

## تولید، پیشروی و بالاروی امواج سونامی ناشی از زمین لغزش زیرسطحی

جلال مفیدی<sup>۱\*</sup>، مریم راهبانی<sup>۲</sup>، اکبر رشیدی ابراهیم حصاری<sup>۳</sup><sup>۱</sup> دانشجوی دکتری فیزیک دریا، دانشگاه هرمزگان؛ jalal.mofidi@yahoo.com<sup>۲</sup> استادیار گروه فیزیک دریا، دانشکده علوم جوی و اقیانوسی، دانشگاه هرمزگان؛ maryamrahbani@yahoo.com<sup>۳</sup> استادیار گروه فیزیک دریا، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور؛ akbarrashidi@gmail.com

## چکیده

در این مقاله مکانیزم تولید، پیشروی و بالاروی امواج سونامی ناشی از زمین لغزش زیرسطحی به صورت دو بعدی مورد مطالعه قرار گرفته است. با استفاده از یک روش عددی کاملاً لاگرانژی مبتنی بر ذرات و بدون شبکه‌بندی با نام روش هیدرودینامیک ذرات هموار تراکم‌ناپذیر، معادلات ناویر-استوکس که معادلات حاکم بر جریان‌ها با سطح آزاد هستند بوسیله یک روش پیش‌بینی-تصحیح حل شده‌اند. مقایسه پروفیل موج بدست آمده با داده‌های آزمایشگاهی و خروجی‌های مدل عددی Nasa-Vof حاکی از آن است که دامنه موج محاسبه شده توسط این روش اختلافی کمتر از ۵ سانتیمتر با داده‌های آزمایشگاهی در تمامی زمان‌ها دارد و با دقت بالاتری نوسانات سطح آب و میزان بالاروی بروی ساحل را تا زمان ۳ ثانیه شبیه‌سازی می‌کند.

## اطلاعات مقاله

ناریخچه مقاله:

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۲/۱۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۳/۲۳

کلمات کلیدی:

سونامی

زمین لغزش زیرسطحی

مدل‌سازی عددی

هیدرودینامیک ذرات هموار تراکم‌ناپذیر

## Generation, Propagation and Run-up of Tsunami Waves Crated by Submarine Landslide

Jalal Mofidi<sup>1\*</sup>, Maryam Rahbani<sup>2</sup>, Akbar Rashidi Ebrahim Hesari<sup>3</sup><sup>1</sup> Ph.D Candidate in Physical Oceanography, Hormozgan University, Bandar Abbas, Iran; jalal.mofidi@yahoo.com<sup>2</sup> Faculty of Marine Science and Technology, Hormozgan University, Bandar Abbas, Iran; maryamrahbani@yahoo.com<sup>3</sup> Faculty Member of Physical Oceanography, Tarbiat Modares University, Noor; akbarrashidi@gmail.com

## ARTICLE INFO

## Article History:

Received: 2 May. 2016

Accepted: 13 May. 2017

## Keywords:

Tsunami

Submarine Landslide

Numerical Modeling

Incompressible Smoothed Particle

- Hydrodynamics

## ABSTRACT

In this study generation, propagation and run-up of tsunami waves caused by submerged landslide are studied in two dimensions. The governing equations, Navier-Stokes equations, are solved in a Lagrangian form using a mesh-less numerical method by the name of Incompressible Smoothed particle hydrodynamics with a prediction-correction step. The Comparison of the result of this study with experimental data indicates that the deviations between the wave amplitudes are less than 5 cm for every different time steps and also, this model simulated run up and Water surface fluctuations more accurately against the Nasa-Vof until to 3 seconds.

## ۱ - مقدمه

سونامی ناشی از زمین لغزش زیرسطحی خطرناکترین نوع سونامی برای بسیاری از مناطق ساحلی می‌باشد. زمین لغزش دومین منبع مهم در تولید سونامی پس از زلزله می‌باشد. این نوع از سونامی‌ها اکثراً بر روی شیب قاره رخ می‌دهند و به علت نزدیکی مکان وقوع

این پدیده به سواحل مدت زمان کوتاهی برای اطلاع‌رسانی و تخلیه ساکنین باقی می‌ماند. دامنه سونامی ناشی از زلزله به بزرگی زمین لرزه ارتباط مستقیم دارد ولی در سونامی ناشی از زمین لغزش دامنه تنها به جابجایی عمودی حرکت لغزنده محدود شده است و

زمین لغزش ایجاد شده بوسیله یک زلزله متوسط نیز می تواند عامل ایجاد سونامی بسیار مخرب باشد [۱، ۲ و ۳].

خطر سونامی حاصل از زمین لغزش به مقیاس، موقعیت، نوع و فرآیندهای آن بستگی دارد. حتی یک زمین لغزش کوچک زیرسطحی وقتی در منطقه ساحلی رخ می دهد می تواند بسیار خطرناک باشد. برای مثال سونامی ناشی از زمین لغزش سال ۱۹۹۶ در سواحل Finneidfjord نروژ [۴] و همچنین سونامی ایجاد شده در سال ۱۹۲۹ سواحل Grand Banks بوسیله زمین لغزش زیرسطحی با حجم کم در ناحیه ساحلی ایجاد شده و خسارات زیادی را به سواحل مذکور وارد آورد [۵].

