


Three-Dimensional Numerical Simulation of Landslide-Induced Waves in Dams' Reservoirs (Case Study: Siyah Bishe Dam)

Meysam Fazeli ^{1*}, Moin Asgari ²

1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University Science and Research Branch, Tehran, Iran.

2- Graduated MSc, Department of Civil Engineering, University of Science and Culture, Tehran, Iran.

* m.fazeli@srbiau.ac.ir

Received: 14 December 2019, Accepted: 23 September 2020  J. Hydraul. Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: Large landslides can cause overtopping and consequently demolish the dams and other substructures and facilities. The landslide stabilization is very costly due to their large size and considerable extent. Hence, proper estimation of the wave height caused by sliding into the reservoirs to determine the risk of overtop is inevitable. In this study, 3D simulation of the SM5 sliding landslide into the upper reservoir of the Siyah Bisheh is conducted to calculate the height of the waves generated by this phenomenon.

Methodology: For landslide modeling, the assumption of rigid mass is assumed and mass motion is considered as a combination of translational and rotational motion. Firstly, Heinrich's (1992) laboratory model was used to evaluate the performance of the Flow-3D numerical model (calibration and validation). For this purpose, the sliding mass was introduced into the reservoir by prescribed motion and the changes in water level at different points were compared with the experimental results. The results showed that there is an appropriate agreement between the experimental and numerical results. The purpose of this comparison was to evaluate the accuracy of the software used to estimate the water level. Although in some cases, the trend of changes in water level is significantly different from laboratory results, the maximum level obtained in numerical model is in relevant agreement with laboratory results. In the numerical simulation of the mass movement in the Siyah-Bisheh Dam, the mass range and the shape of the slide circle are firstly determined. The mass has a volume about 425,000 cubic meters and is about 100 meters long. The slide radius is estimated to be 200 meters. About 250,000 cubic meters of this mass lies beneath the reservoir water level, which 150,000 cubic meters moves during landslide. In this case, the center of mass moved 20 meters downwards and can generate a velocity between 1 to 10 meters per second. For the modeling of motion, different scenarios are considered based on the mass movement velocity. Due to the low width of the river at the mass location (about 60 m), the mass movement is limited at this distance so all masses cannot enter to reservoir. Topography of reservoirs with 1/ 2000 scale were used to model reservoir and SM5 mass. Because of the narrow width of the valley, the mass hits the opposite wall and stops. As mentioned before, mass movement is considered a set of rotations and translations. The main reason to use this type of movement is the lack of ability to consider mass deformation. In the terms of mesh size, meshes of 5 and 10 m in plan and 1 and 2 m in height are used. The results of convergence test show that there is no

significant difference between the meshes of 5 m in the plan and 2 m in the depth and finer one. Different scenarios with various velocity of mass (velocity of 1, 3, 6 and 10 m/s) are considered for the simulation process. The mass is assumed to have reached maximum speed in a short time and stopped shortly at the end of the opposite wall. Results are presented for the 5 specified points in the reservoir with an appropriate distribution on its surface.

Results and discussion: The results are presented for 90 seconds after the mass enters the reservoir and it has been attempted to take into account the impact of the distance and time when the peak occurred. The wave height near the mass reaches to 10 meters where the mass has 10 meters per second and reaches to around 3 meters as it departs from the entry point. The maximum wave height near the dam site has been obtained around 2.5 m. According to the laboratory results, the wave caused by the landslide moves in the direction of mass entry into the reservoir. The mass direction is perpendicular to the river and parallel to the dam axis and it is expected that the generated wave will hit the opposite wall. The generated wave due to landslide collides to the opposite bank and dispersed. As a result, the height of the generated wave is reduced and therefore the possibility of overtopping falls dramatically. Based on the results, it can be said that the wave height will not exceed 2.5 m near the dam body. However, the maximum produced wave height in the reservoir exceeds 10 m at high velocities. At the end, the surface wave height due to landslide has been calculated using the issue number 53 of Iranian Commission on Large Dams (IRCOLD). In this calculation, the slide mass is estimated to be 150,000 cubic meters and the mass velocity is 13 m/s.

Conclusion: According to the empirical tables and relationships, the wave height is obtained at 400 and 800 m far from the dam body at 2.5 and 1 m, respectively. This value is compatible with the results obtained from the numerical model.

Keywords: Landslide, 3D Numerical modeling, Wave height, Overtopping, Siyah Bishe.



© 2021 Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.
This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)

(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

شبیه‌سازی عددی سه بعدی تولید امواج ناشی از زمین لغزش در مخازن سدها (مطالعه موردی سد سیاه پیشه)

میثم فاضلی^{۱*} و معین عسگری^۲

۱- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران

۲- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و فرهنگ، تهران، ایران

* m.fazeli@srbiau.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۲۳، پذیرش: ۱۳۹۹/۰۷/۰۲ و بگاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده: زمین لغزش‌های بزرگ می‌تواند باعث ایجاد روگذری و به تبع آن تخریب سدها و تاسیسات وابسته به آن شوند. هزینه پایدارسازی این توده‌ها به علت بزرگی و گستردگی آن بسیار بالا بوده بطوریکه تخمین مناسبی از ارتفاع امواج ناشی از لغزش این توده‌ها به منظور تعیین ریسک روگذری امری اجتناب ناپذیر است. در این تحقیق با استفاده از مدلسازی سه بعدی توده لغزنده به داخل مخزن سد بالای سیاه پیشه با استفاده از نرم افزار Flow-3D، ارتفاع امواج ایجاد شده ناشی از این پدیده بدست می‌آید. برای مدلسازی توده لغزشی فرض صلب بودن توده لحاظ شده و حرکت توده بصورت ترکیبی از حرکت انتقالی و دورانی در نظر گرفته شده است. با توجه به عرض کم رودخانه در محل توده (حدود ۶۰ متر)، حرکت توده در این فاصله محدود بوده بطوریکه تمام توده وارد آب نخواهد شد. در مقابل موج بوجود آمده ناشی از لغزش به علت برخورد با دیواره مقابل مستهلک می‌شود. بر اساس نتایج به دست آمده می‌توان گفت ارتفاع موج ایجاد شده، در نزدیکی بدنه سد از ۲/۵ متر تجاوز نخواهد کرد. این در حالی است که بیشترین ارتفاع موج تولیدشده در مخزن در سرعت‌های بالای توده از ۱۰ متر تجاوز می‌کند. با استفاده از نشریه ۵۳ کمیته ملی سدهای بزرگ ایران ارتفاع موج سطحی ناشی از لغزش توده محاسبه شده است. با توجه به جداول و روابط تجربی، ارتفاع موج در فاصله ۴۰۰ و ۸۰۰ متری از بدنه سد حدود ۲.۵ و ۱ متر بدست آمده است. این مقدار با نتایج بدست آمده از مدل عددی تطابق مناسبی دارد.

کلید واژگان: زمین لغزش، مدل‌سازی عددی سه بعدی، ارتفاع موج سطحی، روگذری، سد بالای سیاه پیشه.

۱- مقدمه

یا تحمیل آسیب و زیان بر تاسیسات مستقر در محل سد خواهد شد. مطرح بودن بحث قابلیت خطر لغزش توده به درون مخزن و در پی آن تشکیل موج و احتمال روگذری و در نهایت فرسایش و تخریب سد، ضرورت بررسی عامل های موثر بر ارتفاع موج ایجاد شده را آشکار می‌سازد. عواملی همچون سرعت لغزش توده، ابعاد توده، فاصله از محور اصلی سد، شرایط عوارض منطقه، عرض و عمق آب در مخزن و شیب دیواره می‌تواند بر روی ارتفاع موج ایجاد شده در مخزن بر اثر زمین لغزش موثر باشد. در بیشتر آیین نامه ها، محدوده ارائه شده برای ارتفاع موج ناشی از زمین لغزش بسیار گسترده است به طوری که اختلاف بیشترین و کمترین موج تولیدی می‌تواند تا ۵۰ درصد

زمین لغزش، حرکت یک توده خاک یا سنگ روی یک توده‌ی سست می‌باشد که این حجم عظیم مصالح باعث بوجود آمدن آسیب و زیان‌های عمده‌ای به منابع انسانی و طبیعی می‌شوند. زمین لغزش در مخزن های سد ها با توجه به عامل ها و شرایط دخیل، موجب تولید امواج با ارتفاع های مختلف خواهد شد. روگذری در سدهای خاکی و سنگریزه ای می‌تواند موجب فرسایش و یا تخریب جزئی و کلی سد، در شرایط بارگذاری بیش از حد شود. این روگذری موجب تاثیر روی پایین دست سد شده و با آسیب و زیان های جانی و مالی بسیاری همراه خواهد بود. در سد های بتنی نیز، روگذری موجب از بین رفتن کارایی سد و

موجود دارد. موقعیت اولیه توده و ویژگی های فیزیکی آن تأثیر به سزایی نیز روی ارتفاع موج تولیدی دارد.

