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

سعیدہ یاوری رامشہ'; بھزاد عطائی آشتیانی"; عطاء اللہ نجفی جیلانی

### چکیدہ

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 ۲ 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 ۲۱ و ۸۸ 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 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 ۲۰۰۷ مترمکعب آب از بدنه وجود دارد.

كلمات كليدى: مطالعه موردى، شبيه سازى عددى، زمين لغزش، امواج ضربه اى، بالاروى، روگذرى

<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

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[17]. 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

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

آشتیانی و ملک محمدی(۲۰۰۷)[۳] با استفاده از مدل عددی FUNWAVE]، 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 کاملا غیرخطی توسعه یافته است، تنها دو مرحله انتشار و بالاروی موج را مدل می کند و قادر به مدل كردن توليد موج نيست. در نتيجه اين محققين برای محاسبه خصوصیات اولیه موج ایجاد شده از روابط تجربی ای که بر اساس مقادیر حاصل از حوادث واقعی و کارهای آزمایشگاهی پیشین توسیعه داده اند، استفاده نموده اند[٣]. تاکنون مطالعات تئوری، آزمایشگاهی و عددی زیادی جهت بررسی این پدیده انجام شده است. عطائی آشتیانی ونجفی جیلانی(۲۰۰٦)[٦] مرور جامعی بر مطالعات عددی و آزمایشگاهی پیشین انجام داده و خلاصبه 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،

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[٥]، بر اساس روابط بوزینسک با رتبه٤ 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

بالقوه 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.

### LS3D –۲ معرفی مدل عددی

مدل عددیLS3D یک مدل دو بعدی در سطح و انتگرال گیری شده در عمق است که توسط عطائی آشتیانی و نجفى جیلانی(٢٠٠٧)[٥]، با استفاده از معادلات بوزینسک با رتبه چهارم دقت و برای یک شرط مرزی بستر متغیر با زمان دلخواه توسعه يافته 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 اقيانوسی نيز خواهد بود. همه مراحل شکل گيری، 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 تقريب Padé(4,4) 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[٥]:  $\nabla u + w_z = 0$ (1)

$$\mathbf{u} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} + \mathbf{w} \mathbf{u}_z = -\nabla \mathbf{p} \tag{1}$$

 $w_t + u. \nabla w + w w_z = -p_z - g \qquad (\Upsilon)$ 

که معادله(۱) بیانگر بقای جرم، معادله(۲) بقای اندازه حرکت در دو راستای مسطحاتیy و x و معادله(۳) معادله مشابه برای جهت قائم z است. بردار u بردار سرعت در دو راستای مسطحاتیy و x و w سرعت در جهت z است. P فشار سیال، t زمان و √در شرایط دوبعدی مسطحاتی

بصورت (∂/∂x, ∂/∂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[٥]:

- $\zeta_{t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \zeta = w \qquad \text{on } \mathbf{z} = \zeta \qquad (\varepsilon)$
- $p = 0 \tag{($\circ$)}$

و در بستر نیز شرط مرزی سینماتیک به این صورت بیان می شود[٥]. شود[٥]

$$h_{\rm t} + \mathbf{u}.\nabla h = -w$$
 on  $z = -h$  (7)

γ: 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[٥].

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[٥]:

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

 $S_0 = u_t^2 / \alpha_0$  موقعیت مرکز ثقل توده در امتداد شیب،  $S_0 = u_t^2 / \alpha_0$  موقعیت مرکز ثقل توده در امتداد شیب،  $u_t$  مو $u_t$  مورت  $u_t = u_t / \alpha_0$  اولیه آن است و به صورت زیر تعریف می شوند [٥]:  $u_t = \sqrt{g.B} \cdot \sqrt{\frac{\pi(\gamma-1)}{2C_d} \cdot \sin\theta}$ ,  $\alpha_0 = g \cdot \frac{\gamma-1}{\gamma+C_m} \sin\theta$  (۱۰)

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

سنجی مدل بر مبنای یک سری داده های آزمایشگاهی سه بعدی[۸] انجام شده است. همچنین نتایج مدل با نتایج مدل سه بعدیBIEM[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]

#### **LS3D** – صحت سنجی مدل عددی –۳

مدل عددی - LS3D اخیرا - بر مبنای - فرضیات Mark Liu(2002) [۱۶] Lynnet گلان (2002) 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* از ترکیب خطی *u* و سرعت برخورد توده فوق سطحی به سطح آب(vs) و به جای ۵۵ از مجموع ۵۵ و شتاب برخورد توده فوق سطحی به سطح آب( α)، استفاده می شود. صحت سنجی مدل با استفاده از داده های آزمایشگاهی عطائی آشتیانی و نیک خواه(۲۰۰۸) [۷] انجام شده است. طرح شماتیک فلوم 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(شکل۳)[۷]. شکل(٤) 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.