حتی سواحلی که مصون از وقوع سونامی ناشی از زلزله می باشند ممکن است تحت تاثیر زمین لغزش و سونامی ناشی از آن قرار بگیرند، برای مثال در سواحل شمالی کشور با توجه به عمق کم آب در اکثر مناطق، عرض کم دریای خزر و عدم اتصال به اقیانوس ها وقوع سونامی ناشی از زلزله در آن غیر محتمل می باشد ولی با توجه به شیب بالای بستر در بخش جنوبی دریای خزر احتمال وقوع زمین لغزش و سونامی ناشی از آن، این سواحل را نیز تهدید می کند.

سواحل جنوبی کشور در مجاورت دریای عمان نیز با توجه به اتصال با اقیانوس هند و همچنین شیب بستر و جنس خاک، علاوه بر سونامی حاصل از زلزله در معرض زمین لغزش و سونامی ناشی از آن قرار دارند. مطالعات اخیر نشان می دهد که با توجه به فاصله زمانی بین زمین لرزه و امواج سونامی ایجاد شده در بنادر جنوب شرقی ایران و مجاور آن در پاکستان در هنگام وقوع سونامی سال ۱۹۴۵، زمین لغزش در منطقه شیب قاره عامل اصلی سونامی این منطقه بوده است [۶]. این سونامی دومین سونامی مخرب بعد از سونامی سال ۲۰۰۴ در اقیانوس هند بوده و در حدود ۴۰۰۰ نفر کشته در کشورهای هند، پاکستان، ایران و عمان برجای نهاده است [۷].

با توجه به تعداد زیاد سونامی های ناشی از زلزله، تولید و پیشروی این امواج در چهار دهه گذشته مورد مطالعات زیادی قرار گرفته و مکانیزیم های آن بخوبی درک شده است ولی علل و تاثیرات امواج سونامی ناشی از زمین لغزش زیرسطحی کمتر مورد توجه قرار گرفته و کمتر شناخته شده می باشد. مطالعات انجام شده در ارتباط با امواج سونامی ناشی از زمین لغزش را می توان به دو بخش تحقیقات آزمایشگاهی و عددی تقسیم بندی کرد. در زمینه مطالعات آزمایشگاهی می توان به کارهای Wiegell [۸]، Iwasaki [۹]، Heinrich [۱۰] و Watts [۲] اشاره کرد. در این تحقیقات حرکت توده صلب مستغرق در راستای سطح شیب دار منتهی به یک ناحیه با عمق یکنواخت و امواج سطحی ناشی از آن مورد بررسی قرار گرفته است. در زمینه مدل سازی عددی این پدیده، نخستین

رویکرد با ارائه معادلات خطی حاکم بر حرکت امواج آب های کم عمق توسط Raney و همکارانش [۱۱] ارائه شد. این محققان یک مدل عددی بر اساس این معادلات توسعه داده و از آن برای شبیه سازی زمین لغزشی که در دریاچه Libby در ایالات متحده رخ داده بود، استفاده کردند. نتایج این مدل در برخی نقاط تبعیت کلی از مشاهدات میدانی نشان می داد.

از روش I-SPH تا کنون برای مطالعه و بررسی مسائل مختلفی بهره گرفته شد که می توان به مواردی از جمله شکست سد [۱۲]، پیشروی امواج تنها بروی شیب ملایم [۱۳]، برخورد امواج با یک سازه بلند [۱۴] و بالاروی امواج بروی دک کشتی اشاره کرد [۱۵]. همچنین در مطالعه امواج ناشی از زمین لغزش از این روش توسط De Girolamo و همکاران [۱۶]، Panizo و Dalrymple [۱۷]، Panizo و همکاران [۱۸]، Gallati و Braschi [۱۹]، Monaghan و همکاران [۲۰] و عطایی آشتیانی و شوبیری [۲۱] استفاده شد.

مطالعه آزمایشگاهی Heinrich [۱۰] در یک کانال به طول ۲۰ متر، عرض ۵۵/۵ متر و عمق ۱/۵ متر در آزمایشگاه بین المللی هیدرولیک Chatou فرانسه انجام گرفت. در این آزمایشات امواج بوسیله یک گوه مثلثی به ابعاد ۵/۵ متر در ۵/۵ متر و وزن ۱۴۰ کیلوگرم و چگالی ۲۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب که روی سطح شیب دار با زاویه ۴۵ درجه بصورت آزادانه می لغزد تولید شده است. برای مطالعه بالاروی امواج بروی سواحل یک سطح شیب دار ثانویه با شیب ۱۵ درجه که محل تقاطع آن با سطح شیب دار بعدی در فاصله یک متری از شروع کانال قرار دارد، در نظر گرفته شد. سطح بالایی توده لغزنده در حالت اولیه به صورت موازی و ۱ سانتیمتر در زیر سطح ساکن آب قرار داده شد. از نتایج این مطالعه برای صحت سنجی<sup>۱</sup> مدل عددی Nasa-Vof استفاده شد.

