

3D Numerical Modeling of Impulsive Wave Generation and Propagation by landslides in Dam Reservoir

Fateme Maleki^{1*}, Jalal Bazargan²

1- PhD Student in Civil Engineering, Zanjan University.

2- Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Zanjan University.

* f.maleki@znu.ac.ir

Received: 3 April 2024

Accepted: 6 June 2024

Discussion: 23 September 2025



J. Hydraul.

Iranian Hydraulic Association

Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: The most destructive consequence of large solid mass sliding into water is the generation of very high waves. This phenomenon has consistently resulted in significant damages worldwide. Among the most important of them, we can point to the sliding event in the reservoir of the Vajont dam in Italy and Lituya Bay mega tsunami in Canada and a fatal landslide in New Guinea, which caused many casualties and damages. Various researchers have considered this phenomenon with various analytical, numerical and experimental methods and have explained the effective factors from different geotechnical, geological and hydraulic aspects. The review of previous researches shows that despite the existence of experimental and numerical models, the factors of the depth of still water in the reservoir and the effect of surface tension force and porosity of the sliding mass have not been studied. These factors can have important effects on the forming and restraining forces of the phenomenon characteristics.

In this research, an attempt has been made to study aforementioned parameters in a three-dimensional study using Flow-3D software. In particular, information about the initial water depth, sliding mass porosity and numerical modeling considering the surface traction force in the wave has not been published. The innovation of this research is the examination of the impact of these parameters in the Flow-3D model and also the validation of the mentioned model using laboratory data of Bregoli et al. (2017).

Methodology: A three-dimensional modeling of impulse wave caused by the mass sliding has been done using the Flow-3D. v11.02 model, which is one of the most powerful tools for the use of computational fluid dynamics. This model solves three-dimensional equations of Navier-Stokes using volume fraction method and volume of fluid for incompressible fluid. In addition, consistent turbulence equations in the study of this phenomenon are renormalization group (RNG). In order to validate the numerical model, the laboratory data of Bregoli et al. (2017) which measured the impulse wave by mass sliding in still water in 3D has been used (see Fig.1). This model sensitivity has been measured with five different mesh sizes (Table 2). In the laboratory study of this phenomenon, because the dimensions and geometries are small, there will be scale effects such as the effect of surface tension, which can be ignored in the real scale of this phenomenon, and it is a false assumption if this effect is not considered in the modeling. As shown in Figure 3, modeling by activating surface tension physics in the Flow-3D model has better accuracy in all mesh sizes. In the present research, 19 models

using five still water levels in two different physics and two different types of masses have been implemented (Table 4). To study the effect of mass porosity, the physics of surface tension is active and three still water level have been considered.

Results and Discussion: The characteristics of the first wave formed after the mass impact the water surface and its propagation mechanism have been studied by analyzing the wave parameters.

As shown in Fig.5, by activating surface tension physics in the model, the wave velocity has decreased compared to its inactive state. By considering the effect of surface tension and boundary layer turbulence in the air-water interface, changes in fluid viscosity are considered in the surface tension equations, which causes the loss of wave energy.

The depth of water affects the characteristics of wave. Therefore, according to the Fig.6 and Table 7, characteristics of the wave extracted from the numerical model are given. As the water depth increases, the wave velocity increases and waves with shorter amplitude and longer wavelength are generated.

As shown in Fig.8 and 9, results show that by increasing the porosity of the sliding mass, a smaller wave with less energy is generated. The cause of this problem is the pore in the mass, which absorbs the energy of the collision and reduces the transfer of momentum to the water surface. In fact, the porous mass has a geometry similar to a damper.

Conclusion: Increasing the water depth increases the velocity and wavelength and decreases the sharpness and height of the wave. Applying the surface tension force is necessary for small-scale modeling and surface tension cannot be ignored in the generation and propagation of waves. As the porosity of the sliding mass increases, the height and velocity of the wave decreases and the wavelength increases.

Keywords: Surface tension, Mass sliding, Impulsive wave propagation, Flow-3D model.

مدلسازی عددی سه بعدی تولید و انتشار موج ضربه‌ای ناشی از لغزش دیواره‌های مخزن سد

فاطمه ملکی^{۱*}، جلال بازرگان^۲

۱- دانشجوی دکترای مهندسی عمران گرایش آب و سازه هیدرولیکی، دانشگاه زنجان.

۲- استاد، گروه عمران دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان.

* f.maleki@znu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۱۵، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۱۷، نقد و بررسی: ۱۴۰۴/۰۷/۰۱، وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: امواج ضربه‌ای در واقع نوعی از امواج سونامی هستند. مهم‌ترین عامل ایجاد این امواج، انتقال مومنتم از توده‌ی لغزشی به آب است. پدیده امواج ضربه‌ای عامل شکست سد و سیلاب حاصل از آن می‌باشد. بنابراین شناسایی عوامل موثر در این پدیده همواره از دغدغه‌های محققان و طراحان در حوضه هیدرولیک و سد بوده است. این پژوهش با استفاده از مدل عددی Flow-3D انجام شده و از داده‌های آزمایشگاهی (Bregoli et al., 2017) برای اعتبارسنجی مدل استفاده شده است. در این پژوهش، برای نخستین بار تاثیر کشش سطحی بر انتشار موج در مدلسازی سه بعدی موج با مدل Flow-3D در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد که در نظر گرفتن نیروی کشش سطحی برای استخراج نتایج با دقت بالا لازم است و خطای مدلسازی را در حالی که دیگر شرایط شبیه سازی مانند شرایط اولیه و مرزی و اندازه شبکه یکسان است، به طور میانگین ۵ درصد کاهش می‌دهد. همچنین عمق آب ساکن درون مخزن و تخلخل توده لغزنده بر مشخصات موج ضربه‌ای منتشر شده اثرگذار بوده است. بنابر یافته‌ها، با افزایش حدود دو برابری عمق آب، سرعت و طول موج ایجاد شده به ترتیب نزدیک به ۳۰ و ۴۸ درصد افزایش می‌یابد. بعلاوه با کاهش ۱۰ درصدی تخلخل توده لغزشی، سرعت موج ۱۴ درصد و طول موج ۱۰ درصد کاهش یافتند.

کلیدواژگان: کشش سطحی، توده لغزشی، انتشار موج ضربه‌ای، مدل Flow-3D.

۱- مقدمه

می‌توان به رویداد لغزش در مخزن سد وایونت در ایتالیا و خلیج لیتویا در کانادا و گینه نو اشاره کرد (Tappin et al., 2014; Harbitz et al., 2014; Grilli et al., 2017) که رویدادهای اخیر نیز موجب بروز خسارات اقتصادی و انسانی فراوانی شده است (Takagi et al., 2019; Grilli et al., 2019). برخلاف رخداددهای سونامی ناشی از عوامل زمین‌شناسی که در تولید و انتشار در سواحل شناخته شده هستند (Lo & Liu, 2017)، امواج ناشی از لغزش همچنان از جهات مختلف قابل مطالعه و بررسی است. محققان مختلف به انواع روش‌های تحلیلی (Fuhrman & Madsen, 2009; Zhou & Teng, 2010; Ma et al., 2012)، عددی (Zhang et al., 2020; Grilli et al., 2017)؛

زیان‌بارترین پیامد لغزش توده‌های بسیار بزرگ اجسام جامد به داخل مخازن سدها و دریاچه‌ها، ایجاد امواج با ارتفاع بسیار زیاد است که در اثر برخورد این توده‌ها به آب تشکیل می‌شوند و با پیشروی در مخزن و برخورد به دیواره‌ها و بدنه سد موجب تخریب این نواحی می‌گردند. شناخت دقیق و علمی این پدیده و پارامترهای موثر بر آن در محافظت از تاسیسات و منابع انسانی و زیست‌محیطی پیرامون و پایین دست سدها نقش بسزایی دارد و علاوه بر تامین ایمنی جانی، موجب حفظ منابع مالی کشورها می‌شود. در سراسر جهان همواره این پدیده با خسارات مالی و جانی زیادی همراه بوده است که از مهم‌ترین آن‌ها

بررسی میزان تاثیر این متغیرها در مدل Flow-3D و همچنین اعتبارسنجی مدل مذکور با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی (Bregoli et al., 2017) می‌باشد.

۲- مواد و روش‌ها

از آنجا که در این تحقیق بحث تولید و انتشار موج مورد بررسی قرار می‌گیرد، ابتدا به معرفی معادلات حاکم بر حرکت سیالات و مختصری روش مدلسازی با استفاده از نرم افزار Flow-3D پرداخته شده و پس از تحلیل حساسیت اندازه سلول‌های شبکه بر دقت محاسبات و اعتبارسنجی مدل با استفاده از داده‌های مطالعه آزمایشگاهی (Bregoli et al., 2017) و پس از اطمینان از صحت مدل عددی در ارزیابی پدیده‌ی حاضر، به تولید مدل با اعماق آب مختلف و تخلخل متفاوت پرداخته و نتایج حاصل را مطابق برآوردها و نتایج علمی مورد بحث قرار داده‌ایم.

