یادداشت فنی

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

جلال مفیدی'*، مریم راهبانی۲، اکبر رشیدی ابراهیم حصاری^۳

دانشجوی دکتری فیزیک دریا، دانشگاه هرمزگان؛ jalal.mofidi@yahoo.com

^۲ استادیار گروه فیزیک دریا، دانشکده علوم جوی و اقیانوسی، دانشگاه هرمزگان؛ maryamrahbani@yahoo.com

^۳ استادیار گروه فیزیک دریا، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور؛ akbarrashidi@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیدہ
<i>ناریخچه مقاله:</i> تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۲/۱۳ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۳/۲۳	در این مقاله مکانیزم تولید، پیشروی و بالاروی امواج سونامی ناشی از زمین لغزش زیرسطحی بـه صـورت دو بعدی مورد مطالعه قرار گرفته است. با استفاده از یک روش عددی کاملا لاگرانـژی مبتنـی بـر ذرات و بدون شبکهبندی با نام روش هیدرودینامیک ذرات هموار تـراکمناپـذیر، معـادلات نـاویر- اسـتوکس کـه معادلات حاکم بر جریانات با سطح آزاد هستند بوسیله یک روش پیش.بینی- تصحیح حل شدهاند. مقایسه
<i>کلمات کلیدی:</i> سونامی زمین لغزش زیر سطحی	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 زمان ها دارد و با دقت بالاتری نوسانات سطح آب و میزان بالا وی بروی ساحل را تیا زمان ۳
ر یک را ریز مدلسازی عددی هیدرودینامیک ذرات هموار تراکم نایذیر	تار میلی (ماری می کند. ثانیه شبیه سازی می کند.

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

Jalal Mofidi¹*, Maryam Rahbani², Akbar Rashidi Ebrahim Hesari³

¹ Ph.D Candidate in Physical Oceanography, Hormozgan University, Bandar Abbas, Iran; jalal.mofidi@yahoo.com
 ² Faculty of Marine Science and Technology, Hormozgan University, Bandar Abbas, Iran; maryamrahbani@yahoo.com
 ³ 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.

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

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 اکثرا بر روی شیب قاره رخ میدهند و به علت نزدیکی مکان وقوع

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 لغـزش بـه مقیـاس، موقعیـت، نـوع و فرآینـدهای آن بسـتگی دارد. حتـی یـک زمـین لغـزش کوچـک زیرسطحی وقتی در منطقـه سـاحلی رخ مـیهـد مـیتوانـد بسـیار خطرناک باشد. برای مثال سونامی ناشی از زمین لغزش سال ۱۹۹۶ در سواحل Finneidfjord نروژ [۴] و همچنین سونامی ایجاد شده در سـال ۱۹۲۹ سـواحل Finne Banks بوسـیله زمـین لغـزش زیرسطحی با حجم کم در ناحیـه سـاحلی ایجـاد شـده و خسـارات زیادی را به سواحل مذکور وارد آورد [۵].

حتی سواحلی که مصون از وقوع سونامی ناشی از زلزلـه مـیباشـند ممکن است تحت تاثیر زمـین لغـزش و سـونامی ناشـی از آن قـرار بگیرند، برای مثال در سواحل شمالی کشور با توجه به عمق کم آب در اکثر مناطق، عرض کم دریای خزر و عدم اتصال بـه اقیـانوسهـا وقوع سونامی ناشی از زلزله در آن غیر محتمل میباشد ولی با توجه به شیب بالای بستر در بخش جنـوبی دریـای خـزر احتمـال وقـوع زمین لغـزش و سـونامی ناشـی از آن، ایـن سـواحل را نیـز تهدیـد میکند.

سواحل جنوبی کشور در مجاورت دریای عمان نیز با توجه به اتصال با اقیانوس هند و همچنین شیب بستر و جنس خاک، علاوه برسونامی حاصل از زلزله در معرض زمین لغزش و سونامی ناشی از آن قرار دارند. مطالعات اخیر نشان میدهد 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 منطقه بوده است [۶]. این سونامی دومین سونامی مخرب بعد از سونامی سال ۲۰۰۴ در اقیانوس هند بوده و در حدود ۲۰۰۴ نفر کشته در کشورهای هند، پاکستان، ایران و عمان برجای نهاده است [۷].

با توجه به تعداد زیاد سونامیهای ناشی از زلزله، تولید و پیشروی این امواج در چهار دهه گذشته مورد مطالعات زیادی قرار گرفته و مکانیزیمهای 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 میباشد. مطالعات انجام شده در ارتباط با امواج سونامی ناشی از زمین لغزش را میتوان به دو بخش آزمایشگاهی و عددی تقسیم بندی کرد. در زمینه مطالعات آزمایشگاهی میتوان به کارهای Wiegel [۸]، Iwasaki [۹]، آوده صلب مستغرق در راستای سطح شیبدار 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 آبهای کم عمق توسط Raney و همکارانش [۱۱] ارائه شد. این محققان یک مدل عددی بر اساس این معادلات توسعه داده و از آن برای شبیهسازی 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 میداد.

