

Research Paper

Experimental study of waves created by sliding masses in a rectangular water reservoir

Ramin Owtad¹, Shamsa Basirat^{2*}, Ehsan Delavari², Mohammad Hosseini³, Mohammad Hojaji Najafabadi²

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

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

3. Assistant prof., Department of Civil Engineering, Meymand Center, Firoozabad Branch, Islamic Azad University, Firoozabad, Iran

Received: 2019/02/20

Revised: 2019/04/04

Accepted: 2020/09/21

Use your device to scan and read the article online



DOI:

10.30495/wej.2021.20612.2126

Keywords:

Laboratory study, landslide, cylindrical slide model, non-periodic wave

Abstract

Introduction: It is important to investigate the conditions and dimensions of the wave resulting from the fall of the soil and rock mass, which creates large waves with large amplitudes on the water level of reservoirs and dams. Therefore, in the present research, the experimental investigation of the wave resulting from the fall of the solid mass inside the rectangular reservoir was investigated.

Methods: A cylindrical sample with three models falling into water from a sloping surface with an angle of 27.7 degrees and three reservoir depths of 35, 45, and 55 cm was considered for wave investigation. The inclined surface at the corner of the reservoir was considered to be different from previous laboratory studies. In order to determine the effect of changing the mass size on the wave characteristics of the composition and the number of different cylindrical masses, it was investigated.

Findings: Considering that the wave resulting from the falling mass in the reservoir changes under the influence of the presence of the walls and the return wave, the results showed that the placement of the sliding slope in the corner of the reservoir causes irregular waves, and the increase in the density of the sliding mass causes an increase in the length, amplitude, and energy of the wave. On the other hand, in a constant mass density, the model in which the cylindrical sliding masses slide parallel and without distance together (model 3) has the maximum wave height and amplitude due to the greater contact surface of the sliding mass with the water surface. In addition, the results showed that increasing the depth of the reservoir from 35 to 55 cm increases the characteristics of the wave, including the amplitude, length, and energy of the wave, but it does not have a significant effect on the maximum fluctuation of the free water surface. The results showed that the highest wave energy in model 3 (13.258 kJ) occurred at a reservoir depth of 55 cm. Impulsive waves caused by landslides in dam reservoirs can pose a serious threat to damaged dam bodies. The current research model may be effective for predicting the consequences of these types of waves and reducing the risks caused by them around the world.

Citation:

Extended Abstract

Introduction

The risk of landslides in water structures and dams is significant due to the direct and indirect effects of water on the occurrence of landslides. When granular or solid materials slide into a body of water such as a reservoir, lake, or sea, mass momentum is transferred to the water mass, creating waves with large amplitudes. This phenomenon is known as an impulsive wave in a reservoir or lake or as a landslide tsunami in the ocean and sea. Due to the many parameters affecting the characteristics of the wave and the complexity of the problem, there is a need for extensive investigations in this field. In the present research, the waves created by landslides in the reservoirs of dams and the characteristics of the waves created in the dam reservoir, such as the length of the wave and the directions of wave propagation, are investigated.

Materials and Methods

Experiments were carried out in a rectangular double-wall laminated glass flume with a width of 4 m, a length of 10 m, and a depth of 1.2 m in the hydraulic laboratory of the Islamic Azad University, Najaf Abad branch. Water was used as the fluid in the experiments, and its depth was considered to be 0.35, 0.45, and 0.55 m. Cylindrical concrete blocks with 0.20 m in height and 0.1 m in diameter and an approximate weight of 3800 gr were used to simulate the mass falling into the reservoir. The inclined angle of the sliding wall is 27.7 degrees, which is considered on the left side of the flume in the direction of the mass slide. To record the events, a professional camera with the ability to take photos at 30 frames per second was used. Also, at lengths of 1.5, 3, 4.5, 6, and 7.5 m from the inclined surface, water level profile recording sites were selected at different times. For each model, 5

seconds, which included 20 frames, were photographed, and Get Data software was used to collect data from the recorded images of the experiments. Next, with the help of image processing, all the data from the present research was extracted. In this research, the piles were dropped into the reservoir at depths of 35, 45, and 55 cm in three parallel pairs (model 1), two parallel pairs with spacing (model 2), and four parallel pairs (model 3).

Findings and Discussion

Examining the results showed that the type of mass sliding model in the reservoir and its density are effective, and the results of models (3) and (2) compared to model (1) have created a higher wave amplitude and wave height. Based on the results of the wave profile against different locations at a depth of 35 cm, the maximum amplitude of the wave created at a height of 4.3 cm in the model (3) happened in 2 seconds. The comparison of the results between the models for the depth of 45 cm of the water reservoir also showed that the wave amplitude of model (3) is 4.43 cm. By increasing the water depth to 55 cm, it was observed that the maximum wave amplitude occurred in model (3), and the time was 4 seconds, which was the highest value among the models at 5.65 cm. In general, the type of arrangement of these models, which includes parallelism, the effect of the sequence of the masses, and the distance between the masses, can be considered the main reason for this result. Examining the results of the wave profile against different times showed that the maximum amplitude of the wave created for the depths of 35, 45, and 55 cm of the reservoir, the values of the maximum amplitude of the wave, and the fluctuating height of the free water surface for these depths occurred in a model (3). Considering that the mass density in models (2) and (3) is equal to or higher than that in

model (1), with the increase in the density of the sliding mass, its gravitational force also increases. Also, with the increase in water depth, even though the fluctuating height of the water increases when the mass hits the reservoir of the dam, this increase cannot be considered. In model (3), compared to model (2), the contact surface that has a sliding mass inside the reservoir causes the maximum height of the free water surface in the initial areas to be associated with high intensity and high power, and the maximum values of the produced waves can be observed in this model.

Conclusion

The results showed that in all three depths of the reservoir, the increase in the density of the sliding mass increases the height of the wave, and with a constant density of the mass, the arrangement and placement of the cylindrical masses parallel to each other without a gap creates the highest wave height and energy in the reservoir. This is due to the increased contact surface of the sliding model with the water surface in the parallel model. Also, the investigations showed that increasing the depth of the reservoir from 35 cm to 55 cm had little effect on the increase in the height of the free water level, and the increase was about 6%.

The results showed that the highest wave energy in model 3 (13.258 kJ) occurred at a reservoir depth of 55 cm.

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: Ahmad Abedi-Sarvestani, Naser Ezatti-Sarvari.

Methodology and data analysis: Ahmad Abedi-Sarvestani, Naser Ezatti-Sarvari, Gholam-Hossein Abdollahzadeh.

Supervision and final writing: Ahmad Abedi-Sarvestani.

Conflicts of interest

The authors declared no conflict of interest.

مقاله پژوهشی

مطالعه تجربی امواج ایجاد شده توسط توده‌های لغزشی در مخازن آبی مستطیلی

رامین اوتاد^{۱*}، شمس‌بصیرت^۲، احسان دلاوری^۲، محمد حسینی^۲، محمد حججی نجف‌آبادی^۲

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران.
۲. استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران.
۳. استادیار، گروه مهندسی عمران، مرکز میمند، واحد فیروزآباد، دانشگاه آزاد اسلامی، فیروزآباد، ایران

چکیده

مقدمه: بررسی شرایط و ابعاد موج حاصل شده در اثر ریزش توده خاک و سنگ امواج بزرگی با دامنه‌های زیاد در سطح آب مخازن و سدها ایجاد می‌کند، حائز اهمیت است؛ بنابراین در تحقیق حاضر به بررسی تجربی موج حاصل از ریزش توده صلب داخل مخزن مستطیلی پرداخته شد.

روش: یک نمونه استوانه‌ای با سه مدل سقوط در آب از روی سطح شیب‌دار با زاویه ۲۷/۷ درجه به همراه سه عمق ۳۵، ۴۵ و ۵۵ سانتی‌متری مخزن برای بررسی موج در نظر گرفته شد. سطح شیب‌دار در گوشه مخزن در نظر گرفته شد تا نسبت به مطالعات آزمایشگاهی قبلی متفاوت باشد. برای اعمال اثر تغییر اندازه توده بر مشخصات موج ترکیب و تعداد توده‌های استوانه‌ای متفاوت مورد بررسی قرار گرفت.