(Ataei-Ashtiani and Najafi (2008) به شبیه سازی آزمایشگاهی امواج ضربه ای ناشی از رخداد لغزش دیواره درون مخزن سدها پرداختند. در این آزمایش ها چند فراسنجه (پارامتر) به عنوان متغیرهای مبنای آزمایش انتخاب شده و ویژگی های موج ضربه ای ایجاد شده در شرایط مختلف حاکم از حیث این فراسنجه ها بررسی شده است. بر مبنای نتایج آزمایش های انجام شده، الگوی کلی یکسانی برای موج ضربه ای در ناحیه ی شکل گیری در اثر حرکت زیرسطحی توده لغزشی تشخیص داده شده است. این بررسی نشان می دهد که تفاوت قابل ملاحظه ای بین ویژگی های مکانی موج ضربه ای ناشی از توده ی لغزشی صلب با ویژگی های موج همانند ناشی از توده لغزشی تغییر شکل پذیر با شکل اولیه یکسان دیده نمی شود.

(Lotfi et al. (2013) در تحقیقی به بررسی تأثیر فراسنجه های مختلف روی نوسان های سطح آب مخزن سدها بر اثر امواج ضربه ای ناشی از زمین لغزش، با استفاده از روش جسم متحرک پرداختند. در این تحقیق تأثیر فراسنجه های مختلف همچون شکل توده لغزشی، شیب بستر لغزشی و موقعیت توده بررسی شد. نتایج نشان می دهد که فراسنجه های مورد بررسی، بستگی قابل توجهی به شیب لغزش و موقعیت اولیه توده و بستگی اندکی به شکل توده لغزنده دارد.

(Hong-Zhou et al. (2017) به بررسی آزمایشگاهی امواج تولیدی در اثر زمین لغزش و زمین لرزه پرداختند. این مدل آزمایشگاهی از طریق لغزش یک بلوک از روی یک سطح شیب دار به درون آب ساخته شد و نتایج آن مشاهده شد. نتیجه ها نشان می دهد عامل های مؤثر بر ارتفاع موج تولیدی عبارتند از، عمق اولیه آب، شتاب لرزش زمین، سرعت لغزش توده به داخل آب و حجم توده لغزشی.

در این تحقیق با مدلسازی عددی یک زمین لغزش واقعی، ورودی به سد سیاه بیشه به بررسی فراسنجه های هندسی توده، فاصله از سد، شکل دره و پیش فرض (سناریو) های سرعت توده پرداخته شده است.

متغیر باشد. به همین دلیل در تحقیقات اخیر، مدلسازی عددی زمین لغزش در مخزن ها سدها مورد توجه قرار گرفته است. امروزه برای حل مسئله ها، مهندسان و محققان ناگزیر به حل معادله هایی هستند که اغلب دارای شکل دیفرانسیلی بوده و در واقع با حل این معادله ها دیفرانسیل مسئله تحلیل شده و به جواب مورد نظر دست می یابند. اما چون شمار محدودی از این معادله ها را می توان به صورت تحلیلی حل کرد، لذا روش های دیگری با عنوان روش های عددی توسعه یافته اند. همه ی این روش ها هر یک در پی دیگری آمده و دو هدف اصلی را دنبال می کنند. این هدف ها عبارتند از: ایجاد کارایی، دقت و سرعت بالاتر و نیز ایجاد امکاناتی جدیدتر برای حل مسئله ها و رفع نارسایی های احتمالی روش های پیشین. در زمینه امواج ناشی از زمین لغزش، بررسی و ارزیابی عددی و آزمایشگاهی بسیاری صورت پذیرفته است.

(Heinrich (1992) به مدلسازی عددی و آزمایشگاهی و بررسی امواج غیرخطی تولید شده در اثر لغزش توده به درون آب در دو حالت لغزش زیرسطحی یا مستغرق و لغزش سطحی پرداخت. با تحلیل نتایج بدست آمده از این آزمایش بیشترین ارتفاع موج تولیدی در اثر لغزش توده به داخل مخزن را در دو حالت مستغرق و لغزش سطحی بررسی شد.

(Fritz et al. (2003) در تحقیقی با استفاده از مدل دوبعدی آزمایشگاهی، به مدلسازی امواج ناشی از لغزش توده به درون آب پرداخته اند. توده لغزنده از نوع دانه ای در نظر گرفته شده است. در این مدل از سرعت سنج های تصویری (PIV-Particle induced velocitometry) و دستگاه های تجزیه تصویر برای جداسازی توده از سیال استفاده شده است. نتایج این تحقیق نشان می دهد سرعت در محل برخورد توده با آب بسیار بالا بوده و ارتفاع موج تولیدی وابستگی بالایی به حجم توده لغزنده به درون مخزن دارد.

(Qecedo et al. (2004) به شبیه سازی امواج ضربه ای ناشی از زمین لغزش های سریع با استفاده از نرم افزارهای شبیه سازی هیدرولیکی پرداختند. این مدلسازی روی آبراه ای (کانالی) با عنوان کانال گیلبرت انجام شد. نتایج به دست آمده همخوانی قابل قبولی با نتایج آزمایشگاهی

۲- مواد و روش‌ها

از آنجائی که مبنای این تحقیق شبیه سازی عددی حرکت توده لغزشی می باشد، لذا در آغاز معادله های حاکم بر حرکت سیال ارائه می شود. آنگاه مدل عددی مورد استفاده توسط نتایج آزمایشگاهی صحت سنجی می شود. در این تحقیق از مدل عددی Flow-3D استفاده شده است.

۲-۱- معادله های حاکم

به منظور حل میدان جریان در هر یک از نرم افزارهای تجاری نیاز به آشنایی با معادله های حاکم می باشد. قوانین حاکم بر جریان سیال عبارت اند از قانون بقای جرم و اندازه حرکت که در حالت جریان آشفته و به صورت متوسط گیری زمانی ارائه شده اند. در نتیجه، معادله های ناویر- استوکس متوسط گیری شده رینولدز (معروف به معادله RANS) به شکل معادله ی (۱) استخراج می شود.

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial(p)}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] + \frac{\partial(-\rho \overline{u_i' u_j'})}{\partial x_j} \quad (1)$$

که در این رابطه، $\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t}$ نرخ تغییرپذیری چگالی سیال در صورتی که جریان تراکم پذیر و ناپایدار باشد، $\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j}$ ترم حرکتی معادله، $\frac{\partial(p)}{\partial x_i}$ گرادیان فشار و $\frac{\partial}{\partial x_j} \mu \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right]$ ترم اصطکاکی معادله که در آن μ ، میزان لزجت ناشی از جنس و نوع سیال است، می باشند.

در این بررسی به منظور شبیه سازی آشفتگی از مدل K-RNG بهره برده شد. در این مدل آشفتگی، میزان لزجت (ویسکوزیته) گردابه ای را به فراسنجه های K و ϵ بر مبنای معادله ی (۲) نسبت داده می شود:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{K^2}{\epsilon} \quad (2)$$

که در این رابطه C_μ یک ضریب ثابت می باشد که بطور معمول برابر ۰/۰۹ در نظر می گیرند. برای محاسبه ی فراسنجه های K و ϵ از معادله های زیر بهره برده می شود:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho u_j k_j = \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \epsilon_j + G + B - \rho \epsilon \quad (3)$$

$$\rho \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \rho u_j \epsilon_j = \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \epsilon_j + C_1 \frac{\epsilon}{k} G + C_1 (1 - C_3) \frac{\epsilon}{k} B - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} - \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \eta/\eta_0) \epsilon^2}{1 + \beta \eta^3} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (4)$$

که در آن:

$$\eta = \sqrt{C_\mu^{-1} \frac{G}{\rho \epsilon}} \quad (5)$$

$$G = -\rho \overline{u_i' u_j' u_{i,j}} \quad (6)$$

$$B = \rho \overline{u_i' g_i} \quad (7)$$

هریک از فراسنجه های به کار رفته در این معادله ها در قالب نشانه ها و نمادهای اختصاری ارائه شده است. لازم به یادآوری است که پارامترهای C_1 ، C_2 ، C_3 و β ثابت های معادله ها می باشند.

