

## شبیه‌سازی امواج و سیلاب ناشی از سونامی مکران با استفاده از مدل‌های COMMIT-MOST و GEOWAVE

پهزاد لایقی

کارشناس اقیانوس‌شناسی، شرکت مهندسی مشاور افق هسته‌ای، تهران، ایران  
layeghi2001@yahoo.com

عاطفه فرجی

کارشناس زمین‌شناسی، شرکت مهندسی مشاور افق هسته‌ای، تهران، ایران  
ati.faraji@gmail.com

کلید واژه‌ها: شبیه‌سازی، سونامی، مکران، Geowave، Commit- Most

### چکیده

در گستره شمال باختری اقیانوس هند، به سبب فروانش صفحه اقیانوسی عمان به زیر صفحه قاره‌ای ایران، فروانش مکران شکل گرفته است. ناحیه فروانش مکران از نزدیکی‌های تنگه هرمز تا محدوده مرز هند با طولی حدود ۹۰۰ کیلومتر در امتداد خاوری - باختری گسترش یافته است. بر اساس داده‌های علمی و تاریخی، گستره مکران دارای پتانسیل ایجاد سونامی ناشی از زلزله‌های بزرگ در سواحل جنوب خاوری ایرانزمین می‌باشد. از این رو مطالعه و شبیه‌سازی سیلاب ناشی از سونامی با در نظر گرفتن زلزله‌های احتمالی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این تحقیق، امواج و سیلاب سونامی‌های ناشی از زلزله‌های احتمالی در زون فروانش مکران، در سواحل استان سیستان و بلوچستان در بندر بربیس به روش عددی با استفاده از نرم افزار COMMIT و نرم افزار GEOWAVE شبیه‌سازی و مورد مطالعه قرار گرفت. سناریوهای در نظر گرفته شده برای این کار، زلزله‌ای با بزرگای ۸، (زمینلرزه سال ۱۹۴۵ در پاکستان با بزرگای ۸/۱) و زلزله‌ای با بزرگای ۹/۰ (زلزله ۲۰۱۰ سندایی ژاپن) بود. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که حداکثر مقدار بالا آمدن آب در گستره مورد بررسی برای زلزله‌ای با بزرگای ۸ حدود ۰/۵ متر و برای زلزله‌ای با بزرگای ۹ حدود ۱۴ متر است. همچنین حداکثر پهنای منطقه سیلابی حدود ۱/۴ کیلومتر و زمان رسیدن اولین امواج به ساحل حدود ۲۲ دقیقه می‌باشد. نتایج به دست آمده در این تحقیق همچنین نشان دهنده تطابق نسبی خروجی‌های دو مدل برای سناریوهای مختلف سونامی در این منطقه می‌باشد.

### مقدمه

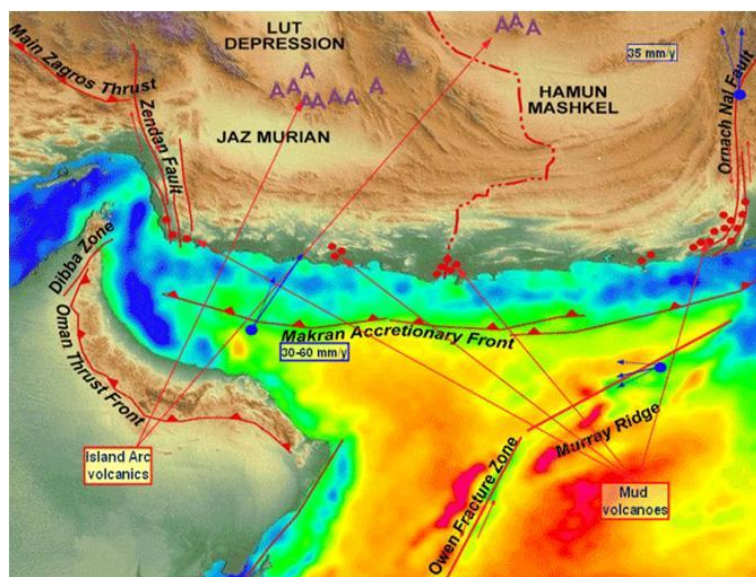
در گستره شمال باختری اقیانوس هند، به سبب فروانش صفحه اقیانوسی عمان به زیر صفحه قاره‌ای ایران، ناحیه فروانش مکران تشکیل شده است. ناحیه فروانش مکران از نزدیکی‌های تنگه هرمز تا محدوده مرز هند با طولی حدود ۹۰۰ کیلومتر (مختاری و همکاران، ۱۳۸۵) در امتداد خاوری - باختری گسترش یافته است. مطالعات نشان می‌دهد که کمترین سرعت فروانش صفحه عمان به زیر صفحه ایران نزدیک ۱۹/۵ میلی‌متر در سال است. بیشترین این مقدار نیز پیرامون ۲۷ میلی‌متر در سال برآورد شده است (Vernant et al., 2004). گستره مکران ایران و پاکستان از سوی خاور با گسل‌های ارنچ‌نال و چمن، و از سوی باختر با گسل میناب (زدان) محدود می‌گردد. گسل میناب، جداکننده ناحیه انتقالی بین پهنه فروانش مکران و چین خوردگی‌های قاره‌ای زاگرس است.