۲-۱- معادلات حاکم و روش عددی

مدلسازی موج ضربه‌ای سه بعدی ناشی از زمین لغزش ایجاد شده با استفاده از مدل Flow-3D.v11.02 انجام شده است که به طور گسترده برای مطالعه ویژگی‌های تولید و انتشار موج ضربه‌ای ناشی از رانش زمین در مخازن سدها استفاده می‌شود. این مدل معادلات سه بعدی ناویر-استوکس را با استفاده از روش کسر حجمی و حجم سیال برای سیال تراکم ناپذیر حل می‌کند. بعلاوه معادلات آشفتگی سازگار در مطالعه این پدیده (RNG) است که می‌تواند جریان تک فاز و مشخصات حرکت جریان سنگریزه‌ای را به طور دقیق مدل کند (Kim et al., 2020; Flow Science, 2022). روش کسر حجمی برای تعریف نواحی هندسی درون شبکه مش مستطیلی به کار می‌رود و بر این اساس استوار است که در اشکال هندسی پیچیده، مقادیر پارامترها را بر اساس مقدار میانگین هر المان حجمی نشان می‌دهد.

معادلات حرکت سیال، معادله ناویه-استوکس، بصورت پایستگی جرم و مومنوم به ترتیب بصورت زیر تعریف می‌شوند:

Heidarzadeh et al., 2020; Chen et al., 2023; Wu et al., 2024; Yi et al., 2023; Lo et al., 2023 آزمایشگاهی (Fritz et al., 2009; Evers et al., 2019; Wang et al., 2019; Huang & Chen, 2020; Bolin et al., 2023; Lio et al., 2023; Wang et al., 2023) این پدیده را مورد بررسی قرار داده و عوامل موثر بر آن را از جهات مختلف ژئوتکنیکی، ژئولوژیکی و هیدرولیکی تشریح کرده و روابطی برای برآورد و پیش‌بینی خصوصیات موج حاصل از این برخورد ارائه کرده‌اند. (Ruffini et al., 2019) یک مدل عددی بر اساس معادلات غیرهیدرواستاتیک آب‌های سطحی برای تعیین اثر کمیت هندسه بدنه آب بر انتشار سونامی ناشی از لغزش در میدان دور ارائه کردند. (Hu et al., 2020) در یک ارزیابی عددی به بررسی هندسه مخزن در چگونگی انتشار موج حاصل از ضربه توده لغزشی پرداختند. در گذشته از دینامیک سیالات محاسباتی برای بررسی امواج تولید شده ناشی از لغزش و پارامترهای مختلف توده لغزنده استفاده شده است. در این بین مدلسازی با نرم افزار Flow-3D (Kim, 2012; Kim et al., 2020) Open foam (Romano et al., 2023) نرم افزار (Rauter et al., 2021; Sabeti et al., 2024) و فلوئنت (Li et al., 2021) بیشترین کارایی را داشته‌اند.

بررسی نتایج پژوهش‌های فوق نشان می‌دهد که علیرغم وجود مدل‌های آزمایشگاهی و عددی، موضوع عمق آب ساکن موجود در مخزن و تاثیر نیروی کشش سطحی و تخلخل توده لغزشی که می‌توانند اثرات مهمی بر برآیند نیروهای تشکیل دهنده و بازدارنده پدیده تولید و انتشار موج بگذارند، به طور کافی مورد مطالعه قرار نگرفته است. لذا در این پژوهش سعی شده است عمق آب درون مخزن به روش عددی و در مطالعه‌ای سه بعدی با استفاده از نرم‌افزار Flow-3D که یکی از قدرتمندترین ابزار بکارگیری دینامیک سیالات محاسباتی است مورد بررسی قرار گیرد. هدف اصلی این پژوهش بررسی پارامتر عمق آب ساکن درون مخزن، نیروی کشش سطحی و تخلخل توده لغزشی بر دینامیک موج ضربه‌ای تولید شده است. به طور خاص، اطلاعاتی در مورد دو پارامتر عمق اولیه آب، تخلخل توده لغزشی و مدلسازی عددی با در نظر گرفتن نیروی کشش سطحی در موج منتشر نشده است. نوآوری این تحقیق،

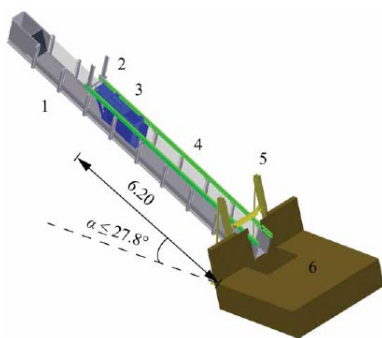


Fig. 1 Geometry of experimental model (Bregoli et al., 2017)

شکل ۱ ابعاد مدل آزمایشگاهی (Bregoli et al., 2017)

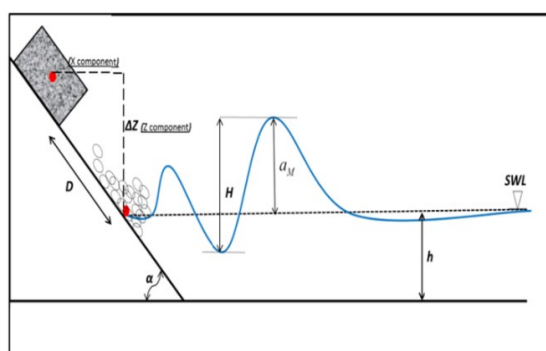


Fig. 2 Impulsive waves parameters (D: landslide distance, H: wave height, a: wave amplitude, h: still water level, α : slide impact angle)

شکل ۲ متغیرهای موج ضربه‌ای (D مسافت لغزشی، H ارتفاع موج، a_m دامنه موج، h ارتفاع اولیه آب مخزن، α زاویه لغزشی)

در پژوهش آزمایشگاهی مذکور، یک بلوک جامد به شکل مکعب که دارای حجم ثابت و حاوی مصالح سنسگریزه‌ای است، در آزمایشات برای شبیه سازی تولید موج ناشی از لغزش استفاده شده است. برای تعریف توده متخلخل، در بخش فیزیک نرم افزار، مشخصات توده متخلخل در "porous media" مشخص شد. سپس در بخش هندسه و شبکه بندی، مولفه توده لغزنده به صورت متخلخل "porous" به مدل معرفی گردید. شکل ۳ لحظه برخورد توده متخلخل به سطح آب در عمق اولیه ۳۵ سانتی متر در لحظات مختلف را نشان می‌دهد. در جدول ۱ ویژگی های هندسی و هیدرولیکی مدل آزمایشگاهی فوق آمده است. برای شبیه سازی، لازم است افزون بر شبکه محاسباتی، حساسیت جواب‌ها به تغییر ابعاد سلول‌های محاسباتی بررسی شود. در این مدل‌ها عمق آب ساکن درون مخزن برابر ۲۵ سانتی متر در نظر گرفته شده است و شبکه بندی

$$\nabla u = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u = -\frac{\nabla P}{\rho} + \nu \cdot \nabla^2 u + g \quad (2)$$

که در آن u میدان سرعت، P میدان فشار، ρ چگالی و t زمان است.

از آنجاکه در این شبیه سازی از فیزیک کشش سطحی در نرم افزار Flow-3D استفاده شده است لازم است اشاره‌ای به آن شود. کشش سطحی نیرویی است که در صفحه تماس بر هر سطح مشترک بین گاز و مایع، یا بین دو مایع غیرقابل اختلاط وارد می‌شود. این نیرو به دلیل تفاوت در نیروهای بین مولکولی بین دو ماده ایجاد می‌شود. مدل کشش سطحی نسبت به مدل‌های دیگر در کل به بی نظمی‌های شبکه در مدل مذکور حساس تر است زیرا به انحناها، یعنی مشتقات دوم بستگی دارد. توصیه می‌شود تا حد امکان از حجم‌های کنترلی نزدیک به مکعب استفاده شود. در برخی از جریان‌های سطح آزاد، حباب هوا ممکن است در سطح آزاد به دلیل تلاطم یا شرایط جریان (به عنوان مثال، یک جت برخوردی) وارد شود. این مدل نرخ ورود گاز (که توسط مناطق خالی نشان داده می‌شود) به جریان با استفاده از تعادل نیروهای پایدار کننده (گرانش و کشش سطحی) و نیروهای ناپایدار کننده (آشفتنی) تخمین می‌زند (Flow Science, 2022).

