

A review study of laboratory parameters affecting the impulse wave caused by the sliding of masses into still waters

مطالعه مروری بررسی آزمایشگاهی پارامترهای موثر بر موج ضربه‌ای ناشی از لغزش توده‌های عظیم به درون آب‌های ساکن

Fateme Maleki*

Ph.D. student, Department of Civil Engineering, Zanjan University, Zanjan, Iran

Jalal Bazargan

Professor, Department of Civil Engineering, Zanjan University, Zanjan, Iran

Zahra Maleki

Master of Civil Engineering, Department of Civil Engineering, Parsian University, Qazvin, Iran

فاطمه ملکی*

دانشجوی دکترا، گروه مهندسی عمران، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

جلال بازرگان

استاد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

زهرا ملکی

کارشناسی‌ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه پارسیان، قزوین، ایران

*Corresponding author's email address:

f.maleki@znu.ac.ir, ORCID: 0000-0002-9970-4811

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۸، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۰۹

How to cite this article:

Fateme Maleki, Jalal Bazargan, Zahra Maleki, A review study of laboratory parameters affecting the impulse wave caused by the sliding of masses into still waters, *Journal of Engineering and Construction Management (JECM)*, 2024; 9(1):13-18.

ارجاع به مقاله:

فاطمه ملکی، جلال بازرگان، زهرا ملکی، مطالعه مروری بررسی آزمایشگاهی پارامترهای موثر بر موج ضربه‌ای ناشی از لغزش توده‌های عظیم به درون آب‌های ساکن، مهندسی و مدیریت ساخت، ۱۴۰۳، ۹ (۱): ۱۳-۱۸.

Abstract

Impulse waves are among the natural phenomena that are caused by the impact or transfer of energy from a mass to still water. These waves are widely observed in nature and engineering environments and have multiple effects on the surrounding structures and environments. Masses' sliding into still water is one of the common situations in creating impulse waves that can occur in different scenarios, such as floods, landslides or sudden entry of materials into water. In recent years, many researches have been conducted in this field, each of which has investigated specific aspects of this phenomenon. The importance of studying impulse waves, especially in the fields of marine engineering and environmental protection, is clearly visible. These waves can cause serious damage to marine structures and aquatic ecosystems, and for this reason, a more accurate understanding of their characteristics and behavior can be effective in better design and more appropriate management of these environments. This article was written with the aim of providing a comprehensive framework for future research in this field. Presenting a comprehensive review of the studies conducted in the field of impulse waves caused by the sliding of masses into still water. In this regard, the results of various tests, data analysis and comparison of the results will be discussed.

Keywords

Impulse wave, Sliding mass, Dam reservoir, Physical models

چکیده

امواج ضربه‌ای از جمله پدیده‌های طبیعی هستند که به دلیل برخورد یا انتقال انرژی از یک توده به یک مایع ساکن ایجاد می‌شوند. این امواج به طور گسترده‌ای در طبیعت و محیط‌های مهندسی مشاهده می‌شوند و تأثیرات متعددی بر روی ساختارها و محیط‌های اطراف خود دارند. لغزش توده‌ها به داخل آب ساکن، یکی از حالات رایج در ایجاد امواج ضربه‌ای است که می‌تواند در سناریوهای مختلفی مانند طغیان، زمین لغزش یا ورود ناگهانی مواد به درون آب رخ دهد. در سال‌های اخیر، پژوهش‌های زیادی در این زمینه انجام شده است که هر کدام به بررسی ابعاد خاصی از این پدیده پرداخته‌اند. اهمیت مطالعه امواج ضربه‌ای به ویژه در زمینه‌های مهندسی دریایی و حفاظت از محیط زیست به وضوح قابل مشاهده است. این امواج می‌توانند منجر به آسیب‌های جدی به سازه‌های دریایی و اکوسیستم‌های آبی شوند و به همین دلیل، شناخت دقیق‌تر از ویژگی‌ها و رفتار آن‌ها، می‌تواند در طراحی بهتر و مدیریت مناسب‌تر این محیط‌ها مؤثر باشد. این مقاله با هدف ارائه یک چارچوب جامع برای پژوهش‌های آتی در این حوزه به نگارش درآمده است. ارائه یک مرور جامع از مطالعات انجام شده در زمینه امواج ضربه‌ای ناشی از لغزش توده‌ها به درون آب ساکن است. در این راستا، به بررسی نتایج آزمایشات مختلف، تجزیه و تحلیل داده‌ها و مقایسه نتایج با یکدیگر پرداخته خواهد شد.

