اتلاف اغتشاشات و نرخ کرنش می‌باشند. $C_{1\epsilon}$ و $C_{2\epsilon}$ نیز ضرایب ثابت مربوط به این مدل آشفتگی هستند. عمده تفاوت بین مدل‌های آشفتگی، در تعریف این ضرایب ثابت می‌باشد.

هندسه و شرایط مرزی

در این تحقیق، از هندسه‌ای مشابه با هندسه‌ی لیو و همکاران (۲۰۰۵) استفاده شده است (۱۵). برای ایجاد هندسه‌ی سه بعدی محفظه‌ی آب

لغزش بر روی سطح شیب را ندارد و اغلب از شرط مرزی تولید موج استفاده می‌شود، که بر پایه‌ی تشکیل موج پیستونی است. در این کتابخانه‌ها از شبکه بندی متحرک استفاده نمی‌گردد، لذا ارائه مدل-سازی عددی، که بتواند موجی با دقت بسیار بالا که هم از شبکه بندی متحرک و هم از قواعد لغزش بر روی سطح شیب دار تبعیت کند، احساس می‌شود (۲۴).

با بررسی پیشینه پژوهش تحقیق می‌توان دریافت که مطالعه‌ای در رابطه با تأثیر پارامترهای چگالی و ارتفاع بی بعد رهاشدن جسم در تولید موج ناشی از لغزش جسم بر روی سطح شیب دار صورت پذیرفته است و همواره خلاء ارائه یک مدل سازی که بتواند با دقت بالا ارتفاع موج ناشی از لغزش را محاسبه کند، احساس شده است. لذا، در این تحقیق، به بررسی این موضوع پرداخته شده است. برای حل معادلات حاکم بر مسئله، از نرم‌افزار متن باز OpenFOAM استفاده شده است. در این نرم‌افزار، با استفاده از روش حجم سیال و شبکه‌بندی برهم‌رونده، به بررسی پارامترهای تأثیرگذار در تشکیل موج در لحظات اولیه پرداخته شده است. روش شبکه بندی برهم‌رونده در ورژن‌های استاندارد OpenFOAM وجود ندارد. اما در ورژن‌های ESI این روش شبکه بندی وجود دارد. در این نوع از شبکه‌بندی، دو مش متفاوت با ابعاد مختلف، می‌توانند بر روی یک دیگر بلغزند و پدیده‌های فیزیکی مختلف با تعریف مرز دیواره در آنها، مشاهده نمود (شکل ۳، سمت چپ). خواصی مانند چگالی، ویسکوزیته و غیره با استفاده از روش درون‌یابی بین این دو نوع شبکه محاسبه می‌گردد. ذکر این نکته حائز اهمیت است که نوع هر دو شبکه بندی باید یکسان باشند. بر فرض مثال می‌بایست دو نوع شبکه بندی سازمان یافته با سلول‌های مستطیلی شکل اعمال گردند. همچنین اندازه‌ی سلول‌ها می‌توانند هر مقدار دلخواه باشند، به نحوی که کیفیت شبکه‌بندی کلی حفظ گردد. نوآوری اصلی کار فعلی، معرفی روش جدید شبکه‌بندی برهم‌رونده و حجم سیال برای شبیه‌سازی موج ناشی از لغزش جسم بر روی سطح شیب دار می‌باشد. بعد از صحت سنجی با کارهای تجربی، تأثیر پارامترهای اثرگذار در فرآیند با استفاده از این روش مطالعه و بررسی گردیده‌اند

مواد و روش‌ها

برای شبیه‌سازی لغزش جسم به داخل آب، از ترکیب دو روش دوفازی حجم سیال و مش روی هم‌رونده در نرم‌افزار OpenFOAM استفاده شده است. در روش دوفازی حجم سیال، هر دو فاز به صورت مخلوط در نظر گرفته شده و از معادلات ناویر-استوکس متشکل از یک معادله پیوستگی و یک معادله مومنتم استفاده گردیده است. برای تعقیب سطح مشترک دو فاز از یک معادله اضافی که همان معادله انتشار کسر حجمی است، استفاده می‌شود. این معادله با نام معادله‌ی نفوذ به صورت رابطه‌ی (۱) ارائه می‌شود. در معادله (۱)، مقدار α برای نشان دادن موقعیت سیال به کار رفته است و عددی بین صفر و یک دارد. برای آب، عدد یک و برای هوا نیز عدد صفر در نظر گرفته شده است. در حالت مخلوطی از آب و هوا نیز مقدار α بین صفر و یک قرار دارد (۱۲).

⁹ Interpolation

دیده نمی‌شود. اختلاف بین مش ۸۰۰۰۰۰ و مش ۹۰۰۰۰۰ در حدود ۰/۳ درصد می‌باشد. لذا این شبکه‌بندی برای نتایج کار ما مناسب و بهینه می‌باشد (شکل ۴).

برای به دست آوردن مناسب‌ترین گام زمانی نیز در ابتدا گام زمانی از مرتبه‌ی ۴-۱۰ در نظر گرفته شده و سپس با کاهش آن مشاهده شد که از گام زمانی ۶-۱۰ به بعد تغییری در پروفیل موج به طور محسوس ایجاد نمی‌شود. لذا این گام زمانی برای شبیه‌سازی انتخاب شده است (شکل ۵).

روش حل عددی

در این تحقیق، از شبکه‌بندی روی هم‌رونده ۱۱ استفاده شده است. در این نوع از شبکه‌بندی، دو میدان محاسباتی با شبکه‌بندی‌های متفاوت قابلیت حرکت روی یکدیگر را با الگویی تعریف شده دارند. در هنگام لغزش این دو شبکه‌بندی، مقادیر مشترک بین آنها، با استفاده از درون‌یابی ۱۲ حل و جایگذاری می‌شود. روش‌های مختلف شبکه متحرک در OpenFOAM وجود دارد مانند، تطابق ۱۳، اصلاحی ۱۴ و جسم صلب ۱۵ که هر کدام بسته به کاربرد مورد استفاده قرار می‌گیرند (۱۸، ۲۰).