۲-۲- مدل آزمایشگاهی و اعتبارسنجی مدل عددی

به منظور اعتبارسنجی مدل عددی و فرضیات آن از داده‌های آزمایشگاهی (Bregoli et al., 2017) که به صورت سه بعدی انتشار موج ضربه‌ای ناشی از لغزش درون آب ساکن را اندازه گیری کرده است، استفاده شده است. تجهیزات آزمایشگاهی فوق شامل یک تولیدکننده توده لغزنده، مخزن آب و ابزار اندازه گیری است که در دانشکده هیدرولیک دانشگاه پلی تکنیک کاتالونیا، اسپانیا واقع شده است (شکل ۱). ابعاد و هندسه این تجهیزات در جدول ۱ آورده شده است. شکل ۲ نیز نمای کلی متغیرهای مورد مطالعه در پدیده امواج ضربه‌ای را نشان می‌دهد.

جدول ۱ مشخصات مدل آزمایشگاهی (Bregoli et al., 2017)

Parameters (unit)	
Still water level,(m)	0.25
Water basin sizes(length* width), (m)	4.12*2.47
Mass sizes(length* width),(m)	0.85*0.34
D ₅₀ ,(mm)	16.9
Mass density,(kg/m ³)	1692
Mass porosity	15%
Mass thickness,(m)	0.09

فضای خالی هوای بالای آب را نیز دربر می‌گیرد تا امواج سطحی ناشی از حرکت توده قابل رویت شود. این مدل با پنج اندازه شبکه مختلف، حساسیت سنجی شده است.

همان‌طور که در جدول ۲ آمده است، برای تحلیل حساسیت مدل عددی، اندازه سلول‌های شبکه میدان حل برابر با ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. در هریک از اندازه‌های شبکه مدل‌سازی یکبار با فعال کردن فیزیک کشش سطحی در نرم افزار و یکبار

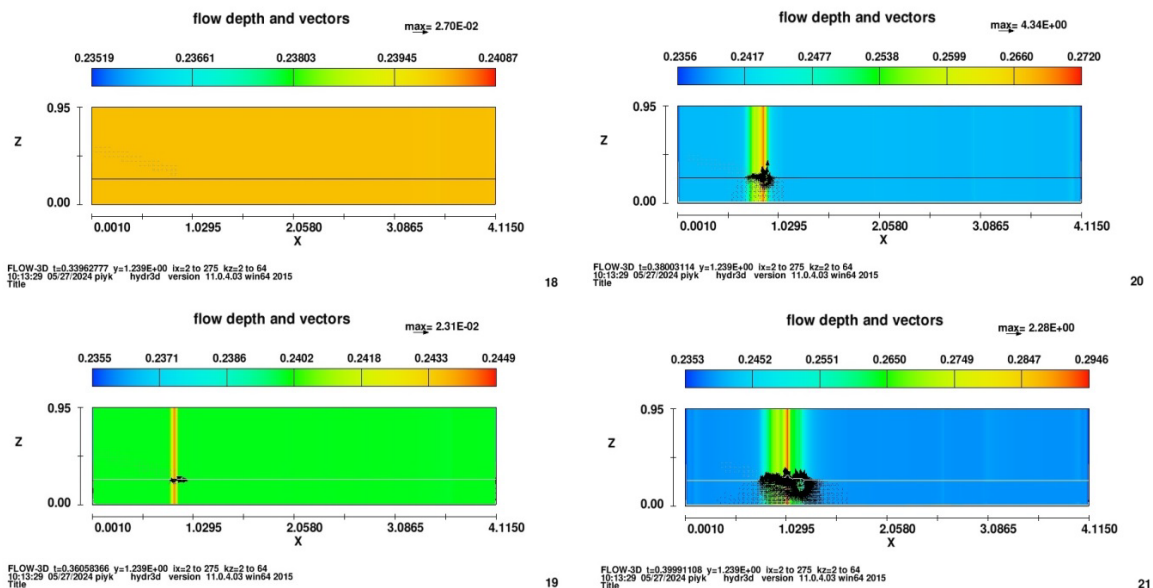


Fig. 3 Porous mass sliding into still water, h=35cm.

شکل ۳ برخورد توده لغزنده متخلخل به سطح آب

حالت وجود نیروی کشش سطحی و از ۱۵ دقیقه به ۱۹۵۰ دقیقه برای حالت عدم وجود کشش سطحی افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود در اندازه سلول شبکه ۵ میلی‌متر مدل پس از انجام چند حلقه تکرار متوقف شده و واگرا می‌شود، زیرا گرادیان فشار در میدان حل بالاست. در نرم افزار Flow-3D امکان اصلاح متغیرهای همگرایی در شرط کورانت در نرم‌افزار Flow-3D وجود دارد اما علیرغم تغییرات اعمال شده و کوچک کردن گام زمانی تا حدود 10^{-38} نیز همگرایی نهایی در مدت شبیه‌سازی مورد نظر حاصل نشد. لازم به توضیح است که در مدلسازی دینامیک سیالات محاسباتی، معیار همگرایی شرط کورانت است که این عدد باید برابر یک باشد تا نشان دهد که در یک گام زمانی، اطلاعات عبوری در میدان حل بصورت سلول به سلول حرکت می‌کنند.

بدون فعال کردن آن انجام شده است و مقادیر درصد میانگین مطلق خطا و همچنین مدت زمان اجرای شبیه‌سازی آمده است. از آنجاکه در مطالعه آزمایشگاهی مذکور نیمرخ سطح آب استخراج و ارائه شده است، جهت صحت سنجی مدل عددی از نیمرخ سطح آب به عنوان خروجی مدل استفاده شد. لذا مقادیر خطای مطلق در جدول ۲، همچنانکه در شکل ۴ نیز آمده است، مربوط به اختلاف مقادیر نیمرخ سطح آب در مدل و نمونه آزمایشگاهی است. همان‌طور که در این جدول ملاحظه می‌شود، اگر اندازه سلول شبکه از ۲۵ به ۱۰ میلی‌متر کاهش پیدا کند خطای شبیه‌سازی برای حالات بدون در نظر گرفتن و با در نظر گرفتن کشش سطحی به ترتیب از ۳۴ به ۱۱ و از ۳۲ به ۷ درصد کاهش پیدا می‌کند. همچنین زمان انجام شبیه‌سازی از حدود ۲۰ دقیقه به ۲۰۸۵ دقیقه برای

صرفنظر کردن است، وجود خواهد داشت و فرض نادرستی است اگر در مدلسازی این اثر در نظر گرفته نشود. همانطور که مشخص شده است مدلسازی با فعال کردن فیزیک کشش سطحی در مدل Flow-3D از دقت مطلوب‌تری در همه اندازه‌های شبکه برخوردار است. تغییرات درصد میانگین خطا با افزایش اندازه سلول‌های شبکه افزایش می‌یابد و بیانگر عدم تطابق با نمونه آزمایشگاهی است. در ابعاد بزرگتر شبکه، تاثیر کشش سطحی در حال کاهش یافتن است زیرا امکان اعمال جزئیات کوچک در نواحی سیال فراهم نشده و در واقع هرچه اندازه سلول‌های شبکه ریزتر باشد، دقت مدل در برآورد اثر کشش سطحی بیشتر است.

عدد کورانت به اندازه شبکه، گام زمانی و کیفیت مش وابسته است و در مدلسازی پدیده‌های با آشفتگی زیاد، می‌توان برای برقراری پایداری تا حد امکان گام زمانی مدل را کوچک کرد.

این مدل یک تقریب ساده از رویدادهای زمین لغزش در طبیعت است. با این حال، برای این پژوهش کافی است زیرا محدوده تحلیل و بررسی، متغیرهای هیدرولیکی موثر بر این پدیده است. یکی از نقص‌هایی که در بررسی بررسی‌های عددی پیشین به چشم می‌خورد، عدم فعالسازی گزینه کشش سطحی در فیزیک مسئله است. در بررسی آزمایشگاهی این پدیده از آنجاکه ابعاد و هندسه مخزن کوچک در نظر گرفته می‌شود، اثرات مقیاس نظیر اثر کشش سطحی که در مقیاس واقعی این پدیده قابل

جدول ۲ تحلیل حساسیت مدل عددی حاضر

Table 2 Sensitivity analysis of model

Model No.	Mesh size (mm)	No. of mesh size	Physics of surface tension on Flow-3D	Run time (H:M)	Mean Absolute Percentage Error
1	5	20,352,800	Model convergence was not achieved in this version of the software.		
2	10	2,544,100	active	34:45	7%
3			Inactive	32:30	11%
4	15	750,307	active	7:35	12%
5			Inactive	7:00	16%
6	20	318,013	active	1:40	24%
7			Inactive	1:00	27%
8	25	163,350	active	00:20	32%
9			Inactive	00:15	34%

باید توازن بین اندازه شبکه و مدت زمان مدلسازی برقرار باشد. با توجه به مقادیر خطای قابل قبول بکار رفته توسط محققان مختلف برای شبیه‌سازی‌های مهندسی و به منظور بهینه‌سازی اقتصادی مدل، اندازه شبکه ۱۵ میلی‌متر در محدوده خطای پیش‌بینی خوب قرار می‌گیرد و زمان شبیه‌سازی را حدود ۴/۵ برابر نسبت به مدل با اندازه شبکه ۱۰ میلی‌متر کاهش می‌دهد که عملاً منطقی است. از طرفی مشاهده شد که در نظر گرفتن کشش سطحی در شبیه‌سازی، زمان شبیه‌سازی را به طور قابل توجهی افزایش نخواهد داد و می‌تواند برای دقت بیشتر شبیه‌سازی‌ها بکار گرفته شود. با فعال کردن این گزینه باید به نسبت ابعاد شبکه و انتخاب حلگر فشار صحیح در

برای بررسی دقت مدل عددی از میانگین درصد خطای مطلق استفاده شده است. خطای مجاز حاصل از مدلسازی پدیده امواج و بالاروی موج هنگامی که یک مدل عددی با داده‌های آزمایشگاهی مورد صحت‌سنجی قرار می‌گیرد برابر ۲۰ درصد عنوان شده است (NTHMP, 2012). در مطالعه (Kim et al., 2019) این خطا برای توسعه مدل Flow-3D و TSUNAMI3D برابر ۳۵ درصد در نظر گرفته شده است با این تفسیر که هدف از مدلسازی عملکرد کلی مدل‌ها براساس دقت عددی، وضوح شبکه بندی و هزینه محاسبات است.