خطای نسبی نتایج عددی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی 🦷 فاز زمانی بین ۱۰– ۱۰٪ بین شکل گیری موج عددی و موج در تخمین بزرگی موج کمتر از ٥٪ است. موج عددی پخش آزمایشگاهی است. تر از موج آزمایشگاهی می باشد و این امر به دلیل اختلاف



شکل(۳) : شمایی از تنظیمات کلی آزمایشات شامل اجزای آزمایش، سیستمهای اندازه گیری، ارتباط بخشهای مختلف و موقعیت دقيق استقرار حساسه ها (كليه ابعاد به سانتي متر است) [٧]



time(s)

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)

### ٤– سد ماکو: مشخصات، موقعیت جغرافیایی و

### لغزش های محتمل

سد مخزنی ماکو(بارون) به مختصات <sup>۳</sup>/۱۷<sup>°</sup> ۱۱عرض شمالی و "٥٥ ۲۸ ٤٤<sup>°</sup> ۲۵ 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 آرارات، سرچشمه می گیرد و نهایتا در شهرستان پلدشت به رودخانه ارس می پیوندد و قبل ازآن از تپه باشی نمازی و مرادلوی علیا می گذرد(شکل(٥)).



شکل(۵) : موقعیت جغرافیایی سد ماکو[۱]

مطابق شکل(٦)، یک گسل نسبتا بزرگ با طول کیلومتر از نزدیکی ساختگاه سد عبور می کند که احتمالا در محل ساختگاه گسلهای فرعی نیز از این گسل منشعب شدهاند. عکسهای ماهواردای 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

**مجله مهندسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی / سال اول/ پیش شماره سه/زمستان ۱۳۸۷** 

-0.02

-0.04

موجب تشديد احتمال ريزش توده هاى بالقوه شود[٢].



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

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 ۳۰۰ و ۱۰ متر، ارتفاع سد از کف ۷۶ متر، ضخامت سد در تاج و گف آن به ترتیب ۱۰ متر و ۲۵۰ متر، ترازهای تاج و حداقل پی به ترتیب ۱۳۹۰ و ۱۲۲۱ متر از سطح دریا است. آب مورد نیاز ۱۹۰۰ 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 درساحل راست مخزن وجود دارد که تصویر آن درشکل(۸)(الف) قابل مشاهده است. این لغزش ازنوع لغزش های حلقوی دررسوبات واریزه ای کناره راست مخزن می باشد. موقعیت این دوتوده نسبت به محورسد، درشکل(۹) دیده می شود.



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



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



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

کلیه لغزشهای صورت گرفته در ساختگاه این سد با توجه به لیتولوژی مارنی آن(سبز رنگ) در تشکیلات قم میباشد که توسط واریزههایی با ضخامتهای مختلف پوشیده شدهاند. مارنها سنگهای ریزدانه با نفوذپذیری پائین میباشند که به لحاظ داشتن کانیهای رسی فراوان قابلیت روان شدگی و لغزش را در شرایط مختلف دارا میباشند[۲]. بر اساس نقشه های سه بعدی در دسترس از توپوگرافی ساختگاه سد، توده واقع برساحل 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)

جدول(۱) : مشخصات توده های لغزشی محتمل ساختگاه سد ماکو بر اساس مطالعات زمین شناختی ساختگاه

سئاريو	طول توده در امتداد شیب B(m)	حداکثر ضخامت توده T(m)	چگالی نسبی تودہ γ	فاصله عمودی توده از سطح آب(موقعیت اولیه توده) d(m)	شیب بستر لغزشی α(deg)
N	٨٠	۱۵	١/٩	- 1 ۵	۳.
۲	۶.	۱٠	١/٩	۵	٣٢

### 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[۸۸]، ۵ متر و گام زمانی ۰۰۰۵ ثانیه انتخاب می شوند. پس از مش بندی، تراز نرمال آب برابر ۱٦٨٠ متر به برنامه داده می شود و برنامه به طور هوشمند، با توجه به نقشه توپوگرافی وسعت دریاچه را نهایت پس از اصلاح مرزهای محاسباتی را تعیین می کند. در واگرایی برنامه، مش بندی مخزن مطابق شکل(۱۱)، توسط برنامه ایجاد می شود.



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

تاثیر 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 (2002).Grilli et al [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 ۲/۰ 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

این امواج نسبت به توده ها، برای هر دو سناریو در شکل(۱٤) مشاهده می شود. در این شکل ها η<sub>max</sub> حداکثر بزرگی مثبت موج ضربه ای و η<sub>min</sub> حداکثر بزرگی منفی موج ضربه ای را نشان می دهند.