معادلات حاکم بر امواج سونامی ناشی از زمین لغزش عمدتاً غیرخطی است و همچنین دامنه محاسباتی شکلی غیرهندسی و متغیر دارد، لذا استفاده از روش های تحلیلی و روش های اویلری با شبکه بندی ثابت برای مطالعه این گونه از مسائل بسیار مشکل می باشد. روش SPH یک روش کاملاً لاگرانژی است که در آن احتیاج به هیچ نوع شبکه بندی نمی باشد. این روش برای اولین بار در زمینه مسائل اختر فیزیکی به کار گرفته شد [۲۳]. علاوه بر مسائل اختر فیزیکی برای اولین بار Monaghan [۲۴] از این روش برای تحلیل جریان های با سطح آزاد استفاده کرد و نتایج قابل قبولی کسب کرد. به طور کلی دو نوع روش SPH تا به حال معرفی شده است [۲۵]. در نوع اول به سیال از این دید نگریسته می شود که سیالات واقعی مانند آب، تراکم پذیر هستند (C-SPH)<sup>۴</sup>. در روش دوم SPH سیالات کاملاً تراکم ناپذیر فرض می شوند و با اعمال این قید و با یک روش پیش بینی - تصحیح

معادلات ناویر- استوکس حل می‌شوند [۲۶].

$\rho_0$  تفاوت خواهد داشت. در مرحله دوم که مرحله تصحیح می‌باشد ترم فشار برای اعمال تراکم‌ناپذیری در محاسبات استفاده می‌شود.

$$\Delta \bar{u}_{**} = \frac{-1}{\rho_*} \nabla P_{t+1} \Delta t \quad (۶)$$

$$\bar{u}_{t+1} = \bar{u}_* + \Delta \bar{u}_{**} \quad (۷)$$

$\Delta \bar{u}_{**}$  تغییرات سرعت ذرات در طول مرحله تصحیح می‌باشد، فشار ذرات در زمان  $t+1$  و  $\bar{u}_{t+1}$  سرعت ذرات در زمان  $t+1$  است. با ترکیب معادلات (۶) و (۱) معادله پواسون فشار به دست می‌آید که می‌توان با حل این معادله، فشار ذرات سیال را به دست آورد.

$$\nabla \cdot \left( \frac{1}{\rho_*} \nabla P_{t+1} \right) = \frac{\rho_0 - \rho_*}{\rho_0 \Delta t^2} \quad (۸)$$

در نهایت موقعیت جدید ذرات در گام زمانی بعدی با تقریب مرکزی در زمان بدست می‌آید.

$$\bar{r}_{t+1} = \bar{r}_t + \frac{\bar{u}_{t+1} + \bar{u}_t}{2} \Delta t \quad (۹)$$

ایده اساسی در روش SPH درون‌یابی انتگرالی می‌باشد که مقدار کمیت  $A$  در نقطه  $r$  برابر است با [۲۴]:

$$A(r) = \int A(r') W(r-r', h) dr' \quad (۱۰)$$

که در آن  $W$  یک تابع درون‌یابی و  $h$  طول هموارتابع درون‌یابی است. در محاسبات عددی استفاده از معادله (۳) امکان‌پذیر نمی‌باشد و باید با تعداد متناهی از نقاط معادله (۱۰) را تقریب زد [۲۷]:

$$A(r_a) = \sum_b m_b \frac{A_b}{\rho_b} W(|r_a - r_b|, h) \quad (۱۱)$$

که در آن  $b$  شاخص مربوط به ذرات مجاور ذره اصلی  $a$  و  $m$  نشان دهنده جرم و  $\rho$  چگالی آن می‌باشد. تابع درون‌یابی که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته یک تابع درجه ۳ می‌باشد که برای اولین بار توسط Monaghan [۲۴] پیشنهاد شده است. این تابع درون‌یابی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$W(r, h) = \frac{10}{7\pi h^2} \left( 1 - \frac{3}{2} q^2 + \frac{3}{4} q^3 \right) \quad q < 1 \quad (۱۲)$$

$$W(r, h) = \frac{10}{28\pi h^2} (2 - q)^3 \quad 1 < q < 2$$

$$W(r, h) = 0 \quad q > 2$$

$q = r/h$  و  $r$  فاصله بین ذرات می‌باشد.

هدف از این مطالعه شبیه‌سازی امواج سونامی ناشی از زمین لغزش زیرسطحی با استفاده از روش I-SPH و نشان دادن توانایی این روش در مدل‌سازی طولانی مدت پدیدهایی با سطح آزاد پیچیده می‌باشد. در این مقاله مکانیزم‌های تولید، پیشروی و بالاروی امواج سونامی ناشی از زمین لغزش زیرسطحی مورد مطالعه قرار گرفته است. جهت نیل به این اهداف در این مطالعه برای بررسی بالاروی امواج بروی شیب ساحلی از یک شیب ثانویه با زاویه ۱۵ درجه استفاده شد. همچنین با توجه به برخورد امواج با دیواره سمت راست، بازگشت و برهم‌نهی آن با امواج پیشرونده، دامنه امواج پس از برهم‌نهی نسبت به داده‌های آزمایشگاهی افزایش می‌یابد که جهت امکان بررسی پیشروی امواج تا زمان ۳ ثانیه، طول حوضه محاسباتی و تعداد ذرات مساله نسبت به مطالعات قبلی افزایش یافته است. همچنین جهت بررسی صحت عملکرد و دقت مدل، خروجی‌ها با داده‌های آزمایشگاهی و نتایج حاصل از مدل عددی Nasa-Vof [۱۰] در زمان‌های مختلف مورد مقایسه قرار گرفته است.