۲-۳- صحت سنجی مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی

در این تحقیق به منظور واسنجی (کالیبراسیون) از مدل آزمایشگاهی معروف Heinrich(1992) استفاده می شود. آزمایش ها در آبراهه ای به طول ۲۰ متر، عرض ۵۵ سانتی متر و عمق ۱/۵ متر انجام شده است. در این مدل موجی از طریق لغزش یک توده به صورت یک نیم باکس به اندازه ۵۰ در ۵۰ سانتی متر روی یک سطح شیب دار ۴۵ درجه به داخل مخزن شکل می گیرد. عرض توده لغزنده نیز برابر عرض آبراهه در نظر گرفته شده است. حرکت توده نیز پس از رسیدن به انتهای سطح شیب دار نیز به وسیله یک بازدارنده (مانع) متوقف خواهد شد. در شکل ۱، مقطعی از آزمایش Heinrich(1992) نشان داده شده است.

در مدلسازی عددی انجام گرفته در این آزمایش نیز دو حالت کلی در نظر گرفته شده است. حالت مستغرق و حالت لغزش سطحی. در حالت مستغرق عمق آب برابر ۱ متر بوده و نیم باکس لغزنده در عمق یک سانتی متر پایین تر از سطح آب قرار دارد. در حالت لغزش سطحی نیز عمق برابر ۰/۴ متر در نظر گرفته شده و پایین ترین نقطه نیم

حالت لغزش سطحی در زمان ۱ ثانیه می باشد. نتایج نشان از همخوانی بالای ۹۰ درصد (ضریب رگرسیون) بین نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی دارد.

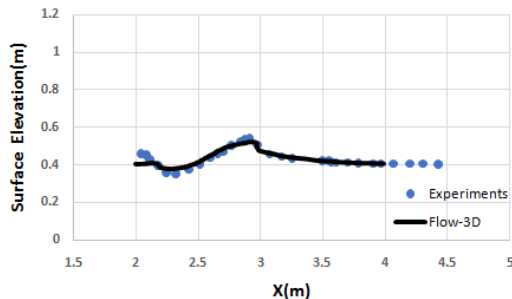


Fig. 3 Comparison between experimental and Numerical (Flow-3D) in the case of aerial land slid at 1.0 sec
شکل ۳ مقایسه رخ نمای سطح آب در حالت لغزش سطحی در زمان ۱.۰ ثانیه

در ادامه به بررسی و مقایسه رخ نمای سطح آب در نقطه های مشخص در میدان مورد بررسی با زمان پرداخته شد. شکل ۴ نشان دهنده مقایسه رخ نمای سطح آب در حالت لغزش مستغرق در نقطه با فاصله ۴ متر از ابتدای آبراهه می باشد.

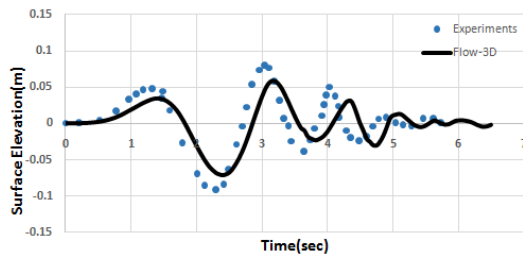


Fig. 4 Comparison between experimental and Numerical (Flow-3D) in the case of submerged land slid versus time 4 meters along channel

شکل ۴ مقایسه رخ نمای سطح آب برای نقطه ۴ متر در حالت لغزش مستغرق

شکل ۵ نیز مقایسه پروفیل سطح آب را در حالت لغزش سطحی برای نقطه مشخص ۴ متر به تصویر می کشد. مقایسه نتایج مدل سازی عددی با نتایج استخراج شده در شرایط آزمایشگاهی بیانگر دقت و همخوانی مناسب مدل عددی با نتایج فیزیکی است. هدف از این قسمت مدل سازی حرکت توده به تغییر مکان پیش فرض (prescribed

باکس لغزنده روی سطح آب قرار دارد. در مدل سازی از اندازه مش ۱ سانتی متر (بعد از آزمون همگرایی با مش های مختلف) استفاده شده است. در مدل سازی به منظور حذف عامل های ایجاد خطا از تغییر مکان پیش تعریف شده بلوک (prescribed displacement) استفاده شده است. علت این موضوع در دسترس نبودن اطلاعات دقیق از سطح تماس بلوک لغزنده و سطح شیب دار می باشد. حرکت توده نیز از نقطه اولیه با سرعت صفر آغاز شده و سرعت بلوک به صورت ورودی به برنامه وارد شده است.

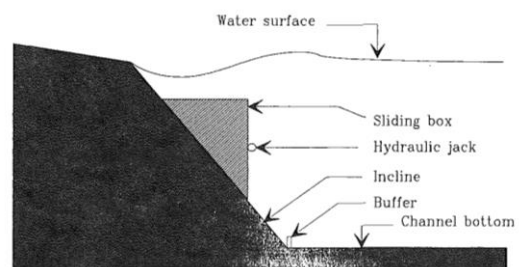


Fig. 1 Experimental Field used in modeling Heinrich(1992)

شکل ۱ میدان آزمایش مورد استفاده در مدل سازی Heinrich(1992)

شکل ۲ نشان دهنده مقایسه رخ نمای (پروفیل) سطح آب میان نتایج به دست آمده از مدل سازی عددی و آزمایشگاهی در زمان ۰/۵ ثانیه می باشد. نتایج نشان از همخوانی بالای ۸۵ درصد (ضریب رگرسیون) بین نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی دارد.

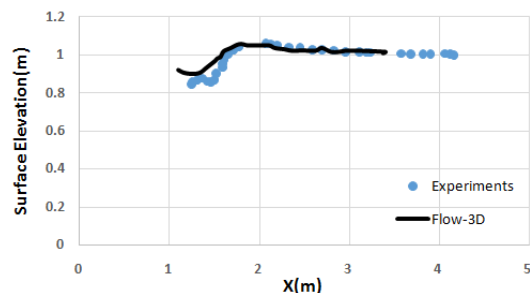


Fig. 2 Comparison between experimental and Numerical (Flow-3D) in the case of submerged land slid at 0.5 sec
شکل ۲ مقایسه رخ نمای سطح آب در حالت لغزش مستغرق در زمان ۰/۵ ثانیه

شکل ۳ نیز نشان دهنده مقایسه رخ نمای سطح آب میان نتایج به دست آمده از مدل سازی عددی و آزمایشگاهی در

در راستای محوری ثابت در جهت شیب دیواره‌ی لغزش در نظر گرفته شده است. در شکل ۸ و ۹، حرکت انتقالی و دورانی توده لغزشی نشان داده شده است.

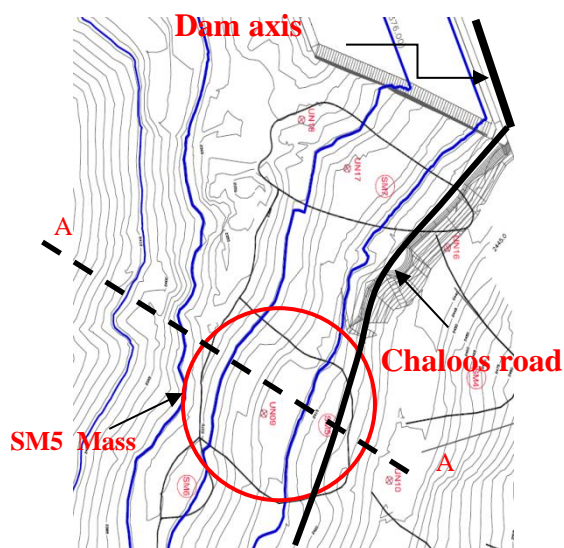


Fig. 6 Main landslide in siyah bishe dam reservoir
 شکل ۶ زمین لغزش‌های اصلی محدوده مخزن سد بالای سیاه بیشه در پلان

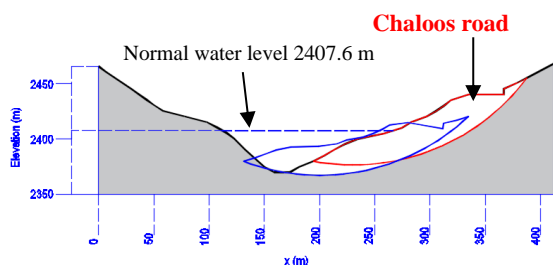


Fig. 7 Initial position on landslide (red line) and the final position of landslide (blue line) across A-A section in Fig. 6.

