

# شبیه سازی عددی امواج ضربه ای ناشی از زمین لغزش های دریاچه سد ماکو در ایران

سعیده یآوری رامشه<sup>۱</sup>؛ بهزاد عطائی آشتیانی<sup>۲</sup>؛ عطاء الله نجفی جیلانی

## چکیده

در این مقاله به مطالعه عددی تولید و انتشار امواج ضربه ای ناشی از زمین لغزش های محتمل در دیواره های مخزن سد ماکو، واقع در شمال غربی ایران، پرداخته می شود. بزرگی امواج ضربه ای حاصل، میزان بالاروی از خطوط کناره و حجم روگذری محتمل از بدنه، برای دو سناریوی لغزش تخمین زده می شود. این شبیه سازی توسط مدل عددی LS3D که در سال ۲۰۰۷ توسط عطائی آشتیانی و نجفی جیلانی، بر اساس روابط بوزینسک با رتبه ۴ دقت و به صورت دوبعدی در سطح و انتگرال گیری شده در عمق و با استفاده از روش اختلاف محدود توسعه یافته است، انجام می شود. نتایج حاصله نشان می دهد که ارتفاع امواج ضربه ای حاصل برای سناریوی اول و دوم به ترتیب حدود ۱۲ و ۱۸ متر می باشد. با وجود قابل توجه بودن ارتفاع امواج حاصل نزدیک بدنه سد (۸ متر)، به دلیل وجود ۹ متر ارتفاع آزاد، در شرایط عادی که تراز آب دریاچه نرمال می باشد، آبی از بدنه عبور نخواهد کرد. اما در فصول بارانی که امکان بالا رفتن تراز آب تا تراز سرریز سد وجود دارد، احتمال عبور حدود ۲۰۰۰۰ مترمکعب آب از بدنه وجود دارد.

**کلمات کلیدی:** مطالعه موردی، شبیه سازی عددی، زمین لغزش، امواج ضربه ای، بالاروی، روگذری

<sup>i</sup> دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف: s\_yavari2002@yahoo.com

<sup>ii</sup> استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف: ataie@sharif.edu

## ۱- مقدمه

خصوصیات امواج ضربه ای ناشی از زمین لغزش در مخازن سد، مطالعه پارامترهای موثر بر ایجاد و انتشار این امواج و نحوه انتشار آنها در داخل مخزن سد را آشکار می سازد. به ویژه که چنین مطالعاتی در ارزیابی خسارات احتمالی آینده و در نهایت اتخاذ تصمیمات مقتضی برای کاهش دادن صدمات به مخازن و سدهای موجود کشور که پتانسیل چنین حوادثی دارند، مفید و موثر است. از جمله مطالعاتی که با این اهداف روی سدهای موجود در ایران انجام شده است، مطالعه عددی مخزن سد شفارود، واقع در شمال ایران، توسط عطائی

در اثر لغزش دیواره های مخزن به داخل دریاچه سد، امواج ضربه ای سهمگینی شکل می گیرند که بارها موجب وارد آمدن صدمات قابل توجهی به تاسیسات ساحلی، بدنه سد، سازه های هیدرولیکی مجاور و مناطق مسکونی و کشاورزی بالادست و پایین دست سد گردیده اند [۱۶]. همچنین فروریزش این توده های حجیم، موجب کاهش حجم مفید مخازن شده و لطمات جبران ناپذیری برای اقتصاد کشور در پی دارد. این امر لزوم پیش بینی

با قوه ساختگاه سد ماکو، واقع در شمال غربی ایران، بررسی شوند. بزرگی امواج ضربه ای حاصل، ارتفاع بالاروی آب از کناره های مخزن، حداکثر ارتفاع موج بالاتر از تراز تاج سد و میزان روگذری محتمل از بدنه سد، برای دو سناریوی محتمل لغزش، واقع بر سواحل راست و چپ مخزن، تخمین زده می شود.

## ۲- معرفی مدل عددی LS3D

مدل عددی LS3D یک مدل دو بعدی در سطح و انتگرال گیری شده در عمق است که توسط عطائی آشتیانی و نجفی جیلانی (۲۰۰۷) [۵]، با استفاده از معادلات بوزینسک با رتبه چهارم دقت و برای یک شرط مرزی بستر متغیر با زمان دلخواه توسعه یافته است. هدف از توسعه نرم افزار LS3D، پیش بینی مشخصات موجی است که از حرکت مرزهای جامد یک بدنه آبی ایجاد می شود. به طور خاص این مدل برای تعیین مشخصات موج ضربه ای ناشی از زمین لغزش دیواره در مخازن سدها توسعه یافته و البته با اطمینان کافی قابل کاربرد برای پدیده های مشابه اقیانوسی نیز خواهد بود. همه مراحل شکل گیری، حرکت و انتشار موج در محیط و برخورد با مرزهای جامد بدنه آبی و رخداد انعکاس یا بالاروی از مرزها توسط این نرم افزار با دقت کافی شبیه سازی می شود. فرمول بندی ریاضی مدل، بسط تقریب Padé(4,4) [۱۱] برای شرط مرزی بستر متحرک است. معادلات پایه حاکم بر پدیده، معادلات شناخته شده پیوستگی و بقای اندازه حرکت میباشند که در شرایط سه بعدی به صورت زیر قابل بیان هستند [۵]:

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

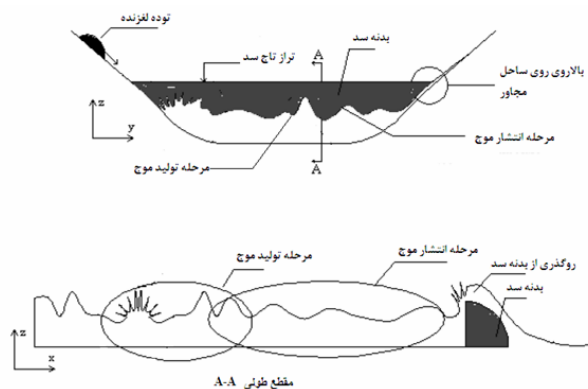
$$u + u \cdot \nabla u + w u_z = -\nabla p \quad (1)$$

$$w_t + u \cdot \nabla w + w w_z = -p_z - g \quad (3)$$

که معادله (۱) بیانگر بقای جرم، معادله (۲) بقای اندازه حرکت در دو راستای مسطحاتی Y و X و معادله (۳) معادله مشابه برای جهت قائم Z است. بردار u بردار سرعت در دو راستای مسطحاتی Y و X و W سرعت در جهت Z است. P فشار سیال، t زمان و  $\nabla$  در شرایط دوبعدی مسطحاتی

آشتیانی و ملک محمدی (۲۰۰۷) [۳] با استفاده از مدل عددی FUNWAVE [۱۲]، جهت بررسی امواج ضربه ای ناشی از سه سناریوی محتمل لغزشی واقع بر تکیه گاه چپ مخزن می باشد. مدل عددی FUNWAVE که بر مبنای روابط بوزینسک کاملاً غیرخطی توسعه یافته است، تنها دو مرحله انتشار و بالاروی موج را مدل می کند و قادر به مدل کردن تولید موج نیست. در نتیجه این محققین برای محاسبه خصوصیات اولیه موج ایجاد شده از روابط تجربی ای که بر اساس مقادیر حاصل از حوادث واقعی و کارهای آزمایشگاهی پیشین توسعه داده اند، استفاده نموده اند [۳]. تاکنون مطالعات تئوری، آزمایشگاهی و عددی زیادی جهت بررسی این پدیده انجام شده است. عطائی آشتیانی و نجفی جیلانی (۲۰۰۶) [۶] مرور جامعی بر مطالعات عددی و آزمایشگاهی پیشین انجام داده و خلاصه این مطالعات را ارائه نموده اند.