در این تحقیق، برای کنترل نحوه‌ی رفتار جسم در حال لغزش بر روی سطح شیب‌دار، از روش شش درجه آزادی ۱۶ استفاده شده است. شبکه‌بندی روی هم‌رونده توسط شرکت ESI توسعه داده شده است و از جمله مزایای آن حفظ کیفیت شبکه‌بندی و دقت بالا نسبت به سایر روش‌ها می‌باشد (۲۰، ۲۹).

برای بررسی نتایج، متغیرهای بی بعدی با استفاده از ارتفاع لغزنده (a)، عرض لغزنده (b)، عمق آب مخزن (H) و ارتفاع رها شدن لغزنده (h) در نظر گرفته شده اند. در فرمول (۸) این متغیرهای بی بعد نشان داده شده‌اند. که H^* نشان دهنده‌ی عمق بی بعد آب، h^* و G نیز به ترتیب ارتفاع بی بعد لغزنده و نسبت هندسی می‌باشد (شکل ۱).

$$H^* = \frac{H}{a} \quad h^* = \frac{h}{a} \quad G = \frac{a}{b} \quad (8)$$

صحت‌سنجی

بررسی دقت نتایج این تحقیق از نتایج تجربی لیو و همکاران (۲۰۰۵) استفاده شده است. بدین منظور، در زمان‌های مختلف، پروفیل موج پیش‌رونده در شکل (۶) به همراه پروفیل موج کار تجربی لیو و همکاران (۲۰۰۵) نشان داده شده‌اند (۱۵). بیشترین درصد خطای گزارش شده با استفاده از حداقل مربعات

با کار لیو و همکاران (۲۰۰۵)، ۴ درصد می‌باشد. برای استخراج نتایج در این تحقیق از ابزار پس‌پردازش پایتون (python) استفاده شده است. در شکل ۲ و ۳ طرح شماتیکی سه بعدی از نحوه‌ی قرارگیری جسم لغزنده‌ی مثلثی شکل و دامنه محاسباتی نشان داده شده است.

از ابزار بلاک مش ۱۰ استفاده شده است. و برای ایجاد هندسه جسم لغزنده، از نرم افزار سالومه استفاده شده است. نرم افزار سالومه، یک نرم افزار این سورس بوده که قابلیت ترسیم انواع هندسه‌های پیچیده را دارد و امکان وارد کردن هر نوع شبکه بندی از آن به داخل این فوم به راحتی میسر است. با ترسیم سه بعدی هندسه جسم لغزنده در سالومه و استخراج فایل STL، و قرار دادن آن در داخل پوشه ثوابت، از کتابخانه‌ی اسپیی هگزمش برای شبکه بندی غیرسازمان یافته استفاده شده است. سپس با استفاده از شبکه بندی متحرک شش درجه آزادی، امکان حرکت آزاد لغزنده بر روی سطح شیب دار برای جسم فراهم شده است. در شکل (۱) مرزهای مدل عددی نشان داده شده است. جسم از حالت سکون به داخل آب ساکن رها می‌شود. محفظه‌ی مورد مطالعه دارای عرض ۳/۷ متر و عمق آب ۴/۶ متر است. جسم مثلثی موجود در شکل ۱ به ابعاد $b=91/4$ سانتی‌متر، $a=45/72$ سانتی متر در گوشه‌ی سمت چپ بر روی سطح شیب‌دار آن قرار داده شده است و این قابلیت را دارد تا به طور آزاد و با استفاده از وزن خود بر روی سطح بلغزد و وارد آب شود. با توجه به اینکه هدف این تحقیق لغزش بر روی سطح شیب‌دار و تداخل سازه و سیال می‌باشد، بنابراین ضروری است که در مسیر حرکت جسم بر روی سطح شیب دار با ریز شدن شبکه به منظور دست‌یابی به گرادین‌های زیاد، دقت محاسبات افزایش یابد. با این عمل، علاوه بر افزایش دقت، زمان محاسباتی نیز به طور چشم‌گیر بهبود می‌یابد. همچنین مش غیرسازمان یافته در اطراف جسم مثلثی نیز باید از نظر ابعادی نیز به قدر کافی ریز باشد تا با سطح شیب دار نیز به طور مناسب درون یابی صورت بگیرد. در جدول (۱) خواص هوا و آب نشان داده شده است.

جدول ۱. خواص فیزیکی آب و هوا در دمای استاندارد ۲۵

درجه سانتی گراد			
نام ماده	کشش سطحی N/m ²	ویسکوزیته دینامیک cP	چگالی kg/m ³
هوا	۰/۰۷	۰/۰۱۸	۱/۰۳۵
آب	۰/۰۷	۱	۱۰۰۰

استقلال نتایج از شبکه و گام زمانی

تشکیل موج و انتشار آن داخل محفظه در این تحقیق با استفاده از شبکه‌بندی سازمان یافته صورت پذیرفته و می‌بایست از مستقل بودن نتایج از تعداد شبکه‌ها نیز اطمینان حاصل کرد. برای این کار، ابتدا یک شبکه‌بندی نسبتاً درشت (مش ۷۰۰۰۰۰) را انتخاب کرده و سپس تعداد مش‌ها تغییر داده و سپس به بررسی پروفیل موج در زمان‌های مختلف پرداخته شده است. از شکل (۲) می‌توان دریافت که از مش‌بندی ۸۰۰۰۰۰ به بعد تغییری در نحوه‌ی ارتفاع میانگین و رفتار پروفیل موج