شکل ۷ موقعیت اولیه قرارگیری توده درون آب. رنگ مشکی شکل دره، رنگ قرمز محل اولیه توده و رنگ آبی قابلیت حرکتی توده در طول مقطع A-A در شکل ۶

طول شعاع دایره‌ی گسیختگی به تقریب برابر ۲۰۰ متر می‌باشد. پیش فرض‌های مختلف این تحقیق با تغییر سرعت لغزش توده شکل می‌گیرد. سرعت حرکت توده لغزنده به درون آب از سرعت صفر آغاز شده، پس از گذشت ۲ ثانیه به یک میزان بیشینه رسیده و سپس با رسیدن به انتهای بستر لغزش، پس از ۱ ثانیه متوقف می‌شود. حرکت توده بر مبنای بیشینه سرعت‌های مختلفی

(displacement) به منظور بررسی روند تغییرپذیری سطح آب می‌باشد. از آنجایی که مدل‌سازی صورت گرفته ارتفاع آب و روند افزایش تراز آب را با دقت مناسبی مدل‌سازی می‌کند لذا می‌توان از این نوع مدل‌سازی در شبیه‌سازی حرکت توده در مقیاس بزرگ نیز استفاده کرد.

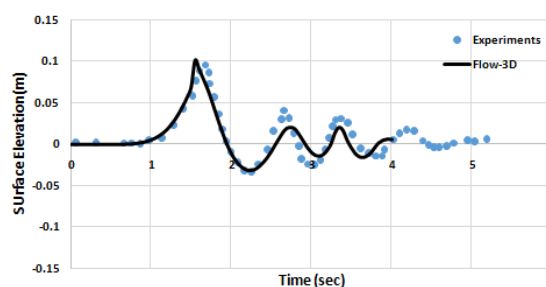


Fig. 5 Comparison between experimental and Numerical (Flow-3D) in the case of aerial land slid versus time 4 meters along channel

شکل ۵ مقایسه رخ نمای سطح آب برای نقطه ۴ متر در حالت لغزش سطحی

۳- شبیه‌سازی حرکت توده SM5 در مخزن سد بالای سیاه بیشه

سد سیاه‌بیشه از دو سد بالا و پایین سنگریزه‌ای با رویه بتنی (CFRD) تشکیل یافته است. سد بالا با ارتفاع ۸۶/۵ متر و طول تاج سد ۴۳۶ متر روی رودخانه کندوان احداث شده است و حجم مفید مخزن آن معادل ۳/۶۶ میلیون مترمکعب می‌باشد (IWPCO). توده لغزشی SM5 در محدوده مخزن سد بالا و در محدوده دو زمین لغزش بزرگ خاکک و دونا قرار گرفته است. حجم این توده نیز در حدود ۴۲۵۰۰۰ مترمکعب برآورد شده است که ۱۵۰۰۰۰ متر مکعب آن طی لغزش وارد مخزن می‌شود. شکل ۶ نشان دهنده موقعیت توده در مخزن سد بالا می‌باشد. در شکل ۷ موقعیت اولیه توده درون آب در مقطع عرضی نشان داده شده است.

در این تحقیق توده به صورت صلب در نظر گرفته شده است. در جهت افزایش دقت در مدل‌سازی و همچنین شباهت بیشتر این توده به واقعیت، حرکت توده لغزشی به درون مخزن به صورت ترکیبی از حرکت دورانی حول محوری که گوه گسیختگی توده را تشکیل داده و حرکت

مدلسازی توده به صورت صلب و یکپارچه در نظر گرفته شده است. پس به منظور همخوانی هرچه بیشتر مدل با واقعیت، در انتهای حرکت نیز توقف ۱ ثانیه (فرض در نظر گرفتن برخورد صلب) به طول خواهد انجامید.

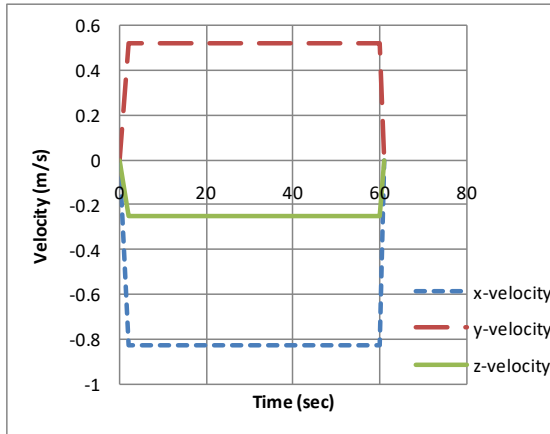


Fig. 10 Time variation of landslide velocity in 3 orientations for 1 m/s velocity

شکل ۱۰ نمودار تغییرپذیری سرعت در سه جهت برای پیش فرض سرعت ۱ متر بر ثانیه

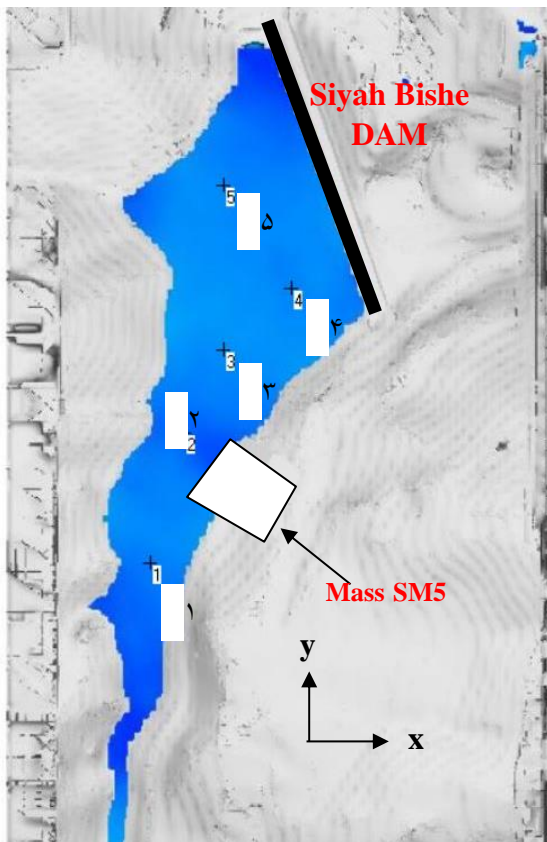


Fig. 11 The pre-defined point for getting output data of free surface elevation

شکل ۱۱ موقعیت قرارگیری نقطه های مفروض های استخراج داده های تراز سطح آب

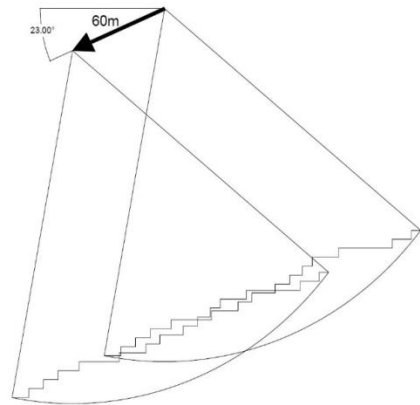


Fig. 8 Longitudinal translation of landslide.

شکل ۸ حرکت محوری توده در راستای محور لغزش آن

که برای توده در نظر گرفته می شود (جدول ۱) شکل گرفته و رخ نمای سطح آب در مخزن برای پنج نقطه مختلف در مخزن (شکل ۱۱) محاسبه می شود.