یافته‌ها: باتوجه به اینکه موج حاصل از ریزش توده در مخزن تحت تأثیر حضور دیواره‌ها و موج بازگشتی دچار تغییر می‌شود، نتایج نشان داد که قرارگیری شیب لغزش در گوشه مخزن سبب ایجاد موج نامتناوب می‌گردد و افزایش چگالی توده لغزشی سبب افزایش طول، دامنه و انرژی موج می‌شود. از طرفی در یک چگالی ثابت توده، مدلی که در آن توده‌های لغزشی استوانه‌ای به صورت موازی و بدون فاصله در کنار هم لغزش پیدا می‌کنند (مدل ۳)، به دلیل سطح تماس بیشتر توده لغزشی با سطح آب، دارای ارتفاع و دامنه موج بیشینه است. علاوه بر این نتایج نشان داد که افزایش عمق مخزن از ۳۵ به ۵۵ سانتی‌متر، باعث افزایش مشخصات موج شامل دامنه، طول و انرژی موج می‌گردد اما تأثیر قابل ملاحظه‌ای در مقدار حداکثر نوسان سطح آزاد آب ندارد. **نتایج نشان داد که بیشترین انرژی موج در مدل ۳ (۱۳/۲۵۸ کیلوژول) در عمق مخزن ۵۵ سانتی‌متر اتفاق افتاد.**

نتیجه‌گیری: موج‌های ضربه‌ای که توسط لغزش زمین در مخزن سدها اتفاق می‌افتد می‌تواند بدنه‌های آسیب‌دیده سدها را با تهدید جدی مواجه کند. مدل تحقیق حاضر ممکن است برای پیش‌بینی پیامدهای این نوع امواج و کاهش خطرات ناشی از آن در سراسر جهان مؤثر باشد.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۰۱

تاریخ داوری: ۱۳۹۸/۰۱/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۳۱

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



DOI:

10.30495/wej.2021.20612.2126

مقدمه

یکی از مخاطرات عمده در مناطق کوهستانی ایران و مناطق مشرف به سازه‌های عمرانی، وقوع انواع ناپایداری‌های طبیعی به ویژه زمین لغزش‌ها می‌باشد. در واقع هنگامی که یک توده سنگی یا خاکی بر روی یک توده سست دیگر شروع به حرکت می‌نماید، زمین لغزش رخ می‌دهد. خطر زمین لغزش در سازه‌های آبی و سدها به علت تأثیر مستقیم و غیرمستقیم حضور آب در وقوع زمین لغزش اهمیت زیادی دارد. هنگامی که مواد دانه‌ای یا جامد به داخل یک بدنه آبی مانند مخزن، دریاچه یا دریا می‌لغزند، تکانه جرم به جرم آب منتقل می‌شود که امواجی با دامنه‌های زیاد ایجاد می‌کند. این پدیده به‌عنوان یک موج ضربه‌ای در یک مخزن و دریاچه یا به‌عنوان یک سونامی رانش زمین در اقیانوس و دریا شناخته می‌شود (۱۹، ۲۴). این نوع موج به‌عنوان موج ثقلی یا گرانژی طبقه‌بندی می‌شود و می‌تواند باعث ایجاد شرایط شدیدی مانند شکستن سدها و همچنین جاری شدن سیل شود. به دلیل این پیامدهای فاجعه‌بار، امواج ضربه‌ای ناشی از زمین لغزش در مخازن سدها می‌تواند برای خانه‌های واقع در پایین دست یا بالادست و همچنین بدنه سد بسیار خطرناک باشد. مخرب‌ترین نمونه این مورد، رویداد سونامی است که در خلیج لیتویا^۱ واقع در آلاسکا، در سال ۱۹۵۸ رخ داد. این رویداد سونامی، که بزرگترین سونامی ثبت شده در جهان است، منجر به ارتفاع ۵۲۴ متری شد (۲۷، ۱۳). همچنین فاجعه سد فاجعه سد واجنت^۲ که در ایتالیا در سال ۱۹۶۳ رخ داد و امواج ضربه‌ای ایجاد شده در مخزن سد بیش از ۷۰ متر از سد فراتر رفت و منجر به فوت حدود ۲۰۰۰ نفر شد (۲۸، ۲۶، ۲۵). وقوع این رویدادها در سراسر جهان که خسارات طبیعی و بشری فراوانی به بار آوردند، باعث شد تا محققین مسئله امواج ضربه‌ای ناشی از زمین لغزش ایجاد شده در مخزن سد را بررسی نمایند (۲۰، ۱۷، ۱۳، ۱۲، ۹، ۱). اثرات مخرب ناشی از امواج تکانشی تولید شده توسط زمین لغزش می‌تواند به طور قابل توجهی تحت تأثیر ویژگی‌های هندسه کانال و غلظت ذرات جرم اولیه باشد. مدل‌های تجربی و محاسباتی به طور قابل ملاحظه‌ای برای مطالعه دینامیک این رویدادهای طبیعی پیچیده به کار گرفته شده اند (۲۱). بررسی آزمایشگاهی و عددی با برنامه هیدرودینامیکی دو بعدی Nasa-Vof2D بر روی امواج غیرخطی ایجاد شده توسط یک جسم مثلی دوبعدی که در یک صفحه شیب‌دار ۴۵ درجه می‌لغزد، حاکی از اینست که پروفیل‌های موج محاسبه‌شده با روش عددی تطابق بسیار نزدیکی با پروفیل‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهند، به جز زمانی که تلاطم سطح آزاد رخ می‌دهد، که روش عددی حاضر نمی‌تواند آن را شبیه‌سازی کند (۱۴). بررسی امواج ناشی از توده لغزنده دانه‌ای به داخل آب نشان می‌دهد که میزان حجم توده لغزنده به داخل مخزن با ارتفاع موجی که تولید می‌نماید، وابستگی و ارتباط مستقیم دارد (۱۰). با بررسی لغزش بلوک‌های آهکی روی یک دیواره شیب دار در مخزن مشخص شد که

امواج ایجاد شده در مخزن به پارامترهای جرم بلوک‌های لغزنده، سطح آب ساکن در مخزن، سرعت لغزش، شیب کرانه لغزشی و موقعیت مرکز جرم اولیه بلوک‌های کشویی وابسته است. حداکثر دامنه موج مثبت وابستگی شدیدی به جرم (حجم) لغزش و به سطح آب اولیه دارد که یک تغییر شبه خطی را نشان می‌دهد و نمودارهای مختلف سرعت لغزش به‌صورت تقریباً خطی، شبه سینوسی و سهمی هستند (۷). در مطالعه‌ای که تخمین تأثیر امواج تولید شده توسط زمین لغزش در مخازن سد با مدل عددی دو بعدی انجام شد نیز نشان داد که نتایج خروجی این مدل با داده‌های آزمایشگاهی همخوانی خوبی دارد. شبیه‌سازی سه سناریوی موج تولید شده توسط زمین لغزش در سایت سد سفارود با استفاده از این مدل نیز نشان می‌دهد که حداکثر ارتفاع موج ۳۱ متر، حداکثر پرتاب موج ۲۱/۲ متر و حداکثر حجم سیلاب سد ۸۰۰۰۰ متر مکعب برآورد شد. بنابراین، این امکان وجود دارد که یک منطقه وسیع پایین دست، به ویژه مناطق مسطح مانند مناطق مسکونی، کشاورزی یا روستایی، غرق آب شود. علاوه بر این، هر سازه ساحلی یا هیدرولیکی، به ویژه آنهایی که در نزدیکی توده لغزنده قرار دارند، می‌توانند توسط موج تولید شده مورد تهدید قرار گیرند (۳). هنگام ایجاد امواج ضربه‌ای ناشی از زمین لغزش پارامترهای مختلفی بر روی نوسانات سطح آب در مخزن سدها تأثیر دارند که می‌توان به شیب بستر لغزشی، شکل و موقعیت توده لغزشی اشاره نمود. در میان این پارامترها، شیب بستر لغزشی و موقعیت اولیه توده لغزشی جزء تأثیرگذارترین پارامترها به‌شمار می‌آیند (۲۳). در پژوهشی دیگر از یک روش شبیه‌سازی عددی برای محاسبه امواج سطحی شکسته در مخزن و پیش‌بینی حداکثر ارتفاع موج آب ناشی از زلزله استفاده نمودند که در نهایت معادله‌ای برای پیش‌بینی حداکثر ارتفاع موج ارائه نمودند (۸). با این حال آزمایش‌ها بر روی امواج ناشی از زمین لغزش در آب کم عمق و در محدوده عدد فرود بین ۰/۶ تا ۲ نشان می‌دهد که افزایش فاصله ریزش توده به داخل مخزن منجر به افزایش بیشتر فشار می‌شود. با این وجود، افزایش شیب سطح باعث شده است که ابتدا فشار حداکثر، کاهش یابد و سپس افزایش یابد. از طرفی مشخص شد که توابع بدون بعد همانند دامنه موج، طول موج و ارتفاع جت آب امواج ناشی از زمین لغزش در آب کم عمق با استفاده از روش تحلیل رگرسیون غیرخطی قابل استخراج است. همچنین تجزیه و تحلیل مقایسه‌ای داده‌ها از منابع متعدد نشان داد که مدل عددی LIWSW^۳ برای امواج ناشی از زمین لغزش در آب‌های کم عمق دارای دقت بالایی است (۱۶). بررسی‌های بیشتر آزمایشگاهی به‌صورت لغزش بلوک از روی یک سطح شیب‌دار به داخل آب نیز حاکی از اینست که ارتفاع موج ایجاد شده متأثر از حجم و سرعت لغزش توده به درون آب، عمق اولیه آب و شتاب لرزش زمین است (۴). ارزیابی امواج ضربه‌ای تولید شده توسط زمین لغزش در مخزن سد ترسون (واقع در شمال ترکیه) به‌صورت عددی سه‌بعدی تعیین نمود