¹³ Adapting mesh

¹⁴ Refinement mesh

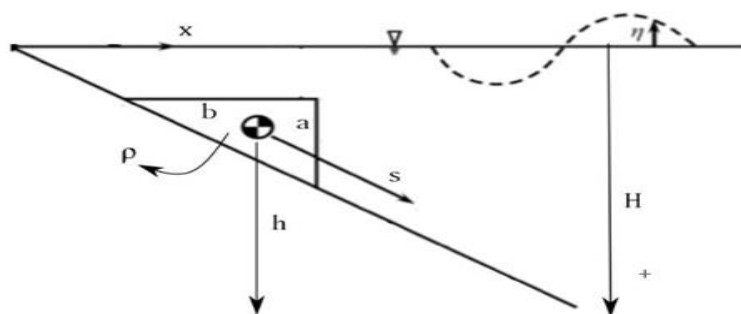
¹⁵ Solid body mesh

¹⁶ 6DOF

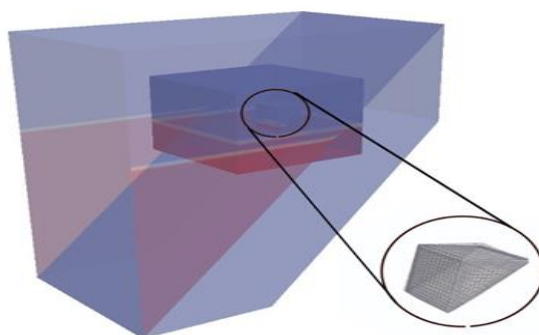
¹⁰ Blockmesh

¹¹ Overset mesh

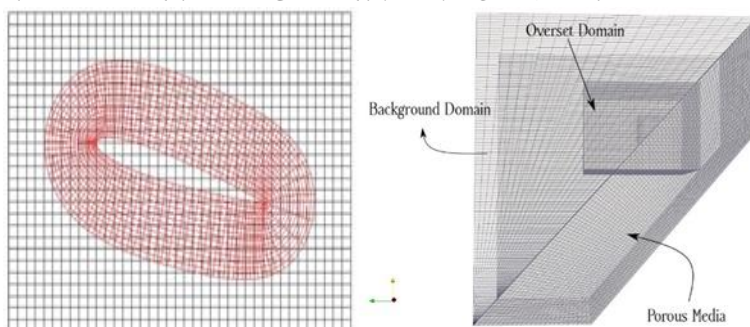
¹² Interpolation



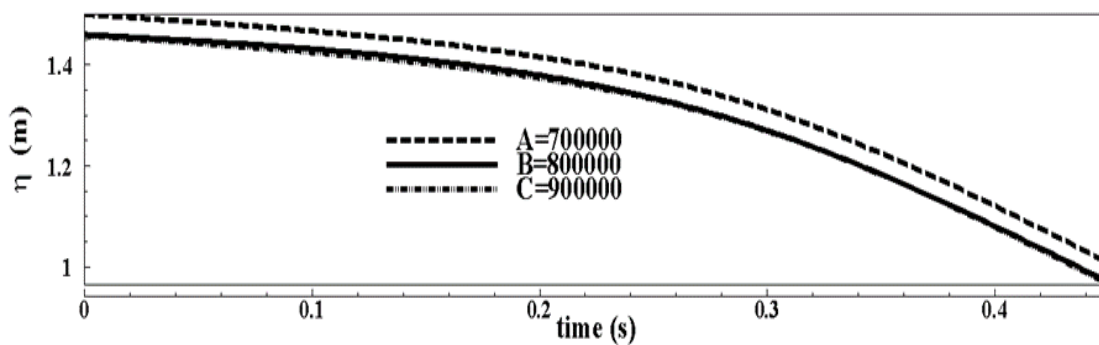
شکل ۱- شماتیک سه بعدی میدان محاسباتی و شرایط مرزی برای مسأله تولیدکنندهی موج ناشی از لغزش جسم به داخل آب (a ارتفاع لغزنده و b قاعده لغزنده)



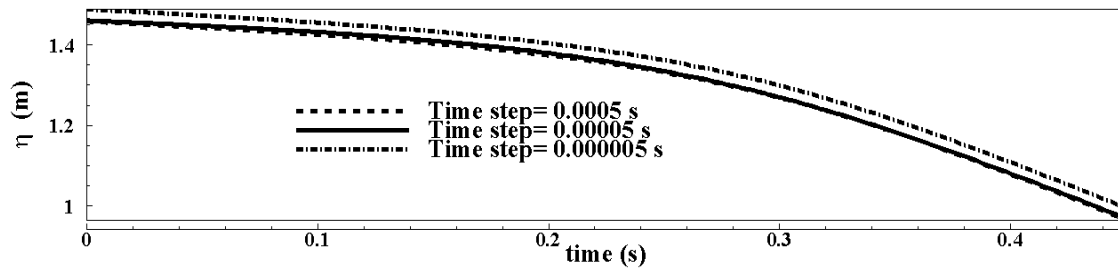
شکل ۲- شماتیک سه بعدی از جسم مثلی لغزنده بر روی سطح شیب دار و شبکه بندی در اطراف جسم