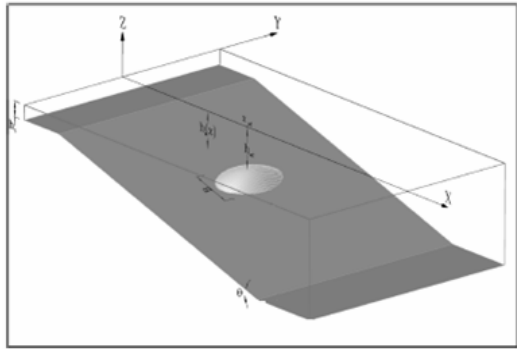
در شبیه سازی پدیده شکل گیری امواج ضربه ای در مخازن سد، چهار مرحله مجزا قابل بررسی است. تولید، انتشار، بالاروی و روگذری از بدنه سد که در شکل (۱) مشاهده می شوند.



شکل (۱): مراحل تولید، انتشار، بالاروی و روگذری امواج ضربه ای ناشی از زمین لغزش در مخازن سد [۳]

در این تحقیق از مدل عددی LS3D که در سال ۲۰۰۷ توسط عطائی آشتیانی و نجفی جیلانی [۵]، بر اساس روابط بوزینسک با رتبه ۴ دقت و به صورت دوبعدی در سطح و انتگرال گیری شده در عمق، با به کارگیری الگوی منقطع سازی اختلاف محدود توسعه یافته است و قادر به مدل کردن مراحل تولید، انتشار و بالاروی موج می باشد، استفاده می گردد تا امواج ضربه ای ناشی از لغزش های

سنجی مدل بر مبنای یک سری داده های آزمایشگاهی سه بعدی [۸] انجام شده است. همچنین نتایج مدل با نتایج مدل سه بعدی BIEM [۱۰] و یک مدل دو لایه با رتبه بالای دقت [۱۳] مقایسه گردیده و در همه موارد، انطباق مناسبی مشاهده گردیده است [۵]. دامنه محاسباتی و پارامترهای اصلی مدل در شکل (۲) دیده می شوند.



شکل (۲) : شکل توده و پارامترهای مربوطه در مدل LS3D [۴]

### ۳- صحت سنجی مدل عددی LS3D

مدل عددی LS3D اخیراً بر مبنای فرضیات Lynnet & Liu (2002) [۱۴] جهت شبیه سازی امواج ضربه ای ناشی از لغزش های فوق سطحی، توسعه یافته است. بر این اساس برای لغزش های فوق سطحی در رابطه (۹) به جای  $u_t$  از ترکیب خطی  $u_t$  و سرعت برخورد توده فوق سطحی به سطح آب ( $v_s$ ) و به جای  $\alpha_0$  از مجموع  $\alpha_0$  و شتاب برخورد توده فوق سطحی به سطح آب ( $\alpha$ )، استفاده می شود. صحت سنجی مدل با استفاده از داده های آزمایشگاهی عطائی آشتیانی و نیک خواه (۲۰۰۸) [۷] انجام شده است. طرح شماتیک فلو م این آزمایشات در شکل (۳) دیده می شود.

برای ثبت نوسانات سطح آب در این آزمایشات از ۸ حساسه فشارسنج دینامیکی سری D15 با علامت تجاری Validyne استفاده شده است (شکل ۳) [۷]. شکل (۴) برای یکی از آزمایشات انجام شده، مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی را در محل اولین و ششمین حساسه (ST1 و ST6) که به ترتیب نشانگر مرحله تولید و انتشار موج هستند، نشان می دهد. بر اساس نتایج حاصله انطباق خوبی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی مشاهده می شود.

بصورت  $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$  تعریف می شود. زیرنویس هر پارامتر نشانگر مشتق جزئی آن پارامتر نسبت به کمیت زیرنویس شده است. در سطح آزاد آب، شرایط مرزی سینماتیک و دینامیک به ترتیب به صورت زیر منظور می شوند [۵]:

$$\zeta_t + \mathbf{u} \cdot \nabla \zeta = w \quad \text{on } z = \zeta \quad (4)$$

$$p = 0 \quad (5)$$

و در بستر نیز شرط مرزی سینماتیک به این صورت بیان می شود [۵]:

$$h_t + \mathbf{u} \cdot \nabla h = -w \quad \text{on } z = -h \quad (6)$$

$\zeta$ : نوسانات سطح آب نسبت به تراز نرمال و  $h$ : ارتفاع کل با فرض متحرک بودن بستر می باشند. معادلات ریاضی حاکم بر مدل با استفاده از تحلیل اغتشاشی با رتبه بالای دقت، بر اساس بسط مولفه های سرعت بدست آمده (معادله (۷) و (۸)) و با بکارگیری الگوی منقطع سازی اختلاف محدود با مرتبه دقت برابر شش حل شده اند [۵].

$$\frac{1}{\varepsilon} h_t + \zeta_t + \nabla \cdot (\varepsilon \zeta + h) \mathbf{u}_0 + \mu \left[ \frac{1}{6} (\varepsilon^2 \zeta^2 + h^2) \mathbf{A} + \frac{1}{2} \varepsilon^2 (\varepsilon \zeta + h) \mathbf{A} - \frac{1}{2} (\varepsilon^2 \zeta^2 - h^2) \nabla (\nabla B) + \varepsilon^2 (\varepsilon \zeta + h) \nabla (\nabla B) \right] + \mu \left[ \frac{1}{120} (\varepsilon^3 \zeta^3 + h^3) \nabla (\nabla \mathbf{A}) - \frac{1}{24} (\varepsilon \zeta + h) \varepsilon^2 \nabla (\nabla \mathbf{A}) - \frac{1}{12} (\varepsilon^3 \zeta^3 + h^3) \nabla (\nabla \mathbf{A}) \right] + \frac{1}{4} (\varepsilon \zeta + h) \varepsilon^2 \nabla (\nabla \mathbf{A}) + \frac{1}{24} (\varepsilon^4 \zeta^4 - h^4) \nabla (\nabla \mathbf{B}) - \frac{1}{6} (\varepsilon \zeta + h) \varepsilon^2 \nabla (\nabla \mathbf{B}) - \frac{1}{2} (\varepsilon^3 \zeta^3 + h^3) \nabla (\nabla \mathbf{B}) + \frac{1}{2} (\varepsilon \zeta + h) \varepsilon \nabla (\nabla \mathbf{B}) + \frac{1}{2} (\varepsilon^2 \zeta^2 - h^2) \nabla \mathbf{C} - (\varepsilon \zeta + h) \varepsilon \nabla \mathbf{C} \Big] = \alpha \varepsilon^6, \mu^6 \quad (7)$$