کلمات کلیدی

موج ضربه‌ای، توده لغزنده، مخزن سد، مدل‌های فیزیکی



9 (1), 2024

دوره ۹، شماره ۱

تابستان ۱۴۰۳

دوفصلنامه پژوهشی



۲- روش شناسی

در روش‌های مطالعه این پدیده یک روند محاسباتی بر اساس معادلات مورد قبول عموم برای ارزیابی امواج ضربه‌ای ناشی از زمین لغزش ارائه می‌شود. ابتدا برای درک بهتر مزایا و معایب این روند، روش‌های موجود برای بررسی امواج ضربه‌ای ناشی از زمین لغزه بررسی می‌شوند. اساساً برای این کار پنج روش زیر وجود دارند: معادلات عمومی بدست آمده از تست مدل فیزیکی، آزمایش‌های انجام شده روی مدل نمونه اولیه، شبیه‌سازی‌های عددی، معادلات تجربی بدست آمده از داده‌های میدانی و بررسی‌های تحلیلی. جدول ۱ این پنج مدل را بر اساس معیارهای زیر مقایسه می‌کند: کیفیت نتایج، زمان مورد نیاز، هزینه‌ها، کاربرد هر روش، شفافیت نتایج و تلاش‌های مورد نیاز برای تعیین پارامترهای حاکم بر هر مدل. این پارامترها شامل ویژگی‌های جغرافیایی مخزن آب، هندسه جسم لغزنده و ویژگی‌های آن است. این شکل نشان می‌دهد که بطور کلی هر چه نتایج دقیق‌تر باشند زمان و هزینه مورد نیاز برای آن تست نیز بیشتر است. تلاش مورد نیاز برای تعیین پارامترهای حاکم بر مدل نیز به همین صورت افزایش می‌یابد چون باید داده‌های بیشتری درباره هندسه آب و جسم لغزنده به همراه ویژگی‌های آن بدست آوریم. در یک بررسی [۲۳] سه روش اول را مناسب‌ترین روش‌ها برای کاربردهای عملی ارزیابی خطر قلمداد کردند. روش اول از آزمایش‌های هیدرولیکی انجام شده در یک کانال موج یا حوضچه بدست می‌آید که آستانه ورود نسبتاً پایینی دارد. نتایج آن تخمینی از بزرگی یک موج ضربه‌ای را به ما می‌دهد و در انتخاب روش‌های ارزیابی دقیق‌تر نیز ما را کمک خواهند کرد. اما تأثیر مقیاس روی آزمایش‌های انجام شده روی این مدل را نباید نادیده گرفت و فرایندهای هیدرولیکی موجود در آب‌های با عمق سنجی پیچیده نیز ممکن است بطور کامل بررسی نشوند.

امواج ضربه‌ای به عنوان یک پدیده هیدرودینامیکی پیچیده، ناشی از انتقال انرژی از یک منبع به داخل یک مایع ساکن به وجود می‌آیند. این مقاله به بررسی مروری پدیده امواج ضربه‌ای ناشی از لغزش توده‌ها به درون آب ساکن در شرایط آزمایشگاهی می‌پردازد. با توجه به اهمیت این پدیده در زمینه‌های مختلف از جمله مهندسی دریایی، حفاظت از محیط زیست و مدیریت منابع آبی، شناسایی عوامل مؤثر بر ایجاد و شکل‌گیری این امواج، ضروری به نظر می‌رسد. مطالعه شامل بررسی تأثیرات عواملی همچون ابعاد توده، سرعت لغزش، عمق آب و ویژگی‌های فیزیکی مایعات بر رفتار و ویژگی‌های امواج ضربه‌ای است. نتایج این تحقیق با استفاده از داده‌های تجربی و مدل‌سازی‌های عددی به دست آمده است و می‌تواند به درک بهتری از مکانیزم‌های تولید این امواج و راهکارهای مدیریت و کنترل آن‌ها کمک کند. این مقاله همچنین به دنبال ارائه مدل‌های نظری و تجربی برای پیش‌بینی رفتار امواج ضربه‌ای و ارزیابی اثرات آن‌ها بر محیط اطراف است. با توجه به چالش‌ها و خطرات ناشی از تغییرات اقلیمی و افزایش ناپایداری‌های طبیعی، این تحقیق می‌تواند به عنوان یک منبع مفید برای پژوهشگران و مهندسان در زمینه‌های مرتبط با مدیریت منابع آبی و طراحی سازه‌های مقاوم در برابر امواج ضربه‌ای محسوب شود. این پدیده با توجه به موقعیت توده لغزنده نسبت به سطح آب به سه بخش اصلی تقسیم می‌شود که شامل روستحی، نیمه مستغرق و زیر سطحی است.

شناخته‌شده‌ترین رویداد از دسته روستحی، فاجعه سد وایونت در ایتالیا در سال ۱۹۶۳ بود، زمانی که رانش زمین با حجم تخمینی ۲۷۰ میلیون متر مکعب به یک مخزن برخورد کرد و موجی را ایجاد کرد که از سد فراتر رفت و باعث مرگ ۲۰۰۰ نفر در دره پایین دست شد [۱-۳]. در مثالی دیگر، در سال ۱۹۵۸، یک لغزش حدود ۳۰ میلیون مترمکعبی به خلیج لیتویا در آلاسکا، ایالات متحده آمریکا، برخورد کرد و موجی ایجاد کرد که از ساحل تا ارتفاع ۵۲۴ متری از سطح دریا بالا رفت [۴-۶]. در نمونه‌های جدیدتر، رانش سنگی به حجم ۳ میلیون متر مکعب در سال ۲۰۰۷ به دریاچه چهالیس در بریتیش کلمبیا، کانادا برخورد کرد و موجی را ایجاد کرد که پوشش گیاهی را تا ارتفاعات بیش از ۳۸ متر از خط ساحلی از بین برد [۷] و مقادیر عظیمی زباله‌های چوبی را بر جای گذاشت که سدی را در خروجی دریاچه تشکیل داد و پایین دست را در معرض خطرات طغیان سیل قرار داد و به یک برنامه طولانی و پرهزینه حذف زباله نیاز داشت [۸]. همچنین وقوع این پدیده در دریاچه لئون در نروژ [۹، ۱۰]، دریاچه باناهایم پرو [۱۱] و فاتوهیوا در [۱۲]۱۹۹۹، شیلی در سال ۲۰۰۷ [۱۳] و هائیتی در ۲۰۱۰ [۱۴] نیز رخ داده است.