## ۲- روش کار

معادلات نویراستوکس و پیوستگی معادلات حاکم بر پدیده می‌باشند که به صورت معادلات دیفرانسیلی ذیل بیان می‌شوند:

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} + \nabla \cdot \bar{u} = 0 \quad (۱)$$

$$\frac{d\bar{u}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot \bar{\tau} + \bar{g} \quad (۲)$$

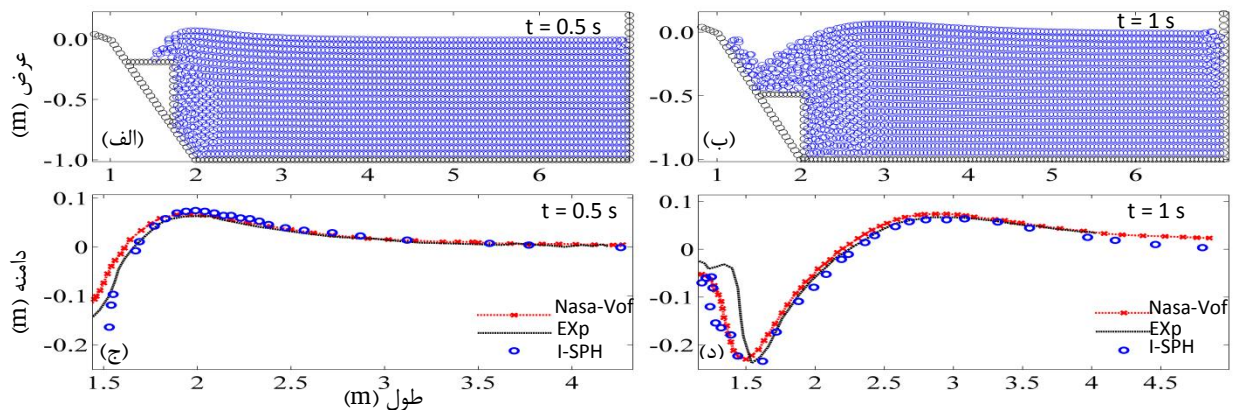
در این معادلات  $\rho$  چگالی، بردار سرعت،  $p$  فشار، تنسور تنش برشی، شتاب ثقل و  $t$  زمان است. محاسبات در روش I-SPH در دو مرحله پیش‌بینی- تصحیح انجام می‌شود [۲۶]. در مرحله پیش‌بینی میدان سرعت بدون در نظر گرفتن ترم گرادیان فشار در معادله مومنتم محاسبه می‌شود:

$$\Delta \bar{u}_* = \left( \bar{g} + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \bar{u} \right) \Delta t \quad (۳)$$

$$\bar{u}_* = \bar{u}_t + \Delta \bar{u}_* \quad (۴)$$

$$\bar{r}_* = \bar{r}_t + \bar{u}_* \Delta t \quad (۵)$$

که  $\bar{u}_t$  و  $\bar{r}_t$  به ترتیب برابر با مقدار سرعت و موقعیت ذرات سیال در زمان فعلی،  $\Delta \bar{u}_*$  مقدار تغییرات سرعت سیال در گام پیش‌بینی و  $\bar{u}_*$  و  $\bar{r}_*$  به ترتیب برابر با مقدار پیش‌بینی شده سرعت و موقعیت ذرات سیال در گام زمانی بعدی و  $\Delta t$  برابر با مقدار گام زمانی است. تراکم‌ناپذیری در این مرحله ارضا نمی‌شود و چگالی سیال  $\rho_*$  که با توجه به موقعیت پیش‌بینی شده ذرات محاسبه شده با چگالی ثابت



شکل ۱ - پروفیل موج حاصل از روش I-SPH (الف) ۰/۵ ثانیه، (ب) ۱ ثانیه و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی و Nasa-Vof (در ج) ۰/۵ ثانیه و (د) ۱ ثانیه.

### ۳-۱- تولید

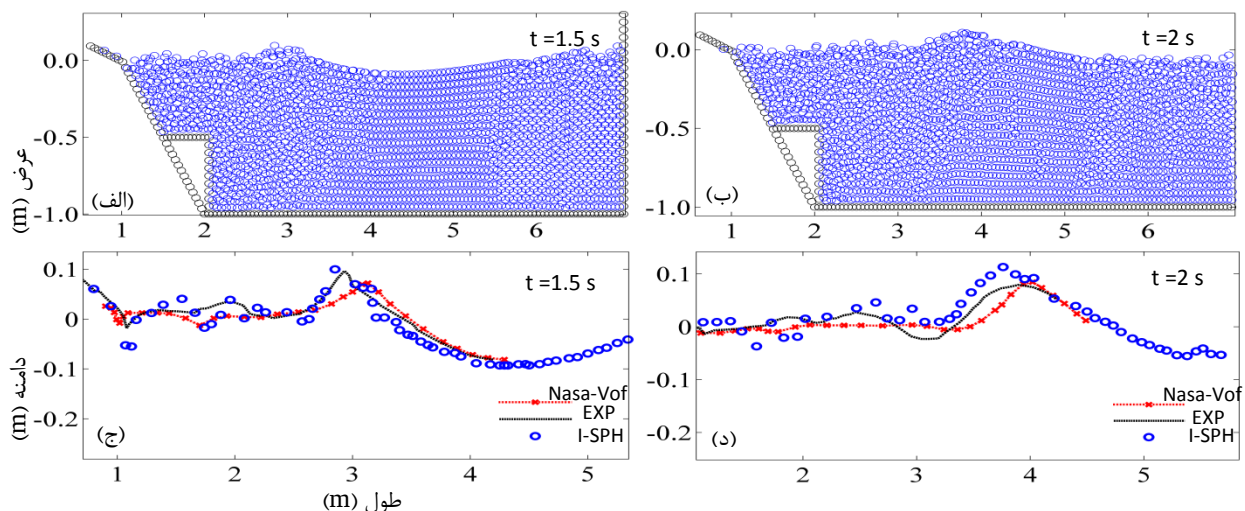
برای مطالعه مکانیزم تولید امواج سونامی ناشی از زمین لغزش زیرسطحی، پروفیل موج بدست آمده از روش I-SPH در زمان‌های ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵ و ۳ ثانیه با داده‌های آزمایشگاهی و نتایج حاصل از روش Nasa-Vof مقایسه شده و در شکل‌های ۱، ۲ و ۳ نمایش داده شده است.