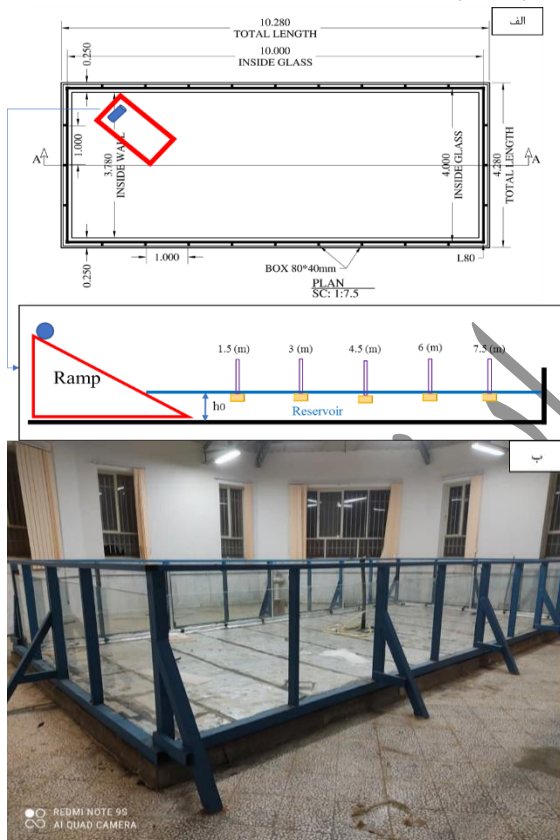
^۳ Landslide-Induced Waves in Shallow Water

^۱ Lituya

^۲ Vajont

مواد و روش‌ها

از آنجایی که در تحقیقات قبلی از ابعاد متنوعی از فلوم برای انجام آزمایش‌ها در ابعاد کوچک انجام شده بودند و تمرکز مطالعات قبلی صرفاً حرکت موج در یک راستا با عرض فلوم زیر ۱ متر بوده است (۲۴،۱۰). به دلیل امکان بازتاب موج از دیواره‌ها و اثر بر موج حاصل بر دیواره مقابل و مجاور بدین منظور در مطالعه تحقیق حاضر تصمیم بر افزایش ابعاد باکس مخزن آب که منجر به گسترش موج در تمام جهات شود، گرفته شد. آزمایش‌های تحقیق حاضر برای بررسی پارامترهای موج ایجاد شده توسط سقوط توده در داخل مخزن آبی با در نظر گرفتن این شرایط طراحی شده‌اند. آزمایش‌ها در یک فلوم شیشه‌ای دوجداره لمینیت شده مستطیلی شکل با عرض ۴ متر، طول ۱۰ متر و عمق ۱/۲ متر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد انجام شد. (شکل ۱).



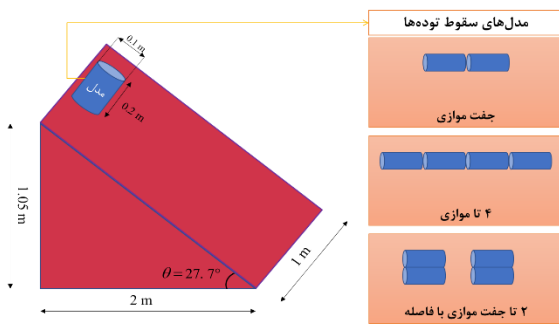
شکل ۱- الف پلان و جزئیات سطح شیب‌دار و ب: نمای واقعی فلوم آزمایشگاهی تحقیق حاضر

تمامی جداره‌های باکس مخزن برای تصویربرداری و بررسی هر چه دقیق‌تر نوسانات موج به صورت شیشه‌ای طراحی و ساخته شد تا محدودیتی در راستای برداشت دیتاها در تحقیق حاضر و مطالعات بعدی صورت نگیرد. همچنین به جهت اینکه فرایند لغزش توده موردنظر به داخل آب و امواج ضربه‌ای ایجاد شده به درستی ثبت شود و هیچ انعکاس نوری در زمان ضبط عکس‌های آزمایشگاهی مانع داده‌برداری نگردد، یک طرف فلوم شیشه‌ای با پارچه سفید پوشانده و در طرف دیگر

که یک موج ضربه ای ۱۶/۵ متری در نتیجه برخورد مواد لغزنده با آب با سرعت ۱۶/۴ متر بر ثانیه ایجاد می‌شود. موج در ۲۷/۴ ثانیه به ساحل مقابل می‌رسد و ارتفاع پرتاب به ۴۸/۸ متر می‌رسد. با انتشار موج با میانگین سرعت ۱۱/۶ متر بر ثانیه در مخزن به سمت بدنه سد، ارتفاع آن کاهش می‌یابد و موجی به ارتفاع ۳/۷ متر در ۱۵۵ ثانیه به سد برخورد می‌کند. تجزیه و تحلیل اعتبارسنجی انجام شده با استفاده از معادلات تجربی و آزمون‌های مدل آزمایشگاهی، تفاوت‌های کوچکی را در نتایج نشان می‌دهد. دلیل اصلی این تفاوت‌ها این است که ارزیابی خواص موج مستقل از نوع حرکت جرم در روش‌های تجربی است. یک تحلیل پایداری مناسب برای تخمین بهتر حجم و سرعت جرم لغزش مورد نیاز است (۲۲). شبیه‌سازی عددی سونامی‌های تولید شده توسط زمین لغزش در مخزن اکیلیودو در چین با استفاده از روش حجم محدود بر اساس معادلات درجه بالا نوع Boussinesq مشخص نمود که خطر سونامی ناشی از زمین لغزش در منطقه مخزن در چین را نمی‌توان نادیده گرفت. همچنین معادلات توسعه‌یافته از نوع Boussinesq همراه با دینامیک زمین لغزش می‌تواند کل فرایند تولید، انتشار، سرریز و تخمین حجم آب سرریز سونامی در دریاچه را شبیه‌سازی کند (۱۸).

بررسی دینامیک سونامی‌های تولید شده توسط زمین لغزش و وابستگی آنها به غلظت ذرات جرم آزاد اولیه نشان می‌دهد که زمانی که جریان به یک مخزن آب ساکن پایین‌دست برخورد می‌کند، غلظت دانه‌ها در توده رهاسازی به طور قابل توجهی بر دینامیک جریان و امواج سیال تأثیر می‌گذارد. همچنین نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که یک جریان انبوه با غلظت بالاتر از رسوبات، سونامی‌های شدیدی را ایجاد می‌کند و به سرعت رو به جلو منتشر می‌شود و خطر بالای شکست سد را به همراه دارد (۲۱).