مهم ترین متغیر قابل تغییر در این تحقیق، سرعت لغزش توده به درون مخزن می باشد که نتایج مدلسازی برای سه حالت سرعت لغزش آهسته، سریع و بسیار سریع، که محدوده های هر یک در جدول ۱ مشخص شده است بررسی می شود. در شکل ۱۰ نمونه ای از سرعت حرکت توده با سرعت بیشینه ۱ متر بر ثانیه نشان داده شده است. در واقعیت حرکت توده ترکیبی از حرکت لغزشی و دورانی می باشد. لذا در این تحقیق جابه جایی مرکز جرم توده در سه راستای x ، y و z محاسبه شده است و سرعت آن به عنوان ورودی به برنامه وارد شده است.

جدول ۱ شاخص های سرعت لغزش توده به درون مخزن

Table 1 The index for landslide velocity into reservoir

Speed limitation	Landslide velocity Index
1 m/s	Slow
3 m/s	Medium
6 m/s	Fast
10 m/s	Very Fast

همان طور که پیشتر اشاره شد در آغاز ۲ ثانیه طول می کشد تا سرعت لغزش از صفر به بیشینه میزان خود برسد. در شکل ۱۰ نیز پس از تجزیه بیشینه سرعت به سرعت هایی در راستای محورهای x ، y و z میزان حداکثر سرعت ها در این راستاها به دست آمده است. نکته قابل توجه دیگر اینکه به رغم دلنهای بودن توده در واقعیت، در

لغزش توده به درون آب، ارتفاع سطح آزاد آب نیز افزایش می‌یابد.

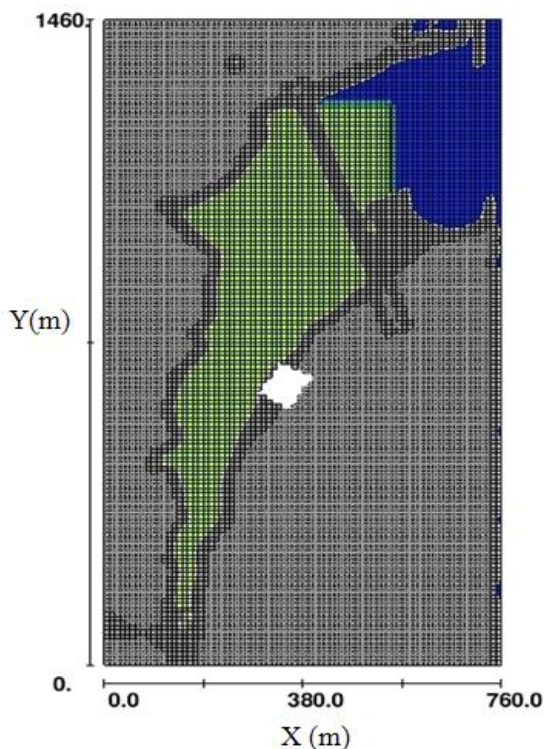


Fig. 12 Mesh configuration of dam reservoir with the landslide position

شکل ۱۲ مش بندی مخزن سد سیاه بیشه بالا با ابعاد ۱۰ متر در پلان و ۲ متر در عمق

با توجه به شکل های ارائه شده، بیشترین تغییر مکان در سطح آب به نقطه نزدیک به توده (نقطه ۲) مربوط می شود که برای پیش فرض سرعت ۱۰ متر بر ثانیه تا حدود ۱۰ متر (تراز ۲۴۱۷.۴ متر) افزایش تراز را نشان می دهد. با فاصله گرفتن از محل توده میزان اوج سطح آب کاهش می‌یابد به طوری که در نقطه های نزدیک به بدنه سد (نقطه های ۴ و ۵) بیشینه موج تولیدی به سه متر می رسد. نکته مهم در این قسمت تاثیر شکل دره در شکل گیری موج با ارتفاع بالا است. به دلیل عرض کم دره در محل لغزش توده، پس از شکل گیری، امواج به سرعت با دیوار روبه روی دره برخورد کرده و خود باعث هدر رفت انرژی و ایجاد آشفتگی و به سبب آن کاهش ارتفاع موج تولیدی ناشی از لغزش توده خواهد شد. همین مسئله موجب کاهش خطر ناشی از روگذری امواج در نزدیکی محور سد

چگونگی مش بندی مخزن سد نیز در شکل ۱۲ نشان داده شده است. با توجه به گستره مدل سازی که کل مخزن سد سیاه بیشه می باشد، اندازه شبکه دارای اهمیت به سزایی می باشد. لذا در این مدل سازی دو شبکه ۲ و ۵ متری در پلان و دو متری در عمق برای مدل سازی در نظر گرفته شده و نظر به نزدیکی نتایج دو حالت از شبکه ۵ متری برای مدل سازی استفاده شده است.

در زمینه شرایط مرزی مسئله، مرزهای پیرامون در مش بندی دیواره (wall) در نظر گرفته شده است. با توجه به شکل ۱۲ مش بندی به گونه ای انتخاب شده که فاصله قابل توجهی با مخزن سد داشته باشد. ویژگی های کف مخزن سد در نقشه عوارض خوانده شده و به صورت ورودی topo به مدل وارد شده است. در عمل مخزن سد در محدوده کف مخزن و دیواره های آن محصور شده و نیز آبی به درون مخزن وارد یا خارج نمی شود. با توجه به استفاده از مدل Flow-3D شرط مرزی سطح آزاد فشار صفر در نظر گرفته شده است. نکته مهم مدل سازی حرکت توده است که این حرکت توسط مدل moving object در حرکت صلب توده این نرم افزار مدل می شود. شرط مرزی بین توده متحرک و محیط سیال، شرط مرزی سرعت است به طوری که سرعت سیال عمود بر جسم جامد با سرعت مرز جامد برابر است.

۴- نتایج

در این قسمت نتایج مدل سازی ارائه می شود. برای مدل سازی پیش فرض های سرعت های مختلف ۱، ۳، ۶ و ۱۰ متر بر ثانیه به عنوان سرعت حدی توده در نظر گرفته شده و برابر شکل ۱۰، تغییر پذیری زمانی سرعت محاسبه شده است. حرکت دورانی و انتقالی توده با پیش فرض های بالا مدل سازی شده و تغییر پذیری زمانی تراز سطح آب برای ۵ نقطه شکل ۱۱ در شکل های ۱۳ الی ۱۷ (در این شکل ها محور قائم تراز سطح آب بوده و واحد آن متر می باشد) نشان داده شده است. تراز اولیه مخزن در تراز نرمال ۲۴۰۷/۶ متر (شکل ۷) می باشد و در طی ورود توده به درون مخزن این تراز به فراخور ارتفاع موج تولیدی بالا می‌رود. همان طور که انتظار می‌رود، با افزایش سرعت

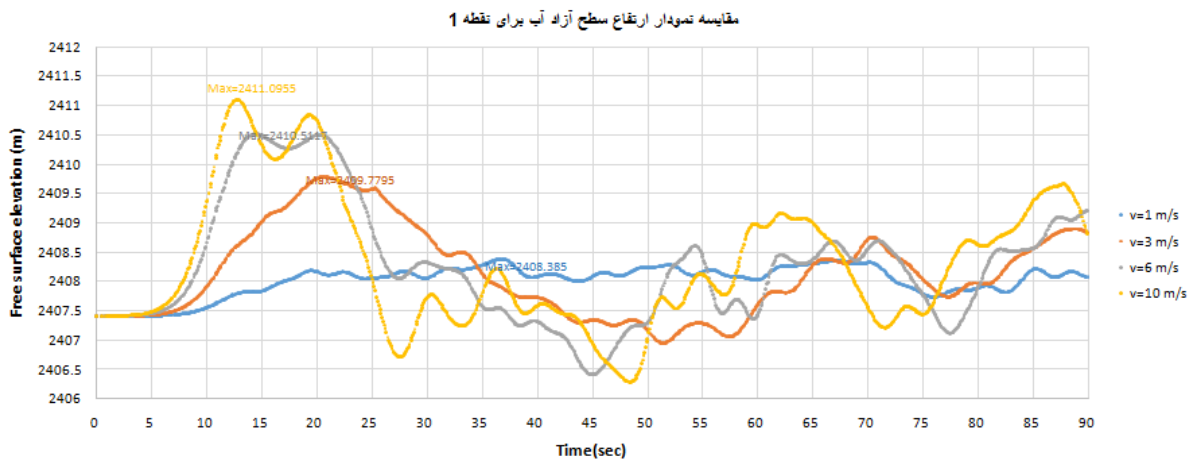


Fig.13 Time variation of water surface level for point 1 in various landslide velocities
 شکل ۱۳ نمودار مقایسه تراز سطح آزاد آب (متر) به ازای سرعت‌های مختلف در نقطه ۱