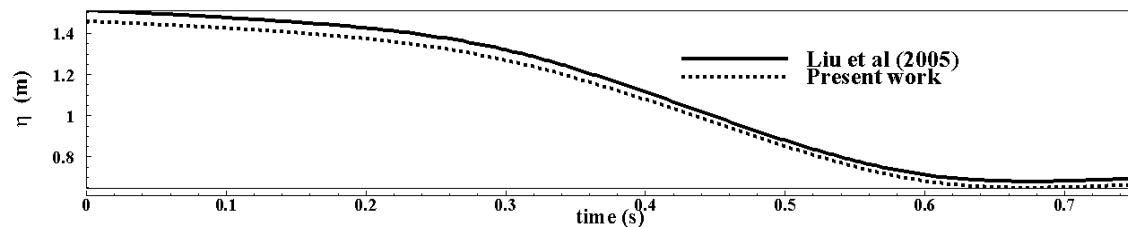
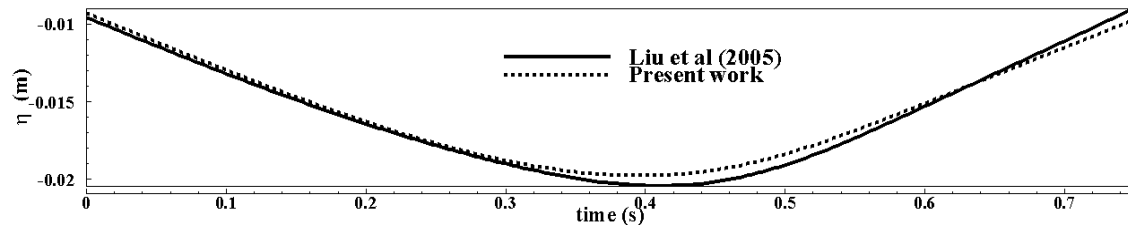
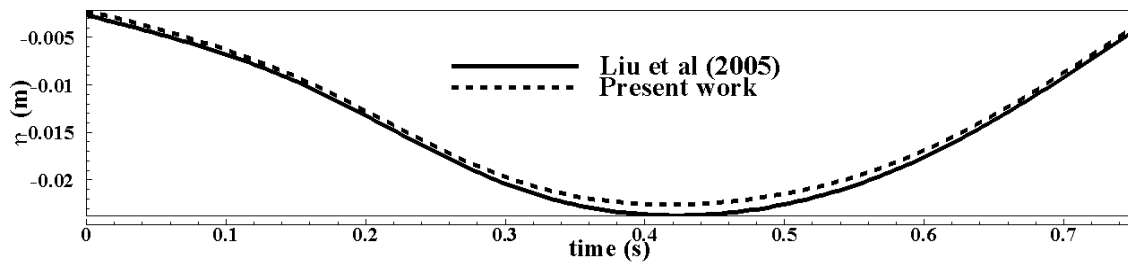
شکل ۳- سمت راست: شماتیک دوبعدی شبکه بندی کل دامنه، سمت چپ: نمایی از شبکه بندی بر روی هم رونده دو شبکه



شکل ۴- استقلال نتایج از شبکه برای پروفیل موج در لحظه ی تشکیل



شکل ۵- استقلال نتایج از گام زمانی برای پروفیل موج در لحظه‌ی تشکیل



شکل ۶- مقایسه بین نتایج کار فعلی شامل تغییرات زمانی ارتفاع موج ناشی از لغزش جسم با کار لیو و همکاران (۲۰۰۵).

جسم بر روی سطح شیب دار و مولفه‌ی مماسی در راستای سطح شیب-دار، هرچه قدر این مولفه‌ی هم‌راستا با سطح شیب‌دار دارای سرعت بیشتری باشد، به همان اندازه جسم مومنتوم بیشتری را به سطح آب وارد می‌کند. این مومنتوم بالا، سیال پیرامون را در جهت شعاعی به اطراف می‌راند و با ادامه‌ی لغزش جسم به داخل آب و برگشت سیال به سمت جسم، گردابه تشکیل می‌شود. این گردابه در زیر موج در راستای طولی منتشر می‌گردد و به مرور زمان داخل آب از بین می‌رود (۲۲).

ارتفاع موج بیانگر قدرت آن است و هر چه قدر این ارتفاع بیشتر باشد، قطر گردابه نیز بزرگ‌تر می‌باشد. رومانو و همکاران (۲۰۲۰) توانستند نشان دهند که گردابه‌ی تشکیل شده در ابتدا به شکل بیضی بوده و سپس با گذشت چند ثانیه تبدیل به دایره می‌گردد. با افزایش جرم جسم صلب لغزنده، نیروی ثقل (معادله ۹) آن افزایش می‌یابد و این نیرو با

نتایج

در قسمت نتایج این تحقیق، به بررسی تأثیر چهار پارامتر مهم در مسئله‌ی ایجاد موج ضربه‌ای ناشی از لغزش جسم پرداخته شده است. تمام بررسی‌ها در لحظات اولیه تشکیل موج ضربه‌ای انجام گرفته‌اند. تأثیر پارامترهایی مانند چگالی جسم لغزنده، ارتفاع بی‌بعد مرکز ثقل جسم از کف محفظه و عمق بی‌بعد آب محفظه بر ارتفاع موج منتشر شده بررسی شده‌اند. بیشتر بودن ارتفاع بی‌بعد موج، به منزله بالا بودن قدرت آن است که این خود می‌تواند تأثیر مخربی داشته باشد.

تأثیر چگالی جسم لغزنده

در این قسمت از تحقیق به بررسی تأثیر چگالی جسم لغزنده بر روی سطح شیب‌دار و ایجاد موج پرداخته شده است. با توجه به لغزش آزاد

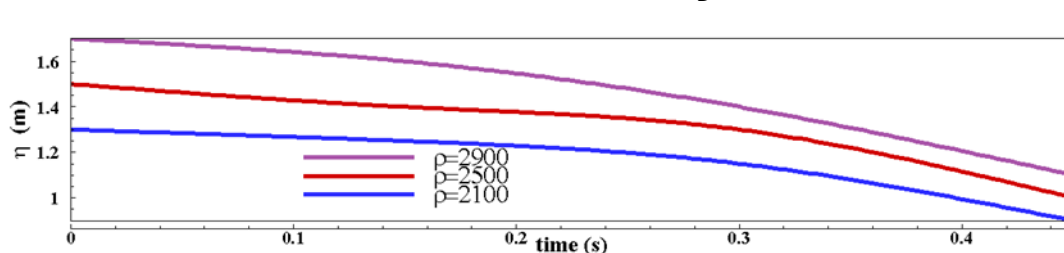
ذکر این نکته حائز اهمیت است که در فرمول ۱۰، نیروی درگ می تواند ناشی از اصطکاک نیز باشد ولی با توجه به ماهیت لغزش جسم و تولید موج ناشی از آن (رومانو ۲۰۲۰) از این ترم چشم پوشی شده است. θ نیز شیب سطح می باشد. ادامه لغزش جسم به داخل آب کاملاً وابسته به هندسه ی جسم لغزنده می باشد. در بخش ۳-۴ در رابطه با تاثیر هندسه لغزنده صحبت به میان آمده است.