لغزش‌های ناشی از توده‌های زیرسطحی نیز در نقاط مختلف جهان پیش آمده است از جمله، پرتوریکو در سال ۱۹۱۸ [۱۵]، نیو فاندلند [۱۶]۱۹۲۹ و گینه نو در سال ۱۹۸۸ [۱۷]. بعلاوه لغزش توده‌های آتشفشانی و یخچال‌های طبیعی نیز از این دسته بوده و مشاهده شده است. کوه‌های اوزن ژاپن [۱۸]، جزیره

جدول ۱ مقایسه روشهای مختلف بررسی پدیده‌های فیزیکی [۲۷]

Criterion	Method (i)	Method (ii)	Method (iii)	Method (iv)	Method (v)
Quality of results	Estimation	Exact	Estimation - exact	Rough estimate	Rough estimate
Time requirement	Low	Very high	High - very high	Low	Low
Cost	Low	Very high	High - very high	Low	Low
User	Engineer	Engineer	Expert	Engineer	Engineer
Clarity	Medium	High	Low	Medium	Low
Effort for governing parameters	Medium	High	High	Medium	Medium

علاوه بر موارد اشاره شده، مزایا و معایب زیر را نیز باید در رابطه با این روش در نظر داشته باشیم. مزایا: نتایج این مدل به ما کمک می‌کنند تا بفهمیم آیا به تحقیقات بیشتر با یک مدل مخصوص نمونه اولیه نیاز داریم یا باید از شبیه‌سازی‌های عددی استفاده کنیم. معایب: اثرات مقیاس را نمی‌توان در مدل‌های خیلی کوچک نادیده گرفت و اثرات مدل (انعکاس، انکسار، پراش و غیره) با انحراف هندسی از نمونه اولیه بیشتر می‌شوند. موارد خاص معمولاً بررسی نمی‌شوند چون معادلات موجود فقط برای هندسه‌های ساده هستند.



9 (1) , 2024

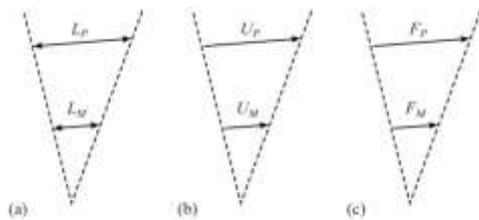
دوره ۹، شماره ۱

تابستان ۱۴۰۳

دوفصلنامه پژوهشی



این روش تنها گزینه ممکن برای وقتی است که باید محاسبات را فوراً انجام دهیم، مثلاً زمانی که یک زمین لغزه از قبل علائمی از حرکت را نشان می‌دهد. طبق مطالعات انجام شده برای این که بتوانیم اثرات مقیاس را نادیده بگیریم باید از قوانین زیر استفاده کنیم: عمق آب ساکن در مخزن در ناحیه برخورد توده لغزنده باید بیشتر از ۲۰ سانتی‌متر باشد [۲۴] و دوره تناوب موج نیز باید بیشتر از ۰/۳۵ ثانیه باشد [۲۵] به نحوی که نیروی جاذبه بر امواج حاکم باشد (امواج گرانشی) و نه نیروی کشش سطحی (امواج مویینگی). بعنوان مثال برای یک نمونه اولیه با $h = 50 \text{ m}$ ، اولین قانون باعث می‌شود تا مینیمم مقیاس ۱:۲۵۰ را داشته باشیم. بنابراین مساحت ۱ میلیون متر مربعی از سطح آب با یک سطح مدلسازی ۱۶ مترمربعی متناظر خواهد شد. اثرات مدل (اثرات ناشی از اختلاف بین هندسه منبع آب با مدل) را می‌توان بطور کیفی در نظر گرفت.



شکل ۱ تشابه (a) هندسی، (b) سینماتیک و (c) دینامیکی با طول، سرعت و نیرو برای نمونه اولیه (P) و مدل (M)

آزمایشات آزمایشگاهی با هدف شبیه سازی فرآیندهای انتشار موج ضربه‌ای که در مقیاس بسیار بزرگتری در طبیعت رخ می‌دهد، انجام شد. در حالی که فرآیندهای هیدرولیکی در طبیعت در مقیاس نمونه انجام می‌شود، آزمایش‌ها این فرایندها را در مقیاس مدل تکرار می‌کنند. نظریه تشابه سه سطح را بین این دو مقیاس متمایز می‌کند: تشابه هندسی، سینماتیکی و دینامیکی که در شکل ۲ نشان داده شده است [۲۶-۲۸].

تشابه هندسی ایجاب می‌کند که تمام طول‌های معادل در نمونه اولیه و در مقیاس مدل دارای یک نسبت باشند و همه زوایای معادل یکسان باشند. نسبت طول مربوطه نظیر در مقیاس نمونه اولیه L_p به مقیاس مدل L_M بعنوان ضریب مقیاس طول تعریف می‌شود:

$$\lambda_U = \frac{U_p}{U_M} \quad (1)$$

در نتیجه، مساحت‌ها و احجام به ترتیب با λ_U^2 و λ_U^3 مقیاس بندی می‌شوند. تشابه سینماتیکی بعد اصلی زمان را اضافه می‌کند و نسبت سرعت ثابت را بین نمونه اولیه U_p و مدل U_M نشان می‌دهد. ضریب مقیاس سرعت به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\lambda_U = \frac{U_p}{U_M} \quad (2)$$