شکل ۱: شهر بریس در ساحل دریای عمان

لازم به ذکر است که شیب فرورانش بسیار کم گزارش شده است (Byrne et al., 1992). به طور کلی مهمترین ویژگیهای مناطق فرورانش در سطح جهان عبارتند از وجود درازگودالهای (Trenches) ژرف با عمق حدود ۲ تا ۴ کیلومتر، تجمع رسوبات و تشکیل گوه‌های فزاینده و نیز فعالیت‌های آتشفشانی (Kearey & Vine, 1996). مطالعات صورت گرفته نشان می‌دهد که در منطقه مکران حجم فوق‌العاده زیادی از رسوبات انباشته شده است، به گونه‌ای که منطقه مکران یکی از بزرگترین گوه‌های فزاینده رسوبی در جهان به شمار می‌رود. ستبرای رسوبات جمع شده در این منطقه به حدود ۷ کیلومتر می‌رسد (Carayannis, 2004) در حالی که ستبرای رسوبات در دیگر مناطق فرورانش جهان معمولاً اندک است (Keary & Vine, 1996). لازم به ذکر است که از نظر زمین‌ساختی، انباشته شدن چنین حجم عظیمی از رسوبات می‌تواند رفتار صفحه‌های درگیر در ناحیه فرورانش و نحوه لغزش صفحه‌ها را تحت تاثیر قرار دهد. از دیگر ویژگیهای منحصر به فرد منطقه مکران، نبود گودال اقیانوسی در این ناحیه است. بررسی مقاطع لرزه‌ای دوبعدی با راستای شمالی - جنوبی از منطقه فرورانش مکران، نشان می‌دهد که بر خلاف بیشتر نواحی فرورانشی دنیا، در گوه فزاینده مکران یک گودال اقیانوسی مشاهده نمی‌شود (شکل ۲).



شکل ۲: نمایش زون فرورانش مکران و گسل‌های محدود کننده آن

مدل سازی عددی سونامی برای شناخت رویدادهای گذشته و شبیه سازی حوادث احتمالی در آینده بسیار مهم است. با توجه به این که داده‌ها در مورد رویدادهای پیشین برای تفسیر و تحلیل آنها کافی نیست، استفاده از مدل سازی عددی برای تعیین سیلاب و بالاروی آب (Run Up) از یک سونامی محلی یا در فاصله دور از ساحل به عنوان ابزاری مفید و مهم شناخته می‌شود. در این تحقیق، از نرم افزار COMMIT به عنوان یک ابزار تحقیق استفاده گردید، که یک واسط اینترنتی مدل مشترک سونامی توسعه یافته توسط مرکز تحقیق سونامی NOAA می‌باشد (NCTR). در این پژوهش مدل سازی سیلاب برای نواحی ساحلی سیستان و بلوچستان برای ارزیابی و یافتن اثرات سونامی ناشی از زلزله احتمالی زون فرورانش انجام شد. تمرکز این مطالعه تعیین حداکثر ارتفاع موج در خط ساحلی استان سیستان و بلوچستان است.