از آنجاکه افزایش تعداد شبکه سلول شبکه با افزایش پیچیدگی‌های محاسباتی و زمان مدلسازی همراه است،

میلی متر و با فعال کردن کشش سطحی انجام شده است. همانطور که در شکل ۴ نیز تغییرات سطح آب در مدل عددی و آزمایشگاهی نشان داده شده است، با توجه به نتایج حاصله، به طور کلی می توان ادعا داشت که این مدل عددی برای انجام این تحقیق به اندازه کافی دقیق است. از آنجایی که در درجه اول به دامنه حداکثر موج اول توجه می کنیم، مدل عددی آنها را به خوبی پیش بینی می کند.

مدل مذکور دقت کافی داشت. بطور کلی می توان گفت موجک هایی در امواج سطحی غیرخطی با دامنه های بسیار کوچک روی سطح آب تشکیل می شوند که در معادلات موج با جملات مراتب بالاتر تعریف شده اند و معمولاً در اندازه گیری ها و حل های تحلیلی موج صرف نظر شده اما طبیعتاً بر نیمرخ سطح اثرگذار است. با توجه به نتایج حاصل از صحت سنجی و تحلیل حساسیت، در مدل های این پژوهش اندازه شبکه ۱۵

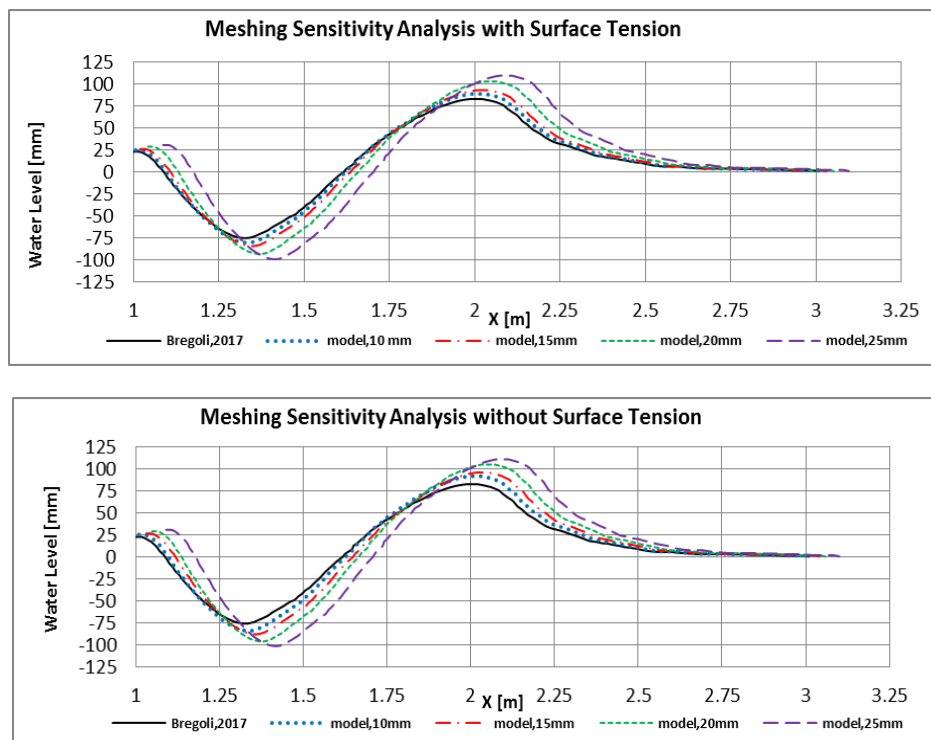


Fig. 4 Comparisons of measured and simulated surface water level in various mesh sizes

شکل ۴ نیمرخ سطح آب در مطالعه آزمایشگاهی و مدل عددی با اندازه شبکه مختلف.

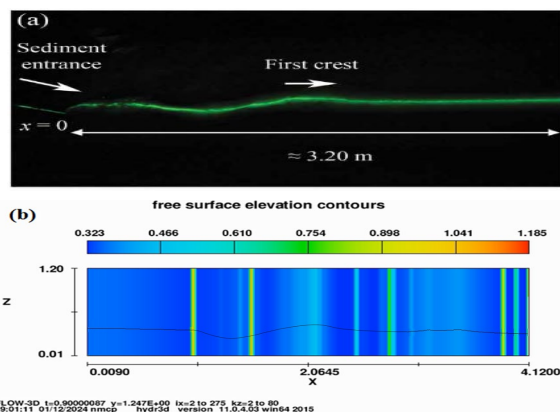


Fig. 5 Surface water level. a) Experimental (Bregoli et al., 2017), b) Numerical model with 15mm mesh size.

شکل ۵ نیمرخ سطح آب در: (a) نمونه آزمایشگاهی مذکور و (b) مدل عددی با اندازه سلول شبکه ۱۵ میلی متر.

در شکل ۵ نیز نیمرخ سطح آب در مدل عددی در لحظه ۰/۹ ثانیه و پس از تشکیل قله اول موج با استفاده از نرم افزار Flow-3D و نتایج آزمایشگاهی (Bregoli et al., 2017) مقایسه شده است. همانطور که مشخص است، نتایج مدلسازی با استفاده از نرم افزار تطابق خوبی با داده های آزمایشگاهی نشان می دهد.

۲-۳- مدلسازی

در این پژوهش، مدل سازی موج ضربه ای ناشی از لغزش توده به داخل مخزن با کمک نرم افزار Flow-3D صورت گرفته است. برای مدلسازی عددی، کل دامنه جریان به

توده از سه مقدار متفاوت تخلخل برای تعریف مصالح دانه‌ای در این مدل عددی استفاده شده است. این مقادیر عبارت‌اند از ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد. همان‌طور که در جدول ۳ نشان داده شده است، برای انجام این پژوهش از ۱۹ مدل با استفاده از پنج ارتفاع آب در دو فیزیک متفاوت مسئله و دو جنس متفاوت توده در نرم افزار Flow-3D اجرا شده است. تعیین کارآمدی مدل با در نظر گرفتن کشش سطحی و توده صلب و همچنین بررسی تغییر عمق آب با فعال کردن کشش سطحی در مدل و با استفاده از مصالح صلب مدل شده است. برای بررسی اثر تخلخل توده نیز فیزیک کشش سطحی فعال بوده و به منظور کاهش حجم محاسبات و کیفیت مدلسازی با سه حالت، از سه عمق ۲۵، ۴۵ و ۶۵ سانتی‌متری آب ساکن درون مخزن استفاده شده است.

طول ۴/۱۲ متر، ۲/۴۷ متر عرض با اعماق متفاوت در نظر گرفته شده است. سیال داخل مخزن، آب با چگالی ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب در دمای ۲۰ درجه سلسیوس تعریف شد. عمق آب ساکن درون مخزن بین ۲۵-۶۵ سانتی‌متر متغیر بود. در اعماق ۲۵، ۳۵، ۴۵، ۵۵ و ۶۵ به بررسی اثر تغییرات عمق آب ساکن درون مخزن و نیز اثر کشش سطحی بر مشخصات موج انجام شده است. زاویه شیب لغزش ثابت و برابر ۱۵ درجه در نظر گرفته شده است. ابعاد توده لغزنده در این پژوهش ثابت و یک بلوک صلب به ابعاد ۰/۸۵ متر طول، ۰/۳۴ متر عرض و ۰/۰۹ متر ضخامت بوده و همچنین مصالح دانه‌ای با شکل مکعب مستطیل به ابعاد مانند حالت صلب و دارای حجم یکسان با توده صلب (۰/۲۶ متر مکعب)، در این مدلسازی استفاده شده است. از آنجاکه تخلخل توده لغزنده یکی از عوامل موثر بر موج حاصل از برخورد است، برای بررسی تخلخل

جدول ۳ مشخصات نمونه‌های عددی مدل شده

Table 3 Characteristics of numerical models

Water level(m)	Active surface tension									Inactive surface tension																							
	0.25			0.35			0.45			0.55			0.65			0.25			0.35			0.45			0.55			0.65					
Mass type	solid			solid			solid			solid			solid			solid			solid			solid			solid			solid			solid		
No. model	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19														

اصطکاک داخلی توده است. در مدل‌های عددی، تعریف درست متغیرهای موردنیاز در نرم افزار از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در همین راستا در جدول ۴ متغیرهای لازم تعریف شونده توسط کاربر برای مدلسازی در نرم افزار Flow-3D آورده شده است.