از آنجاکه سرعت دارای ابعاد اصلی است $[L T^{-1}]$ ، ضریب مقیاس سرعت ممکن است با عوامل مقیاس مربوط به طول $\lambda_L = \frac{L_p}{L_M}$ و $\lambda_T = \frac{T_p}{T_M}$ زمان مجدداً تنظیم شود. علاوه بر سرعت، تشابه سینماتیکی به مقادیر وابسته به زمان شامل شتاب و دبی برای داشتن نسبت ثابت بین نمونه اولیه و مدل نیاز دارد [۲۷]. برای رسیدن به

تشابه دینامیکی، همه نیروهای متناظر باید با نسبت مقیاس نیرو ثابت باشند.

$$\lambda_F = \frac{F_p}{F_M} \quad (3)$$

نیرو به طور کلی بصورت شتاب در جرم تعریف می‌شود و دارای ابعاد اصلی $[MLT^{-2}]$ است. بنابراین نیرو ممکن است با ضرایب مقیاس $\lambda_T = \frac{T_p}{T_M}$ ، $\lambda_L = \frac{L_p}{L_M}$ ، $\lambda_M = \frac{M_p}{M_M}$ دوباره تنظیم شود [۲۸]. هر سطح از تشابه شامل موارد قبلی خود می‌شود، به عنوان مثال تشابه دینامیکی، شامل تشابه هندسی و سینماتیکی نیز است. به گفته [۲۵] و [۲۷]، مهم ترین نیروها در مدلسازی هیدرولیکی عبارتند از: نیروهای اینرسی، ثقل، ویسکوزیته، کششی سطحی، نیروی فشاری الاستیک و نیروهای فشاری.

اگر تمام این نیروها نسبتی مساوی بین نمونه اولیه و مدل داشته باشند، تشابه دینامیکی کامل به دست می‌آید. در نتیجه همه نسبت‌های این نیروها باید در نمونه اولیه و در مدل دارای مقیاس یکسان باشند. با این حال، هیچ مایع شناخته شده ای وجود ندارد که نسبت‌های برابر نیرو را برای همه نیروهای مربوطه بین نمونه اولیه و مدل برآورده کند. بسته به تجهیزات آزمایشگاهی، باید مناسب‌ترین نسبت نیرو تعیین شده و اثر نادیده گرفتن سایر نسبت‌های نیرو که تحت عنوان اثرات مقیاس مشخص می‌شوند، سنجیده شوند. در هیدرولیک سطح آزاد، بیشترین نسبت نیروی اعمال شده بین نیروی اینرسی و نیروی گرانش است که به عنوان عدد فرود عمومی تعریف می‌شود.

$$F_o = \sqrt{\frac{\text{inertial force}}{\text{gravity force}}} = \frac{U}{\sqrt{gL}} \quad (4)$$

تشابه زمانی اعمال می‌شود که عدد فرود در نمونه اولیه و مدل معادل باشد. آزمایش هیدرولیکی امواج ضربه‌ای ناشی از لغزش زمین به طور کلی بر اساس تشابه فرود است [۲۴] و برای آزمایش دو بعدی موج و همچنین برای حوضچه موج سه بعدی به کار گرفته شده است.

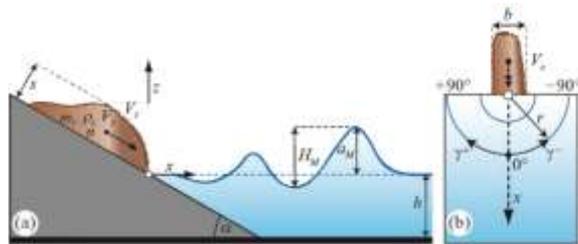
۳- متغیرهای مورد بررسی در این پدیده

۳-۱- نوع توده لغزنده

ایجاد امواج ضربه‌ای ناشی از زمین لغزه به برهم کنش بین مواد لغزنده، آب و هوا بستگی دارد. این فرایند پیچیده هیدرولیکی سه فازی در یک مدل هیدرولیکی دارای مقیاس بیان می‌شود [۲۹ و ۳۰]. این مدل‌ها توسط یک توده لغزنده دانه‌ای شکل با یک توده لغزشی می‌تواند صلب [۳۱-۴۸] یا از مصالح دانه‌ای [۴۹-۵۴] تشکیل شده باشد. و (نیز نتایج را بر اساس هر دو روش ارائه کردند. اگرچه توده‌های دانه‌ای شکل قبل و بعد از اصابت با سطح آب تغییر شکل پذیراند، شکل اجسام صلب بدون تغییر باقی می‌ماند. به جز اثرگذاری روی فرایند انتشار موج، نوع توده لغزنده روی اندازه‌گیری سرعت لغزش و در نتیجه حدود آن نیز تأثیر می‌گذارد. سرعت نوک جسم لغزنده قبل از اصابت با آب را می‌توان با دوربین‌های فوق سریع یا موانع نوری تعیین کرد. اگرچه سرعت مرکز ثقل جسم‌های صلب معادل سرعت نوک آن‌ها است ولی برای توده‌های دانه‌ای باید شار جرمی را نیز در نظر داشته باشیم [۵۵-۵۶].