### پیشینه سونامی های تهدید کننده سواحل ایران

بررسی تاریخچه رخداد سونامی در هر منطقه سونامی خیز و از اولین اقدامات مورد نیاز در بررسی خطر سونامی به شمار می‌رود. بدون داشتن درک صحیح و اطلاعات کافی از تاریخچه رخداد سونامی در هر منطقه سونامی خیز، ممکن است خطر رخداد سونامی در آن منطقه به درستی شناخته نشده و در نتیجه توسعه سامانه‌های هشدار سونامی مورد غفلت واقع شود. می‌توان به عنوان نمونه، یکی از دلایل نبود سامانه‌های هشدار سونامی در منطقه اقیانوس هند تا پیش از سونامی بزرگ ۲۶ دسامبر سال ۲۰۰۴ سوماترا که موجب کشته شدن حدود ۲۲۵۰۰۰ نفر گردید، به نبود درک صحیح از تاریخچه رخداد سونامی در این منطقه نسبت داد. آخرین سونامی مخرب گزارش شده در منطقه مکران، مربوط به رویداد ۲۸ نوامبر سال ۱۹۴۵ میلادی است. این سونامی در اثر رخداد زمین‌لرزه‌ای با بزرگای ۸/۱ که کانون آن در طول جغرافیایی ۲۴/۵۰ درجه شمالی و عرض جغرافیایی ۶۳/۰۰ درجه خاوری و به فاصله ۸۷ کیلومتری جنوب باختری منطقه بلوچستان پاکستان قرار داشت به وجود آمد (Page et al., 1979). رخداد این سونامی، تلفات مالی و جانی گسترده‌ای در سواحل ایران، پاکستان، هند و عمان بر جای گذاشت (Ambraseys & Melville, 1982).

در نواحی ساحلی پاکستان امواج سونامی باعث شد حدود ۴۰۰۰ نفر تلفات گزارش شود و آسیب های قابل توجهی به تاسیسات ساحلی وارد شد. بر اساس گزارش‌های موجود، پس از رخداد سونامی، قسمتی از دو شهر بندری پاسنی و اورماره به زیر آب فرو رفتند (Ambraseys & Melville, 1982). در پاسنی و اورماره شکستهای اساسی و عمده‌ای در زمین پدید آمد و در بعضی نقاط تا حدود ۱/۵ متر زمین پایین افتاده بود (Ambraseys & Melville, 1982). همچنین میزان فراخاست زمین نیز در حدود ۲ متر گزارش شده است (Page et al., 1979).

### مدلسازی عددی منبع ایجاد کننده در زون فرورانش مکران

برای مدل سازی عددی در شبیه‌سازی ایجاد سونامی در آب‌های ساحلی یا آب‌های عمیق، انتشار و سیلاب در منطقه مورد مطالعه ابزاری مفید است. در این جا از مدل MOST (روش جداسازی سونامی) تهیه شده به وسیله تیتوف Titov از موسسه PMEL و سینولاکیس Synolakis از دانشگاه کالیفرنیا جنوبی به همراه واسط گرافیکی COMMIT (واسط گرافیکی مدل مشترک سونامی) برای ایجاد سونامی، انتشار موج به سمت ناحیه تحت تاثیر و سیلاب در طول منطقه مورد مطالعه و همچنین مدل GEOWAVE استفاده گردید. برای تولید مجدد دینامیک صحیح موج در طی محاسبه سیلاب، شبکه‌های عمق سنجی و ارتفاع‌سنجی با قدرت تفکیک بالا مورد نیاز است. در این پژوهش، جایگاه رویداد زمینلرزه در زون فرورانش مکران انتخاب شد.

### معرفی مدل COMMIT-MOST

مدل عددی MOST (روش جداسازی سونامی) تهیه شده بوسیله NOAA/PMEL برای اعمال مدل اقیانوسی آب کم عمق غیر خطی به کار برده شد. انتشار امواج همراه با طرح‌واره عددی پخش به کار گرفته شد. معادله مدل برای انتشار امواج آب کم عمق به صورت زیر است:

$$h_t + (uh)_x + (vh)_y = 0$$

$$u_t + uu_x + vu_y + gh_x = gd_x$$

$$v_t + uv_x + vv_y + gh_y = gd_y$$

$$d(x,y,z) = d_0(x,y,t), t \leq t_0$$

$$d(x,y,t) = d_0(x,y,t_0), t \leq t_0$$

که  $h = \eta(x, y, t) + d(x, y, t)$  دامنه موج،  $d(x, y, t)$  عمق آب غیر متلاطم،  $u(x, y, t), v(x, y, t)$  سرعت های متوسط گیری شده در عمق در جهت  $X$  و  $Y$ ، و  $g$  شتاب گرانش است.