به کمک بررسی امواج ایجاد شده از زمین لغزش و همین‌طور پس از برخورد آنها با ساحل یا دیواره سد، می‌توان تا حدودی آمادگی لازم برای مقابله با آنها را بالا برد و خسارات وارده را به حداقل رساند با بررسی پیشینه تحقیق مشخص گردید که تحقیقات قابل توجهی در مورد پارامترهای مؤثر امواج آب ناشی از زمین لغزش در مخزن سد به طور جداگانه انجام شده است. با توجه به پارامترهای متعدد مؤثر بر مشخصات موج و پیچیدگی مسئله نیاز به بررسی‌های گسترده در این زمینه وجود دارد. بنابراین در تحقیق حاضر به بررسی آزمایشگاهی امواج ایجاد شده توسط زمین لغزش توده در مخازن سدها و ویژگی‌های موج ایجاد شده در مخزن سد نظیر مشخصات موج شامل دامنه، طول و انرژی موج بررسی می‌شود. از نوآوری‌های تحقیق می‌توان به مدلسازی تجربی شرایطی که در طبیعت ممکن است به وقوع بپیوندد همانند یکپارچه نبودن توده لغزش یافته (موازی بودن با و بدون فاصله بودن توده‌های استوانه‌ای) به داخل مخزن در اعماق متفاوت آب که تاکنون کمتر در مطالعات قبلی مورد تحلیل قرار گرفته‌اند، نیز بررسی شد.



شکل ۲- نمای واقعی و شماتیک از سطح شیب‌دار و توده لغزشی مورد استفاده در تحقیق حاضر

در همین راستا از یک روش طرح آزمایشی ابتکاری که شامل انجام چهار آزمایش برای هر بلوک رها شده بود، بهره گرفته شد. آزمایش اول برای تعیین موقعیت اوج اولیه موج ضربه‌ای و تثبیت اندازه‌های موج بود و آزمایش‌های دیگر ارتفاع امواج پیشرو را به دست آوردند و سپس مقدار میانگین آن‌ها به‌عنوان مقدار تجربی محاسبه و یادداشت شد. پس از انتشار موج، فاصله بین دو پیک موج اول به‌عنوان طول موج اندازه‌گیری شد. سلسله‌های فاز موج ضربه‌ای با مقایسه فاصله‌هایی که موج اوج در بازه‌های زمانی مختلف نشان داده‌شده در تصاویر حرکت می‌کرد، محاسبه شد. برای انجام آزمایش‌ها چندین مدل که توده‌ها در چیدمان‌های مختلف در نظر گرفته شد. مدل‌ها شامل جفت موازی، دو تا جفت موازی بافاصله و چهارتا موازی توده لغزشی اشاره نمود. در شکل ۲ و جدول ۱ مشخصات توده‌های لغزشی به داخل مخزن و سناریوهای طراحی شده ارائه شده است. همچنین برای مقایسه و درک بهتر نتایج سعی گردید که تغییرات ارتفاع و طول نوسانات سطح آزاد آب تمامی مدل‌ها حول عدد ۲۵ نوسان کند؛ لذا از مقادیر عمق استخر ۳۵، ۴۵ و ۵۵ سانتی‌متری به ترتیب ۱۰، ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متر کم شد.

دوربین با کیفیت بالا نصب شد. از آب به‌عنوان سیال مورد استفاده در آزمایش‌ها استفاده و عمق آن ۰/۳۵، ۰/۴۵ و ۰/۵۵ متر در نظر گرفته شد. جهت شبیه‌سازی توده ریزشی به داخل مخزن از بلوک‌های استوانه‌ای شکل بتنی با ابعاد ۰/۲۰ متر ارتفاع و قطر ۰/۱ متر به وزن تقریبی ۳۸۰۰ گرم استفاده شد (شکل ۲). در تحقیقات قبلی همواره از بلوک‌های مکعبی شکل مستطیلی و دیگر اشکال برای شکل توده استفاده شده بود؛ اما در تحقیق حاضر از بلوک‌های استوانه‌ای استفاده شد تا علاوه بر نوآوری تحقیق حاضر، غلتانیده شدن توده در سطح شیب‌دار بررسی شود (۱۶،۳). زاویه دیواره لغزشی مثلثی قائم الزوایه‌ای که در کناره سمت چپ فلوم جهت لغزش توده نیز در عرض ۱ متر، طول ۲ متر به ارتفاع ۱/۰۵ متری در نظر گرفته شد. به عبارتی زاویه شیب‌دار ۲۷/۷ درجه برای دیواره لغزشی تعیین شد (شکل ۲).

برای ثبت رخدادها هنگام رهایی بلوک به داخل مخزن آب از یک دوربین عکاسی حرفه‌ای با قابلیت عکس‌برداری ۳۰ فریم بر ثانیه استفاده شد. دوربین نصب شده ۶ متر از فلوم را پوشش می‌داد و بر اساس آزمون‌وخطا مشخص شد که برای ثبت کامل رویدادهای تحقیق حاضر این طول کافی بود. همچنین در طول‌های ۱/۵، ۳، ۴/۵، ۶ و ۷/۵ متری از سطح شیب‌دار به‌عنوان محل‌های ثبت پروفیل سطح آب در تایم‌های زمانی مختلف انتخاب شد (شکل ۱ الف). برای هر مدل ۵ ثانیه که شامل ۲۰ فریم بود، تصویربرداری شد و برای جمع‌آوری داده‌های مربوط از تصاویر ثبت شده آزمایش‌ها از نرم‌افزار گیت دیتا استفاده شد. در ادامه به کمک قابلیت پردازش تصویر در این برنامه تمامی داده‌های تحقیق حاضر استخراج شد. همچنین برای اینکه تمامی پارامترهای موج ضربه‌ای به‌درستی ثبت شود، برخی آزمایش‌ها برای چندین بار تکرار شد تا خطا انسانی در آزمایش‌ها به حداقل رسد.



جدول ۱- مشخصات سناریوهای طراحی شده برای لغزش توده‌ها

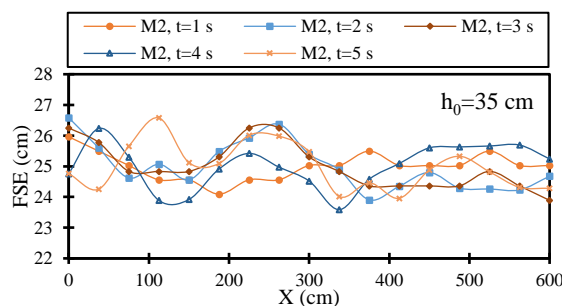
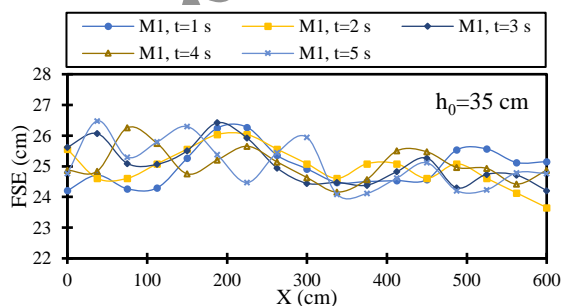
مدل	نوع توده	فاصله عمودی توده از سطح آب (m)	چگالی یک توده (Kg/m ³)	وزن کل توده ریزشی (Kg)	زاویه شیب لغزشی (درجه)	عمق استخر (cm)
1	جفت موازی		2419	7.6		
2	دو تا جفت موازی بافاصله	1.05	2419	15.2	27.7°	35, 45 and 55
3	چهارتا موازی		2419	15.2		