از روش I-SPH تا کنون برای مطالعه و بررسی مسائل مختلفی بهره گرفته شد که میتوان 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 ممچنین در مطالعه امواج ناشی از زمین لغزش از این روش توسط Panizo یا De Girolamo و همکاران [۱۶]، Gallati [۱۸]، Gallati اران [۱۸]، Gallati و شوبیری [۱۲]، Monaghan استفاده شد.

مطالعه آزمایشگاهی Heinrich [۱۰] در یک کانال به طول ۲۰ متر، عرض ۵۵/، متر و عمق ۱/۵ متر در آزمایشگاه بینالمللی هیدرولیک Chatou فرانسه انجام گرفت. در این آزمایشات امواج بوسیله یک گوه مثلثی به ابعاد ۵/، متر در۵/، متر و وزن ۱۴۰ کیلوگرم و چگالی ۲۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب که روی سطح شیبدار با زاویه ۴۵ درجه بصورت آزادانه میلغزد تولید شده است. برای مطالعه بالاروی امواج بروی سواحل یک سطح شیبدار ثانویه با شیب ۱۵ درجه که محل تقاطع آن با سطح شیبدار 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 زیر سطح ساکن آب قرار داده شد. از نتایج این مطالعه برای

معادلات حاکم بر امواج سونامی ناشی از زمین لغزش عمدتا غیرخطی است و همچنین دامنه محاسباتی شکلی غیرهندسی و متغییر دارد، لذا استفاده از روشهای تحلیلی و روشهای اویلری با شبکهبندی ثابت برای مطالعه این گونه از مسائل بسیار مشکل میباشد. روش HT یک روش کاملا لاگرانژی است که در آن احتیاج به هیچ نوع شبکهبندی نمیباشد. این روش برای اولین بار در زمینه مسائل اختر فیزیکی به کار گرفته شد [۲۳]. علاوه بر مسائل اختر فیزیکی برای اولین بار Monaghan [۴۲] از این روش برای تحلیل جریانهای با سطح آزاد استفاده کرد و نتایج قابل شده است [۲۵]. در نوع اول به سیال از این دید نگریسته میشود شده است [۲۵]. در نوع اول به سیال از این دید نگریسته میشود کسه سیالات واقعی مانند آب، تراکم،ناپذیر فرض کسه سیالات واقع دو مای یک روش پیشبینی مینی میشوند و با اعمال این قید و با یک روش پیشبینی - تصحیح

معادلات ناوير - استوكس حل مى شوند [٢۶]. 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 می اشد. 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 15 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 دادهای 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 زمان های مختلف مورد مقایسه قرار گرفته

۲ - روش کار معـادلات نویراسـتوکس و پیوسـتگی معـادلات حـاکم بـر پدیـده میباشند که به صورت معادلات دیفرانسیلی ذیل بیان میشوند:

$$\frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{dt} + \nabla \vec{u} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{d\vec{u}}{dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla P + \frac{1}{\rho}\nabla .\vec{\tau} + \vec{g}$$
(7)

در این معادلات ρ 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 می شود [۲۶]. در مرحله پیشبینی میدان سرعت بدون در نظر گرفتن ترم گرادیان فشار در معادله مومنتم محاسبه می شود:

$$\Delta \vec{u}_* = (\vec{g} + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \vec{u}) \Delta t \tag{(7)}$$

$$\vec{u}_* = \vec{u}_t + \Delta \vec{u}_* \tag{(f)}$$

$$\vec{r}_* = \vec{r}_t + \vec{u}_* \Delta t \tag{(a)}$$

که $\vec{r_t} = \vec{r_t}$ به ترتیب برابر با مقدار سرعت و موقعیت ذرات سیال در زمان فعلی، $\vec{n_t} = \Delta \vec{u}$ مقدار تغییرات سرعت سیال در گام پیشبینی و \vec{u}_* و \vec{r} به ترتیب برابر با مقدار پیشبینی شده سرعت و موقعیت ذرات سیال در گام زمانی بعدی و Δt برابر با مقدار گام زمانی است. تراکمناپذیری در این مرحله ارضا نمی شود و چگالی سیال ρ_* که با توجه به موقعیت پیشبینی شده ذرات محاسبه شده با چگالی ثابت

تفاوت خواهد داشت. در مرحله دوم که مرحله تصحیح ρ_0 میباشد ترم فشار برای اعمال تراکمناپذیری در محاسبات استفاده می شود.

$$\Delta \vec{u}_{**} = \frac{-1}{\rho_*} \nabla P_{t+1} \Delta t \tag{6}$$

$$\vec{u}_{t+1} = \vec{u}_* + \Delta \vec{u}_{**} \tag{Y}$$

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

$$\nabla . \left(\frac{1}{\rho_*} \nabla P_{t+1}\right) = \frac{\rho_0 - \rho_*}{\rho_0 \Delta t^2} \tag{A}$$

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

$$\vec{r}_{t+1} = \vec{r}_t + \frac{\vec{u}_{t+1} + \vec{u}_t}{2} \Delta t$$
(9)

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

$$A(r) = \int A(r')W(r - r', h).dr' \tag{1}$$

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]:

$$A(r_a) = \sum_b m_b \frac{A_b}{\rho_b} W(|r_a - r_b|, h) \tag{11}$$

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

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

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

$$W(r,h) = 0 \qquad q > 2$$
(17)

. و r = q = r/h و q = r/h



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

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 وحل 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 ۳۵۲۲ ذره میباشد که ۳۷۰ ذره به عنوان ذرات مرز جامد و مجازی و تعداد

۳- نتايج

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 تقسیم.ندی شده است.