$$\mathbf{u}_m + \varepsilon (\nabla \mathbf{u}_0) \mathbf{u}_0 + \varepsilon (w_t|_{z=0}) \mathbf{u}_0 + \mu \left[ \mathbf{u}_1|_{z=0} + \varepsilon (\nabla \mathbf{u}_1|_{z=0}) \mathbf{u}_0 + \varepsilon (\nabla \mathbf{u}_0) (\mathbf{u}_1|_{z=0}) + \varepsilon (w_1|_{z=0}) \mathbf{u}_0 + (w_t|_{z=0}) (\mathbf{u}_1|_{z=0}) \right] + \mu \left[ \mathbf{u}_2|_{z=0} + \varepsilon (\nabla \mathbf{u}_2|_{z=0}) \mathbf{u}_0 + \varepsilon (\nabla \mathbf{u}_1) (\mathbf{u}_1|_{z=0}) + \varepsilon (\nabla \mathbf{u}_1) (\mathbf{u}_1|_{z=0}) + \varepsilon (\nabla \mathbf{u}_0) (\mathbf{u}_2|_{z=0}) + \varepsilon (w_2|_{z=0}) (\mathbf{u}_1|_{z=0}) + (w_t|_{z=0}) (\mathbf{u}_2|_{z=0}) \right] + \nabla (h|_{z=0}) = \alpha \varepsilon^6, \mu^6 \quad (8)$$

مدل عددی LS3D جهت شبیه سازی امواج ضربه ای ناشی از زمین لغزش های زیر سطح آب توسعه یافته است. شکل توده هیپربولیک در نظر گرفته شده و قانون حرکت آن به صورت زیر بیان می شود [۵]:

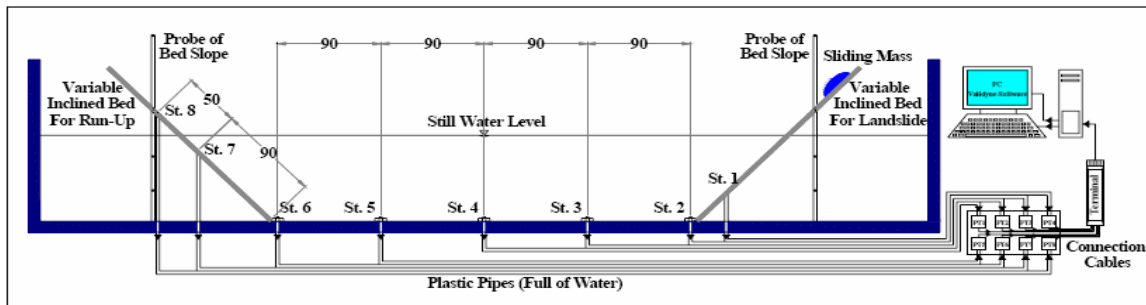
$$S(t) = S_0 \cdot \ln \left( \cosh \frac{t}{t_0} \right) \quad (9)$$

$S$  موقعیت مرکز ثقل توده در امتداد شیب،  $S_0 = u_t^2 / \alpha_0$  و  $t_0 = u_t / \alpha_0$  که  $u_t$  سرعت نهایی توده لغزنده و  $\alpha_0$  شتاب اولیه آن است و به صورت زیر تعریف می شوند [۵]:

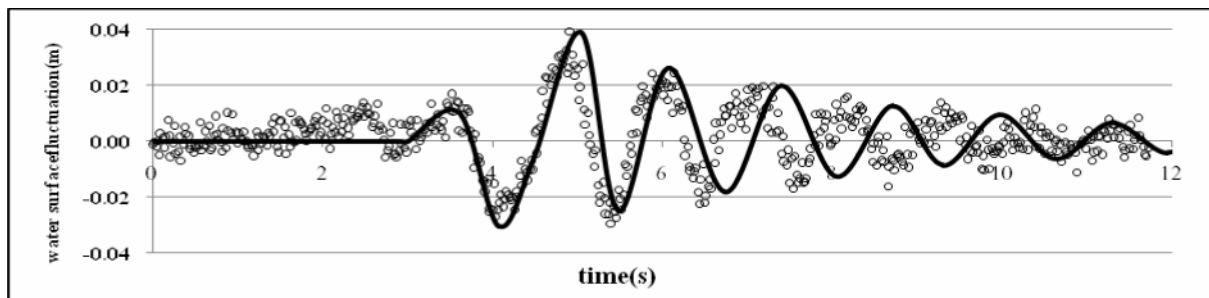
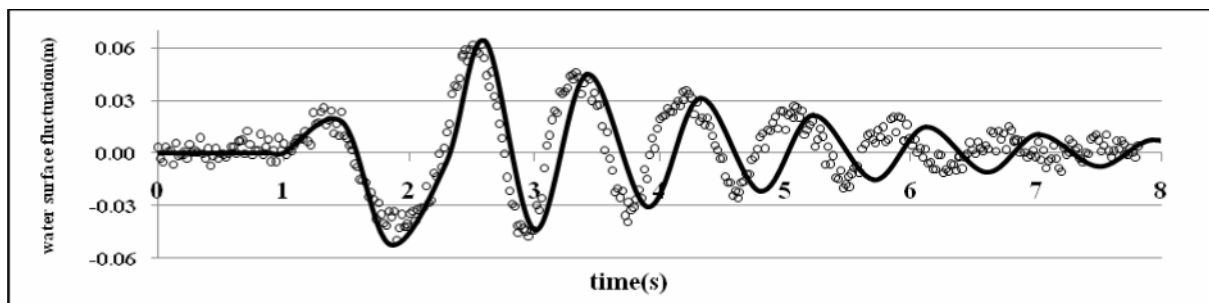
$$u_t = \sqrt{g \cdot B} \cdot \sqrt{\frac{\pi(\gamma-1)}{2C_d}} \cdot \sin \theta, \quad \alpha_0 = g \cdot \frac{\gamma-1}{\gamma+C_m} \sin \theta \quad (10)$$