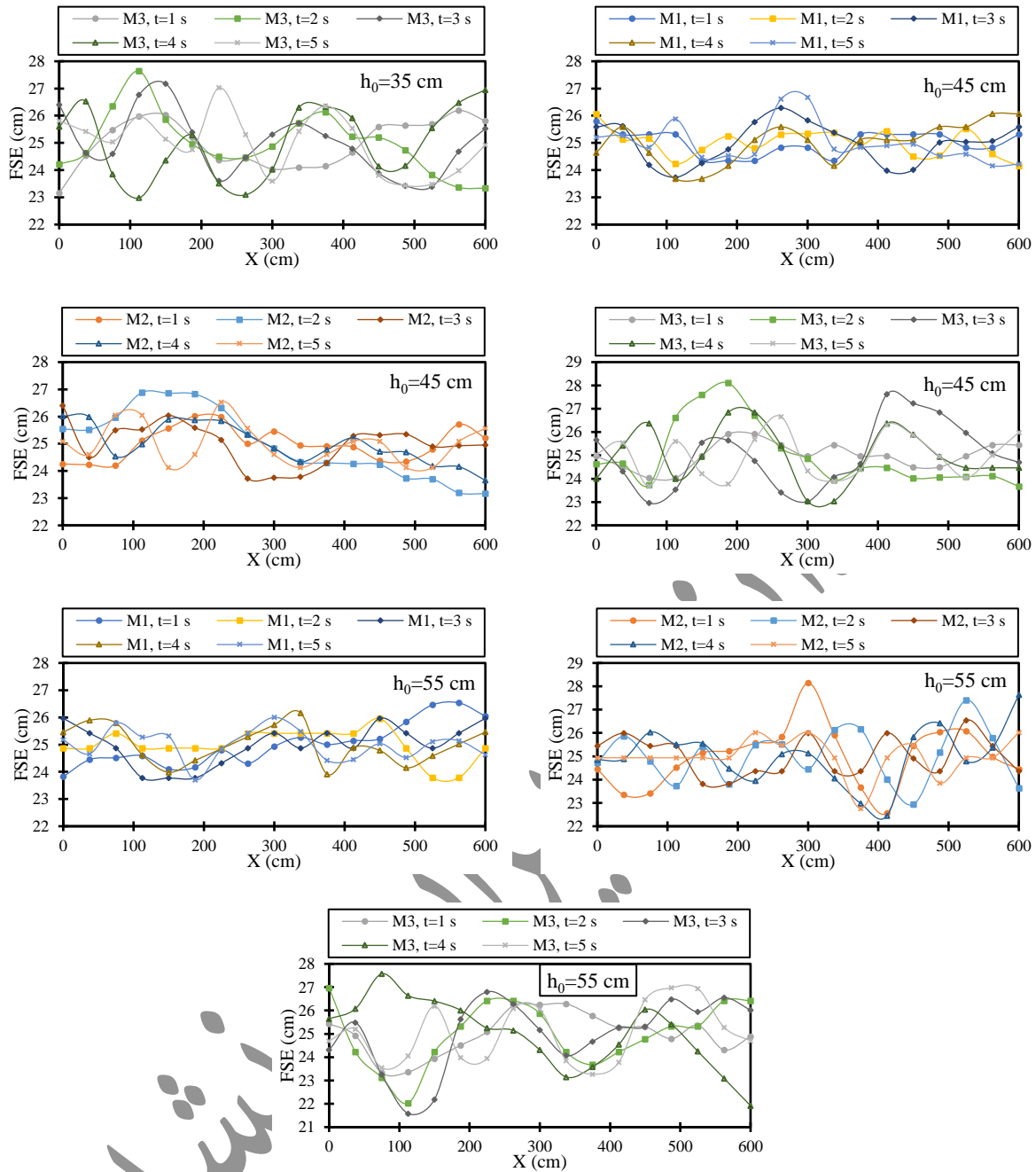
نتایج

حداکثر ارتفاع نوسانات سطح آزاد آب به ازای عمق‌ها در طول مخزن

توده در مخزن و چگالی آن تأثیرگذار است و نتایج مدل (۳) و مدل (۲) نسبت به مدل (۱) دامنه موج و ارتفاع موج بالایی ایجاد نموده است. در واقع نوع چینش این مدل‌ها که شامل موازی بودن، اثر توالی توده‌ها و فاصله میان توده‌هاست را می‌توان دلیل اصلی این نتیجه دانست. به طور کلی موازی بودن توده‌ها هنگام لغزش (مدل ۳) به داخل مخزن سبب دامنه موج بالایی را نسبت به حالت دو تا جفت موازی با فاصله (مدل ۲) را ایجاد می‌کند. بررسی مقادیر عمق آب مخزن نیز نشان داد که افزایش عمق آب تأثیر چشمگیری در ارتفاع نوسانات سطح آزاد آب ندارد؛ اما در مورد بررسی انرژی موج مشخص شد که طول موج و دامنه موج و به تبع آن انرژی موج تأثیر مطلوبی دارد. بررسی مقادیر افزایش عمق آب از ۳۵ سانتی‌متر به ۵۵ سانتی‌متر به‌ازای مدل‌های بحرانی در این اعماق سبب شد که ارتفاع نوسانات سطح آزاد آب در مخزن با عمق ۵۵ سانتی‌متر، ۴/۳۲ درصد نسبت به عمق آب ۳۵ سانتی‌متر افزایش پیدا نماید. همچنین بر اساس شکل (۳) می‌توان بیان نمود که تغییرات امواج ایجاد شده تمامی مدل‌ها در مخزن سد از الگوی خاصی در ناحیه شکل‌گیری صفر الی ۶۰۰ سانتی‌متر پیروی می‌کنند. بررسی مشخصات مکانی حداکثر ارتفاع نوسانات سطح آزاد آب تحت مدل‌های متفاوت نشان می‌دهد که تفاوت ناچیزی میان مدل‌های تحقیق حاضر مشاهده شد، با این حال اکثر ارتفاع‌های بالای آب برای مخازن با اعماق ۳۵ و ۵۵ سانتی‌متری در محدوده ابتدایی سقوط رخ داد. دلیل وقوع این نتیجه را می‌توان به نحوه برخورد توده با سیال آب مخزن و نوع استفاده از سطح شیب‌دار در گوشه فوم مرتبط دانست. در واقع در اکثر تحقیقات قبلی در مخازن سد سعی می‌شد که لغزش توده در راستای جریان انتخاب شود و نوسان سطح آزاد آب ایجاد شده در همین راستا انتشار می‌یافت؛ در حالی که در تحقیق حاضر گوشه‌ای از مخزن سد جهت سقوط توده لغزشی انتخاب شد و توده لغزشی علاوه بر راستای جریان، بر کرانه‌های مخزن نیز گسترش می‌یافت و این عامل سبب ایجاد موج نامتناوب در مخزن شد. در واقع موج اولیه و پس از آن موج ثانویه بلندی ایجاد می‌شد. در ادامه نیز در محدوده میانی مخزن نیز نوسانات سطح آب افزایش یافت و نتایج نیز نشان داد که در طولی با محدوده ۲۲۵ الی ۴۱۲/۵ سانتی‌متری از سطح شیب‌دار مقادیر حداکثر ارتفاع نوسان سطح آزاد آب به وقوع پیوست.