۳-۲- آزمایشات 2D

در آزمایش‌های دو بعدی، ویژگی‌های موج ضربه‌ای در امتداد طول و عمق کانال موج اندازه‌گیری می‌شوند و شرایط مرزی در امتداد عرض کانال به صورت ثابت فرض می‌شود. شکل ۲، پارامترهای حاکم بر لغزش دوبعدی را نشان می‌دهد. این پارامترها شامل سرعت مرکز ثقل جسم لغزنده (V_s) یا سرعت نوک توده لغزنده (V_f)، جرم توده لغزنده (m_s)، ضخامت توده لغزنده (s)، پهنای توده لغزنده (b)، طول توده لغزنده (l_s)، زاویه اصابت آن (a) و عمق آب ساکن در مخزن (h) است. این پارامترها به ما اجازه می‌دهند تا ویژگی‌های موج در امتداد محور طولی کانال ($r=x$) را برای زاویه انتشار یک موج تنها $\alpha = 0^\circ$ شناسایی کنیم. ویژگی‌های موج شامل دامنه موج و ارتفاع موج هستند که بر اساس موقعیت آن‌ها در قطار موج بیان می‌شوند.



شکل ۲ متغیرهای موج ضربه‌ای

آزمایش‌های نسبتاً کمی در آزمایشگاه روی زمین لغزه دو بعدی انجام شده است که در آن از مواد دانهای با هندسه و انرژی پتانسیل مختلف برای جرم توده لغزنده استفاده شده باشد. اکثر این پژوهش‌ها با هدف شناسایی جریان آب در میدان نزدیک به لغزش و حفرة ایجاد شده توسط اصابت جسم لغزنده انجام شده‌اند. برای نمونه، [۲۴] اثرات مقیاس و تأثیر جرم مواد لغزنده دانه‌ای شکل روی امواج ایجاد شده را با استفاده از یک آزمایش دو بعدی در آزمایشگاه بررسی کردند. این آزمایش دوبعدی در یک فلووم موج‌ساز با اندازه متوسط (۵/۰ متر پهنا، ۱ متر عمق و ۱۱ متر طول) انجام شد و دینامیک زمین لغزش فوق سطحی اولیه توسط یک ژنراتور بادی جدید کنترل شد. [۵۳] حین مقایسه انواع توده‌های لغزش رو سطحی (دانه‌ای و جسم صلب) به این نتیجه رسید که حداقل در آزمایش‌های دوبعدی، جسم صلب لغزنده برای عدد فرود (Fr) کمتر از ۳ معمولاً امواج بلندتری را بوجود می‌آورد. اما با توجه به شعاع انتقال از شیب تا کف کانال، [۲۶] نوسانات موج کوچکتری را در موج ضربه‌ای حاصل از لغزش جسم صلب مشاهده کردند چون این اجسام معمولاً بطور جزئی در انتقال رو به پایین متوقف می‌شوند.

۳-۳- آزمایشات 3D

در حالی که تنها یک جهت انتشار در آزمایش‌های دو بعدی [۵۷] مشاهده شد، الگوهای انتشار چندجهته در آزمایش‌های سه بعدی دیده شدند. بطور تقریبی، امواج ضربه‌ای ایجاد شده توسط لغزش‌ها در جهت شعاع محل ضربه منتشر می‌شوند. برای توصیف ویژگی‌های ظاهری موج از مختصات قطبی استفاده می‌شود. بنابراین جهت قطب نشان دهنده مرکز محل اصابت توده لغزش است و مختصات زاویه‌ای و شعاعی نیز به ترتیب معادل زاویه (g) و فاصله (r) انتشار موج

هستند. تمامی معادلاتی که از این پس معرفی می‌شوند برای انتشار موج آزاد و بدون تداخل به کار می‌روند (یعنی امواج لبه در مسیر ساحل نادیده گرفته می‌شوند).

اجسام صلب لغزنده توسط [۵۸] برای آزمایش‌های انتشار موج روی حوضچه با زاویه لغزش ۱۶ تا ۳۶ درجه استفاده شدند. این جسم صلب روی یک صخره شیب‌دار و با یک سیستم فنر که در انتهای آن بود آزاد شد که جابجایی لغزشی سنگ را متوقف می‌کرد و مومنتوم آن را نیز بطور جزئی جذب می‌کرد. همانند مقاله [۵۹]، زمان بدون بعد لغزش نیز اندازه‌گیری شد. تأثیر عدد فرود توده لغزنده، ضخامت بدون بعد توده، وزن مخصوص آن و زاویه برخورد توده با آب بررسی شدند. نتایج نشان دادند که هر چه مقادیر فرود، ضخامت توده و چگالی بزرگتر باشد یا مقدار زاویه کوچکتر باشد، ارتفاع و دامنه موج ایجاد شده بزرگتر خواهد بود. اما در آزمایش سه بعدی انجام شده توسط [۶۰] در آزمایشگاه، تأثیر زاویه ضربه با آنچه در پژوهش‌های اخیر مشاهده شد کاملاً متفاوت بود. این تضاد نشان می‌دهد که در لغزش‌های رو سطحی، تأثیر ورود هوای انتقالی نیز فاکتور مهمی در فرایند تولید موج است. به نظر می‌رسد که ورود هوا بدلیل هوای به دام افتاده در جریان متلاطم آب، فوراً ارتفاع موج را کاهش می‌دهد. بطور مشابه، توزیع تناوب و نوسان موج نیز عوامل مهمی در انتقال سریع موج هستند که این قضیه در آزمایش‌های انجام شده در آزمایشگاه توسط [۶۱] نیز تأیید شده است.

پژوهش دقیقی در مورد نوسان موج درون قطار موج را برای یک زاویه اصابت ثابت $a = 27.1^\circ$ ارائه کردند. نوسان بالاترین نقطه یا قله موج اول (a_{c1})، نوسان فاصله بین دو موج اول (a_{c11}) و نوسان قله موج دوم (a_{c2}) به صورت جداگانه برازش شدند. آزمایش‌ها با توده‌های لغزنده دانه‌ای شکل انجام شدند. اما سرعت نوک توده لغزنده V_f بعنوان یک پارامتر حاکم برای بدست آوردن عدد فرود نوک سطح لغزنده استفاده شد [۶۲].