غلبه بر نیروی درگ (معادله ۱۰) آب منجر به ادامه ی حرکت لغزشی آن داخل آب می شود. سرعت جسم هنگام برخورد با سطح آب کاملاً وابسته به جرم جسم لغزنده می باشد. از طرفی با توجه به فرمول ۱۰، ضریب درگ (C_D) وابسته به هندسه جسم می باشد. مسلماً به هر میزان نیروی درگ کمتر باشد، نیروی مقاوم در برابر لغزش نیز کمتر می باشد و جسم با سرعت بیشتری به سطح آب برخورد می کند (معادله ۱۱).

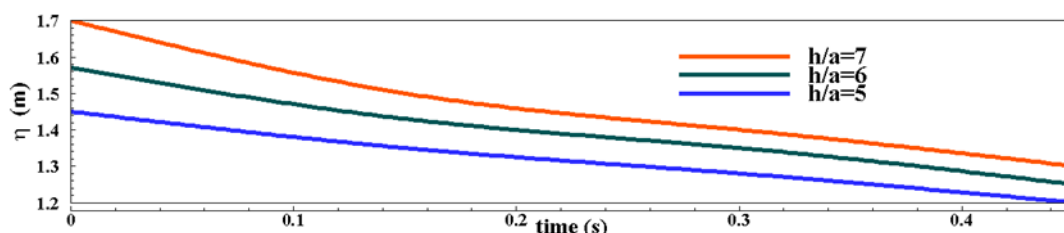
$$W = m \cdot g \sin \theta \quad (9)$$

$$F_D = C_D \frac{\rho A (V \sin \theta)^2}{2} \quad (10)$$

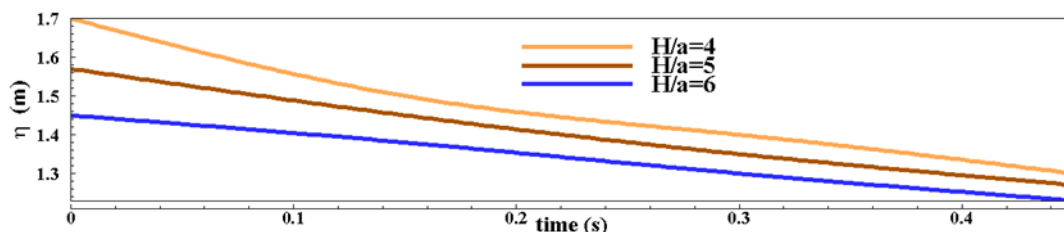
$$W - F_D = m \cdot a \quad (11)$$



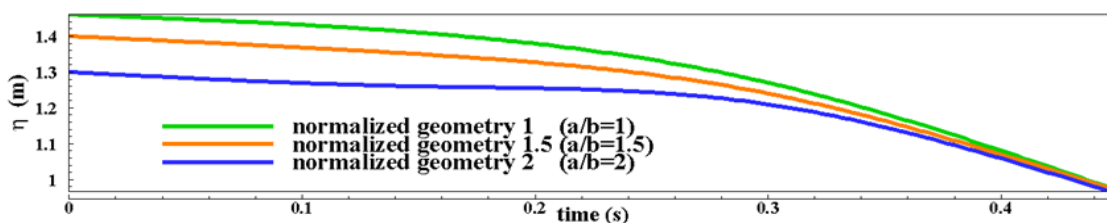
شکل ۷- تغییرات ارتفاع موج بر حسب انواع چگالی های جسم لغزنده (وزن جسم صلب) در $H/a=5$ ، $h/a=6$ و $a/b=1$



شکل ۸- تغییرات ارتفاع موج بر حسب ارتفاع رهاشدگی بی بعد در چگالی 3200 Kg/m^3 و $H/a=5$ ، $a/b=1$



شکل ۹- تغییرات ارتفاع موج بر حسب عمق آب بی بعد در چگالی 3200 Kg/m^3 و $h/a=6$ ، $a/b=1$



شکل ۱۰- تغییرات ارتفاع موج بر حسب نسبت هندسی بی بعد در چگالی 3200 Kg/m^3 و $H/a=5$ ، $h/a=6$

در حدود ۲۴ درصد می باشد. همانطور که گفته شد، هرچه چگالی جسم لغزنده بیشتر باشد، به همان اندازه نیز ارتفاع موج بالا خواهد بود. این بالا بودن ارتفاع موج منتشر یافته وابسته به اندازه گردابه در زیر آن می باشد. هرچه این گردابه بزرگتر باشد به همان اندازه موج قوی تر بوده

از شکل (۷) می توان دریافت که هر چقدر چگالی جعبه بیشتر باشد، سیال بیشتری به اطراف جعبه رانده می شود. و ارتفاع موج ایجاد شده نیز بیشتر خواهد بود. برای این منظور از سه چگالی مختلف ۲۱۰۰، ۲۵۰۰ و ۲۹۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب استفاده شده است. افزایش ارتفاع میانگین موج در حالت چگالی لغزنده ی ۲۹۰۰ نسبت به چگالی ۲۱۰۰،

$$(m + C_m m_0) \frac{d^2 s}{dt^2} = (m - m_0)g(\sin \theta - C_n \cos \theta) - \frac{1}{2} C_d \rho A \left(\frac{ds}{dt}\right)^2 \quad (14)$$