در این مدل، مجموعه ای از معادلات آب کم عمق با عبارت اصطکاک بستر بوسیله طرحواره تفاضل متناهی لیب فراگ جداسازی شدند. این مدل برای شبیه سازی انتشار سونامی و سیلاب بر روی زمین خشک مفید است.

## معرفی مدل GEOWAVE

GEOWAVE تولید، انتشار، و سیلاب ساحلی را با استفاده از مدل موج بوزینسک مرتبه چهارم کاملاً غیر خطی و پخشی شبیه سازی می کند که دارای مکانیزم های پخش موج، شکست موج، و سیلاب زمین خشک می باشد. این مدل یک ساختار برنامه نویسی را برای ایجاد منابع چندگانه سونامی با TOPICS فراهم می کند و این منابع سونامی را در زمان مناسب به یک اجرای شبیه سازی در مدل FUNWAVE وارد می کند.

GEOWAVE در سراسر جهان در بیش از ۴۰ مرکز تحقیقاتی و ۱۰ کشور به عنوان مدل منبع آزاد و تحت مجوز عمومی GNU توزیع شده است. این مدل یکی از معتبرترین و دقیق ترین مدل های سونامی در جهان است.

GEOWAVE نقشه های مخاطرات سونامی را با گستره وسیعی از خروجی ها نظیر عمق آب، سرعت آب، شارش آب، موقعیت شکست موج و ... را به علاوه حالت های انتقال رسوب، جابجایی جانبی اجسام شناور، انتقال سنگ های بزرگ، مردم و ماشین را تولید می کند. برنامه هایی برای نرم افزار Surfer و MATLAB برای رسم نقشه های مخاطرات سونامی موجود است.

معادلات غیرخطی Boussinesq که از Wei et al (1995) اقتباس شده است به شکل زیر مفروض می باشد:

$$\eta t + \Delta \cdot \{ (h + \eta) [ u a + (z a + \frac{1}{2} (h - \eta)) \Delta (\Delta \cdot h u a) + (\frac{1}{2} z^2 a - 1/6 (h^2 - h \eta + \eta^2)) \Delta (\Delta \cdot u a) ] \} = 0$$

$$u a t + (u a \cdot \Delta) u a + g \Delta \eta + z a \{ \frac{1}{2} z a \Delta (\Delta \cdot u a t) + \Delta (\Delta \cdot (h u a t)) \} \quad (2)$$

$$+ \Delta \{ \frac{1}{2} (z^2 a - \eta^2) (u a \cdot \Delta) (\Delta \cdot u a t) + \frac{1}{2} [\Delta \cdot (h u a) + \eta \Delta \cdot u a]^2 \}$$

$$\eta \Delta \cdot u a t + \Delta \cdot (h u a t) \} = 0 \quad (3) + \Delta \{ (z a - \eta) (u a \cdot \Delta) (\Delta \cdot (h u a)) - \eta [ \frac{1}{2}$$

در اینجا  $\eta$  ارتفاع سطحی،  $h$  عمق آب فعلی،  $u a$  بردار سرعت افقی در عمق آب  $(\partial/\partial x, \partial/\partial y)$ ،  $\Delta = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$  عامل شیب افقی،  $g$  شتاب گرانشی، و اندیس  $t$  مشتق جزئی نسبت به زمان می باشد. معادلات ۲ و ۳ شرح نگهداری توده و نیروی حرکت آبی را به ترتیب نمایش می دهند.

## شبکه های مدل

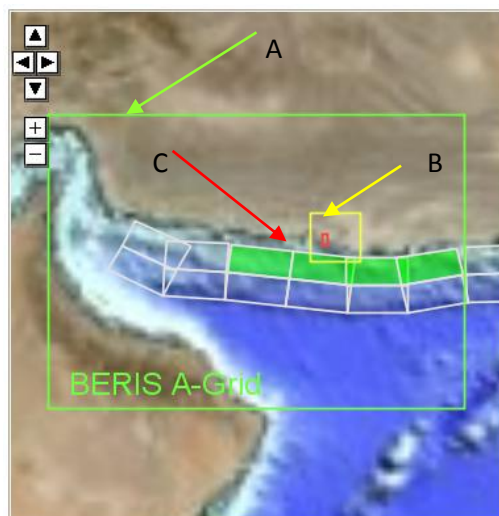
به منظور ارزیابی اثرات سونامی بر سواحل سیستان و بلوچستان، سه شبکه A، B و C انتخاب گردید که C زیر مجموعه B و B زیر مجموعه A می باشد. اندازه و تفکیک سه شبکه در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: مشخصات شبکه های مورد استفاده در مدل سازی