[۲۶] آزمایش‌هایی را با اجسام صلب گوه‌ای (V) شکل انجام دادند. زاویه اصابت جسم، ثابت و ۴۵ درجه بود. بر خلاف کار [۵۸]، اجسام صلب در نقطه صفر صفحه لغزنده متوقف نشدند و جهت حرکت آن‌ها به موازات کف حوضچه بود. این تغییر حالت از طریق یک ورق فلزی خمیده و استوانه‌ای شکل انجام شد. چون از یک جسم صلب لغزنده استفاده کردند، سرعت مرکز ثقل آن با سرعت نوک آن برابر است.

۴- نتیجه گیری

بطور کلی بررسی این پدیده در آزمایشگاه به دو صورت دوبعدی در یک کانال و سه بعدی در یک مخزن یا حوضچه مورد بررسی قرار می‌گیرد. بررسی بیش از ۶۰ پژوهش نشان می‌دهد که مطالعه امواج ضربه‌ای بصورت آزمایشگاهی با موانع و فرضیات ساده کننده بسیاری همراه است و معطوف به مشخصات فیزیکی و ژئوتکنیکی توده لغزش همراه با امواج منفرد و منظم است. اخیراً با پیشرفت ابزار برداشت مهندسی و ظهور کامپوترهای قوی، می‌توان فرضیات مطالعه این پدیده را واقعی‌تر و گسترده‌تر بررسی کرد. با در نظر گرفتن انتشار موج در حالت سه بعدی با مقیاس بزرگ و مطالعه پدیده روگذری از تاج سدها و بررسی فرسایش و استخراج هیدروگراف خروجی ناشی

numerical simulations and energy considerations by use of 3D-2D coupled models: the October 11, 1918, Mona Passage Tsunami. *Pure Appl. Geophys.* 172, 1679-1698. (doi:10.1007/s00024-014-0988-3)

- [16] Fine IV, Rabinovich AB, Bornhold BD, Thomson RE, Kulikov EA. 2005 The Grand Banks landslide-generated tsunami of November 18, 1929: preliminary analysis and numerical modeling. *Mar. Geol.* 215, 45-57. (doi:10.1016/j.margeo.2004.11.007)
- [17] Bardet J-P, Synolakis CE, Davies HL, Imamura F, Okal EA. 2003 Landslide tsunamis: recent findings and research directions. *Pure Appl. Geophys.* 160, 1793-1809. (doi:10.1007/s00024-003-2406-0)
- [18] Ward SN, Day S. 2003 Ritter Island volcano-lateral collapse and the tsunamis of 1888. *Geophys. J. Int.* 154, 891-902. (doi:10.1046/j.1365-246X.2003.02016.x)
- [19] Simkin T, Fiske RS. 1983 Krakatau, 1883—the volcanic eruption and its effects. Washington, DC: Smithsonian Institution Press.
- [20] Tinti S, Manucci A, Pagnoni G, Armigliato A, Zaniboni F. 2005 The 30 December 2002 landslide-induced tsunamis in Stromboli: sequence of the events reconstructed from the eyewitness accounts. *Nat. Haz. Earth Syst. Sci.* 5, 763-775. (doi:10.5194/nhess-5-763-2005)
- [21] Tinti S, Pagnoni G, Zaniboni F, Bortolucci E. 2003 Tsunami generation in Stromboli island and impact on the south-east Tyrrhenian coasts. *Nat. Haz. Earth Syst. Sci.* 3, 299-309. (doi:10.5194/nhess-3-299-2003).
- [22] Heinrich P. 1992 Nonlinear water waves generated by submarine and aerial landslides. *J. Waterw. Port C-ASCE* 118, 249-266. (doi:10.1061/(ASCE)0733-950X(1992)118:3(249))
- [23] Heller, V.; Hager, W.H.; Minor, H.-E. (2009). *Landslide Generated Impulse Waves in Reservoirs: Basics and Computation*; VAW-Mitteilung 211; ETH: Zürich, Switzerland.
- [24] Heller, V., Hager, W. H., & Minor, H. E. (2008). Scale effects in subaerial landslide generated impulse waves. *Experiments in Fluids*, 44(5), 691-703.
- [25] Hutter K, Greve R (1993) Two-dimensional similarity solutions for finite-mass granular avalanches with Coulomb- and viscous-type frictional resistance. *J Glaucoma* 39:357-372. doi:10.3198/1993JOG39-132-357-372.
- [26] Heller V, Spinneken J. 2013 Improved landslide-tsunami prediction: effects of block model parameters and slide model. *J. Geophys. Res: Oceans* 118, 1489-1507. (doi:10.1002/jgrc.20099)
- [27] Heller, V. (2007). *Landslide generated impulse waves: Prediction of near field characteristics* (Doctoral dissertation, Eth Zurich).
- [28] Kowalski J, McElwaine JN (2013) Shallow two-component gravity-driven flows with vertical variation. *J Fluid Mech* 714:434-462. doi:10.1017/jfm.2012.489.
- [29] Pfister, M., & Chanson, H. (2012). Scale effects in physical hydraulic engineering models, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 49, No. 3 (2011), pp. 293-306. *Journal of Hydraulic Research*, 50(2), 244-246.
- [30] Heller, V., & Spinneken, J. (2013). Improved landslide-tsunami prediction: effects of block model parameters and slide model. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118(3), 1489-1507.
- [31] Grilli ST, Watts P (1999) Modeling of waves generated by a moving submerged body, *Applications to underwater landslides. Eng Anal Bound Elem* 23:645-656. doi:10.1016/S0955-7997(99)00021-1
- [32] Lindström, E.K., Pedersen, G.K., Jensen, A., Glimsdal, S. (2014). Experiments on slide generated waves in a 1: 500 scale fjord model. *Coastal Engineering* 92:12-23.