$\gamma = \rho_s / \rho_w$  چگالی توده و  $\rho_w$  چگالی آب،  $B$  طول توده در امتداد شیب،  $\theta$  زاویه شیب،  $C_m$  ضریب جرم افزوده،  $C_d$  ضریب نیروی درگ و  $g$  شتاب ثقل هستند. صحت

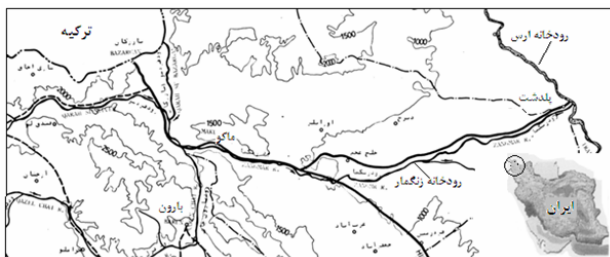
خطای نسبی نتایج عددی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی در تخمین بزرگی موج کمتر از ۵٪ است. موج عددی پخش تر از موج آزمایشگاهی می باشد و این امر به دلیل اختلاف فاز زمانی بین ۱۰-۱۵٪ بین شکل گیری موج عددی و موج آزمایشگاهی است.



شکل (۳): شمایی از تنظیمات کلی آزمایشات شامل اجزای آزمایش، سیستمهای اندازه گیری، ارتباط بخشهای مختلف و موقعیت دقیق استقرار حساسه ها (کلیه ابعاد به سانتی متر است) [۷]



شکل (۴): مقایسه (-): نتایج مدل عددی LS3D با (0): نتایج آزمایشگاهی عطائی آشتیانی و نیک خواه (۲۰۰۸) برای امواج ضربه ای ناشی از لغزش فوق سطحی، در (الف) مرحله شکل گیری (ST1) و (ب) انتشار موج (ST6)



شکل (۵): موقعیت جغرافیایی سد ماکو [۱]

مطابق شکل (۶)، یک گسل نسبتاً بزرگ با طول کیلومتر از نزدیکی ساختگاه سد عبور می کند که احتمالاً در محل ساختگاه گسل‌های فرعی نیز از این گسل منشعب شده‌اند. عکسهای ماهواره‌ای نشان می دهد که این گسل در امتداد گسل بداولی بوده که از نزدیکی ساختگاه سد آق‌چای می‌گذرد. بنابراین شرایط لرزه ای ساختگاه، در صورت وقوع زمین لرزه می تواند

## ۴- سد ماکو: مشخصات، موقعیت جغرافیایی و

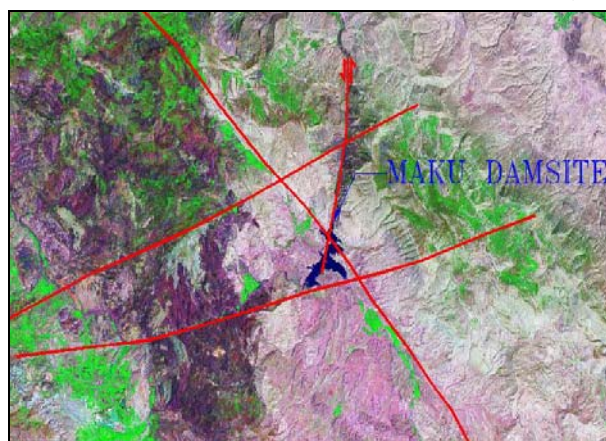
### لغزش های محتمل

سد مخزنی ماکو (بارون) به مختصات  $11^{\circ}39'17''$  عرض شمالی و  $44^{\circ}28'55''$  طول شرقی در ۱۹ کیلومتری شمال شهرستان ماکو، بر روی رودخانه زنگمار (بارون چای) در نزدیکی روستای بارون در استان آذربایجان غربی واقع شده است. رودخانه زنگمار از کوههای مرزی ایران و ترکیه واقع در نزدیکی کوه های آرات، سرچشمه می گیرد و نهایتاً در شهرستان پلدشت به رودخانه ارس می پیوندد و قبل از آن از تپه باشی نمازی و مرادلوی علیا می گذرد (شکل (۵)).

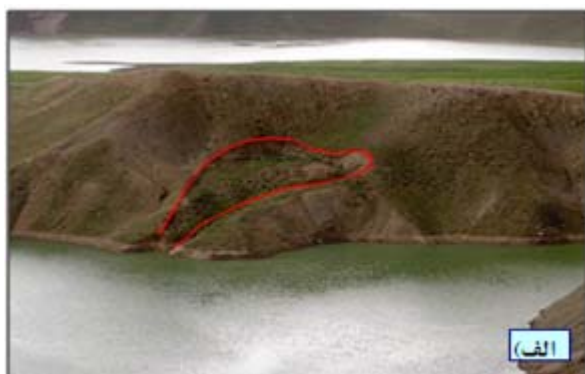
موجب تشدید احتمال ریزش توده های بالقوه شود [۲].



شکل (۷): سد ماکو در استان آذربایجان غربی [۱۸]



شکل (۶): تصویر ماهواره‌ای ساختگاه سد ماکو و گسل های موجود در ساختگاه [۲]



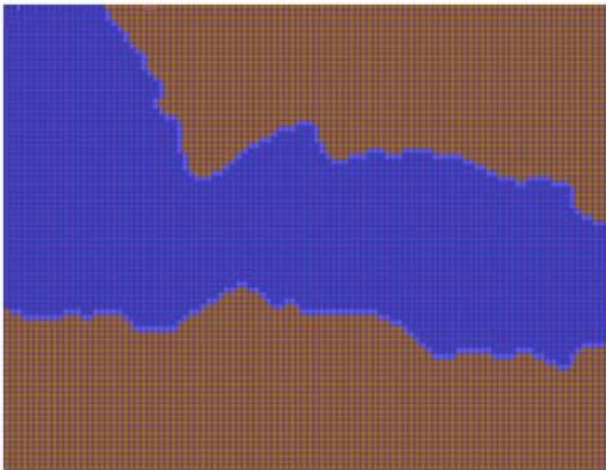
شکل (۸): الگوهای لغزشی در بخش های مختلف دیواره مخزن سد ماکو [۱۸]



شکل (۹): موقعیت توده های بحرانی نسبت به محور سد ماکو

سد مخزنی ماکو از نوع سد خاکی با هسته رسی می باشد و می تواند بالغ بر ۱۳۵ میلیون مترمکعب آب ذخیره سازد (شکل (۷)). طول و عرض تاج سد به ترتیب ۳۵۰ و ۱۰ متر، ارتفاع سد از کف ۷۴ متر، ضخامت سد در تاج و کف آن به ترتیب ۱۰ متر و ۳۵۰ متر، ترازهای تاج و حداقل پی به ترتیب ۱۶۹۰ و ۱۶۲۱ متر از سطح دریا است. آب مورد نیاز ۱۵۰۰۰ هکتار اراضی کشاورزی واقع در دشت حاصلخیز پلدشت در پایین دست سد، از طریق این سد تامین می شود. عمده سنگهای ساختگاه شامل سنگهای آهکی، مارن و ماسه سنگ بوده که مربوط به سازند قم (الیگومیوسن) هستند که بصورت دگر شیب بر روی تشکیلات روته قرار گرفته اند [۲].