همان‌طور که در شکل ۱ (الف) نشان داده شده است پس از شروع حرکت توده لغزنده یک قله در سطح آزاد آب ایجاد می‌شود که دامنه این قله در زمان نیم ثانیه ۷/۲ سانتیمتر می‌باشد. در ادامه در زمان یک ثانیه گوه به انتهای سطح شیب‌دار رسیده و حرکتش متوقف می‌شود (شکل ۲ ب). در زمان یک ثانیه در روی سطح آب یک قله پیش رونده با دامنه مثبت ۶/۸ سانتیمتر و یک گلو با دامنه منفی ۲۵/۹ سانتیمتر بوجود آمده است. از شروع حرکت تا زمان یک ثانیه بزرگترین دامنه به اندازه ۷/۷ سانتیمتر در زمان ۰/۶ ثانیه ایجاد می‌شود. مقایسه پروفیل موج محاسبه شده با داده‌های آزمایشگاهی و نتایج مدل Nasa-Vof در شکل ۲ (ج و د) حاکی از دقت بالای هر دو مدل در شبیه‌سازی موج ایجاد شده پس از شروع حرکت توده لغزنده در آب می‌باشد.

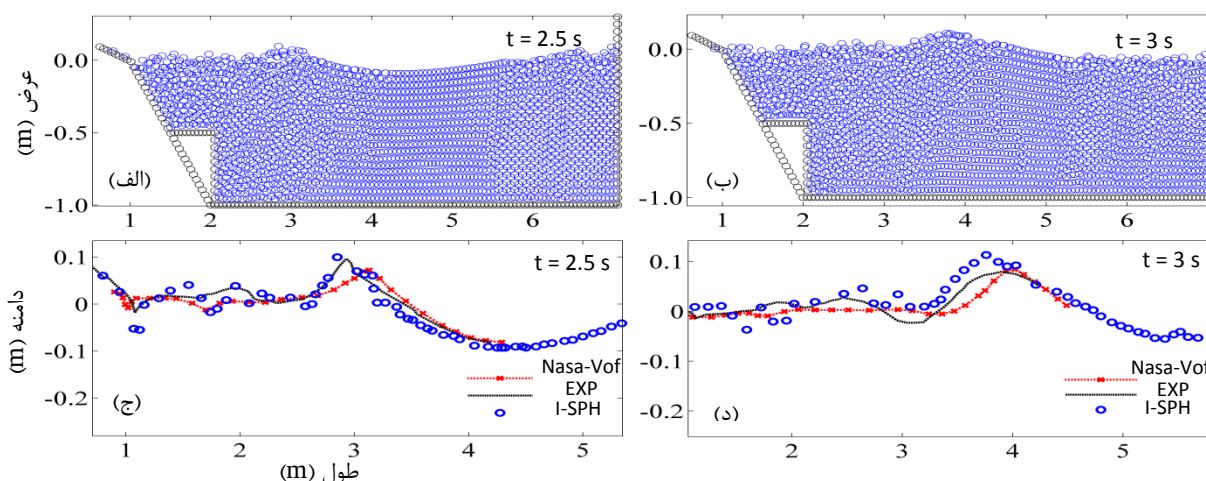
در این تحقیق معادلات حاکم بر امواج سونامی ناشی از زمین لغزش زیرسطحی با استفاده از روش عددی I-SPH با حوضه محاسباتی مانند مطالعه Heinrich (۱۹۹۲) گسسته‌سازی و حل شده است، تنها تفاوت در طول کانال می‌باشد که با توجه به محدودیت تعریف تعداد ذرات بالا در نرم افزار متلب و همچنین کاهش دقت محاسبات در صورت لحاظ مقدار زیاد برای فاصله اولیه ذرات، ۷ متر در نظر گرفته شده است. در این مطالعه فاصله اولیه بین ذرات ۵ سانتیمتر، گام زمانی ۰/۰۵ ثانیه و تعداد کل ذرات ۲۵۱۳ ذره می‌باشد که ۳۷۰ ذره به عنوان ذرات مرز جامد و مجازی و تعداد ۲۱۴۴ ذره به عنوان ذرات سیال در شبیه‌سازی لحاظ گردیده است.

### ۳- نتایج

پروفیل موج سونامی حاصل از زمین لغزش زیرسطحی محاسبه شده توسط روش عددی I-SPH در زمان‌های مختلف با داده‌های آزمایشگاهی و نتایج حاصل از روش عددی Nasa-Vof مقایسه شده است. برای مطالعه مکانیزم تولید، پیشروی و بالاروی امواج محور افقی مساله به سه ناحیه تولید از ۱ تا ۴ متر، بالاروی کوچکتر از ۱ متر و پیشروی ۳ تا ۵ متر تقسیم‌بندی شده است.