از این موج جهت بهبود پیشبینی خطرات احتمالی، می‌توان از فزاینده‌های انسانی و اقتصادی ناشی از این رخداد جلوگیری کرد.

۵- تعارض منافع

نویسندگان هیچ گونه تضاد منافی ندارند.

۶- حمایت مالی

این تحقیق از هیچ‌گونه حمایت مالی‌ای برخوردار نبوده است.

۷- مراجع

- [1] Panizzo A, de Girolamo P, Di Risio M, Maistri A, Petaccia A (2005) Great landslide events in Italian artificial reservoirs. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 5(5):733-740
- [2] Genevois, R., & Ghirotti, M. (2005). The 1963 vaiont landslide. *Giornale di Geologia Applicata*, 1(1), 41-52.
- [3] Briske, D. D., Joyce, L. A., Polley, H. W., Brown, J. R., Wolter, K., Morgan, J. A., ... & Bailey, D. W. (2015). Climate-change adaptation on rangelands: linking regional exposure with diverse adaptive capacity. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 13(5), 249-256.
- [4] Fritz HM, Hager WH, Minor HE (2003b) Landslide generated impulse waves. 2. Hydrodynamic impact craters. *Exp Fluids* 35(6):520-532
- [5] Weiss, R., Fritz, H. M., & Wünnemann, K. (2009). Hybrid modeling of the mega-tsunami runup in Lituya Bay after half a century. *Geophysical Research Letters*, 36(9).
- [6] Miller, D. J. (1960). *Giant waves in Lituya bay, Alaska*, Geological Survey Professional Paper 354-C. US Government Printing Office, Washington DC.
- [7] Brideau, M. A., Sturzenegger, M., Stead, D., Jaboyedoff, M., Lawrence, M., Roberts, N. J., ... & Clague, J. J. (2012). Stability analysis of the 2007 Chehalis lake landslide based on long-range terrestrial photogrammetry and airborne LiDAR data. *Landslides*, 9, 75-91.
- [8] Roberts, T. M., Wang, P., & Puleo, J. A. (2013). Storm-driven cyclic beach morphodynamics of a mixed sand and gravel beach along the Mid-Atlantic Coast, USA. *Marine Geology*, 346, 403-421.
- [9] Harbitz CB, Pedersen G, Gjevik B. 1993 Numerical simulations of large water waves due to landslides. *J. Hydraul. Eng.* 119, 1325-1342. (doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(1993)119:12(1325))
- [10] Jørstad F. 1968 Waves generated by landslides in Norwegian fjords and lakes. *Norwegian Geotech. Inst. Publ.* 79, 13-32.
- [11] Plafker G, Eyzaguirre V. 1979 Rock avalanche and wave at Chungar, Peru. In *Rockslides and avalanches*, pp. 269-279. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier.
- [12] Okal EA, Fryer GJ, Borrero JC, Ruscher C. 2002 The landslide and local tsunami of 13 September 1999 on Fatu Hiva (Marquesas Islands; French Polynesia). *Bull. Soc. Géol. France* 173, 359-367. (doi:10.2113/173.4.359)
- [13] Sepúlveda SA, Serey A. 2009 Tsunamigenic, earthquake-triggered rock slope failures during the April 21, 2007 Aisén earthquake, southern Chile (45.5 S). *Andean Geol.* 36, 131-136. (doi:10.5027/andgeoV36n1-a10).
- [14] Fritz HM, Hillaire JV, Molière E, Wei Y, Mohammed F. 2013 Twin tsunamis triggered by the 12 January 2010 Haiti earthquake. *Pure Appl. Geophys.* 170, 1463-1474. (doi:10.1007/s00024-012-0519-z)
- [15] López-Venegas AM, Horrillo J, Pampell-Manis A, Huérfano V, Mercado A. 2015 Advanced tsunami