که در فرمول ۱۲، m جرم لغزنده، S مقدار جابه‌جایی لغزنده در زیر آب، t زمان سپری شده در زیر آب، C_n ضریب اصطکاک کولمبیک (Columbic)، C_m ضریب مقدار جرم اضافه شده، m_0 مقدار آب جابه‌جاشده، A مساحت سطح مقطعی از لغزنده که با آب در تماس است و C_d نیز ضریب درگ ناشی از آب می‌باشد که به هندسه لغزنده وابسته است. پلونسکی و پاونسکی (۱۹۹۶) نیز اظهار داشتند که از ضریب C_n نیز می‌توان برای لغزش در حالت خشک در برخی مواقع صرف نظر کرد. از جمله مواقعی که فرض بر این است که تپه‌های مشرف به مخازن سدها، دارای لجن بوده و بتوان از اثرات اصطکاک صرف نظر نمود. همچنین مسیر طی شده توسط لغزنده مغروق در آب از فرمول ۱۵ تبعیت می‌نماید که وات (۱۹۹۸) آن را معرفی نموده بود (۲۸):

$$s(t) = \frac{V_t^2}{a_0} \log \left[\cosh \left(\frac{a_0 t}{V_t} \right) \right] \quad (15)$$

که در فرمول ۱۵، V_t سرعت نهایی لغزنده و a_0 نیز شتاب اولیه جسم می‌باشد. از فرمول بالا می‌توان دریافت که تابع لگاریتمی معرفی شده در فرمول ۱۵، کاملاً وابسته به سرعت نهایی لغزنده است و هرچه سرعت نهایی لغزنده بزرگتر باشد، آن جسم مسیر طولانی‌تری را بر روی سطح لغزنده طی می‌کند. رفتار نمودار معادله ۱۵، تقریباً مشابه با رفتار نمودار درجه دوم می‌باشد، که برای سرعت‌های شتاب گیرنده، رفتاری صعودی دارد.

تأثیر عمق آب (H/a) در محفظه

فرمول ۱۶، برای توصیف ارتفاع موج تشکیل شده از لغزش و یا سقوط جسم به داخل آب کاربرد دارد. از این فرمول می‌توان دریافت که عمق آب رابطه‌ی معکوسی با ارتفاع سطح آزاد سیال H دارد.

$$H(x, t) = a \sec^2 \left[\sqrt{\frac{3a}{4d^3}} (x - ct) \right] \quad (16)$$

که H ارتفاع سطح آب، a دامنه موج، d عمق آب و $c = \sqrt{g(d+a)}$ سرعت قله موج است شکل (۹) بیانگر این موضوع است که هر چقدر عمق بی بعد آب افزایش یابد، به همان اندازه نیز ارتفاع موج ضربه‌ای نیز کاهش می‌یابد. با استفاده از این تئوری، می‌توان فهمید که اغلب در علوم ساخت سد، مخازن کم نسبتاً پر عمق انتخاب می‌شود. هرچند این موضوع بستگی زیادی به ارتفاع تخلیه‌کننده‌های تحتانی سدها و موقعیت جغرافیایی منطقه دارد.

تأثیر نسبت هندسی بی بعد جسم لغزنده

و مومتوم بزرگتری را حمل می‌کند. وجود این گردابه‌ها در زیر قله موج انتشار آن، نمونه‌ای از وجود امواج درونی (Internal Wave) است.

تأثیر ارتفاع رهاشدگی جسم لغزنده (h/a)

سرعت جسم صلب لغزنده پس از رها شدن از ارتفاع Δh بالای سطح آب، در لحظه برخورد با سطح آب با استفاده از رابطه (۱۲) تعیین می‌گردد. ذکر این نکته حائز اهمیت است که، جسم لغزنده بعد از برخورد به سطح آب و نفوذ به داخل آن، دچار شناوری نمی‌گردد و وزن آن طوری انتخاب گردیده است که به مسیر مستقیم خود ادامه می‌دهد.

$$V^2 - V_0^2 = 2g\Delta h \sin \theta^2 \quad (12)$$

که در این معادله V_0 سرعت اولیه جسم لغزنده در راستای سطح شیب‌دار در لحظه‌ی رها شدن از بالای سطح آزاد سیال به ارتفاع Δh می‌باشد. مقدار Δh برابر است با $h_{sliding-hwate}$. در معادله (۱۲)، V برابر با سرعت برخورد جسم صلب به سطح آب و g شتاب گرانشی زمین برابر مقدار ۹/۸۱ متر بر مجذور ثانیه می‌باشد. در این فرمول از شتاب تجزیه شده در راستای سطح شیب‌دار و طولی که جسم لغزنده بر روی سطح شیب‌دار طی می‌کند، استفاده شده است. توان دوم عبارت \sin نیز ناشی از آن می‌باشد.

معادله (۱۲) بیانگر معادله مستقل از زمان حرکت لغزنده آزاد اجسام در غیاب نیروهای ناشی از اصطکاک است؛ سرعت اولیه و سرعت نهایی جسم، ارتفاع رهاشدگی و شتاب نقل زمین در غیاب زمان به هم مرتبط می‌شود. در این شبیه‌سازی عددی، به علت اینکه جسم صلب از حالت سکون در بالای سطح آزاد سیال رها می‌شود، مقدار V_0 برابر با صفر می‌باشد. لذا با اعمال این تغییر، معادله (۱۲) به دست می‌آید.

$$v = \sqrt{2g\Delta h \sin \theta} \quad (13)$$

به منظور بررسی اثر سرعت برخورد جسم صلب با سطح آزاد، مسئله برای ارتفاع بی بعد لغزنده از کف محفظه‌ی (h/a) 5، 6 و 7 تعیین می‌گردد. از شکل (۸) می‌توان دریافت که با افزایش این ارتفاع سرعت برخورد جسم لغزنده به سطح آزاد آب نیز افزایش می‌یابد. بالا بودن سرعت برخورد به این منزله می‌باشد که تکانه منتقل شده از جسم صلب به آب بیشتر می‌باشد و این تکانه بالا باعث فرورفتن بیشتر آب در زمان مشابه می‌شود. شکل (۸) بیانگر این مطلب می‌باشد.