برای تضمین پایداری در شبیه‌سازی‌ها، FLOW-3D شرط عدد کورانت را اعمال می‌کند و اطمینان می‌دهد که همگرایی مدل به اندازه کافی کارآمد می‌ماند.

$$C = \frac{U \Delta t}{\Delta x} \quad (5)$$

که در این معادله، Δt گام زمانی و Δx اندازه سلول شبکه

در این پژوهش، مسافت طی شده توده در هر جهت محورهای مختصات نسبت به سطح ساکن آب ثابت نگه داشته شد. شتاب و سرعت برخورد توده‌ها از روابط زیر استخراج شد و بعنوان متغیر ورودی در مدل اشیا متحرک تعریف شده است (Fritz et al., 2004 ; Xue et al., 2019).

$$a_s = \frac{2D}{t_s^2} \quad (3)$$

$$v_s = \sqrt{2g\Delta z(1 - \tan \delta \cot \alpha)} \quad (4)$$

در این معادلات، D فاصله لغزش، α زاویه لغزش، t زمان لغزش، Δz اختلاف تراز محل توده تا سطح آب و δ

مورد بررسی در این پدیده شامل عمق آب ساکن اولیه درون مخزن، جنس توده و فیزیک مدل در نرم افزار Flow-3D هستند که در مدلسازی تأثیر بسزایی در نتایج دارند اما معمولاً در نظر گرفته نشده‌اند. در انتهای این بخش و در جدول ۷، مقادیر مشخصات موج برای تمام حالات مدلسازی شده در این پژوهش شامل سرعت، ارتفاع و طول موج آورده شده است. در ادامه بطور جداگانه نتایج تغییر متغیرهای مختلف بر مشخصات موج مورد بررسی و بحث قرار می‌گیرد.

۳-۱- اثر فعال کردن کشش سطحی در مدل

Flow-3D

همان‌طور که در شکل ۶ آمده است با فعال کردن فیزیک کشش سطحی در مدل مسئله، سرعت حرکت موج در مقایسه با حالت غیرفعال بودن آن کاهش یافته است. به عبارت دیگر اگر در هنگام شبیه سازی کشش سطحی را در فیزیک مدل فعال نکنیم، سرعت حرکت موج بیشتر از مقادیر واقعی خواهد بود. با در نظر گرفتن اثر کشش سطحی و آشفتگی لایه مرزی در سطح آزاد بین آب و هوا و همچنین نقش ورود حباب‌های هوا هنگام برخورد توده به سطح آب و اثرات آن در تولید و انتشار موج حاصل از برخورد، تغییرات ویسکوزیته سیال در معادلات کشش سطحی در نظر گرفته می‌شود که موجب اتلاف انرژی موج است. به تغییرات ویسکوزیته در تحقیقات (Heller et al., 2008) نیز اشاره شده است. همچنین در این پژوهش 2D، مقداری برای عمق آب ساکن جهت چشمپوشی از اثر کشش سطحی عنوان کرده است. لذا بطور قطع می‌توان گفت در نظر گرفتن کشش سطحی در مطالعات عددی باعث دقت بیشتر نتایج و نزدیک شدن به مقادیر واقعی خواهد بود. بطور کلی سرعت موج در سطح آب وابسته به ویسکوزیته سیال و نیروی گرانش است. درحالتی که طول موج بزرگ باشد، اثر ویسکوزیته بر حرکت ناچیز بوده و بنابراین اثر کشش سطحی قابل صرف نظر کردن خواهد بود اما در صورتی که طول موج کوچک باشد، نظیر آنچه در مطالعات آزمایشگاهی ساخته و پرداخته می‌شود، سرعت حرکت موج از کشش سطحی نیز تأثیر می‌پذیرد. بنابراین باید توجه داشت که در مدلسازی‌ها و مطالعات مشخصات

جدول ۴ مقادیر مدل در فرآیند شبیه سازی

Table 4 Model values in the simulation process

Finish time(s)	2
Turbulence model	RNG
Moving object model	Collision GMO
Mesh size(mm)	15
Boundary* condition	X _{max} S
	X _{min} W
	Y _{max} W
	Y _{min} S
	Z _{max} S
	Z _{min} W
Contact angle(deg)	90
Entrainment rate coefficient	0.5
Mass impact velocity(m/s)	x 4.83
	y 0
	z 1.3
Mass density(kg/m ³)	solid 4300
	granular 2500

* S: symmetry ; W: wall

است. برای شرایط مرزی در این مدل، مقادیر متغیرها در حالت متقارن و دیواره به ترتیب مطابق زیر در نظر گرفته می‌شود. شرط دیواره برای تمام نواحی پیرامون استخر و کف آن در نظر گرفته شده است و شرط تقارن به این منظور است که جریان در تمام آن مرز متقارن است.

$$\frac{\partial p}{\partial x} = 0 \text{ و } \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} = 0 \text{ و } u = 0 \quad (7)$$

مدل آشفتگی در این پژوهش RNG در نظر گرفته شده است که به دلیل کاربرد گسترده‌تر و دقت آن در جریان‌های سطح آزاد است (Choi et al., 2007; Sabeti & Heidarzadeh, 2021). البته در یک پژوهش جدید (Sabeti & Heidarzadeh, 2024)، مدل آشفتگی k- ω نتایج بهتری در مدلسازی این پدیده در نرم افزار Flow-3D داشته است.

۳- بحث و نتایج

در این پژوهش، مدل عددی تایید شده خود را برای شبیه‌سازی امواج ناشی از لغزش روسطحی اعمال می‌کنیم. امواج توسط دو نوع توده لغزنده، یعنی بلوک صلب و دانه‌ای ایجاد شده است. مشخصات دامنه موج اول تشکیل شده پس از برخورد توده به سطح آب و نحوه انتشار آن با بررسی متغیرهای موج مطالعه شده است. سه متغیر اصلی

سمت مناطقی از آب‌های کم عمق حرکت کنند، شروع به تحت تاثیر قرار گرفتن از کف می کنند و حرکت مداری آزاد آب مختل می شود و ذرات آب در حرکت مداری به موقعیت اولیه خود باز نمی گردند. با کم عمق شدن آب، بالآمدگی بیشتر و تندتر شده و در نهایت تیزی موج افزایش می یابد. بطور کلی امواج در آب‌های عمیق سریعتر حرکت می کنند. سرعت موج آب کم عمق به عمق آب بستگی دارد و اگر بخشی از یک موج در آب کم عمق تر باشد، سرعت آن کندتر خواهد شد.

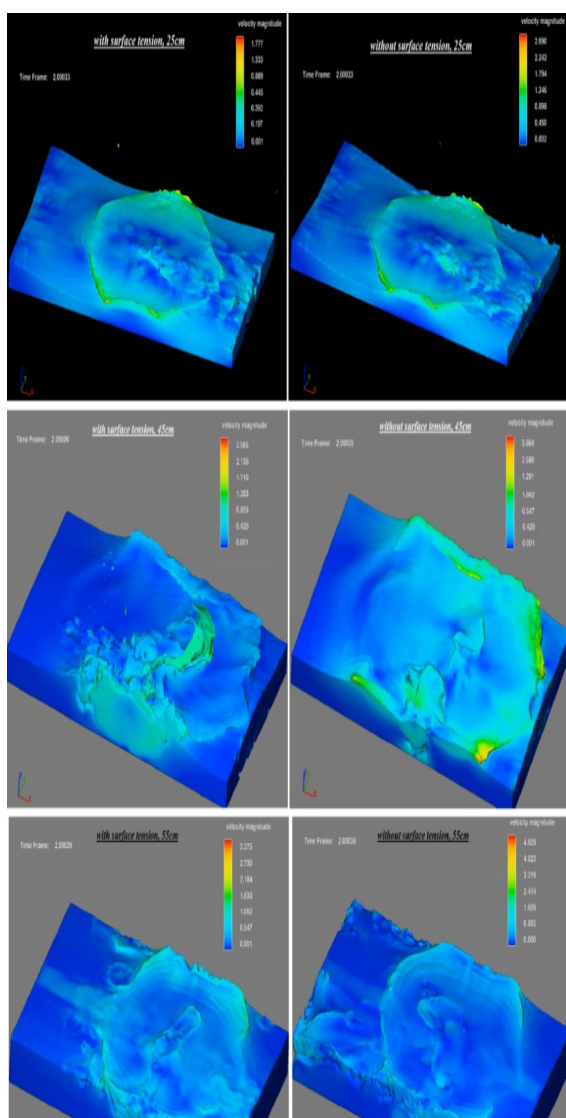


Fig. 6 Velocity magnitude in 25,45,55cm water level; solid mass.