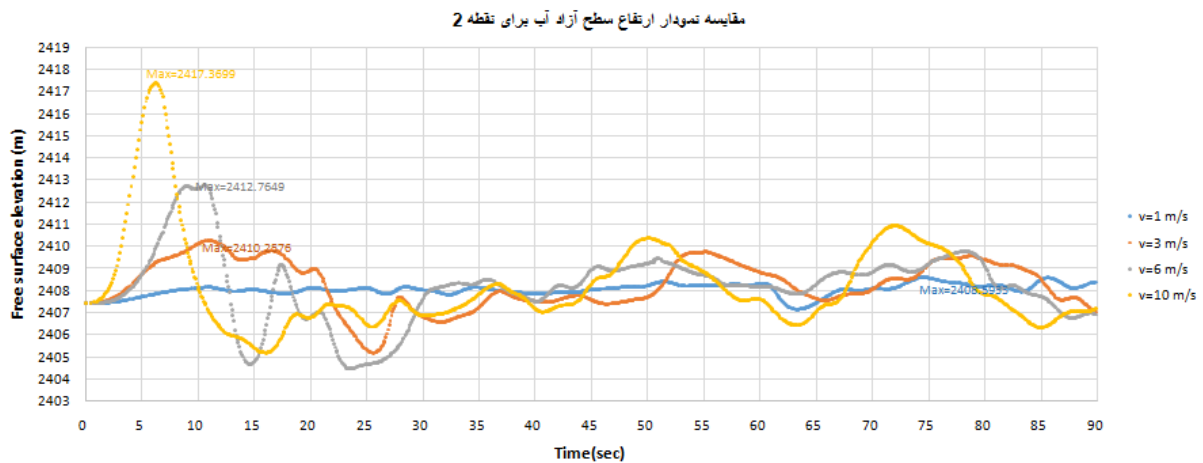


Fig.14 Time variation of water surface level for point 2 in various landslide velocities
 شکل ۱۴ نمودار مقایسه تراز سطح آزاد آب (متر) به ازای سرعت‌های مختلف در نقطه ۲

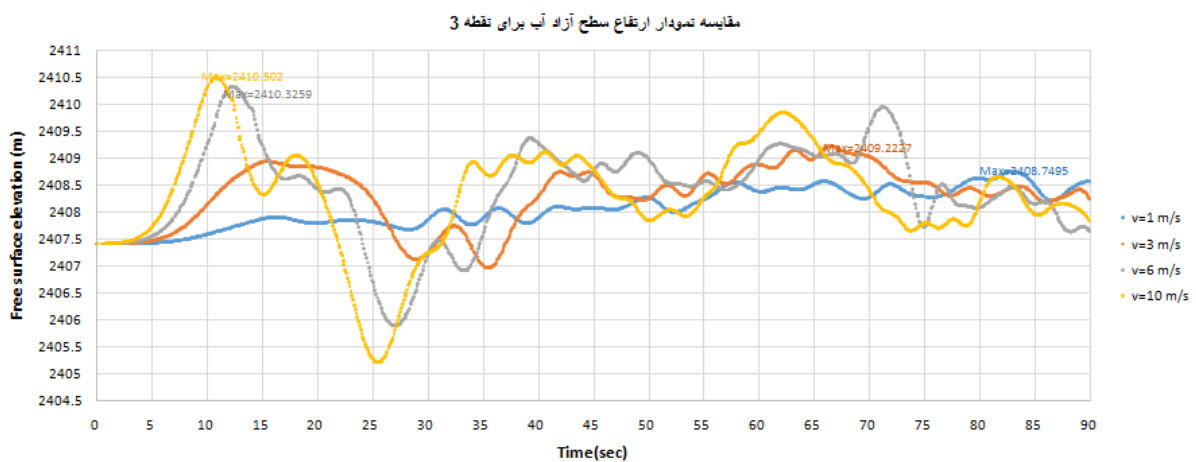


Fig.15 Time variation of water surface level for point 3 in various landslide velocities
 شکل ۱۵ نمودار مقایسه تراز سطح آزاد آب (متر) به ازای سرعت‌های مختلف در نقطه ۳

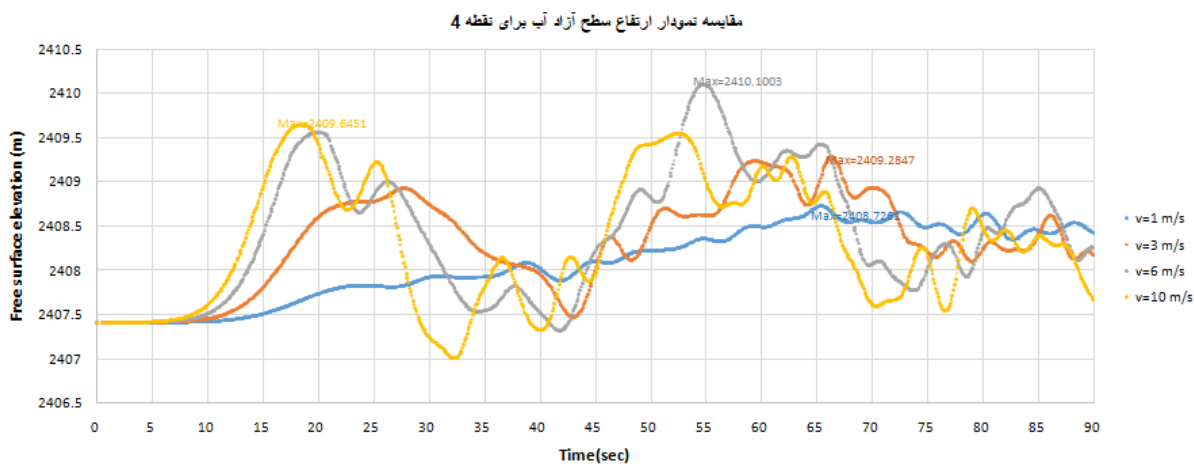


Fig.16 Time variation of water surface level for point 4 in various landslide velocities

شکل ۱۶ نمودار مقایسه تراز سطح آزاد آب (متر) به ازای سرعت‌های مختلف در نقطه ۴

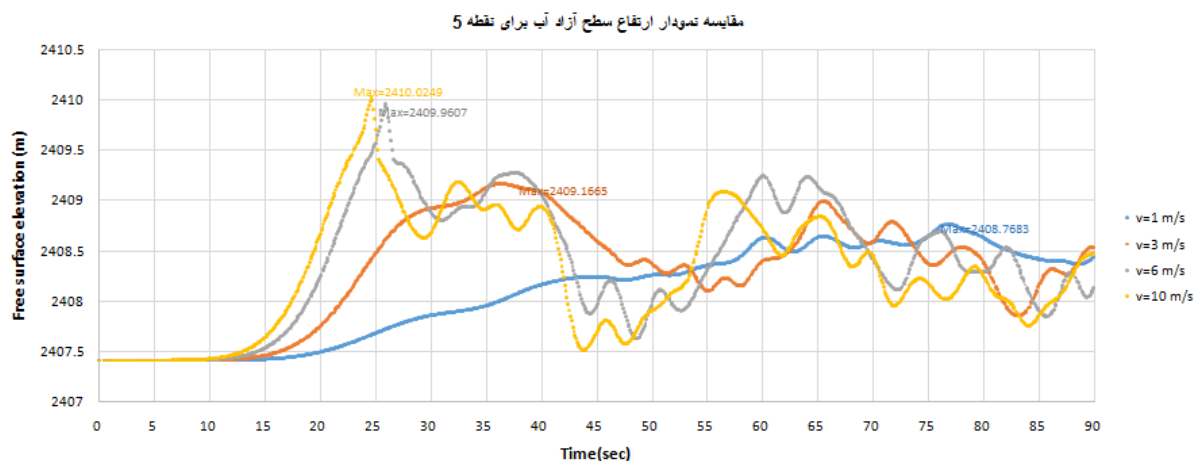
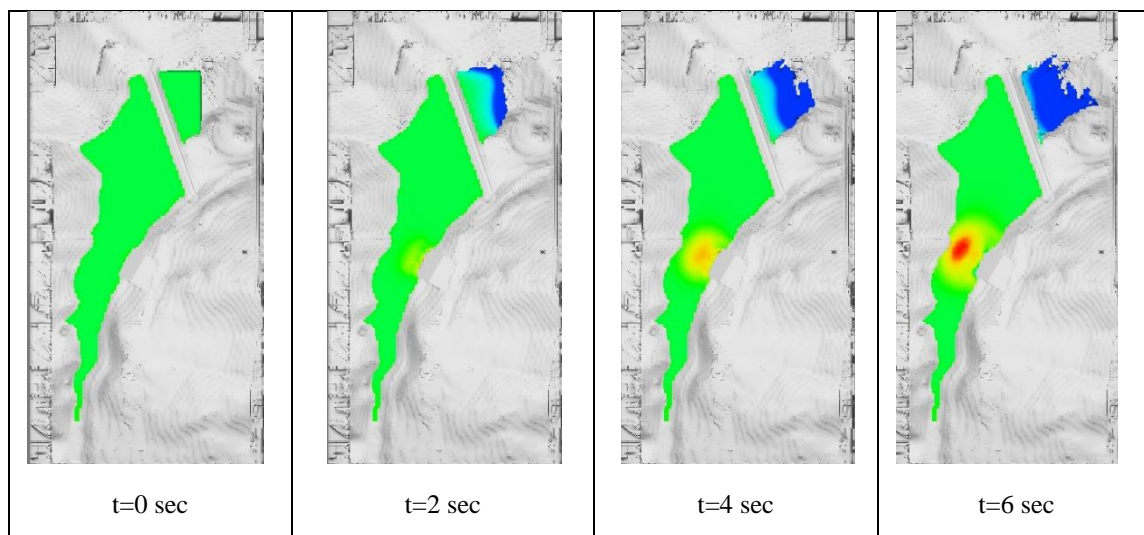