تفکیک شبکه	مراحل اجرای MOST
1 arc min (1800 m)	شبکه A
8 arc sec (240 m)	شبکه B
1 arc sec (30 m)	شبکه C



بر این اساس ساختار شبکه‌های مدل تعریف و آماده ورود به مراحل بعد گردید. در شکل ۳ حدود شبکه‌های مختلف مدل مشخص گردیده است.



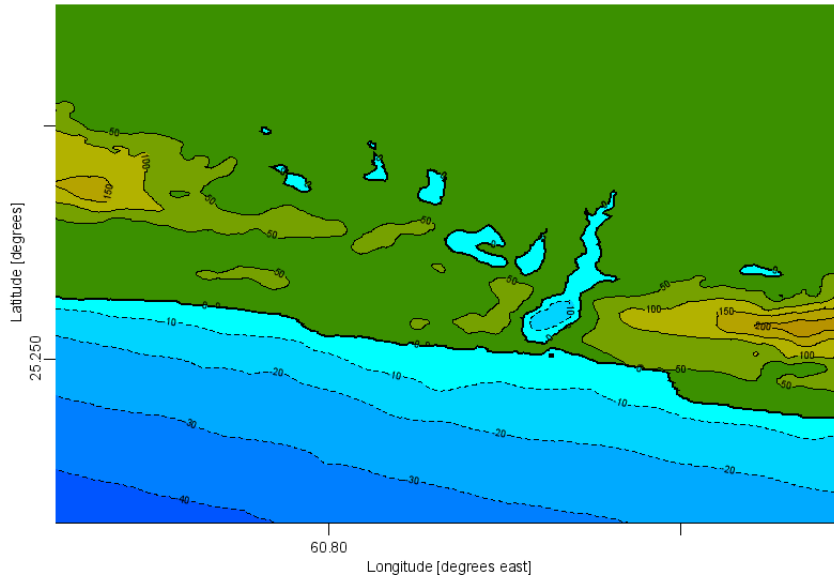
شکل ۳: شبکه‌های A, B, C مدل MOST

### داده‌های عمق سنجی

داده‌های عمق سنجی مورد استفاده در این مدل، داده‌های جهانی ۲ دقیقه‌ای (ETOPO2) تهیه شده توسط مرکز ملی داده‌های ژئوفیزیکی به دست آمده از وب سایت زیر است:

<http://sift.pmel.noaa.gov/grid/>.

مجموعه داده‌های ETOPO2 از پایگاه داده رقومی بستر دریا و ارتفاعات خشکی در یک شبکه ۲ دقیقه‌ای طول و عرض جغرافیایی به دست آمده است. مجموعه داده‌های ETOPO2v2 از چندین منبع قابل دستیابی است و اغلب داده‌های عمق سنجی از مجموعه داده‌های ماهواره راداری ارتفاع سنجی Smith & Sandwell به دست می‌آید. توپوگرافی خشکی از مدل ارتفاعی رقومی CGIAR SRTM ۹۰ متر، تهیه شده توسط اتحادیه CGIAR اطلاعات فضایی به دست آمده است. مجموعه داده‌های CGIAR نسخه پردازش شده داده‌های ماموریت توپوگرافی رادار شاتل (SRTM) ایجاد شده توسط NASA است. نقشه‌های خطوط هم عمق برای شبکه C در شکل ۴ نشان داده شده‌اند.