شکل ۶ بزرگای سرعت برای اعماق ۲۵، ۴۵ و ۵۵ سانتی متر آب ساکن. برای حالت توده صلب در دو حالت با کشش سطحی و بدون کشش سطحی.

موج حاصل از لغزش و انتشار آن باید تاثیر کشش سطحی نیز لحاظ گردد.

با توجه به جدول ۵ و زمان شبیه سازی ارائه شده در جدول، در نظر گرفتن این فیزیک در مسئله، از لحاظ زمانی غیر اقتصادی نخواهد بود. همچنین مشاهده می شود که با افزایش عمق آب اثر کشش سطحی در حال کاهش است. این مسئله می تواند ناشی از افزایش اثر نیروهای گرانشی نسبت به کشش سطحی باشد. در مطالعه (Oelke & Yamakawa, 1945) معادله زیر برای محاسبه کشش سطحی ارائه شده است که دخالت متغیرهای موج در آن به اثبات رسیدند.

$$T = \rho \left(\frac{\lambda^3 n^2}{2\pi} - \frac{g\lambda^2}{4\pi^2} \right) \quad (8)$$

در این معادله؛ n فرکانس و λ طول موج سطح است.

جدول ۵ مقایسه زمان مدل جهت بررسی کشش سطحی

Table 5 Run time for surface tension investigation in simulation

Water level [cm]	Run time (HH:mm)		Changes of velocity[%]
	Active surface tension	Inactive surface tension	
25	7:30	7	6%
35	8:10	7:35	5.3%
45	8:55	8:15	5%
55	9:40	8:40	3.9%
65	10:15	9:05	2.8%

۳-۲- اثر تغییر عمق آب ساکن درون مخزن

از آنجاکه رفتار موج در آب‌های عمیق و سطحی تفاوت دارد، تعیین اینکه موج‌های تشکیل شده در این مدل در چه دسته‌ای قرار گیرند اهمیت دارد. در آب‌های عمیق، تندی موج مستقل از عمق آب است (Sorenson, 1993)، که ناشی از این است که امواج با کف برهم کنش ندارند. با این حال، تندی به طول موج بستگی دارد. بنابراین پراکندگی امواج سطحی در آب عمیق مشابه رفتار امواج نوری در هوا است. از سوی دیگر، امواج سطحی آب کم عمق، با بستر برهم کنش داشته و متناسب با ریشه مربع عمق، سرعت خود را کاهش می دهند و سرعت در این امواج تابعی از طول موج نیست. هنگامی که امواج به

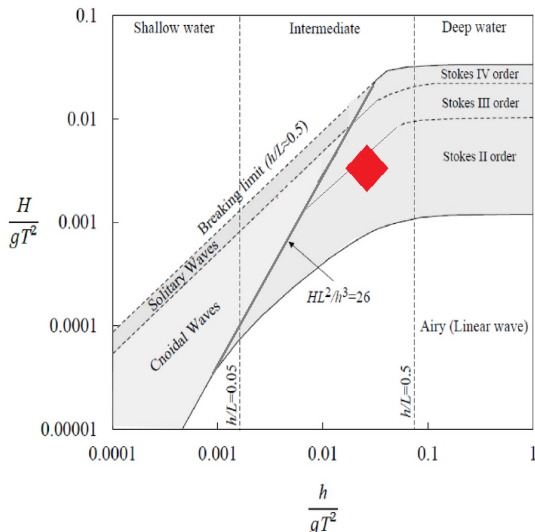


Fig. 7 Velocity magnitude in 25,45,55cm water level; solid mass.

شکل ۷ وضعیت موج‌های تشکیل شده در این پژوهش.

عمق آب بر مشخصات موج تشکیل شده شامل سرعت، ارتفاع و شکل موج اثرگذار است. لذا با توجه به مشخصات موج مستخرج از مدل عددی برای هر یک از اعماق آب ساکن درون مخزن شامل طول و ارتفاع موج و همچنین متغیرهای مربوط به تعیین نوع موج در شکل ۷، در جدول ۶ آورده شده است.

جدول ۶ مشخصات موج مدلسازی شده در این پژوهش

Table 6 Wave characteristics in this study

Water level [m]	H [m]	L [m]	h/L	HL ² /h ³
0.25	0.141	1.7	0.14	26.08
0.35	0.126	2	0.17	11.75
0.45	0.107	2.2	0.20	5.68
0.55	0.086	2.4	0.23	2.98
0.65	0.074	2.52	0.26	1.71

شکل ۷ نشان می‌دهد برای تشخیص تئوری مناسب حاکم بر موج به منظور شناخت رفتار و مشخصه‌های موج از مولفه‌های ارتفاع و طول موج و همچنین عمق آب ساکنی که موج در آن منتشر می‌شود، استفاده می‌شود. تاثیر تمام این متغیرها در عدد اورسل گنجانده می‌شود که بصورت زیر تعریف می‌شود.

$$UrsellParameter = \frac{HL^2}{h^3} \quad (9)$$

در این معادله، H ارتفاع موج، L طول موج و h ارتفاع آب ساکن درون مخزن است. اگر این عدد از ۲۶ کمتر باشد، موج با تئوری استوکس مطالعه و بررسی می‌شود. در این پژوهش همانطور که از جدول ۶ مشخص است، تئوری حاکم استوکس و در عمق متوسط یا بینابینی قرار می‌گیرد.

برای بررسی بهتر مشخصات موج در شکل ۸، نیمرخ سطح آب و موج اول پس از برخورد توده به سطح آب در تمام اعماق اولیه ساکن آب آورده شده است.

همانطور که در شکل‌های ۶ و ۸ نشان داده شده است، با افزایش عمق آب سرعت موج افزایش یافته و موج‌هایی با دامنه کوتاهتر و طول موج بلندتر و شیب (تندی) ملایم‌تر ایجاد می‌شود. مقادیر طول موج برای اعماق مورد مطالعه در محدوده ۱/۷-۲/۵۲ متغیر است. با توجه به مطالب فوق

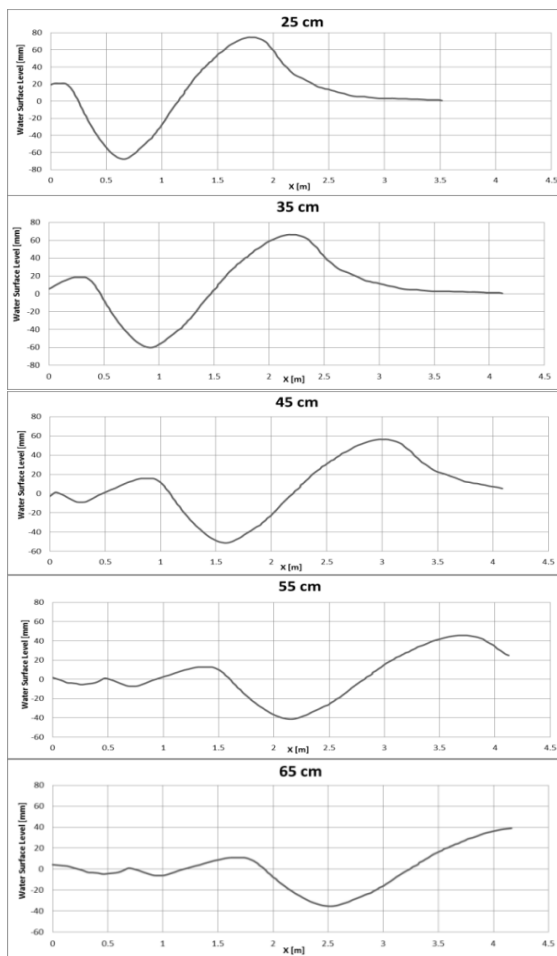


Fig. 8 Water surface profile in first wave after mass impact.

شکل ۸ نیمرخ سطح آب در موج اول تشکیل شده پس از برخورد توده در اعماق مختلف و مشخصات هندسی موج.

بررسی نیمرخ سطح آب در اعماق مورد مطالعه به منظور مقایسه اثر عمق آب بر میزان تخلخل توده لغزنده در موج تولید و منتشر شده ناشی از برخورد نشان می‌دهد که ارتباط معنادار جداگانه بین عمق آب و تخلخل توده وجود ندارد و رفتار نیمرخ سطح آب مشابه حالت صلب بوده و تنها با این تفاوت که نسبت به توده صلب موج ضعیف‌تری تشکیل و منتشر شده است. لذا این دو متغیر در این پدیده مستقل از هم هستند.