بعد از برخورد جسم لغزنده به سطح آب نیروی درگ ناشی از آب باعث کندتر شدن حرکت لغزنده می‌گردد. هر چه قدر ارتفاع بی بعد رهاشدگی جسم لغزنده بیشتر باشد، پروفیل‌های موج بیشتر در راستای عمودی پخش می‌گردند و با به اصطلاح Plumper می‌گردند. این اصطلاح در شکل ۸ کاملاً مشهود می‌باشد. با Plumper شدن آب موج دچار تاخیر در انتشار می‌گردد هر چند ارتفاع موج بسیار بالاتری دارد. از شکل ۸ می‌توان دریافت که درصد افزایش ارتفاع موج در ارتفاع رهاشدگی بی بعد ۷، به طور تقریبی ۲۰ درصد نسبت به ارتفاع رهاشدگی بی بعد (h/a) ۵ بیشتر است. همانطور که گفته شد فرمول ۱۲ برای لحظه‌ی برخورد جسم لغزنده به سطح آب می‌باشد. برای بررسی بیشتر ادامه‌ی مسیر حرکت لغزنده داخل آب، فرمول ۱۴ توسط پلونسکی و پاونسکی (۱۹۹۶) ارائه گردیده است (۲۱).

در بخش پایانی، این تحقیق به بررسی نسبت هندسی بی بعد لغزنده و تاثیر آن بر روی ارتفاع موج ضربه‌ای پرداخته شده است. نسبت بی بعد معرفی شده عبارت است از: a/b که در آن a ارتفاع جسم مثلثی است که مستقیم در ارتباط با آب است. از شکل ۱۰ می‌توان دریافت که با افزایش نسبت هندسی بی‌بعد، ارتفاع موج موقع تشکیل کاهش می‌یابد. به طوری که وقتی این نسبت دو برابر شود، ارتفاع موج، در حدود ۱۴ درصد کاهش می‌یابد. دلیل فیزیکی آن را می‌توان اینطور بیان نمود که وقتی جسم لغزنده با سطح پهن تری به آب مومنتوم وارد می‌کند، نیروی کمتری به آب وارد می‌گردد (بنابر تعریف فشار که نیرو بر واحد سطح است) و حجم کمتری از آب را جابه‌جا می‌کند. ولی وقتی با سطح نسبتاً کمتری به آب برخورد می‌کند، باعث ایجاد ضربه‌ای بسیار قوی می‌شود که حجم بالاتری را جابه‌جا می‌کند و ارتفاع موج بیشتر می‌باشد. همچنین در حالت a/b برابر یک مرکز ثقل جسم لغزنده در ارتفاع بالاتری نسبت به a/b برابر ۲ دارد یافته‌ها نشان داد.

ملاحظات اخلاقی پیروی از اصول اخلاق پژوهش

همکاری مشارکت‌کنندگان در تحقیق حاضر به صورت داوطلبانه و با رضایت آنان بوده است.

حامی مالی

هزینه تحقیق حاضر توسط نویسندگان مقاله تامین شده است.

مشارکت نویسندگان

طراحی و ایده‌پردازی: قاسم مختارزاده، شمس بصیرت و جلال بازرگان است.

روش‌شناسی و تحلیل داده‌ها: قاسم مختارزاده، شمس بصیرت نظارت و نگارش نهایی: شمس بصیرت.

تعارض منافع

این مقاله مستخرج از رساله دکتری آقای قاسم مختارزاده با عنوان "مدل‌سازی عددی امواج ضربه‌ای ناشی از رخداد لغزش ناگهانی دیواره (مواد صلب و دانه‌ای) در مخازن سدها" به راهنمایی خانم دکتر شمس بصیرت و آقای دکتر جلال بازرگان است.

References

1. Afshar, M. A. (2010). Numerical wave generation in OpenFOAM®.
2. Aly, A. M., and Asai, M., (2014). "Incompressible smoothed particle hydrodynamics simulations of fluid-structure interaction on free surface flows", International Journal of Fluid Mechanics Research, Vol 41, pp. 14-35.
3. Ataie-Ashtiani, B., and Shobeyri, G, (2007). "Numerical simulation of landslide impulsive waves by incompressible smoothed particle hydrodynamics", International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol 56, pp 209-232.
4. de la Asunción, M., Castro, M. J., Mantas, J. M., & Ortega, S. (2016). Numerical simulation of tsunamis generated by

landslides on multiple GPUs. Advances in Engineering Software, 99, 59-72

5. de la Asunción, M., & Castro, M. J. (2017). Simulation of tsunamis generated by landslides using adaptive mesh refinement on GPU. Journal of Computational Physics, 345, 91-110.
6. Esmail Heidari Fahvande, Nader Barahmand, (2017). Application of the Standard Torbulance Model and the Volume of Fluid Method in Prediction of the Water Surface Profiles in a Hydraulic Jumps on the Triangular Corrugated Beds. ۳۳-۴, (۲۸)۹, <https://dorl.net/dor/20.1001.1.20086377.1395.9.28.3.4۶>.
7. Fritz, H. M., Hager, W. H., and Minor, H. E, (2003). "Landslide generated impulse

بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق، با شبیه‌سازی عددی مسئله لغزش یک جسم صلب بر روی سطح شیب دار و ورود به آب، نحوه تشکیل تک موج ضربه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. به منظور مدل‌سازی عددی تشکیل موج ضربه‌ای در آب از روش‌های حجم سیال و شبکه‌ی روی هم‌رونده استفاده شده‌است و با شبیه‌سازی در نرم‌افزار متن باز OpenFOAM، جسم صلب لغزنده با سیال ساکن آب برهم‌کنش می‌نماید. روش عددی پیشنهادی در کار فعلی با نتایج تجربی تطابقت بسیار خوبی از خود نشان داد.