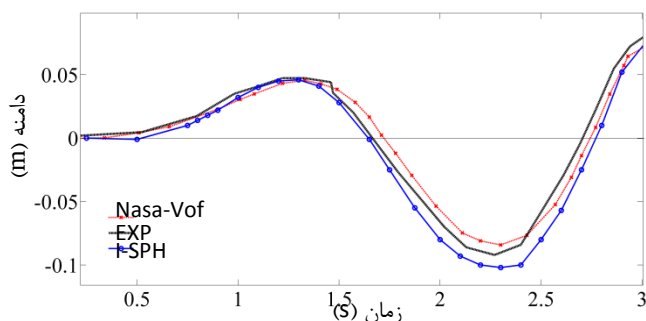


شکل ۲ - پروفیل موج حاصل از روش I-SPH (الف) ۱/۵ ثانیه، (ب) ۲ ثانیه و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی و Nasa-Vof (در ج) ۰/۵ ثانیه و (د) ۱ ثانیه



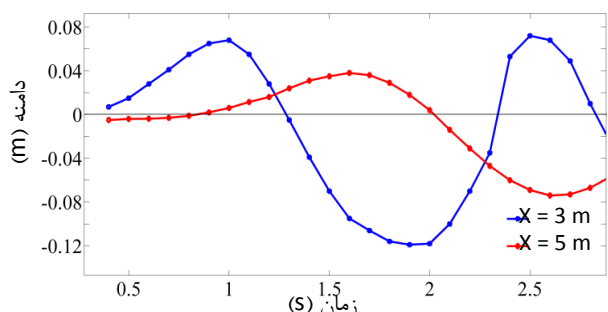
شکل ۳ - پرفیل موج حاصل از روش I-SPH در زمان الف) ۲/۵ ثانیه، ب) ۳ ثانیه و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی و Nasa-Vof ج) ۲/۵ ثانیه و د) ۳ ثانیه.

این نقطه می‌رسد. قله بعدی که به این مکان می‌رسد دارای دامنه‌ای در حد دامنه گلی قبلی می‌باشد.



شکل ۴ - مقایسه بین سری زمانی دامنه موج بدست آمده توسط روش‌های عددی I-SPH و Nasa-Vof با داده‌های آزمایشگاهی در مکان ۴ متر.

مقایسه سری زمانی دامنه امواج سونامی ناشی از زمین لغزش زیرسطحی در مکان‌های ۳ و ۵ متر حاکی از کاهش محسوس دامنه با پیشروی به سمت ساحل دور دست می‌باشد (شکل ۵). دامنه قله مثبت پس از طی مسافت ۲ متر از ۶/۸ به ۳/۸ سانتیمتر کاهش می‌یابد. سرعت این قله به میزان ۳/۳ متر بر ثانیه می‌باشد که نشان می‌دهد این موج جزو طبقه‌بندی امواج بلند بوده که سرعت فازی آن متناسب با رابطه  $c = \sqrt{gh}$  می‌باشد.



شکل ۵ - سری زمانی دامنه موج بدست آمده توسط روش عددی I-SPH در مکان‌های ۳ و ۵ متر.

در شکل ۲ الف) می‌توان دید که در زمان ۱/۵ ثانیه ارتفاع قله مثبت به ۴ سانتیمتر کاهش می‌یابد. مسافت طی شده از ۰/۵ تا ۱/۵ ثانیه تقریباً ۲/۴ متر می‌باشد. در زمان ۲ ثانیه (شکل ۲ ب) اولین قله ایجاد شده به دیواره سمت راست برخورد کرده و تغییر جهت می‌دهد و با موج‌های بعدی تداخل ایجاد می‌کند. بالاروی در دیواره سمت راست در زمان ۱/۵ ثانیه به مقدار منفی ۱۹ سانتیمتر و در زمان ۲ ثانیه به میزان ۶/۴ سانتیمتر می‌رسد.

نتایج حاصل از مقایسه مدل‌ها در شکل ۲ ج و د) نشان می‌دهد که در زمان ۱/۵ ثانیه هر دو مدل دامنه و میزان بالاروی در سواحل را با دقت مطلوبی شبیه‌سازی می‌کنند ولی در زمان ۲ ثانیه موج بدست آمده با روش Nasa-Vof علاوه بر تقدم فاز، دارای خطایی بالاتر از ۱۰ سانتیمتر برای دامنه موج در بعضی از نقاط می‌باشد، در مقابل دامنه موج حاصل از مدل I-SPH در زمان ۲ ثانیه خطایی کمتر از ۵ سانتیمتر را در همه نقاط نشان می‌دهد.

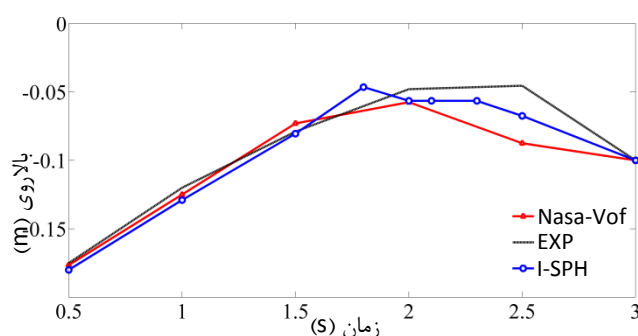
مقایسه پروفیل موج بدست آمده در زمان ۲/۵ و ۳ ثانیه (شکل ۳) نشان می‌دهد که هر دو روش با دقت قابل قبولی امواج سونامی ناشی از زمین لغزش زیرسطحی را شبیه‌سازی نموده‌اند و از پایداری قابل قبولی برای شبیه‌سازی طولانی مدت پدیده‌هایی با سطح آزاد متلاطم برخوردار می‌باشند. همچنین مقایسه نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که دقت محاسبات در روش I-SPH بالاتر از روش Nasa-Vof می‌باشد.