محتمل ترین لغزش ساختگاه سد ماکو، در ساحل سمت چپ و نزدیک به ساختگاه سد قرار دارد. عامل اصلی شکل گیری این توده ایجاد ترک های کششی و گسترش آنها در محدوده تکیه گاه چپ است (شکل (۸) ب). به علاوه فراوانی و توسعه ترکهای کششی در این ناحیه، بیانگر حجم زیاد توده در حال لغزش و گسترش آن به اطراف می باشد. علاوه بر این توده، لغزش محتمل دیگری در ساحل راست مخزن وجود دارد که تصویر آن در شکل (۸) الف قابل مشاهده است. این لغزش از نوع لغزش های حلقوی در رسوبات واریزه ای کناره راست مخزن می باشد. موقعیت این دوتوده نسبت به محور سد، در شکل (۹) دیده می شود.



شکل (۱۱): مش بندی اصلاح شده میدان محاسباتی مخزن سد ماکو توسط گزینه اصلاح مرزها

تأثیر مرزهای دریاچه در پلان، یعنی توالی تر و خشک شدن مرزها بر بدنه آبی در قالب موضوع انعکاس از دیواره اعمال گردیده است. به این منظور، مطابق توصیه Grilli et al. (2002) [۹] ضریبی به نام ضریب بازتاب از دیواره باید توسط کاربر و بر اساس شرایط واقعی کناره های مخزن در محل، تعیین و به مدل وارد گردد. این ضریب که بر اساس نوع پوشش گیاهی و جنس مصالح تشکیل دهنده نواحی مختلف کناره دریاچه تعیین می گردد، برای سد ماکو ۰/۶ تخمین زده می شود.

## ۶- نتایج

بر اساس شبکه نهایی و اصلاح شده مخزن سد ماکو، طول و عرض متوسط مخزن به ترتیب ۵۱۰ و ۱۸۵ متر می باشند. با انتخاب پارامترهای محاسباتی مناسب، شبیه سازی برای هر دو توده محتمل لغزشی انجام می شود. دو شکل (۱۲) و (۱۳) انتشار امواج ضربه ای حاصل را در ناحیه نزدیک و دور از لغزش و در پلان دریاچه نشان می دهند.

### ۶-۱- بزرگی موج ضربه ای حاصل

ارتفاع موج ضربه ای اول ایجاد شده در میدان نزدیک، برای سناریوی اول و دوم لغزش به ترتیب حدود ۱۲ و ۱۸ متر می باشد. سری زمانی نوسانات سطح آب و موقعیت

کلیه لغزشهای صورت گرفته در ساختگاه این سد با توجه به لیتولوژی مارنی آن (سبز رنگ) در تشکیلات قم می باشد که توسط واریزه هایی با ضخامتهای مختلف پوشیده شده اند. مارنها سنگهای ریزدانه با نفوذپذیری پائین می باشند که به لحاظ داشتن کانیهای رسی فراوان قابلیت روان شدگی و لغزش را در شرایط مختلف دارا می باشند [۲]. بر اساس نقشه های سه بعدی در دسترس از توپوگرافی ساختگاه سد، توده واقع بر ساحل چپ مخزن (سناریوی اول)، زیرسطحی است. درحالیکه بیشترین حجم توده واقع بر ساحل راست مخزن (سناریوی دوم)، بالای سطح آب واقع است و در نتیجه توده فوق سطحی می باشد. مشخصات کامل این دو توده لغزشی در جدول (۱) ارائه گردیده است.

جدول (۱): مشخصات توده های لغزشی محتمل ساختگاه سد ماکو

شماره سناریو	بر اساس مطالعات زمین شناختی ساختگاه				
	شیب بستر لغزشی $\alpha$ (deg)	فاصله عمودی توده از سطح آب (موقعیت اولیه توده) $d$ (m)	چگالی نسبی توده $\gamma$	ضخامت توده $T$ (m)	طول توده در امتداد شیب $B$ (m)
۱	۳۰	-۱۵	۱/۹	۱۵	۸۰
۲	۲۲	۵	۱/۹	۱۰	۶۰

## ۵- مراحل شبیه سازی

ابتدا نیاز به تعیین محدوده شبیه سازی و مش بندی آن می باشد. بدین منظور گام مکانی در دو راستای مسطحاتی X,Y با توجه به شرایط پایداری برنامه، از عدد کورانت انتشار موج که معیاری عمومی برای نرم افزارهایی است که از روش تفاضلات محدود برای شبیه سازی عددی معادلات استفاده می کنند [۱۸]، ۵ متر و گام زمانی ۰/۰۵ ثانیه انتخاب می شوند. پس از مش بندی، تراز نرمال آب برابر ۱۶۸۰ متر به برنامه داده می شود و برنامه به طور هوشمند، با توجه به نقشه توپوگرافی وسعت دریاچه را تشخیص داده و مرزهای محاسباتی را تعیین می کند. در نهایت پس از اصلاح مرزهای محاسباتی برای جلوگیری از واگرایی برنامه، مش بندی مخزن مطابق شکل (۱۱)، توسط برنامه ایجاد می شود.

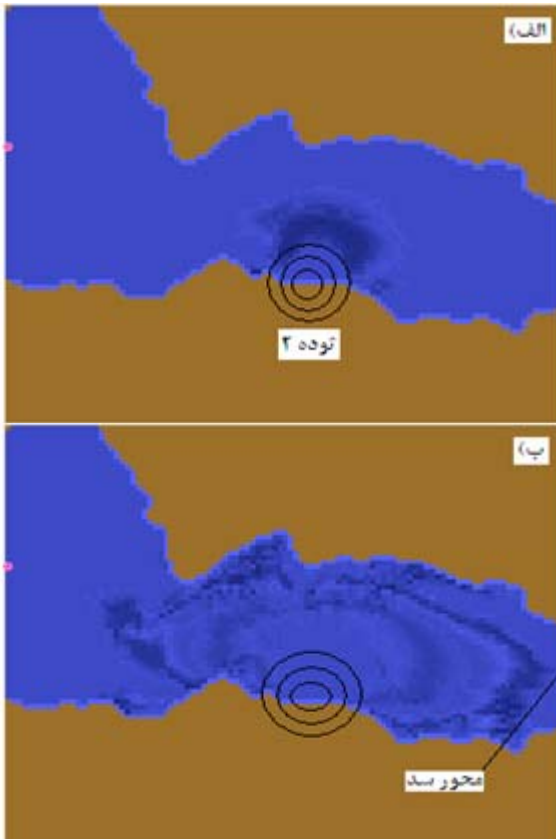
این امواج نسبت به توده ها، برای هر دو سناریو در شکل (۱۴) مشاهده می شود. در این شکل ها حداکثر  $\eta_{max}$  حداکثر بزرگی مثبت موج ضربه ای و  $\eta_{min}$  حداکثر بزرگی منفی موج ضربه ای را نشان می دهند.