- generated waves at a sloping coast. *Coastal Engineering* 56(5-6):659-671.
- [51] Russell JS. 1837 Report on the committee of waves. In Report of the 7th Meeting of the British Association for the Advancement of Science, pp. 417-496. See <http://www.biodiversitylibrary.org/item/46624#page/7/mode/1up>.
- [52] Heller V, Hager WH. 2010 Impulse product parameter in landslide generated impulse waves. *J. Waterw. Port C-ASCE* 136, 145-155. (doi:10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000037)
- [53] Zweifel, A. (2004). Impulswellen: Effekte der Rutschdichte und der Wassertiefe (Doctoral dissertation, ETH Zurich).
- [54] Chauchat J, Medale M (2014) A three-dimensional numerical model for dense granular flows based on the $\mu(1)$ rheology. *J Comput Phys* 256:696-712. doi:10.1016/j.jcp.2013.09.004
- [55] Fritz, H. M. (2002). Initial phase of landslide generated impulse waves (Doctoral dissertation, ETH Zurich).
- [56] Volkart, P. (1980). The mechanism of air bubble entrainment in self-aerated flow. *International Journal of Multiphase Flow*, 6(5), 411-423.
- [57] Rettenmaier, D., Deising, D., Ouedraogo, Y., Gjonaj, E., De Gersem, H., Bothe, D. & Marschall, H. (2019). Load balanced 2D and 3D adaptive mesh refinement in OpenFOAM. *SoftwareX*, 10, 100317.
- [58] Panizzo, A., De Girolamo, P., & Petaccia, A. (2005). Forecasting impulse waves generated by subaerial landslides. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 110(C12).
- [59] Walder, J. S., Watts, P., Sorensen, O. E. & Janssen, K. (2003). Tsunamis generated by sub aerial mass flows, *J. Geophys. Res.* 108(B5), 2236, 19 pp.
- [60] Huber, L. E., Evers, F. M., & Hager, W. H. (2017). Solitary wave overtopping at granular dams. *Journal of Hydraulic Research*, 55(6), 799-812.
- [61] Zhang, C., Dai, J., Cui, L., & Ning, D. (2023). Experimental study of nonlinear states of oscillating water column in waves. *Physics of Fluids*, 35(1).
- [62] Mohammed, F., & Fritz, H. M. (2012). Physical modeling of tsunamis generated by three-dimensional deformable granular landslides. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(C11).
- [33] Miller, G.S., Take, A.W., Mulligan, R.P., McDougall, S. (2017). Tsunamis generated by long and thin granular landslides in a large flume. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 122(1):653-668.
- [34] Fritz HM, HagerWH, Minor H-E. 2003 Landslide generated impulse waves. 1. Instantaneous flow fields. *Exp. Fluids* 35, 505-519. (doi:10.1007/s00348-003-0659-0)
- [35] FritzHM, HagerWH, MinorH-E. 2003 Landslide generated impulse waves. 2. Hydrodynamic impact craters. *Exp. Fluids* 35, 520-532. (doi:10.1007/s00348-003-0660-7)
- [36] Fritz HM, Hager WH, Minor H-E. 2004 Near field characteristics of landslide generated impulse waves. *J. Waterw. Port C-ASCE* 130, 287-302. (doi:10.1061/(ASCE)0733-950X(2004)130:6(287))
- [37] Fritz HM. 2002 Initial phase of landslide generated impulse waves. PhD thesis, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Zürich, Switzerland, no. 14871.
- [38] Ataie-Ashtiani B, Najafi-Jilani A. 2008 Laboratory investigations on impulsive waves caused by underwater landslide. *Coast. Eng.* 55, 989-1004. (doi:10.1016/j.coastaleng.2008.03.003)
- [39] Sælevik G, Jensen A, Pedersen G. 2009 Experimental investigation of impact generated tsunami; related to a potential rock slide, Western Norway. *Coast. Eng.* 56, 897-906. (doi:10.1016/j.coastaleng.2009.04.007)
- [40] Grilli ST, Watts P. 2005 Tsunami generation by submarine mass failure. I: modeling, experimental validation, and sensitivity analyses. *J. Waterw. Port C-ASCE* 131, 283-297. (doi:10.1061/(ASCE)0733-950X(2005)131:6(283))
- [41] Watts P. 2000 Tsunami features of solid block underwater landslides. *J. Waterw. Port C-ASCE* 126, 144-152. (doi:10.1061/(ASCE)0733-950X(2000)126:3(144))
- [42] Watts P. 1997 Water waves generated by underwater landslides. PhD thesis, California Institute of Technology, Pasadena, CA, USA.
- [43] Watts P. 1998 Wavemaker curves for tsunamis generated by underwater landslides. *J. Waterw. Port C-ASCE* 124, 127-137. (doi:10.1061/(ASCE)0733-950X(1998)124:3(127))
- [44] Kamphuis J, Bowering R. 1970 Impulse waves generated by landslides. In 12th Coastal Engineering Conf., Washington, DC, 13-18 September 1970, pp. 575-588. Reston, VA: ASCE.
- [45] Wiegel RL, Noda EK, Kuba EM, Gee DM, Tornberg GF. 1970 Water waves generated by landslides in reservoirs. *J. Waterw. Port C. Div.* 96, 307-333.
- [46] Slingerland RL, Voight B. 1979 Occurrences, properties, and predictive models of landslide-generated water waves. In *Rocksides and avalanches* (ed. Voight B). Amsterdam, The Netherlands: Elsevier.
- [47] Wiegel RL. 1955 Laboratory studies of gravity waves generated by the movement of a submerged body. *Trans. Am. Geophys. Union* 36, 759-774. (doi:10.1029/TR036i005p00759)
- [48] Walder JS, Watts P, Sorensen OE, Janssen K. 2003 Tsunamis generated by subaerial mass flows. *J. Geophys. Res.* 108, 2236. (doi:10.1029/2001JB000707)
- [49] Huber A. 1980 Schwallwellen in Seen als Folge von Bergstürzen (ed. D Vischer). *VAW Mitteilung*
- [50] Di Risio, M., Bellotti, G., Panizzo, A., De Girolamo, P. (2009). Three-dimensional experiments on landslide

COPYRIGHTS

©2024 by the authors. Published by **Journal of Engineering & Construction Management (JECM)**. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



9 (1) , 2024

دوره ۹، شماره ۱

تابستان ۱۴۰۳

دوفصلنامه پژوهشی



مطالعه مروری بررسی آزمایشگاهی پارامترهای مؤثر بر موج ضربانی ناشی از لغزش توده‌های عظیم به درون آب‌های ساکن