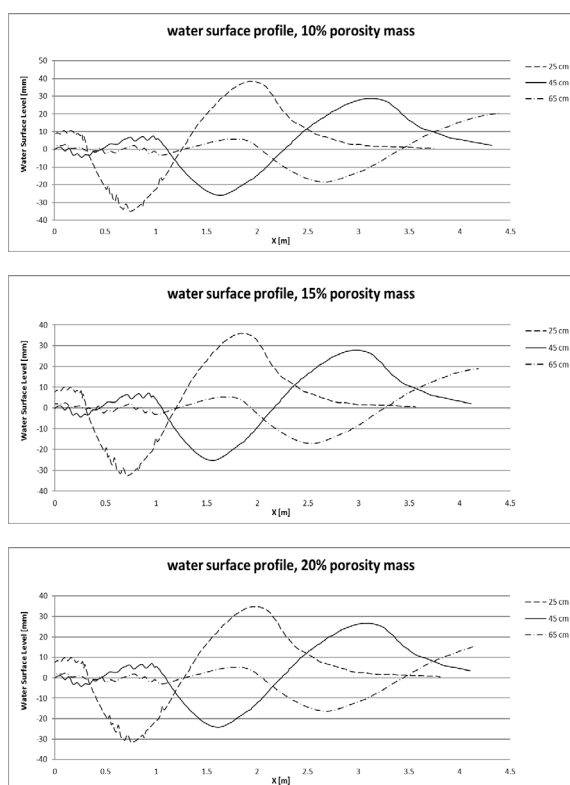


Fig. 9 water surface profile with variuos porosity. شکل ۹ نیمرخ سطح آب برای مقادیر مختلف تخلخل توده لغزنده

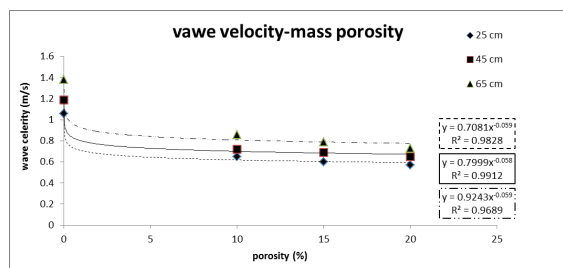


Fig. 10 water surface profile with variuos porosity. شکل ۱۰ سرعت موج برای مقادیر مختلف تخلخل توده لغزشی.

و ماهیت پدیده موج ضربه‌ای ناشی از توده لغزنده به درون یک آب ساکن که می‌تواند منفرد، استوکس یا ایری باشد، تعیین عمق آب برای مطالعات عددی و آزمایشگاهی اثراتی مهم و قابل توجه در نتایج دارد. در نظر گرفتن شرایطی مطابق واقعیت و پرهیز از ایجاد اثرات مقیاس نیازمند بررسی دقیق است.

۳-۳- اثر جنس مصالح توده لغزنده

متغیر جنس توده لغزنده می‌تواند منحصراً برای تخلخل‌های متفاوت مطالعه و بررسی گردد. همانطور که در شکل ۹ مشخص است، مقادیر طول و ارتفاع موج تولید شده در اثر توده صلب نسبت به مقادیر نظیر در توده متخلخل هم حجم با ۱۰ درصد تخلخل در اعماق آب ساکن ۲۵، ۴۵ و ۶۵ سانتی‌متر، به ترتیب ۹۵، ۹۷ و ۹۲ درصد بیشتر است. همچنین برای ۱۵ درصد تخلخل در اعماق فوق به ترتیب ۱۰۸، ۱۰۳، ۱۰۶ و ۲۰ درصد تخلخل در همان اعماق به ترتیب ۱۱۵، ۱۱۲ و ۱۱۸ درصد بیشتر می‌باشد. نکته قابل توجه دیگر از نمودار این شکل این است که در محل نزدیک برخورد توده به سطح آب تا فاصله حدود یک متر، نیمرخ سطح آب در مدل‌های با توده سنگدانه‌ای دارای شکستگی‌های زیادی هستند در حالیکه برای توده صلب نمودار نرم‌تر است.

این مشاهده می‌تواند ناشی از تخلخل توده و رفتار متفاوت سطح آب حین برخورد به منافذ خالی و دانه‌ها باشد. همانطور که در شکل ۱۰ نیز آورده شده است، سرعت نیز بطور میانگین برای تخلخل ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد حدود ۳۹، ۴۳ و ۴۶ درصد نسبت به حالت صلب کاهش داشته است. در ادامه با تغییر تخلخل توده مشاهده می‌گردد که مقادیر حداکثر دامنه و طول موج ناشی برخورد توده به سطح آب تغییر می‌کند. بطور کلی از نتایج چنین برمی‌آید که با افزایش تخلخل توده لغزنده، موج کوچکتر و با انرژی کمتری تولید می‌شود. علت این مسئله نیز خلل فرج موجود در توده است که عامل جذب انرژی برخورد شده و کاهش انتقال مومنتوم به سطح آب است. در واقع توده متخلخل هندسه‌ای شبیه میراگر داشته و مانند آن عمل می‌کند.

جدول ۷ مشخصات موج اول تشکیل شده در مدل‌ها
Table 7 wave characteristics of all numerical models

Water level(m)	Active surface tension									Inactive surface tension									
	0.25	0.35			0.45			0.55			0.65			0.25	0.35	0.45	0.55	0.65	
Mass type	solid	10%	15%	20%	solid	solid	10%	15%	20%	solid	solid	10%	15%	20%	solid	solid	solid	solid	solid
Wave velocity [m/s]	1.06	0.65	0.60	0.57	1.12	1.19	0.72	0.69	0.65	1.27	1.38	0.86	0.79	0.73	1.12	1.18	1.25	1.32	1.42
Wave height [cm]	14.1	7.2	6.5	6.3	12.6	10.7	5.1	4.9	4.6	8.6	7.4	3.9	3.5	3.2	13	11.5	9.8	7.8	6.8
Wave length [m]	1.7	1.8	1.9	2	2.08	2.23	2.4	2.5	2.61	2.47	2.52	2.63	2.71	2.80	1.6	2	2.11	2.32	2.4
No. model	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19

• با افزایش تخلخل توده لغزشی، ارتفاع و سرعت موج کاهش یافته و طول موج افزایش می‌یابد. این امر را می‌توان با کاهش مومنتوم وارده از توده به سطح آب هنگام برخورد توده با تخلخل کم توجیه کرد.

در جدول شماره ۷، مقادیر مشخصات موج اول در تمام ۱۹ حالت مدل شده در این پژوهش آورده شده است.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از نرم افزار Flow-3D به بررسی اثر عمق آب و جنس توده با لحاظ کردن یک حالت جدید در مدلسازی توسط این نرم افزار پرداخته ایم که به شرح زیر است.

- افزایش عمق آب موجب افزایش سرعت و طول موج و کاهش تیزی و ارتفاع موج می‌گردد.
- اعمال نیروی کشش سطحی برای مدلسازی در مقیاس‌های کوچک لازم و ضروری است زیرا در ابعاد کوچک اثر ویسکوزیته سیال و کشش سطحی در تولید و انتشار امواج قابل چشمپوشی نبوده و مقادیری خطا ایجاد می‌کند.
- با افزایش عمق آب تاثیر کشش سطحی بر مشخصات موج کاهش می‌یابد. بطوریکه برای اعماق بزرگتر از ۵۰ سانتی‌متر به دلیل کاهش قابل توجه خطاهای محاسباتی از اثر کشش سطحی صرف‌نظر کرد. شایان توجه است که تعیین این مقدار از عمق به شرایط هندسی و ابعاد مخزن نیز وابسته است.

۵- فهرست نشانه‌ها

نماد	تعریف [بعد]
a_s	شتاب توده لغزشی [LT^{-2}]
C	عدد کورانت
D	مسافت لغزش [L]
g	شتاب ثقل [LT^{-2}]
H	ارتفاع موج [L]
h	عمق آب ساکن [L]
L	طول موج ضربه‌ای [L]
n	فرکانس موج [T^{-1}]
P	فشار [$ML^{-1}T^{-2}$]
T	نیروی کشش سطحی [MLT^{-2}]
t	زمان [T]
u	سرعت [LT^{-1}]
v_s	سرعت توده لغزشی [LT^{-1}]
α	زاویه لغزش توده [-]
Δt	گام زمانی [T]

coastal tsunami hazard from submarine mass failures: effect of slide rheology, experimental validation, and case studies off the US East Coast. *Natural hazards*, 86, 353-391.

Grilli, S.T., Tappin, D.R., Carey, S., Watt, S.F., Ward, S.N., Grilli, A.R., ... & Muin, M. (2019). Modelling of the tsunami from the December 22, 2018 lateral collapse of Anak Krakatau volcano in the Sunda Straits, Indonesia. *Scientific Reports*, 9(1), 11946.

Harbitz, C.B., Løvholt, F. & Bungum, H. (2014). Submarine landslide tsunamis: how extreme and how likely?. *Natural Hazards*, 72, 1341-1374.