امواج ضربه‌ای در داخل مخزن سد در اثر عواملی همانند ریزش صخره و زمین لغزش ایجاد می‌شوند. این امواج ضربه‌ای سبب تولید نوسانات در سطح آب مخزن سد می‌شود. در سیلاب‌هایی که ارتفاع امواج فراتر رود، جریان به صورت روگذر از تاج سد عبور می‌کند و باعث بروز خطرات اجتماعی و اقتصادی جبران‌ناپذیر در پایین‌دست می‌شود. لذا بررسی مدل‌های احتمالی سقوط توده‌های لغزشی به داخل مخزن سد و حداکثر ارتفاع موج ایجاد شده به همراه طول مسافت و زمان انتشار موج از الزامات مهم بررسی این موضوع است. در این تحقیق توده‌ها در سه مدل جفت موازی بودن (مدل ۱)، دو تا جفت موازی با فاصله (مدل ۲) و چهارتا موازی (مدل ۳) به داخل مخزن با اعماق ۳۵، ۴۵ و ۵۵ سانتی‌متر رها شدند. در شکل (۳) ارتفاع نوسانات سطح آزاد آب ایجاد شده تحت مدل‌های مختلف در برابر طول‌های متفاوت به‌ازای اعماق مختلف آب مخزن در زمان ۵ ثانیه ارائه شده است. همچنین در جدول (۲) دامنه موج‌های ایجاد شده توسط مدل‌های تحقیق حاضر نیز ارائه شده است. برای درک بهتر دامنه موج‌های ایجاد شده توسط مدل‌های تحقیق حاضر مقادیر بیشینه ارتفاع موج مدل از مقدار کمینه آن کسر شد و حاصل به‌عنوان دامنه موج در نظر گرفته شد. بر اساس شکل (۳) و جدول (۲) مشخص شد که در عمق ۳۵ سانتی‌متر حداکثر دامنه موج ایجاد شده به ارتفاع ۴/۳ سانتی‌متر در مدل (۳) در ثانیه ۲ اتفاق افتاد. مقایسه نتایج میان مدل‌ها برای عمق ۴۵ سانتی‌متر مخزن آب نشان داد که مدل (۳) در تمامی ۵ ثانیه مورد بررسی بالاترین ارتفاع نوسانات سطح آزاد آب را دارد. این مدل نوسانی به ارتفاع ۲۸/۱۰ سانتی‌متر به فاصله ۱۸۷/۵ سانتی‌متری از سطح شیب‌دار در طول مخزن و در ثانیه ۲ ایجاد نمود و دامنه موج این مدل نیز ۴/۴۳ سانتی‌متر است. با افزایش عمق آب به ارتفاع ۵۵ سانتی‌متر نیز مشاهده شد حداکثر دامنه موج در مدل ۳ و زمان ۴ ثانیه به وقوع پیوست که بیشترین مقدار را در بین مدل‌ها به مقادیر ۵/۶۵ سانتی‌متر داشت. با این حال در همین عمق آب مخزن، مدل (۲) در زمان سقوط ۱ ثانیه به داخل مخزن نوسان آبی به ارتفاع ۲۸/۱۴ سانتی‌متری در طول ۳۰۰ سانتی‌متری از سطح لغزش به ثبت رساند. به طور کلی بررسی نتایج نشان می‌دهد که نوع مدل لغزش





شکل ۳- مقایسه ارتفاع سطح آزاد آب به‌ازای عمق‌های متفاوت مخزن در برابر طول‌های مختلف برای زمان ۱ الی ۵ ثانیه

بیشتری است، لذا دارای انرژی موج بیشتری است. با بررسی بهتر جدول می‌توان دریافت که در میان مدل‌های تحقیق حاضر، بیشترین انرژی موج مربوط به مدل ۳ و مقدار آن برابر ۱۳/۲۵۸ کیلوژول در عمق مخزن ۵۵ سانتی‌متر است. از طرفی بررسی کمی نتایج جدول (۲) نشان داد که افزایش عمق از ۳۵ به ۵۵ سانتی‌متر باعث افزایش انرژی موج می‌شود، به نحوی که برای مدل‌های ۱، ۲ و ۳ انرژی موج به ترتیب ۴۸/۱٪، ۸۴/۷٪ و ۷۸/۱٪ افزایش یافت. با این حال مقادیر انرژی موج مدل ۳ با عمق ۳۵ سانتی‌متری در مقایسه با مدل ۲، ۳۲٪ افزایش یافت. این مقادیر برای اعماق ۴۵ و ۵۵ سانتی‌متری مخزن آب به ترتیب ۲۶٪ و ۲/۸٪ است.

در تحقیق حاضر برای محاسبه انرژی موج که مجموع انرژی جنبشی و پتانسیل آن است از رابطه زیر استفاده شد (۶).

$$E_L = \frac{1}{8} \rho g H^2 L \quad (۱)$$

در رابطه بالا E_L کل انرژی هر موج، ρ جرم مخصوص آب، g شتاب گرانش زمین، H دامنه موج و L طول موج است. مقادیر انرژی موج در هر مدل به‌ازای عمق‌های آب مخزن در جدول ارائه شده است. مطابق جدول مشاهده می‌شود که با افزایش عمق پارامترهای طول و دامنه موج نیز افزایش می‌یابد. از آنجایی که انرژی موج تابعی از توان دوم دامنه موج بوده و مدل ۳ در بین دو مدل دیگر دارای دامنه موج

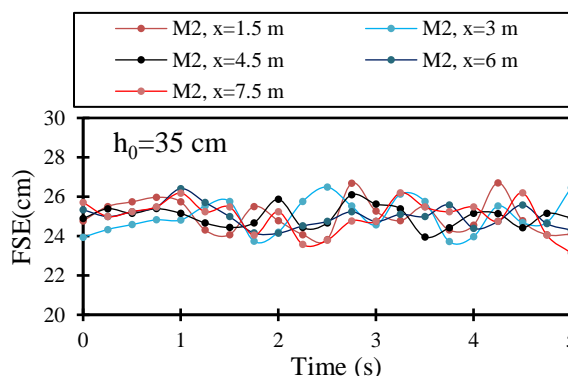
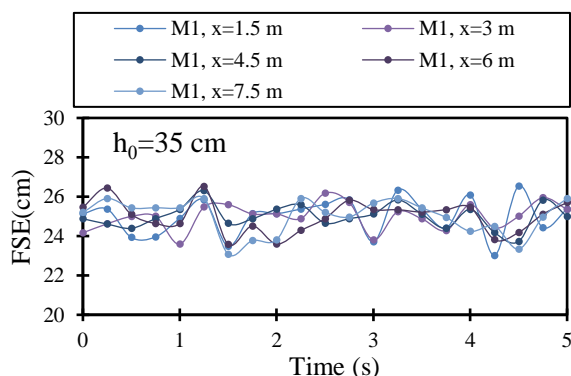
جدول ۲- نتایج حداکثر انرژی، دامنه و طول موج برای هر مدل

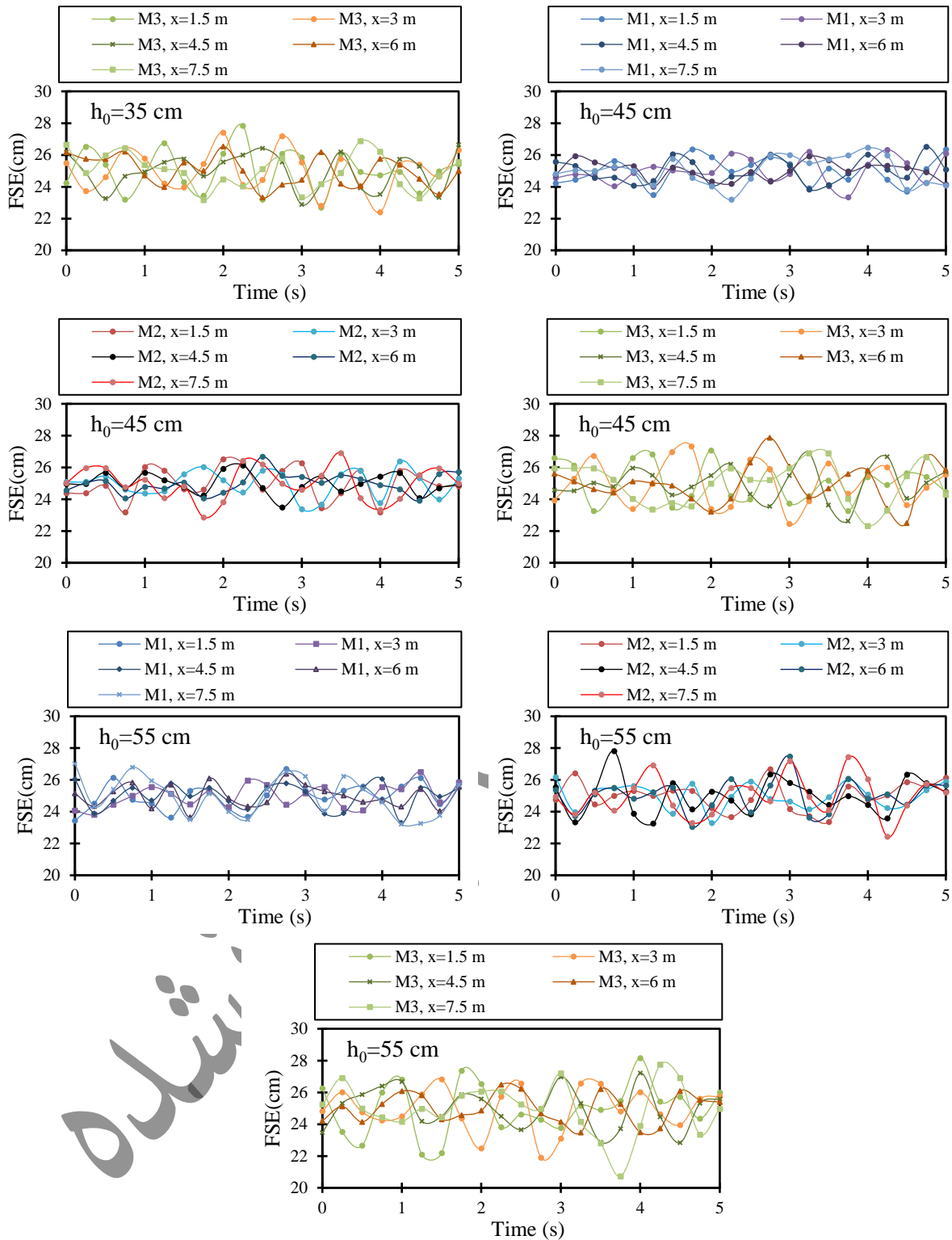
h ₀ =55 cm			h ₀ =45 cm			h ₀ =35 cm			عمق مخزن
انرژی	دامنه	طول	انرژی	دامنه	طول	انرژی	دامنه	طول	مدل
(kj)	(m)	(m)	(kj)	(m)	(m)	(kj)	(m)	(m)	
2.0263	0.0271	2.25	1.449	0.0251	1.875	1/051	0.0239	1.5	Model 1
12.886	0.0558	3.375	5.063	0.0371	3	1.967	0.0267	2.25	Model 2
13.258	0.0565	3.375	7.989	0.0466	3	2.897	0.03	2.625	Model 3