### ۳-۲- مکانیزم پیشروی

سری زمانی دامنه محاسبه شده با روش I-SPH در فاصله ۴ متری از شروع کانال با داده‌های آزمایشگاهی و نتایج روش عددی Nasa-Vof با یکدیگر مقایسه شده‌اند (شکل ۴). اولین قله در زمان ۱/۳ ثانیه به اندازه ۴/۶ سانتیمتر در این نقطه ایجاد می‌شود و پس از گذشت یک ثانیه گلی با دامنه منفی ۱۰/۲ سانتیمتر به

## ۳-۳ - مکانیزم بالاروی

چگونگی بالاروی امواج سونامی حاصل از زمین لغزش زیر سطحی در زمان‌های مختلف با روش I-SPH محاسبه شده و با نتایج مدل عددی Nasa-Vof و داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شده است ( شکل ۶). موج منفی ایجاد شده که حاصل ورتکس آب در بالای توده لغزنده می‌باشد در زمان ۱/۳ ثانیه پس از شروع حرکت توده لغزنده، شروع به بالاروی از سطح شیب دار ۱۵ درجه می‌کند. ماکزیمم بالاروی امواج در زمان ۱/۸ ثانیه به میزان ۱۰/۷ سانتیمتر روی می‌دهد، بیشترین مقدار پیشروی این موج در ساحل به میزان ۳۸/۵ سانتیمتر در زمان ۲/۱ ثانیه روی می‌دهد و پس از آن در زمان ۳ ثانیه امواج شروع به ایجاد پایین‌روی<sup>۵</sup> بروی سطح شیب‌دار ۴۵ درجه می‌کنند. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است مقدار بالاروی محاسبه شده توسط روش I-SPH در تمامی زمان‌ها کمتر از ۵ سانتیمتر با مقادیر آزمایشگاهی اختلاف دارد در حالی که این مقدار در روش Nasa-Vof به ۹ سانتیمتر نیز می‌رسد.



شکل ۶ - مقایسه بالاروی امواج محاسبه شده توسط روش عددی I-SPH با نتایج روش عددی Nasa-Vof و داده‌های آزمایشگاهی.

## ۴-۳ - مقایسه خطای RMS

با مقایسه نتایج حاصل از روش‌های عددی I-SPH و Nasa-Vof با نتایج آزمایشگاهی، خطای حاصل از دو روش بصورت جدول ذیل می‌باشد:

جدول ۱- خطای حاصل از روش‌های عددی I-SPH و Nasa-Vof.

| زمان (ثانیه) | روش I-SPH | روش NASA-VOF |
|--------------|-----------|--------------|
| ۰/۵          | ۰/۰۲۳     | ۰/۰۳۲        |
| ۱            | ۰/۰۶۴     | ۰/۰۶۱        |
| ۱/۵          | ۰/۰۵      | ۰/۰۲۴        |
| ۲            | ۰/۰۳۱     | ۰/۰۸۶        |
| ۲/۵          | ۰/۰۱۵     | ۰/۰۱۷        |
| ۳            | ۰/۰۲۴     | ۰/۰۱۶        |

همانطور که در جدول بالا مشخص می‌باشد کمترین خطا مربوط به روش I-SPH در زمان ۲/۵ ثانیه و بیشترین مقدار خطا در زمان ۲ ثانیه مربوط به روش Nasa-Vof می‌باشد.

## ۴ - نتیجه گیری

در این مقاله امواج سونامی ناشی از زمین لغزش زیرسطحی بوسیله روش عددی لاگرانژی بدون شبکه بندی I-SPH شبیه‌سازی و با داده‌های آزمایشگاهی و خروجی‌های مدل عددی Nasa-Vof تا زمان ۳ ثانیه مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که محاسبات انجام شده توسط مدل مورد استفاده تا زمان‌های طولانی مدت پایدار بوده و از دقت قابل قبولی نیز برخوردار می‌باشد. اختلاف بین دامنه موج محاسبه شده و داده‌های آزمایشگاهی در تمامی زمان‌ها کمتر از ۵ سانتیمتر می‌باشد در حالی که این مقدار در زمان‌هایی که اختلاط در سطح آزاد آب رخ می‌دهد در مدل Nasa-Vof به ۱۰ سانتیمتر می‌رسد، که این امر نشان می‌دهد مدل عددی I-SPH با دقت بالاتری پدیده برخورد موج با دیواره ساحلی و بالاروی از آن را شبیه‌سازی کرده و از قابلیت بالاتری در شبیه‌سازی پدیده‌هایی با سطح آزاد پیچیده نسبت به روش احجام محدود برخوردار است.