### ۶–۲– میزان بالاروی از کناره ها

در مدل عددیLS3D 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:



شکل(۱۲) : نتایج شبیه سازی موج ضربه ای ناشی از لغزش توده۱ سد ماکو، الف)میدان نزدیک و ب) میدان دور



شکل(۱۳) : نتایج شبیه سازی موج ضربه ای ناشی از لغزش توده۲ 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 وH 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(۱۰) نشان داده شده است، به همراه شیب کناره در جدول(۲) مشاهده می شود. در نام گذاری گیج ها، عدد اول شماره توده لغزشی محتملی است



شکل(۱۵) : موقعیت گیج های محاسبه مقادیر بالاروی در سواحل راست و چپ مخزن سد ماکو که موج ضربه ای از فرووریزش آن ناشی شده است و عـدد دوم شـماره گیج است. مشـاهده مـی شـود کـه در

مجاورت توده ها ارتفاع بالاروی تا ۳۰ متر نیز می رسد.

بنابراین در صورت وقوع زمین لغـزش سـطح وسـیعی از مناطق ساحلی مخزن از آب پوشیده خواهد شد.

# ۶–۳– امواج در مجاورت بدنه سد و تخمین ح<del>ب</del>م روگذری از سد

تراز تاج سد ماکو ۱٦٩٠ و تراز نرمال آب ۱٦٨٠ متر می باشد. بنابراین اختلاف تراز تاج سد تا سطح نرمال آب که مجموع ارتفاع آزاد(٩متر) و ارتفاع منظور شده برای امواج ناشی از باد و زلزله(١ متر) است، ١٠ 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.

		-	-				
	مشخصات مخزن			ج ها			
شمارہ گر <b>ہ</b>	فاصله از محار	عمق	شيب	بزرگی مثبت	بزرگی منفی	ارتفاع موج در	ارتفاع
	لغزش	متوسط	کنارہ	موج	موج	مجاورت كناره	بالاروى
	$X_p(m)$	ho(m)	β(°)	$a_c(m)$	$a_t(m)$	H(m)	R(m)
11	٧٠	٥.	۲۲	۲/۱۹	0/V1	٧/٩	۲۲/۲
17	٩.	٥٠	٣٥	١/٣٥	٤/٠٧	0/27	۱٠/٥
١٣	۱٦٨	٥٠	٤٨	١/٧٥	٤/٢٣	٥/٩٨	٩/٥
١٤	۲۸۰	7.	٢٥	۲/٤٢	٤/٥٦	٦/٩٨	١٧
21	9.	٥.	۲.	٤/٧	٥/٢٢	٩/٩	Ψ·/V
77	١	0.	٧٠	٣/٨	۲/٦	٦/٣٨	٦/٥
۲۳	180	٥.	٦٥	٤/٢٥	۲/٥	٦/٧٤	V/A
78	720	0.	٢٥	٥/٦٢	۲/٩	٨/٥	77

جدول۲- مقادیر بالاروی موج ار کناره های مخزن سد ماکو

تراز سرریز ۱٦۸۵ متر می باشد. بنابراین جهت تخمین سیل محتمل دو حالت بهترین(تراز آب ۱٦٨٠ متر) و بدترین (تراز آب ۱٦٨٥ متر) وضعیت در نظر گرفته می شود. برای محاسبه حجم آب عبوری از سد، از رابطه زیر استفاده می شود: V = b [ndt

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

**مجله مهندسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی / سال اول/ پیش شماره سه/زمستان ۱۳۸۷** 

سری زمانی موج رسیده به بدنه سد برای سناریوی اول و دوم در شکل(۱۲) دیده می شود. حداکثر ارتفاع موج رسیده به سد برای این دو سناریو به ترتیب ۷/۸ متر و ٥/٨ 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 ٤ متر، برای سناریوی اول حدود ۳ متر و برای سناریوی دوم ٤ متر از ارتفاع موج

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



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 خطرساز

سرريز)،	آب(تراز	تراز	حداكثر	شرايط	در	اينكه	مگر	نیست،
						دهد.	، رخ	لغزشى

## γ– خلاصه نتايج

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 عددیLS3D 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(۱٦٨٠ 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(۱٦٨٥ 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 ۸۸ متر می رسد، احتمال وارد آمدن خسارت به تاسیسات ساحلی و سازه های هیدرولیکی مجاور سد و حتی خود بدنه وجود دارد.