شکل ۴: خطوط هم عمق نزدیک سواحل بریس مربوط به شبکه C

(مدل برای محاسبه بالاروی و پایین روی موج بر روی خط ساحلی در ریزترین شبکه خود (C) تنظیم گردید)

### مقدار و شیب تخمینی در ناحیه منبع

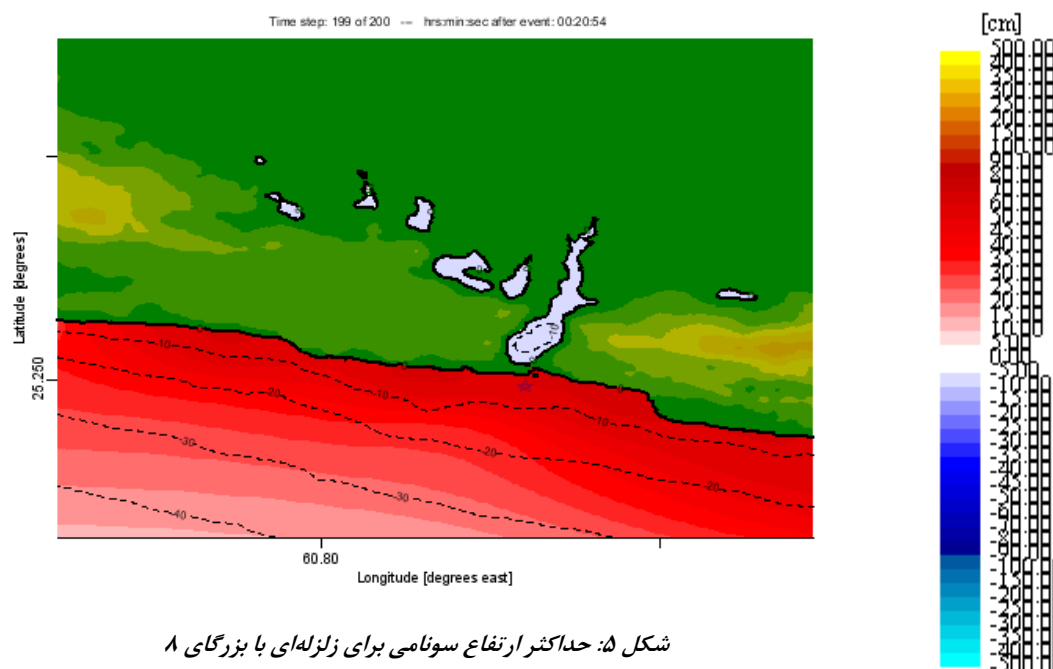
برای این تحقیق ۴ منبع ایجاد زلزله با گام زمانی 0.2 S با استفاده از شرط CFL (کورانت-فردریش-لوی) در نظر گرفته شد:

$$\Delta t \leq \min \Delta x_i / |u_i| + \sqrt{g h_i}$$

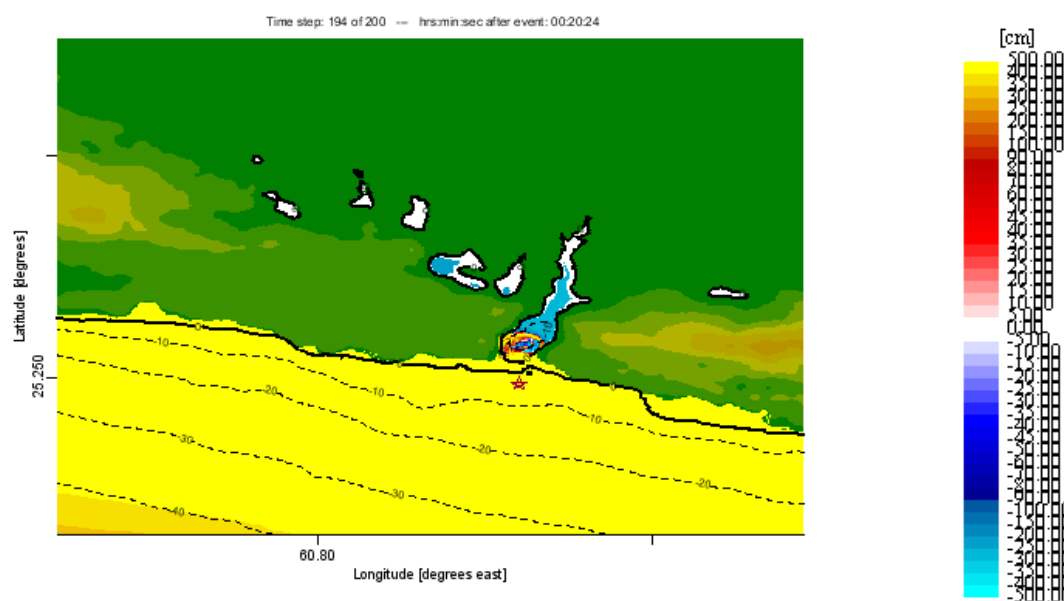
نتایج با در نظر گرفتن بزرگ‌های ۸ و ۹ و جابجایی قائم گسل با مقادیر 1.4m و 44.35m آزمایش گردید. با توجه به نزدیکی زون فرورانش به سواحل سیستان و بلوچستان، زمان اجرای مدل حدود ۲ ساعت در نظر گرفته شد. در این راستا اولین امواج حدود ۲۰ دقیقه به سواحل بریس می‌رسند.