Fig.17 Time variation of water surface level for point 5 in various landslide velocities

شکل ۱۷ نمودار مقایسه تراز سطح آزاد آب (متر) به ازای سرعت‌های مختلف در نقطه ۵



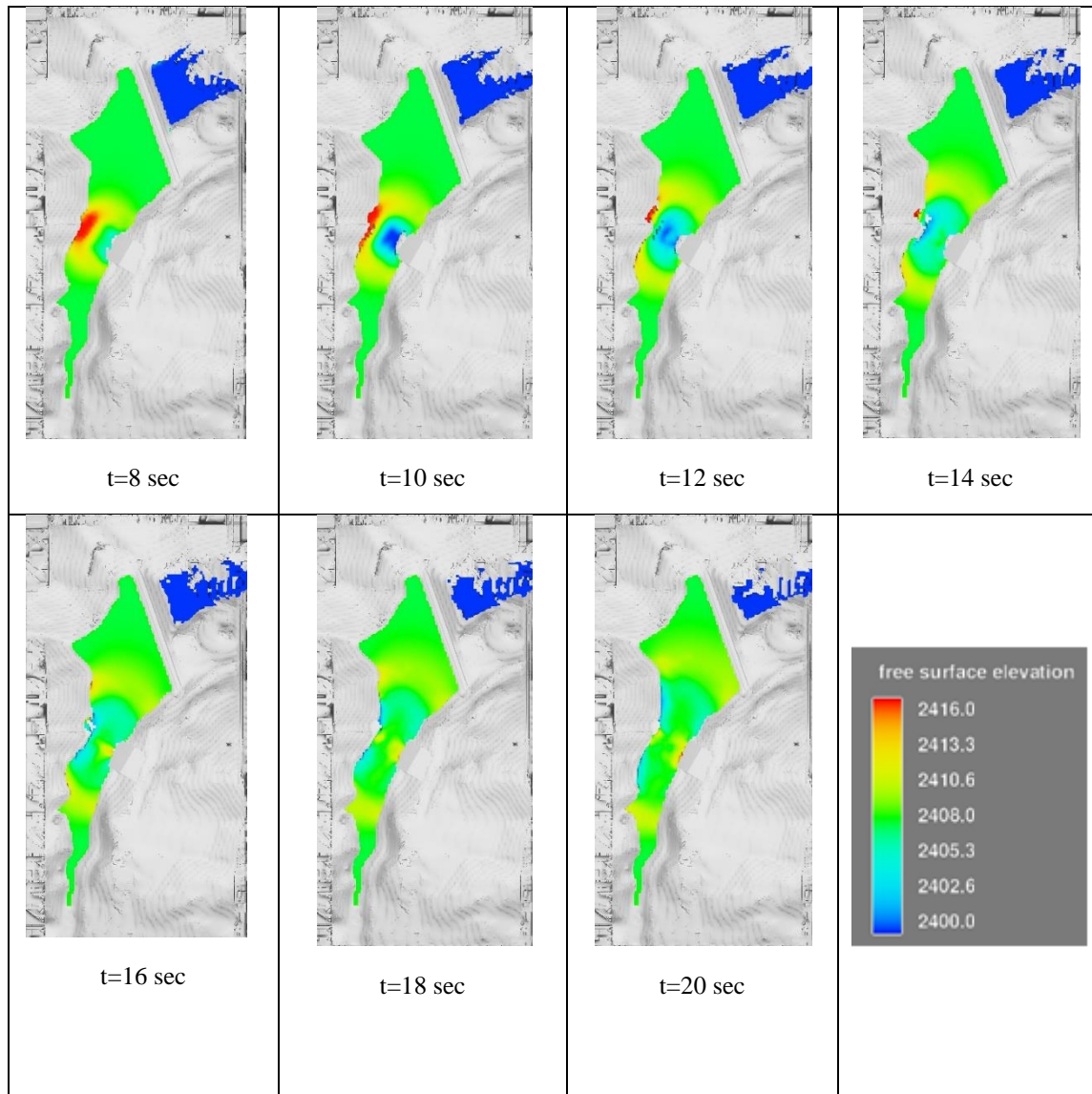


Fig. 18 Time variation of water surface level in dam reservoir plan landslide with 6 m/s velocities

شکل ۱۸ پلان پخش موج در مخزن پس از لغزش با سرعت ۶ متر بر ثانیه در زمان‌های مختلف

ترازهای نقطه‌های دور نمی‌گذارد. علت این موضوع شکست موج روی دیواره روبه‌رو می‌باشد. همچنین سرعت توده در حدود ۱ متر بر ثانیه تاثیر قابل توجهی در تراز سطح آب نمی‌گذارد. جدول ۲، بیشترین ارتفاع موج تولیدی به ازای سرعت‌های مختلف در نقطه‌های مختلف را نشان می‌دهد. در جدول زیر بیشترین ارتفاع موج بر حسب متر نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۱۸، چگونگی پخش موج تولیدی در مخزن در زمان‌های مختلف، مشخص است که بعد تولید موج ناشی از زمین لغزش، این موج تمایل به حرکت به سمت ساحل مقابل دارد. با برخورد به دیواره مقابل و حرکت

نیز می‌شود. در شکل ۱۸، تغییرپذیری سطح آب در پلان برای پیش فرض سرعت توده ۶ متر بر ثانیه برای زمان‌های مختلف ارائه شده است.