### ۶-۲- میزان بالاروی از کناره ها

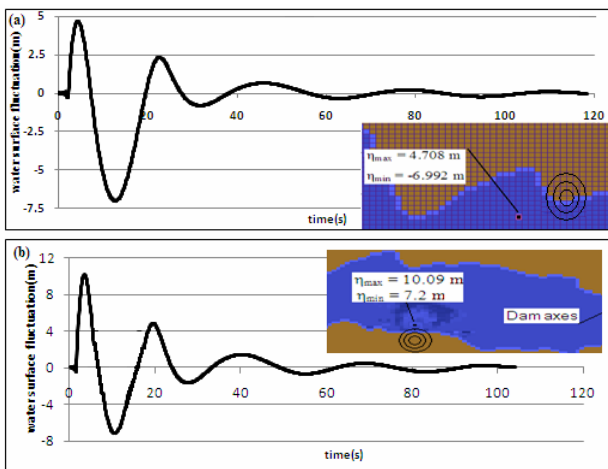
در مدل عددی LS3D شبیه سازی بالاروی موج از کناره ها بر اساس روش عددی Synolakis(1987) [۱۷] می باشد. این محقق بر اساس آزمایشات انجام شده بر روی موج تنها، مثبت، ناشکنا و کناره شیبدار مسطح و نفوذ ناپذیر، رابطه ساده زیر را برای تخمین بالاروی موج ارائه نموده است:

$$R/h_0 = 2.831(H/h_0)^{1.25} \sqrt{\cot\beta} \quad (11)$$

$\beta$  زاویه شیب بستر بالاروی،  $R$  ارتفاع بالاروی،  $h_0$

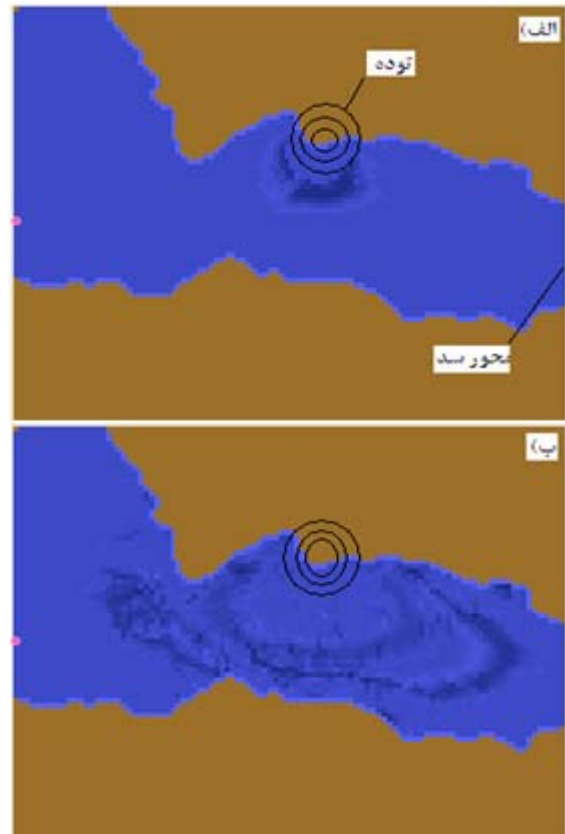


شکل (۱۳): نتایج شبیه سازی موج ضربه ای ناشی از لغزش توده ۲ سد ماکو، (الف) میدان نزدیک و (ب) میدان دور



شکل (۱۴): موقعیت و سری زمانی موج ضربه ای ایجاد شده در میدان نزدیک برای سناریوی (a): اول و (b) دوم

عمق آب آرام در مخزن و  $H$  ارتفاع موج اولیه نزدیک شونده به کناره هستند. میزان بالاروی موج برای هر دو سناریو، در چند گیج واقع بر ساحل راست و چپ مخزن، که موقعیت آنها در شکل (۱۵) نشان داده شده است، به همراه شیب کناره در جدول (۲) مشاهده می شود. در نام گذاری گیج ها، عدد اول شماره توده لغزشی احتمالی است

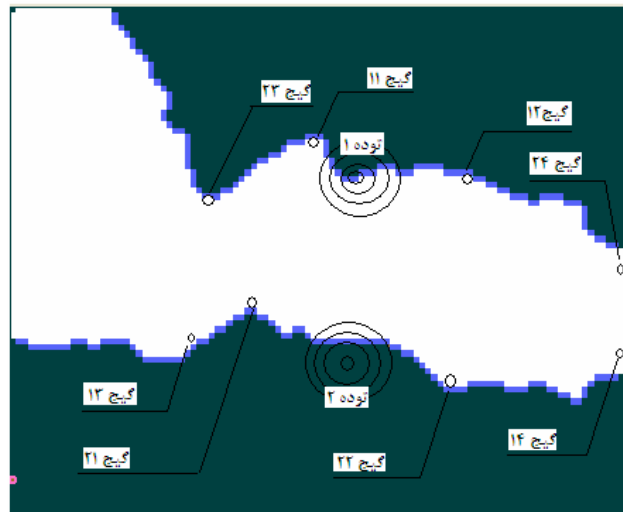


شکل (۱۵): نتایج شبیه سازی موج ضربه ای ناشی از لغزش توده ۱ سد ماکو، (الف) میدان نزدیک و (ب) میدان دور

بنابراین در صورت وقوع زمین لغزش سطح وسیعی از مناطق ساحلی مخزن از آب پوشیده خواهد شد.

### ۶-۳- امواج در مجاورت بدنه سد و تخمین حجم روگذری از سد

تراز تاج سد ماکو ۱۶۹۰ و تراز نرمال آب ۱۶۸۰ متر می باشد. بنابراین اختلاف تراز تاج سد تا سطح نرمال آب که مجموع ارتفاع آزاد (۹متر) و ارتفاع منظور شده برای امواج ناشی از باد و زلزله (۱ متر) است، ۱۰ متر می باشد. البته در فصول بارانی که احتمال سست شدن و لغزش توده ها نیز بیشتر است، تراز آب می تواند حداکثر تا تراز سرریز سد افزایش یابد. سرریز سد ماکو از نوع تونلی با شفت مایل می باشد و در تکیه گاه سمت چپ واقع است.



شکل (۱۵): موقعیت گنج های محاسبه مقادیر بالاروی در سواحل راست و چپ مخزن سد ماکو

که موج ضربه ای از فرووریزش آن ناشی شده است و عدد دوم شماره گنج است. مشاهده می شود که در مجاورت توده ها ارتفاع بالاروی تا ۳۰ متر نیز می رسد.