پیدا می‌کند. با افزایش نیروی ثقل توده و غلبه این نیرو بر نیروی درگ باعث پیشروی توده در جریان آب و افزایش طول و ارتفاع نوسانات سطح آزاد آب در این دو مدل می‌شود. همچنین با افزایش عمق آب باوجود اینکه ارتفاع نوسانی آب هنگام برخورد توده به مخزن سد افزایش می‌یابد؛ اما این افزایش قابل تأمل نیست (شکل ۴). به طور کلی عمق اولیه مخزن تأثیر قابل توجهی بر روی حداکثر افزایش سطح آزاد آب ندارد و در مدل (۲) با عمق آب ۳۵ سانتی‌متری مخزن نسبت به مدل (۲) با عمق ۵۵ سانتی‌متری، ۶/۲ درصد افزایش می‌یابد. باتوجه به اینکه با افزایش عمق اولیه آب، نسبت انتقال انرژی افزایش می‌یابد؛ اما تأثیرات آن به طور قابل توجهی کوچک است و می‌توان از آن صرف نظر نمود که این موضوع را محققین قبلی نیز بیان و تأیید نمودند (Aksen, 2022). همچنین در مدل (۳) با اعماق آب مخزن ۳۵، ۴۵ و ۵۵ سانتی‌متری، حداکثر ارتفاع سطح آزاد آب به ترتیب در طول‌های ۱/۵، ۶ و ۱/۵ متری از سطح شیب‌دار مشاهده شد و برای مدل (۲) با مخزن با عمق آب ۳۵، ۴۵ و ۵۵ سانتی‌متری این قضیه در مسافت‌های ۱/۵، ۷/۵ و ۴/۵ متری از سطح شیب‌دار سقوط توده رخ داد. در واقع استفاده از چهار توده در یک راستای موازی به‌جای دو توده لغزشی پشت‌سرهم سبب افزایش تماس سطح توده با آب مخزن می‌شود. باتوجه به اینکه در مدل (۳) نسبت به مدل (۲) سطح تماسی که توده لغزشی به داخل مخزن دارد باعث می‌شود که حداکثر ارتفاع سطح آزاد آب در نواحی ابتدایی با شدت بالا و قدرت بالایی همراه باشد و مقادیر بیشینه امواج تولیدی در این مدل مشاهده شود.

حداکثر ارتفاع نوسانات سطح آزاد آب به‌زای عمق‌های مخزن در زمان‌های مختلف

در تحقیق حاضر برای بررسی پروفیل سطح آزاد آب در زمان‌های متفاوت صفر الی ۵ ثانیه اقدام به تصویربرداری جهت ثبت داده شد. در ۵ ثانیه ابتدایی بررسی توده لغزشی به داخل مخزن سد، ۲۰ فریم که هر یک ثانیه شامل ۴ فریم یا به عبارتی ۴ داده بود ثبت شد. شکل (۴) نشان‌دهنده مقادیر ارتفاع سطح آزاد آب بر اثر امواج ایجاد شده در مخزن سد بر اثر لغزش توده‌ها تحت مدل‌های متفاوت در برابر زمان است. همچنین محل‌های ثبت امواج ایجاد شده در طول‌های ۱/۵، ۳، ۴/۵، ۶ و ۷/۵ متری از سطح شیب‌دار است. همچنین در جدول (۳) مقادیر حداکثر ارتفاع نوسانات سطح آزاد آب برای مدل‌های مختلف تحقیق به‌زای اعماق متفاوت آب و طول‌های متفاوت ارائه شده است. نتایج شکل (۴) و جدول (۳) نشان داد که حداکثر دامنه موج ایجاد شده در عمق ۳۵ سانتی‌متر برای مدل (۳) به مقدار ۵/۱۴ سانتی‌متر است، در حالی که برای مدل (۲) مقدار آن ۳/۰۵ سانتی‌متر است. از طرفی حداکثر ارتفاع نوسانی سطح آزاد آب برای عمق ۳۵ سانتی‌متری مخزن در مدل (۳) رخ داد. نتایج برای عمق‌های ۴۵ و ۵۵ سانتی‌متر مخزن نیز نشان داد که مقادیر حداکثر دامنه موج و ارتفاع نوسانی سطح آزاد آب برای این عمق‌ها در مدل (۳) رخ داد؛ لذا اثر موازی بودن توده‌های لغزشی نسبت به توالی توده‌ها بافاصله مشهود است. همچنین این نوسانات حداکثر سطح آزاد آب برای عمق‌های ۳۵، ۴۵ و ۵۵ سانتی‌متری مخزن به ترتیب در زمان‌های ۲/۲۵، ۲/۷۵ و ۴ ثانیه رخ داد. باتوجه به اینکه چگالی توده‌ها در مدل‌های (۲) و (۳) برابر و نسبت به مدل (۱) بیشتر است، بنابراین با افزایش چگالی توده لغزشی، نیروی ثقل آن نیز افزایش





شکل ۴- مقایسه ارتفاع سطح آزاد آب به‌ازای عمق‌های متفاوت مخزن در برابر طول‌های مختلف برای زمان ۱ الی ۵ ثانیه

جدول ۳- نتایج حداکثر نوسانات سطح آب برای هر مدل در زمان و مکان مشخص

عمق اولیه آب مخزن			نوع مدل
$h_0=55$ cm	$h_0=45$ cm	$h_0=35$ cm	
			Model 1

X=7.5 m t=0 s max=27.02 cm	X=4.5 m t=4.75 s max=26.51 cm	X=1.5 m t=4.5 s max=26.54 cm	
X=4.5 m t=0.75 s max=27.81 cm	X=7.5 m t=3.5 s max=26.90 cm	X=1.5 m t=4.25 s max=26.71 cm	Model 2
X=1.5 m t=4 s max=28.16 cm	X=6 m t=2.75 s max=27.87 cm	X=1.5 m t=2.25 s max=27.83 cm	Model 3

بحث و نتیجه گیری

طراحی و ایده پردازی: رامین اوتاد
روش شناسی و تحلیل داده ها: رامین اوتاد، شمس بصیرت، احسان
دلاوری، محمد حجی نجف آبادی
نظارت و نگارش نهایی: شمس بصیرت

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان، مقاله حاضر فاقد هرگونه تعارض منافع بوده است.