با توجه به شکل‌های ارائه شده (شکل‌های ۱۳ الی ۱۷) می‌توان نتیجه گرفت که تاثیر سرعت توده در نزدیکی توده (نقطه ۲) بسیار بیشتر از نقطه‌های دور از توده است به طوری که در نقطه‌های دور از توده نتایج تغییرپذیری سطح آب در سرعت ۶ متر بر ثانیه و سرعت ۱۰ متر بر ثانیه به هم نزدیک می‌شوند. این موضوع نشان می‌دهد که با افزایش سرعت بالای ۱۰ متر بر ثانیه تنها نقطه‌ای نزدیک به توده ترازهای بالاتر را تجربه کرده و تغییری در

جدول ۲ بیشترین ارتفاع موج تولیدی ناشی از لغزش توده SM5 به داخل مخزن

Table 2 Maximum wave generated in various scenarios

Mass velocity	10 m/s	6 m/s	3 m/s	1 m/s
Point-1	3.4955	2.9117	2.1795	0.785
Point-2	9.7699	5.1649	2.6576	0.9933
Point-3	2.902	2.7259	1.6227	1.1495
Point-4	2.0451	2.5003	1.6847	1.1261
Point-5	2.4249	2.3607	1.5665	1.1683

جدول ۳ میزان های a و b به ازای فراسنجه های مؤثر Table 3 a and b in equation (8) in landslide angle of 28

$\frac{x}{h}$	100	50	20	10	5
a	0.125	0.144	0.188	0.243	0.324
b	0.564	0.522	0.513	0.509	0.509

جدول ۴ میزان های ضریب کاهش P

Table 4 Decreasing coefficient of P

ϕ	F	$\frac{x}{h}$		
		5	10	20
30	1.06	0.43	0.23	0.13
	1.51	0.40	0.27	0.18
	1.84	0.53	0.38	0.29
45	1.06	0.32	0.22	0.15
	1.51	0.67	0.48	0.32
	1.84	0.77	0.50	0.33
60	1.06	0.26	0.23	0.20
	1.51	0.50	0.34	0.24
	1.84	0.67	0.50	0.36

برای محاسبه سرعت ضربه فرض می شود که ۵۰ درصد انرژی قابلیت لغزش به انرژی جنبشی تبدیل می شود و بقیه به صورت اصطکاک از بین می رود. بدین طریق سرعت حرکت توده حدود ۱۳ متر بر ثانیه برآورد می شود. میزان ضریب کاهش نیز به تقریب برابر ۰/۴۳ می باشد. همچنین عمق آب در محل توده برابر ۴۰ متر در نظر گرفته شده است. در جدول ۵ میزان ها ارتفاع موج نشان داده شده است.

جدول ۵ محاسبه ارتفاع امواج در فاصله های نسبی مختلف Table 5 Calculating wave height in various relative distance

$\frac{x}{h}$	$(\frac{H}{h})_{2D}$	P	$(\frac{H}{h})_{3D}$	H(m)
5	0.322	0.43	0.1384	6.228
10	0.242	0.23	0.0556	2.502
20	0.187	0.13	0.0243	1.093

با مقایسه نتایج مدلسازی عددی و رابطه تجربی نشریه

حرکت روبه بالا در شیب دیواره (Run up)، میزان قبل توجهی از انرژی موج میرا می شود. این مسئله در سرعت های بالای توده بیشتر به چشم می خورد. در شکل ۱۸، بعد از زمان حدود ۱۰ ثانیه موج برخوردی به دیوار میرا می شود. با توجه به شکل ۱۴ نیز تراز موج بعد از ۱۰ ثانیه دچار افت شدید می شود که نشان از اثر عرض دره در کاهش اثر زینبار موج زمین لغزش می باشد.

۵- برآورد ارتفاع موج با توجه به مطالب

نشریه ۵۳ کمیته ملی سدهای بزرگ

در نشریه شماره ۵۳ کمیته ملی سدهای بزرگ رابطه هایی جهت محاسبه ارتفاع موج ناشی از زمین لغزش در مخزن سدها ارائه شده است. یک قاعده توانی ساده، رابطه بین عدد جابه جایی و ارتفاع نسبی موج را نشان می دهد.

$$\frac{H_i}{h} = aM^b \quad (8)$$

که در این رابطه a و b بستگی به شیب صفحه لغزش (ϕ) و سرعت نسبی انتشار موج ($i = \frac{x}{h}$) دارد. در رابطه ها H: ارتفاع موج و h: ارتفاع آب در سد در محل توده لغزش، x: فاصله از توده لغزش و میزان M (عدد جابه جایی) نسبت حجم توده به عرض در ارتفاع آب در محل توده به توان دو می باشد. همچنین عدد فرود لغزش، F، نسبت سرعت توده لغزش به سرعت موج سطحی در محل توده لغزش می باشد. در جدول ۳ میزان های a و b به ازای شیب صفحه لغزش به تقریب برابر شیب لغزش توده SM5 (حدود ۲۸ درجه) و $\frac{x}{h}$ های مختلف ارائه شده است.

ارزیابی آزمایش ها منجر به پیشنهاد میزان های ضریب کاهش P برابر جدول ۴ شد، که با اعمال آن ارتفاع امواج دوعدی به امواج سه بعدی تبدیل می شود.

x	فاصله از توده لغزش
b و a	ثابت های تعیین ارتفاع موج سطحی
M	عدد جابه جایی
F	فرود لغزش
ϕ	زاویه سطح لغزش با افق درجه
ρ	جرم واحد حجم سیال
ε	نرخ اضمحلال انرژی

۵۳، می توان نتیجه گرفت که اگرچه سرعت حرکت توده ۱۳ متر بر ثانیه پیش بینی شده است با این حال ارتفاع موج پیش بینی شده در رابطه تجربی در فاصله ۴۰۰ تا ۸۰۰ متر از محل توده ۲.۵ تا ۱ متر است. مشکل رابطه تجربی این است که تغییرپذیری عمق آب درون مخزن و شکل دره و فاصله محل توده تا محور سد را در نظر نمی گیرد. با این حال نتایج به دست آمده همخوانی مشخصی با نتایج عددی دارد.

۶- منابع ها

Ataei-Ashtiani, B. and Najafi Jilani, A. (2008). Experimental simulation of landslide impulsive waves in dam reservoir. 4th national congress in civil engineering, Tehran University. (in Persian).

Ataie-Ashtiani. B. and Shobeyri, G. (2007). Numerical simulation of landslide impulsive waves by incompressible smoothed particle hydrodynamics. International Journal for Numerical Methods in Fluids. 56(2), 209-232.

Ataei-Ashtiani, B. and Yavari Ramshe, S. (2010). Simulation of landslide impact waves in Shafaroud reservoir. 8th national congress on civil engineering, Shiraz. IRAN. (in Persian).

Fritz, H. and Hager, W. (2003). Landslide generated impulse waves. Instantaneous flow fields. Experiments in Fluids. 35(6), 505-519.

Heinrich, P. (1992). Nonlinear water waves generated by submarine and aerial landslides. J. Waterway, Port, Coastal & Ocean Eng., 118, 249-266.

Hong-Zhou, A., Ling-kan, Y. and Yi-Liang Z. (2017). Laboratory investigations of earthquake and landslide induced composite surges. Journal of Mountain. 14(2), 1537-1549.

IRCOLD. (2015). Basics of Stability Evaluation of Landslide in Dams reservoir. Issue 53. (in Persian).

IWPCO. (2017). Stabilization Study on SM5 Landslide in Siyah Bishe Reservoir. Consultant reports.

IWPCO. (2015). Studies on Generation Energy Improvement of Siyah bishe pump storage Dam. Consultant reports. (in Persian).

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).

۶- نتیجه گیری

با توجه به بحث های مطرح شده در رابطه با پایداری توده لغزشی SM5 و بررسی های انجام شده، در این تحقیق افزون بر تجمیع بررسی پیشین در زمینه امواج ناشی از سقوط توده به درون آب و گزارش های مربوط به سد بالای سیاه بیشه، نسبت به محاسبه ی بیشترین ارتفاع موج تولیدی ناشی از لغزش توده SM5 به درون مخزن اقدام شده است. نتایج نشان می دهد بیشترین ارتفاع موج، در جهت لغزش توده شکل می گیرد و همچنین عرض کم دره ی مقابل توده SM5، خود باعث ایجاد آشفتگی و در نتیجه کاهش ارتفاع نهایی موج تولیدی خواهد شد. در جهت دستیابی به بهترین نتایج و نزدیک ترین آن ها به مدل واقعی، حرکت توده به درون آب به صورت ترکیبی از حرکت دورانی حول محوری که گوه گسیختگی توده را تشکیل داده و حرکت در راستای محوری ثابت در جهت شیب دیواره ی لغزش در نظر گرفته شد. نتایج نشان می دهد در نقطه های نزدیک بدنه سد، ارتفاع موج به بیش از ۲/۵ متر نخواهد رسید. این میزان تا حدودی برابر میزان محاسبه شده توسط روابط تجربی می باشد.

۷- فهرست نشانه ها

u_i	مولفه سرعت در جهت های مختلف
τ	تنش برشی
P	فشار
μ_t	لزجت گردابه ای
H_i	ارتفاع موج سطحی
h	عمق آب در محل توده

Quecedo, M., Pastor, M. and Herreros, M.I. (2004). Numerical modelling of impulse wave generated by fast landslides. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 59(12), 1633-1656.