جدول ۲- مقادیر بالاروی موج از کناره های مخزن سد ماکو

شماره گنج	مشخصات مخزن			خصوصیات موج در محل گنج ها			ارتفاع بالاروی R(m)
	فاصله از محل لغزش $X_p(m)$	عمق متوسط $h_o(m)$	شیب کناره $\beta(^{\circ})$	بزرگی مثبت موج $a_c(m)$	بزرگی منفی موج $a_i(m)$	ارتفاع موج در مجاورت کناره H(m)	
۱۱	۷۰	۵۰	۲۲	۲/۱۹	۵/۷۱	۷/۹	۲۲/۲
۱۲	۹۰	۵۰	۳۵	۱/۳۵	۴/۰۷	۵/۴۲	۱۰/۵
۱۳	۱۶۸	۵۰	۴۸	۱/۷۵	۴/۲۳	۵/۹۸	۹/۵
۱۴	۲۸۰	۶۰	۲۵	۲/۴۲	۴/۵۶	۶/۹۸	۱۷
۲۱	۹۰	۵۰	۲۰	۴/۷	۵/۲۲	۹/۹	۳۰/۷
۲۲	۱۰۰	۵۰	۷۰	۳/۸	۲/۶	۶/۳۸	۶/۵
۲۳	۱۳۵	۵۰	۶۵	۴/۲۵	۲/۵	۶/۷۴	۷/۸
۲۴	۲۴۵	۵۰	۲۵	۵/۶۲	۲/۹	۸/۵	۲۲

سری زمانی موج رسیده به بدنه سد برای سناریوی اول و دوم در شکل (۱۶) دیده می شود. حداکثر ارتفاع موج رسیده به سد برای این دو سناریو به ترتیب ۷/۸ متر و ۸/۵ متر می باشد. بنابراین در بهترین شرایط که ۹ متر ارتفاع آزاد وجود دارد، سیلی رخ نخواهد داد. اما در فصول بارانی با ارتفاع آزاد ۴ متر، برای سناریوی اول حدود ۳ متر و برای سناریوی دوم ۴ متر از ارتفاع موج

تراز سرریز ۱۶۸۵ متر می باشد. بنابراین جهت تخمین سیل محتمل دو حالت بهترین (تراز آب ۱۶۸۰ متر) و بدترین (تراز آب ۱۶۸۵ متر) وضعیت در نظر گرفته می شود. برای محاسبه حجم آب عبوری از سد، از رابطه زیر استفاده می شود:

$$V = b \int \eta dt \quad (12)$$

در این رابطه V حجم روگذری از بدنه، b طول سد،  $\eta$  ارتفاع سطح آب نسبت به تراز نرمال و t زمان می باشند.



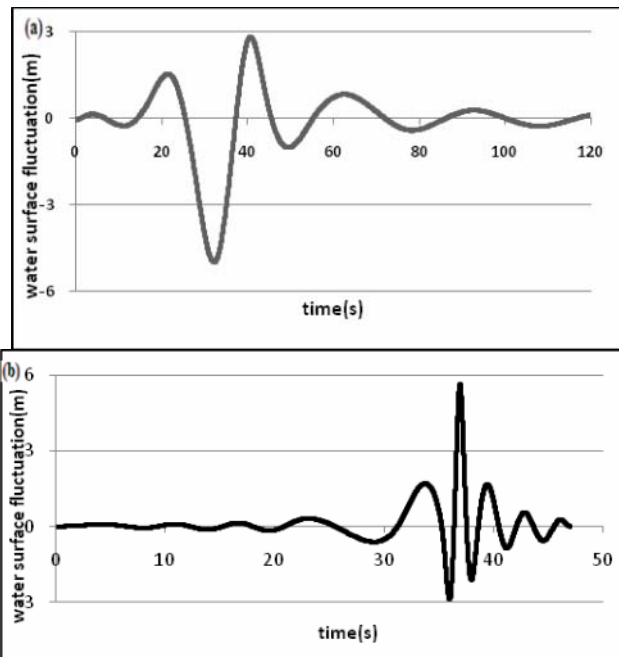
نیست، مگر اینکه در شرایط حداکثر تراز آب (تراز سرریز)، لغزشی رخ دهد.

## ۷- خلاصه نتایج

به عنوان یک نمونه کاربردی، دریاچه سد خاکی احداث شده ماکو در استان آذربایجان غربی، در ایران، جهت بررسی دو توده محتمل لغزشی، یکی زیرسطحی و واقع بر ساحل چپ مخزن و دیگری فوق سطحی و واقع بر ساحل راست مخزن، توسط مدل عددی LS3D شبیه سازی گردید. خلاصه نتایج حاصل از این شبیه سازی در جدول (۳) مشاهده می گردد.

نتایج نشان می دهد که احتمال وقوع سیل با حجم زیاد با فرض حداقل تراز آب (۱۶۸۰ متر)، به دلیل زیاد بودن ارتفاع آزاد سد (۹ متر) کم است. اما در صورتی که لغزش ها در فصول بارانی که تراز آب حداکثر است (۱۶۸۵ متر) رخ دهند، می توانند سیلی معادل ۲۰۰۰۰ مترمکعب یا حتی بیشتر ایجاد کنند. ولی به هر حال با توجه به بزرگ بودن امواج ضربه ای حاصل که برای سناریوی دوم ارتفاع آن به ۱۸ متر می رسد، احتمال وارد آمدن خسارت به تاسیسات ساحلی و سازه های هیدرولیکی مجاور سد و حتی خود بدنه دارد.

رسیده به بدنه، بالاتر از تاج سد خواهد بود و بر اساس رابطه (۱۲) به ترتیب حدود ۱۳۰۰۰ و ۲۰۰۰۰ مترمکعب آب از سد عبور خواهد کرد. در هر حال به دلیل پایین بودن



شکل (۱۶): سری زمانی نوسانات سطح آب در مجاورت بدنه سد ماکو برای سناریوی (a): اول و (b) دوم

تراز آب مخزن نسبت به تراز تاج سد، می توان گفت لغزش های این ساختگاه از لحاظ رخداد سیل خطرناک