در تحقیق حاضر به صورت آزمایشگاهی ویژگی های امواج تولید شده در اثر لغزش توده به مخزن سد پرداخته شده است. بدین منظور از سه مدل سقوط توده استوانه ای که شامل جفت موازی بودن، ۴ تا موازی و ۲ تا جفت موازی بافاصله بودن توده لغزشی به داخل مخزن در اعماق متفاوت آب بررسی شد. نتایج نشان داد در هر سه عمق مخزن، افزایش چگالی توده لغزشی سبب افزایش ارتفاع موج می گردد و در یک چگالی ثابت توده، چیدمان و قرارگیری توده های استوانه ای به صورت موازی در کنار هم و بدون فاصله، بیشترین ارتفاع و انرژی موج را در مخزن ایجاد می کند. این امر به دلیل افزایش سطح تماس مدل لغزشی با سطح آب در مدل موازی است. همچنین بررسی ها نشان داد که افزایش عمق مخزن از ۳۵ سانتی متر تا ۵۵ سانتی متر تأثیر چندانی بر افزایش ارتفاع نوسان سطح آزاد آب تأثیر کمی داشته و مقدار افزایش در حدود ۶ درصد به دست آمد که این مورد در مطالعات قبلی نیز ذکر شده است. با این حال نتایج بررسی بیشتر مشخصات موج نشان داد که افزایش عمق مخزن سبب افزایش انرژی موج شده و بیشترین انرژی موج مربوط به مدل ۳ و مقدار آن برابر ۱۳/۲۵۸ کیلوژول در عمق مخزن ۵۵ سانتی متر است. موج های ضربه ای که توسط لغزش زمین در مخزن سدها اتفاق می افتد می تواند بدنه های آسیب دیده سدها را با تهدید جدی مواجه کند. مدل تحقیق حاضر ممکن است برای پیش بینی پیامدهای این نوع امواج و کاهش خطرات ناشی از آن در سراسر جهان مؤثر باشد. لازم است برای مطالعات بعدی، تأثیر مدل های سقوط متفاوت و همچنین تأثیر زاویه سطح شیب دار روی مشخصات موج ایجاد شده در مخزن به صورت مفصل بررسی و نتایج آن ارزیابی گردد.

ملاحظات اخلاقی پیروی از اصول اخلاق پژوهش

همکاری مشارکت کنندگان 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

References

1. Akgün, A., 2011. Assessment of possible damaged areas due to landslide-induced waves at a constructed reservoir using empirical approaches: Kurtun (North Turkey) Dam reservoir area. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(5), pp.1341-1350.
2. Ataie-Ashtiani, B. and Najafi Jilani, A., 2007. A higher-order Boussinesq-type model with moving bottom boundary: applications to submarine landslide tsunami waves. *International journal for numerical methods in fluids*, 53(6), pp.1019-1048.
3. Ataie-Ashtiani, B. and Yavari-Ramshe, S., 2011. Numerical simulation of wave generated by landslide incidents in dam reservoirs. *Landslides*, 8, pp.417-432.
4. Ai, H.Z., Yao, L.K. and Zhou, Y.L., 2017. Laboratory investigations of earthquake-and landslide-induced composite surges. *Journal of Mountain Science*, 14(8), pp.1537-1549.
5. Aksen, M.M., 2022. Parametric Analysis of Two-Layer Shallow Flow Modelling for Landslide and Water Waves in Dam Reservoirs (Master's thesis, Middle East Technical University).
6. Dean, R. G., & Dalrymple, R. A. 1991. *Water wave mechanics for engineers and scientists* (Vol. 2). world scientific publishing company.
7. De Carvalho, R.F. and Antunes do Carmo, J.S., 2007. Landslides into reservoirs and their impacts on banks. *Environmental Fluid Mechanics*, 7, pp.481-493.
8. Demirel, E. and Aydin, I., 2016. Numerical simulation and formulation of wave run-up on dam face due to ground oscillations using major earthquake acceleration records. *Journal of Engineering Mechanics*, 142(6), p.06016001.
9. Ersoy, H., Karahan, M., Gelişli, K., Akgün, A., Anılan, T., Sünnetçi, M.O. and Yahşi, B.K., 2019. Modelling of the landslide-induced impulse waves in the Artvin Dam reservoir by empirical approach and 3D numerical simulation. *Engineering Geology*, 249, pp.112-128.
10. Fritz, H.M., Hager, W.H. and Minor, H.E., 2003. Landslide generated impulse waves. *Experiments in Fluids*, 35, pp.505-519.
11. Fritz, H.M., Hager, W.H. and Minor, H.E., 2004. Near field characteristics of landslide generated impulse waves. *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering*, 130(6), pp.287-302.
12. Fawu WF, Peng X, Zhang Y, Huo Z, Takeuchi A, Araiba K, Wang G (2006) Landslides and slope deformation caused by water impoundment in the Three Gorges Reservoir, China. The 10th IAEG International Congress, Nottingham, 137:1-13 (in United Kingdom).
13. Fritz, H.M., Mohammed, F. and Yoo, J., 2009. Lituya Bay landslide impact generated mega-tsunami 50 th Anniversary. *Tsunami Science Four Years after the 2004 Indian Ocean Tsunami: Part II: Observation and Data Analysis*, pp.153-175.
14. Heinrich, P., 1992. Nonlinear water waves generated by submarine and aerial landslides. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 118(3), pp.249-266.
15. Hermanns, R. L., L'Heureux, J. S., & Blikra, L. H. 2013. Landslide triggered tsunami, displacement wave. *Encyclopedia of natural hazards*, 611-615.
16. Huang, B., Wang, S. C., & Zhao, Y. B. 2017. Impulse waves in reservoirs generated by landslides into shallow water. *Coastal Engineering*, 123, 52-61.
17. Heller, V., Hager, W. H., & Minor, H. E. (2009). Landslide generated impulse waves in reservoirs: Basics and computation. *VAW-Mitteilungen*, 211.
18. Huang, T., Zhang, H., & Shi, Y. 2022. Numerical simulation of landslide-generated tsunamis in lakes: A case

- study of the Xiluodu Reservoir. *Science China Earth Sciences*, 1-15.
19. Kamphuis JW, Bowering RJ. 1970. Impulse waves generated by landslides, 12th International Conference on Coastal Engineering, Washington, D.C. (in United States).
 20. Kaczmarek, H., Tyszkowski, S., & Banach, M. 2015. Landslide development at the shores of a dam reservoir (Włocławek, Poland), based on 40 years of research. *Environmental Earth Sciences*, 74, 4247-4259.
 21. Kafle, J., Dangol, B. R., Tiwari, C. N., & Kattel, P. 2023. Dynamics of landslide-generated tsunamis and their dependence on the particle concentration of initial release mass. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 97, 146-161.
 22. Karahan, M., Ersoy, H., & Akgun, A. 2020. A 3D numerical simulation-based methodology for assessment of landslide-generated impulse waves: a case study of the Tersun Dam reservoir (NE Turkey). *Landslides*, 17, 2777-2794.
 23. Lotfi, E., Safarzadeh, A. and Habibzadeh, H. 2013. Using Moving Object for investigation of various parameter in landslide impact waves. 1th national conference of geotechnics. [In Persian].
 24. Mokhtarzadeh, G., Basirat, S., Bazargan, J., & Delavari, E. (2022). Impulse wave generation: a comparison of landslides of block and granular masses by coupled Lagrangian tracking using VOF over a set mesh. *Water Supply*, 22(1), 510-526.
 25. Panizzo, A., De Girolamo, P., Di Risio, M., Maistri, A., & Petaccia, A. (2005). Great landslide events in Italian artificial reservoirs. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5(5), 733-740.
 26. Rose, N. D., & Hungr, O. (2007). Forecasting potential rock slope failure in open pit mines using the inverse-velocity method. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44(2), 308-320.
 27. Zweifel, A. (2004). *Impulswellen: Effekte der Rutschdichte und der Wassertiefe* (Doctoral dissertation, ETH Zurich).
 28. Zhang, T., Yan, E., Cheng, J., & Zheng, Y. (2010). Mechanism of reservoir water in

the deformation of Hefeng landslide. *Journal of Earth Science*, 21(6), 870-875.