شماره سناريم	حجم توده افزنده	فاصله تقریبی تا	ارتفاع موج ضربه ای	حجم آب عبوری از روی سد در بدترین	حجم آب عبوری از روی سد در بهترین	حداکثر ارتفاع آب روی تاج	حداقل ارتفاع آب روی تاج
للتاريق	عرعه	محور سد	اول	شرايط	شرايط	سىد	سىك
	V <sub>s</sub> (mm3)	D(m)	H <sub>max</sub> (m)	V <sub>max</sub> (m3)	V <sub>min</sub> (m3)	h <sub>max</sub> (m)	h <sub>min</sub> (m)
١	۰/٦	۳۷٥	١٢	17	•	٣	•
۲	·/\o	۲۳۰	١٨	7	•	٤	•

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

### ۸– فہرست علائم

a<sub>0</sub>: دامنه موج ضربه ای B1 : یک عدد اسکالر B : طول توده لغزنده در امتداد شیب

b : طول بدنه سد C<sub>m</sub> : ضریب جرم افزوده C<sub>d</sub> : ضریب نیروی درگ b : عمق اولیه غوطه وری توده g : شتاب ثقل

H : ارتفاع موج h : ارتفاع کل آب با فرض متحرک بودن سىتر (h(x,y,z)) h<sub>0</sub> : عمق آب آرام در مخزن ا : طول موج  $\mathsf{l}_0$ P : فشار سىدال R : ارتفاع بالاروى موج R.F : ضريب بازتاب از ديواره S : موقعیت مرکز ثقل توده در امتداد شیب S<sub>0</sub> : طول مشخصه T : ضخامت توده لغزنده t : زمان t<sub>0</sub> : زمان مشخصه u : بردار سرعت در دو راستای مسطحاتی y و x ut : سرعت نهائي تودہ لغزندہ زیرسطحی V : حجم آب عبوری از بدنه سد w : سرعت در راستای قائم Z α : شتاب برخورد توده فوق سطحی به سطح آب α0 : شتاب اوليه توده لغزنده زيرسطح، β: زاویه شیب کناره مخزن γ : چگالی نسبی توده لغزنده ع : شاخص نشانگر رفتار غیرخطی موج ζ : نوسانات سطح آب نسبت به تراز نرمال η: ارتفاع سطح آب نسبت به تراز نرمال η<sub>max</sub> : حداکثر بزرگی مثبت موج بزرگی منفی موج : η<sub>min</sub>  $\theta$  : زاویه شیب لغزش µ : شاخص يراكنش موج vs : سرعت برخورد توده فوق سطحی به سطح آب P<sub>s</sub> : حگالی توده لغزنده ρ<sub>w</sub> : چگالی آب ∆x : گام مکانی جهت مش بندی محدوده محاسباتی در راستای مسطحاتی x ∆y : گام مکانی جهت مش بندی محدوده محاسباتی در راستای مسطحاتی y

**مجله مهندسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی / سال اول/ پیش شماره سه/زمستان ۱۳۸۷** 

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

### ۹– مراجع

[٣]

[٤]

[٦]

[V]

[٩]

- اوزارت نیرو، سازمان آب منطقه ای آذربایجان، "مطالعات امکان یابی رودخانه های مرزی ایران و ترکیه"، شبکه آبیاری و زهکشی دشت بازرگان
- [۲] مهندسین مشاور مهاب قدس، "گزارش نهایی مطالعات تفصیلی هیدرولیک، زمین شناسی و لرزه شناسی ساختگاه سد ماکو"
- 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, March2008, XVIII(3): 1-25

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.

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.

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.

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

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

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

Lynett, P. and Liu, P.L. (2002). "A Numerical [12] Study of Submarine-Landslide-Generated Waves and Run-up", Philosophical Trans. Royal society, London, U.K.A458, pp 2885-2910.

Najafi-Jilani, A. and Ataie-Ashtiani, B.(2007), [10] "Estimation of Near-Field Characteristics of Tsunami Generation by Submarine Landslide", Ocean Engineering (2007), doi:10.1016/j.oceaneng.2007.11.006

Semenza, E. (200). : La storia del Vajont, [17] raccontata dal geologo che ha scoperto la frana., Tecomproject, Ferrara, 2002.

Synolakis C. E. (1987). "The run-up of [\V] solitary waves." Journal of Fluid Mechanics, vol.185, pp 523-545.

Watts, F. and Grilli, S.T. (2003), "Underwater [1A] Landslide Shape, Motion, Deformation, and Generation", Proceedings Of The Thirteenth (2003) International Offshore and Polar Engineering Conference Honolulu, Hawaii, USA, May 25-30

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

Gobbi, M.F., Kirby, J.T., and Wei G., (2000), [11] "A fully nonlinear Boussinesq model for surface waves. II. Extension to O(kh<sup>4</sup>)", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 405, pp 181-210.

- Kirby, J.T., Wei, G., Chen, Q., Kennedy, A.B. [Y1Y] 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
- 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.