نتایج نشان داد که با افزایش ارتفاع رهاشدگی جسم (h/a) ، ارتفاع موج (قدرت موج) افزایش یافت. همچنین، چگالی لغزنده تأثیر محسوسی بر موج تولیدی دارد و با افزایش چگالی جسم صلب، افزایشی

- waves", *Experiments in Fluids*, Vol 35, pp 505-519.
8. Heller, V., & Hager, W. H. (2011). Wave types of landslide generated impulse waves. *Ocean Engineering*, 38(4), 630-640.
 9. Heller, V., & Hager, W. H. (2010). Impulse product parameter in landslide generated impulse waves. *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering*, 136(3), 145-155.
 10. Heller, V., Bruggemann, M., Spinneken, J., & Rogers, B. D. (2016). Composite modelling of subaerial landslide-tsunamis in different water body geometries and novel insight into slide and wave kinematics. *Coastal Engineering*, 109, 20-41.
 11. Heinrich, P. (1992). "Nonlinear water waves generated by submarine and aerial landslides", *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol 118, pp 249-266.
 12. Hossein Khorshidi, (2016). Numerical Investigation of Aeration System in High Flow Velocity Using VOF ۶۲-۷۴. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.20086377.1395.9.29.5.8>
 13. Kim, G. B., Cheng, W., Sunny, R. C., Horrillo, J. J., McFall, B. C., Mohammed, F., & Kowalik, Z. (2019). Three Dimensional Landslide Generated Tsunamis: Numerical and Physical Model Comparisons. *Landslides*, 1-17.
 14. Li, C. Y., Shih, R. S., and Weng, W. K. (2020). Visualization Investigation of Energy Dissipation Induced by Eddy Currents for a Solitary-like Wave Passing over Submerged Breakwater Sets. *Journal of Marine Science and Engineering*, Vol 11, pp 834.
 15. Liu, P. F., Wu, T. R., Raichlen, F., Synolakis, C. E., & Borrero, J. C. (2005). Runup and rundown generated by three-dimensional sliding masses. *Journal of fluid Mechanics*, 536(1), 107-144.
 16. McFall, B. C., & Fritz, H. M. (2016). Physical modelling of tsunamis generated by three-dimensional deformable granular landslides on planar and conical island slopes. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 472(2188), 20160052.
 17. Napoli, E., De Marchis, M., Gianguzzi, C., Milici, B., and Monteleone, A. (2016). A coupled Finite Volume-Smoothed Particle Hydrodynamics method for incompressible flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol 310, pp 674-693.
 18. OpenFOAM Foundation Ltd., (2016). "OpenFOAM — the open source CFD toolbox —Programmers' guide"
 19. Panizzo, A., Bellotti, G., and De Girolamo, P. (2002). "Application of wavelet transform analysis to landslide generated waves", *Coastal Engineering*, Vol 44, pp 321-338.
 20. Pedersen, J. R., Larsen, B. E., Bredmose, H., and Jasak, H. (2017) "A new volume-of-fluid method in OpenFOAM", In VII International Conference on Computational Methods in Marine Engineering. pp. 266-278
 21. Pelinovsky, E., & Poplavsky, A. (1996). Simplified model of tsunami generation by submarine landslides. *Physics and Chemistry of the Earth*, 21(1-2), 13-17.
 22. Romano, A. (2020). Physical and Numerical Modeling of Landslide-Generated Tsunamis: A Review. *Geophysics and Ocean Waves Studies*.
 23. Robbe-Saule, M., Morize, C., Henaff, R., Bertho, Y., Sauret, A., and Gondret, P. (2020). Experimental investigation of tsunami waves
 24. Shadloo, M. S., Oger, G., and Le Touzé, D. (2016). Smoothed particle hydrodynamics method for fluid flows, towards industrial applications: Motivations, current state, and challenges. *Computers and Fluids*, Vol 136, pp 11-34
 25. Tong, C., Shao, Y., Hanssen, F. C. W., Li, Y., Xie, B., and Lin, Z. (2019). Numerical analysis on the generation, propagation and interaction of solitary waves by a Harmonic Polynomial Cell Method. *Wave Motion*, Vol 88, pp 34-56.
 26. Wang, B., Yao, L., Zhao, H., and Zhang, C. (2018) "The maximum height and attenuation of impulse waves generated

- by subaerial landslides", *Shock and Vibration*, Vol 31, , pp 47-98
27. Watts, P., (1998). Wavemaker curves for tsunamis generated by underwater landslides. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Eng.*, 124(3):127-137.
 28. Windl, C., Davidson, J., Akram, B., and Ringwood, J. V., (2018) "Performance assessment of the overset grid method for numerical wave tank experiments in the OpenFOAM environment", 37th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering.
 29. Worni, R., Huggel, C., Clague, J. J., Schaub, Y., & Stoffel, M. (2014). Coupling glacial lake impact, dam breach, and flood processes: A modeling perspective. *Geomorphology*, 224, 161-176.
 30. Wu, N. J., Hsiao, S. C., Chen, H. H., and Yang, R. Y. (2016). The study on solitary waves generated by a piston-type wave maker. *Ocean Engineering*, Vol 117, pp 114-129.
 31. Wu, N. J., Tsay, T. K., and Chen, Y. Y. (2014). Generation of stable solitary waves by a piston-type wave maker. *Wave Motion*, Vol 2, pp 240-255.
 32. Xie, Z., and Stoesser, T. (2020). Two-phase flow simulation of breaking solitary waves over surface-piercing and submerged conical structures. *Ocean Engineering*, Vol 213, pp 107-679.
 33. Xu, W. J., & Dong, X. Y. (2021) Simulation and verification of landslide tsunamis using a 3D SPH-DEM coupling method. *Computers and Geotechnics*, 129, 103803.