جدول (۳): خلاصه نتایج شبیه سازی دریاچه سد ماکو

شماره سناریو	حجم توده لغزنده $V_s(\text{mm}^3)$	فاصله تقریبی تا محور سد $D(\text{m})$	ارتفاع موج ضربه ای اول $H_{\text{max}}(\text{m})$	حجم آب عبوری از روی سد در بدترین شرایط $V_{\text{max}}(\text{m}^3)$	حجم آب عبوری از روی سد در بهترین شرایط $V_{\text{min}}(\text{m}^3)$	حداکثر ارتفاع آب روی تاج سد $h_{\text{max}}(\text{m})$	حداقل ارتفاع آب روی تاج سد $h_{\text{min}}(\text{m})$
۱	۰/۶	۳۷۵	۱۲	۱۳۰۰۰	۰	۳	۰
۲	۰/۱۵	۲۳۰	۱۸	۲۰۰۰۰	۰	۴	۰

b: طول بدنه سد

$C_m$ : ضریب جرم افزوده

$C_d$ : ضریب نیروی درگ

d: عمق اولیه غوطه وری توده

g: شتاب ثقل

## ۸- فهرست علائم

$a_0$ : دامنه موج ضربه ای

$B1$ : یک عدد اسکالر

B: طول توده لغزنده در امتداد شیب

$\Delta t$ : گام زمانی اجرای مدل عددی  
 $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$ : در شرایط دوبعدی مسطحاتی

H: ارتفاع موج  
h: ارتفاع کل آب با فرض متحرک بودن  
بستر ( $h(x,y,z)$ )

## ۹- مراجع

[۱] وزارت نیرو، سازمان آب منطقه ای آذربایجان،  
“مطالعات امکان یابی رودخانه های مرزی ایران و  
ترکیه”، شبکه آبیاری و زهکشی دشت بازرگان

[۲] مهندسین مشاور مهتاب قدس، گزارش نهایی مطالعات  
تفصیلی هیدرولیک، زمین شناسی و لرزه شناسی  
ساختگاه سد ماکو”

[۳] Ataie-Ashtiani, B. and Malek-Mohammadi, S. (2007), “Mapping Impulsive Waves due to Subaerial Landslides into a Dam Reservoir: Case Study of Shafa-Roud Dam”, Dam Engineering, March 2008, XVIII(3): 1-25

[۴] Ataie-Ashtiani, B., Malek-Mohammadi, S. (2007), “Near field Amplitude of Sub-aerial Landslide Generated Waves in Dam Reservoirs.”, Dam Engineering, February/March XVII (4): 197-222.

[۵] 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, 35 (6): 1019-1048.

[۶] Ataie-Ashtiani, B. and Najafi-Jilani, A. (2006). “Prediction of Submerged Landslide Generated Waves in Dam Reservoirs: An Applied Approach” Dam Engineering, XVII (3): 135-155.

[۷] Ataie-Ashtiani, B. and Nik-khah, A. (2008). “Impulsive Waves Caused by Subaerial Landslide”, Environmental Fluid Mechanics (2008) 8: pp263-280

[۸] Enet, F., Grilli, S.T. and Watts, P. (2003), “Laboratory experiments for tsunami generated by underwater landslides: comparison with numerical modeling.” Thirteenth International Conference on Offshore and Polar Engineering, Honolulu, Hawaii, U.S.A., May 2003; 372-379.

[۹] Grilli, S. T., Vogelmann, S. and Watts, P. (2002). “Development of a 3D Numerical Wave Tank for Modeling Tsunami Generation

$h_0$ : عمق آب آرام در مخزن

$l_0$ : طول موج

P: فشار سیال

R: ارتفاع بالاروی موج

R.F: ضریب بازتاب از دیواره

S: موقعیت مرکز ثقل توده در امتداد شیب

$S_0$ : طول مشخصه

T: ضخامت توده لغزنده

t: زمان

$t_0$ : زمان مشخصه

u: بردار سرعت در دو راستای مسطحاتی  $x$  و  $y$

$u_t$ : سرعت نهایی توده لغزنده زیرسطحی

V: حجم آب عبوری از بدنه سد

W: سرعت در راستای قائم Z

$\alpha$ : شتاب برخورد توده فوق سطحی به سطح آب

$\alpha_0$ : شتاب اولیه توده لغزنده زیرسطحی

$\beta$ : زاویه شیب کناره مخزن

$\gamma$ : چگالی نسبی توده لغزنده

$\varepsilon$ : شاخص نشانگر رفتار غیرخطی موج

$\zeta$ : نوسانات سطح آب نسبت به تراز نرمال

$\eta$ : ارتفاع سطح آب نسبت به تراز نرمال

$\eta_{max}$ : حداکثر بزرگی مثبت موج

$\eta_{min}$ : حداکثر بزرگی منفی موج

$\theta$ : زاویه شیب لغزش

$\lambda$ : شاخص پراکنش موج

$v_s$ : سرعت برخورد توده فوق سطحی به سطح آب

$P_s$ : چگالی توده لغزنده

$\rho_w$ : چگالی آب

$\Delta x$ : گام مکانی جهت مش بندی محدوده محاسباتی

در راستای مسطحاتی X

$\Delta y$ : گام مکانی جهت مش بندی محدوده محاسباتی

در راستای مسطحاتی Y

- Lynett, P. and Liu, P.L. (2002). "A Numerical Study of Submarine-Landslide-Generated Waves and Run-up", Philosophical Trans. Royal society, London, U.K.A458, pp 2885-2910. [۸۴]
- Najafi-Jilani, A. and Ataie-Ashtiani, B.(2007), "Estimation of Near-Field Characteristics of Tsunami Generation by Submarine Landslide", Ocean Engineering (2007), doi:10.1016/j.oceaneng.2007.11.006 [۸۵]
- Semenza, E. (200). : La storia del Vajont, raccontata dal geologo che ha scoperto la frana., Tecomproject, Ferrara, 2002. [۸۶]
- Synolakis C. E. (1987). "The run-up of solitary waves." Journal of Fluid Mechanics, vol.185, pp 523-545. [۸۷]
- Watts, F. and Grilli, S.T. (2003), "Underwater Landslide Shape, Motion, Deformation, and Generation", Proceedings Of The Thirteenth (2003) International Offshore and Polar Engineering Conference Honolulu, Hawaii, USA, May 25-30 [۸۸]
- by Underwater Landslides" Journal of Engineering Analysis with Boundary Elements, Vol. 26, pp301-313
- Grilli, S. T. and Watts, F. (2005). "Tsunami Generation by Submarine Mass Failure. I: Modeling, Experimental Validation, and Sensitivity Analyses" , Journal of Waterway, Port, Costal, and Ocean Engineering © ASCE / November / December 2005/ 283-297 [۸۰]
- Gobbi, M.F., Kirby, J.T., and Wei G., (2000), "A fully nonlinear Boussinesq model for surface waves. II. Extension to  $O(kh^4)$ ", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 405, pp 181-210. [۸۱]
- Kirby, J.T., Wei, G., Chen, Q., Kennedy, A.B. and Dalrymple, R.A. (1998). "FUNWAVE 1.0 Fully Nonlinear Boussinesq wave model Documentation and user's Manual" Research Report No. CACR-98-06 / September1998 [۸۲]
- Lynett, P., and Liu, P.L.F., (2004), "A Multi-Layer Approach to Wave Modeling", Proc. Royal Society, London, A, Vol. 460, pp 2637-2669. [۸۳]