۳–۱– توليد

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.

همان طور که در شکل ۱ (الف) نشان داده شده است پس از شروع حرکت توده لغزنده یک قله در سطح آزاد آب ایجاد می شود که دامنه این قله در زمان نیم ثانیه ۷/۲ سانتیمتر می باشد. در ادامه در زمان یک ثانیه گوه به انتهای سطح شیب دار رسیده و حرکتش متوقف می شود (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 ۶/۰ ثانیه ایجاد می شود. مقایسه پروفیل موج محاسبه شده با داده های آزمایشگاهی و نتایج مدل Nasa-Vof در شکل ۲ (ج و د) حاکی از دقت بالای هر دو مدل در شبیه سازی موج ایجاد شده پس از شروع حرکت توده لغزنده در آب می باشد.



شکل ۲ – پرفیل موج حاصل از روش I-SPH در زمان الف) ۱/۵ ثانیه، ب) ۲ ثانیه و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی و Nasa-Vof در ج) ۱/۵ 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.

در شکل ۲ (الف) می توان دید که در زمان ۱/۵ ثانیه ارتفاع قله مثبت به ۴ سانتیمتر کاهش می یابد. مسافت طی شده از ۱/۵ تا ۱/۵ ثانیه تقریبا ۲/۴ متر می باشد. در زمان ۲ ثانیه (شکل ۲ ب) اولین قله ایجاد شده به دیواره سمت راست برخورد کرده و تغییر جهت می دهد و با موجهای بعدی تداخل ایجاد می کند. 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 می رسد.

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 شبیه سازی 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 می باشد، در مقابل دامنه موج حاصل از مدل I-SPH در زمان ۲ ثانیه خطایی کمتر از ۵ سانتیمتر را در همه نقاط نشان می دهد.

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

۲-۳- مکانیزم پیشروی

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

این نقطه میرسد. قلـه بعـدی کـه بـه ایـن مکـان مـیرسـد دارای دامنهای در حد دامنه گلوی 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 دامنـه امـواج سـونامی ناشـی از زمـین لغـزش 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 متـر از ۶/۸ بـه ۲/۸ سـانتیمتر کـاهش مییابد. سرعت این قله به میزان ۳/۳ متر بر ثانیه میباشد که نشان میدهد این موج جزو طبقهبندی امواج بلند بوده که سـرعت فـازی آن متناسب با رابطه $c = \sqrt{gh}$ میباشد.



Downloaded from marine-eng.ir on 2025-07-05

۳-۳ - مكانيزم بالاروى

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 ۱۰/۷سانتیمتر روی میدهد، بیشترین مقدار پیشروی این موج در ساحل به میزان مراز ۳ ثانیه امواج شروع به ایجاد پایینروی ^۵ بروی سطح شیبدار زمان ۳ ثانیه امواج شروع به ایجاد پایینروی ^۵ بروی سطح شیبدار مقدار بالاروی محاسبه شده توسط روش ISPH در تمامی زمانها مقدار بالاروی محاسبه شده توسط روش ISPH در تمامی زمانها کمتر از ۵ سانتیمتر با مقادیر آزمایشگاهی اختلاف دارد در حالی که این مقدار در روش Nas-Vof به ۹ سانتیمتر نیز میرسد.



RMS مقایسه خطای

با مقایسه نتایج حاصل از روشهای عددی I-SPH و 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.

روش NASA-VOF	روش I-SPH	زمان (ثانیه)
•/• ٣٢	•/• ٣٣	•/۵
•/•۶١	•/•۶۴	١
•/•74	•/• ۵	١/۵
۰/۰ <i>۸۶</i>	• / • ٣ ١	٢
•/• \Y	•/• 10	۲/۵
٠/٠١۶	•/• ٢۴	٣

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 کمتر از ۵ سانتیمتر میباشد در حالی که این مقدار در زمانهایی اکه اختلاط در سطح آزاد آب رخ میدهد در مدل Nasa-Vof به دا سانتیمتر میرسد، که این امر نشان میدهد د مدل عددی -I SPH با دقت بالاتری پدیده برخود 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 برخودار 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 depthintegrated 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., Mjolness, 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 Flowes with SPH, Journal of Computational Physics, Vol. 110, p. 399-406

26- G'omez-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., (2.11), *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- G'omez-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*