Heidarzadeh, M., Ishibe, T., Sandanbata, O., Muhari, A. & Wijanarto, A.B. (2020). Numerical modeling of the subaerial landslide source of the 22 December 2018 Anak Krakatoa volcanic tsunami, Indonesia. *Ocean Engineering*, 195, 106733, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106733>.

Heller, V., Hager, W.H. & Minor, H.E. (2008). Scale effects in subaerial landslide generated impulse waves. *Experiments in Fluids*, 44, 691-703.

Hu, Y.X., Yu, Z.Y. & Zhou, J.W. (2020). Numerical simulation of landslide-generated waves during the 11 October 2018 Baige landslide at the Jinsha River. *Landslides*, 17(10), 2317-2328.

Huang, J. & Chen, G. (2020). Experimental study on wave impulse and characteristic pressure of a vertical wall with overhanging horizontal cantilever slab. *Ocean Engineering*, 217, 108055, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108055>.

Kim, G. (2012). Numerical simulation of three-dimensional tsunami generation by subaerial landslides, MSc Thesis, Texas A&M University.

Kim, G.B., Cheng, W., Sunny, R.C., Horrillo, J.J., McFall, B.C., Mohammed, F., ... & Kowalik, Z. (2020). Three dimensional landslide generated tsunamis: Numerical and physical model comparisons. *Landslides*, 17, 1145-1161.

Li, R.Y., Chen, J.J. & Liao, C.C. (2021). Numerical study on interaction between submarine landslides and a monopile using CFD techniques. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(7), 736, <https://doi.org/10.3390/jmse9070736>.

Liu, J., Wang, Y., Xiao, T., Yin, K., Huo, Z., Wang, X. & Tang, Y. (2023). Experimental investigation on near-field edge wave run-ups generated by landslides in narrow reservoirs. *Geological Journal*, 58(6), 2268-2282.

Lo, H.Y. & Liu, P.L.F. (2017). On the analytical

Δx اندازه سلول شبکه در میدان حل [L]

Δz ارتفاع توده لغزشی [L]

λ طول موج سطحی [L]

ρ چگالی [M L⁻³]

۶- منابع

Bolin, H., Yueping, Y., Renjiang, L., Peng, Z., Zhen, Q., Yang, L., ... & Kaikai, X. (2023). Three-dimensional experimental investigation on hazard reduction of landslide-generated impulse waves in the Baihetan Reservoir, China. *Landslides*, 20(9), 2017-2028.

Bregoli, F., Bateman, A. & Medina, V. (2017). Tsunamis generated by fast granular landslides: 3D experiments and empirical predictors. *Journal of Hydraulic Research*, 55(6), 743-758.

Chen, X., Jing, H., Li, P. & Fan, Y. (2023). Numerical investigation of landslide-generated impulse waves in Yangqu reservoir, China, In: ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference, Ottawa, Canada, June 2023, 2390, ISOPE.

Choi, B.H., Kim, D.C., Pelinovsky, E. & Woo, S.B. (2007). Three-dimensional simulation of tsunami run-up around conical island. *Coastal Engineering*, 54(8), 618-629.

Evers, F.M., Hager, W.H. & Boes, R.M. (2019). Spatial impulse wave generation and propagation. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 145(3), 04019011, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WW.1943-5460.0000514](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000514).

Flow Science (2022). Flow Science, Inc., Santa Fe, NM, USA. *FLOW-3D®*, Version 11.04, User's Manual.

Fritz, H.M., Hager, W.H. & Minor, H.E. (2004). Near field characteristics of landslide generated impulse waves. *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering*, 130(6), 287-302.

Fritz, H.M., Mohammed, F. & Yoo, J. (2009). Lituya Bay landslide impact generated megatsunami 50th Anniversary. *Tsunami Science Four Years after the 2004 Indian Ocean Tsunami: Part II: Observation and Data Analysis*, 153-175.

Fuhrman, D.R. & Madsen, P.A. (2009). Tsunami generation, propagation, and run-up with a high-order Boussinesq model. *Coastal Engineering*, 56(7), 747-758.

Grilli, S.T., Shelby, M., Kimmoun, O., Dupont, G., Nicolsky, D., Ma, G., ... & Shi, F. (2017). Modeling

- Waves: Comparing OpenFOAM and FLOW-3D HYDRO Models. *Pure and Applied Geophysics*, 181, 1074-1093.
- Sabeti, R. & Heidarzadeh, M. (2024). Estimating maximum initial wave amplitude of subaerial landslide tsunamis: A three-dimensional modelling approach. *Ocean Modelling*, 189, 102360, <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2024.102360>.
- Takagi, H., Pratama, M.B., Kurobe, S., Esteban, M., Aránguiz, R. & Ke, B. (2019). Analysis of generation and arrival time of landslide tsunami to Palu City due to the 2018 Sulawesi earthquake. *Landslides*, 16, 983-991.
- Tappin, D.R., Grilli, S.T., Harris, J.C., Geller, R.J., Masterlark, T., Kirby, J.T., ... & Mai, P.M. (2014). Did a submarine landslide contribute to the 2011 Tohoku tsunami?. *Marine Geology*, 357, 344-361.
- Wang, J., Ward, S.N. & Xiao, L. (2019). Tsunami Squares modeling of landslide generated impulsive waves and its application to the 1792 Unzen-Mayuyama mega-slide in Japan. *Engineering Geology*, 256, 121-137.
- Wu, H., Shi, A., Ni, W., Zhao, L., Cheng, Z. & Zhong, Q. (2024). Numerical simulation on potential landslide-induced wave hazards by a novel hybrid method. *Engineering Geology*, 107429.
- Xue, H., Ma, Q., Diao, M. & Jiang, L. (2019). Propagation characteristics of subaerial landslide-generated impulse waves. *Environmental Fluid Mechanics*, 19, 203-230.
- Yi, X., Feng, W., Li, B., Yin, B., Dong, X., Xin, C. & Wu, M. (2023). Deformation characteristics, mechanisms, and potential impulse wave assessment of the Wulipo landslide in the Baihetan reservoir region, China. *Landslides*, 20(3), 615-628.
- Zhang, Y., Li, D., Chen, L., Yin, K., Xiao, L., Fu, X., ... & Leo, C. (2020). Numerical analysis of landslide-generated impulse waves affected by the reservoir geometry. *Engineering geology*, 266, 105390, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105390>.
- Zhou, H. & Teng, M.H. (2010). Extended fourth-order depth-integrated model for water waves and currents generated by submarine landslides. *Journal of Engineering Mechanics*, 136(4), 506-516.
- solutions for water waves generated by a prescribed landslide. *Journal of Fluid Mechanics*, 821, 85-116.
- Lo, P.H.Y. (2023). Analytical and numerical investigation on the energy of free and locked tsunami waves generated by a submarine landslide. *Physics of Fluids*, 35(4), 046601, <https://doi.org/10.1063/5.0144533>.
- Ma, G., Shi, F. & Kirby, J.T. (2012). Shock-capturing non-hydrostatic model for fully dispersive surface wave processes. *Ocean Modelling*, 43, 22-35.
- National Tsunami Hazard Mitigation Program. (2012). Proceedings and Results of the 2011 NTHMP Model Benchmarking Work-shop. Boulder: U.S. Department of Commerce/NOAA/NTHMP; (NOAA Special Report). 436p.
- Rauter, M., Hoße, L., Mulligan, R.P., Take, W.A. & Løvholt, F. (2021). Numerical simulation of impulse wave generation by idealized landslides with OpenFOAM. *Coastal Engineering*, 165, 103815, <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2020.103815>.
- Romano, A., Lara, J.L., Barajas, G. & Losada, Í.J. (2023). Numerical modeling of tsunamis generated by granular landslides in OpenFOAM®: A Coulomb viscoplastic rheology. *Coastal Engineering*, 186, 104391, <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2023.104391>.
- Rubin, W., Wang, Y., Wan, J., Xu, W., Yang, Y. & Wang, H. (2023). Propagation Mechanism of Deep-Water Impulse Waves Generated by Landslides in V-Shaped River Channels of Mountain Valleys: Physical Model of Regular Rigid Block. *Geofluids*, Article ID 1743305, <https://doi.org/10.1155/2023/1743305>
- Ruffini, G., Heller, V. & Briganti, R. (2019). Numerical modelling of landslide-tsunami propagation in a wide range of idealised water body geometries. *Coastal Engineering*, 153, 103518, <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2019.103518>.
- Sabeti, R. & Heidarzadeh, M. (2022). A new empirical equation for predicting the maximum initial amplitude of submarine landslide-generated waves. *Landslides*, 19(2), 491-503.
- Sabeti, R., Heidarzadeh, M., Romano, A., Barajas Ojeda, G. & Lara, J. L. (2024). Three-Dimensional Simulations of Subaerial Landslide-Generated

© 2025 The Author(s). Published by Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