## ۶ - کلید واژگان

- 1- Verify
- 2- Nonlinear Eulerian code
- 3- Volume of fluid method
- 4- Compressible Smoothed Particle Hydrodynamic
- 5- Run down

## ۷ - مراجع

- 1- Murty, S., (1979), *Submarine slide-generated water-waves in Kitimat Inlet, British Columbia*, Journal of Geophysics Research, Vol. 84(C12), p. 777-779.
- 2- Watts, P., (1998), *Wave maker curves for tsunamis generated by underwater landslides*, Journal of Waterways, Port, Coast, and Ocean Engineering, Vol. 124 (3), p. 127-137.
- 3- Tappin, R., Watts, P., Mc Murtry, M., Lafoy, Y. and Matsumoto, T., (1998), *The Sissano, Papua New Guinea tsunami of July 1998 – offshore evidence on the source mechanism*, Marine Geol, Vol. 175, p. 1-23.
- 4- Longva, O., Janbu, N., Blikra, L. H. and Boe, R., (2003), *The Finneidfjord Slide: Seafloor Failure and Slide Dynamics. Submarine Mass Movements and Their Consequences*, J Locat and J Mienert, eds, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht Netherlands, p. 531-538.

*method for deck overtopping*, Proceedings of Waves 2001, Reston, VA, ASCE, 1082-1091.

16- De Girolamo, P., Wu, TR., Liu, PLF., Panizzo, A., Bellotti, G. and Di Risio, M., (2006), *Numerical simulation of three dimensional Tsunamis water waves generated by landslides: comparison between physical model results, VOF, SPH and depth-integrated models*, ICCE Conference, San Diego.

17- Panizzo, A. and Dalrymple, RA., (2004), *SPH modelling of underwater landslide generated waves*, ICCE 2004 Conference, Lisbon.

18- Panizzo, A., Cuomo, G. and Dalrymple, RA., (2006), *3D-SPH simulation of landslide generated waves*, ICCE Conference, San Diego.

19- Gallati, M. and Braschi, G., (2003), *SPH simulation of the wave produced by a block falling into a water tank*, Proceedings of International Conference on Fluid Flow Technologies (CMFF'03), Budapest.

20- Monaghan, JJ., Kos, A. and Issa, N., (2003), *Fluid motion generated by impact*, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 129(6), p. 250-259.

21- B, Ataie-Ashtiani. and G, Shobeyri., (2007), *Numerical simulation of landslide impulsive waves by incompressible smoothed particle hydrodynamics*, Int. J. Numer. Meth. Fluids 2008, vol. 56, p. 209-232.

22- Torrey, M. D., Cloutman, L. D., Mjølness, R. C., and Hirt, C. W., (1985), *Nasa-Vof2D: A computer program for incompressible flows with free surfaces*, Report LA-10612-MS, Los Alamos Nat. Lab., Los Alamos, N.M.

23- Lucy LB., (1977), *A numerical approach to the testing of the fission hypothesis*, Astronomical Journal, Vol. 82(12), p. 1013-1024.

24- Monaghan, J.J., (1992), *Smoothed particle hydrodynamics*, Annual Review of Astronomy and Astrophysics, Vol. 30, p. 543-574.

25- Monaghan, J.J., (1994), *Simulating Free Surface Flows with SPH*, Journal of Computational Physics, Vol. 110, p. 399-406

26- Gómez-Gesteira, M. and Dalrymple, R. A., (2004), *Using a three-dimensional smoothed particle hydrodynamics method for wave impact on a tall structure*, Journal of Waterways, Port, Coastal, and Ocean Engineering (ASCE), Vol. 130(2).

5- Fine, I. V., Rabinovich, A. B., Bornhold, B. D., Thomson, R. E. and Kulikov, E. A., (2005), *The Grand Banks Landslide- Generated Tsunami of November 18, 1929: Preliminary Analysis and Numerical Modeling*. Marine Geology, Vol. 203, p. 201-218.

6- Okal, E., Fritz, H., Hamzeh, M. A., Ghasemzadeh, J. and Naderi, M., (2011), *Field survey of the 1945 Makran Tsunami in Southeastern Iran*, Geophysical Research Abstracts, Vol. 13.

7- Pararas-Carayannis, G., (2006), *The potential for tsunami generation along the Makran Subduction Zone in the Northern Arabian Sea, Case study: The earthquake and tsunami of November 28, 1945*, Science of Tsunami Hazard, Vol. 24 (5), p. 358-384.

8- Wiegel, R., (1955), *Laboratory studies of gravity waves generated by the movement of a submarine body*, Transactions-American Geophysical Union, Vol. 36(5), p. 759-774.

9- Iwasaki, S., (1982), *Experimental study of a tsunami generated by a horizontal motion of a sloping bottom*, Bulletin of the Earthquake Research Institute, Vol. 57, p. 239-262.

10- Heinrich, P., (1992), *Nonlinear water waves generated by submarine and aerial landslides*, Journal of Waterways, Port, Coastal, and Ocean Engineering, Vol. 118(3), p. 249-266.

11- Raney, D.C. and Butler, H.L., (1976), *Landslide generated water wave model*, J. Hydraulics division ASCE, Vol. 102(9), PP. 1269-1282.

12- Shao, S.D. and Lo, M., (2003), *Incompressible SPH Method for Simulating Newtonian and Non-Newtonian Flows with a Free Surface*, Advances in Water Resources, Vol. 26(7), p. 787-800.

13- Lo, EYM. and Shao, S., (2002), *Simulation of near-shore solitary wave mechanics by an incompressible SPH method*, Journal of Applied Ocean Research, Vol. 24, p. 275-286.

14- Gómez-Gesteira, M. and Dalrymple, RA., (2004), *Using a three-dimensional smoothed particle hydrodynamics method for wave impact on a tall structure*, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering (ASCE), 130(2).

15- Dalrymple, RA., Knio, O., Cox, DT., Gesteira, M. and Zou, S., (2002), *Using a Lagrangian particle*