### تحلیل های محاسباتی و نتایج

بر اساس نتایج مدل عددی، توزیع مکانی ارتفاع تخمینی سونامی و سیلاب آن برای مورد سواحل بریس از زلزله احتمالی منطقه فرورانش مکران تخمین زده شد. حداکثر دامنه موج در خروجی مدل MOST در شکل های 5 تا 7 برای زمینلرزه‌های با بزرگ‌های ۸ و ۹ آمده است.



شکل ۵: حداکثر ارتفاع سونامی برای زلزله‌ای با بزرگای ۸

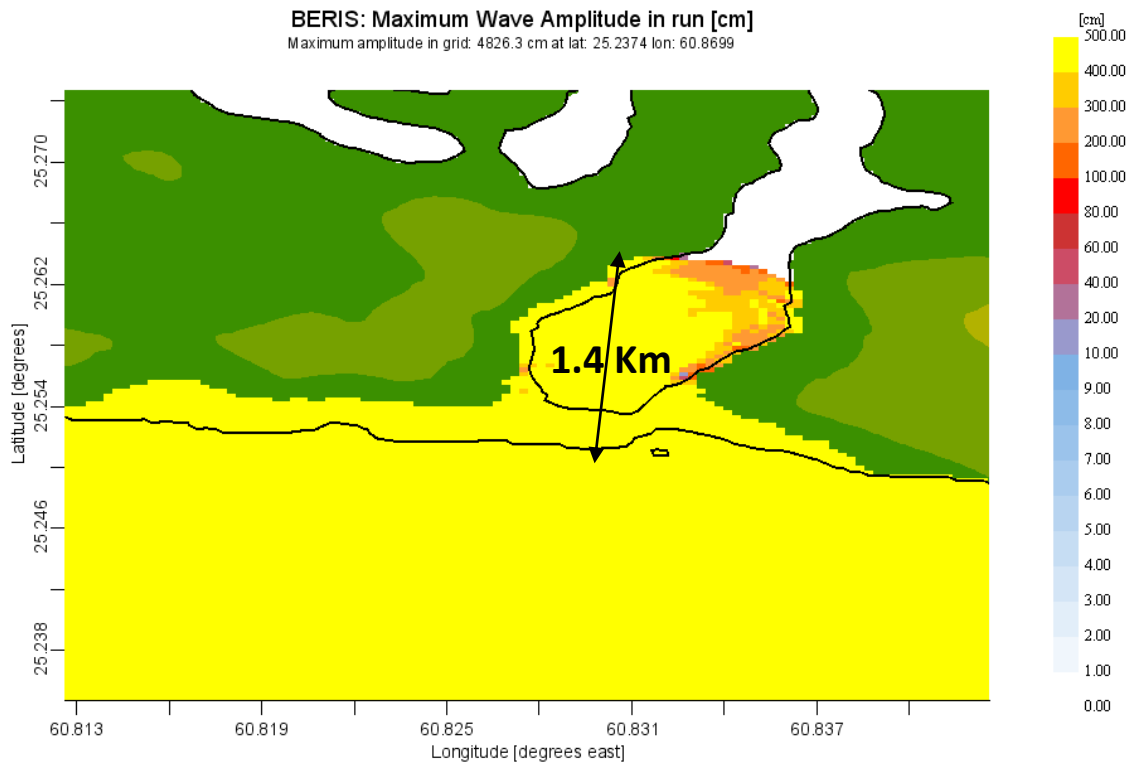


شکل ۶: حداکثر ارتفاع سونامی برای زلزله‌ای با بزرگای ۹

## حداکثر مقدار سیلاب

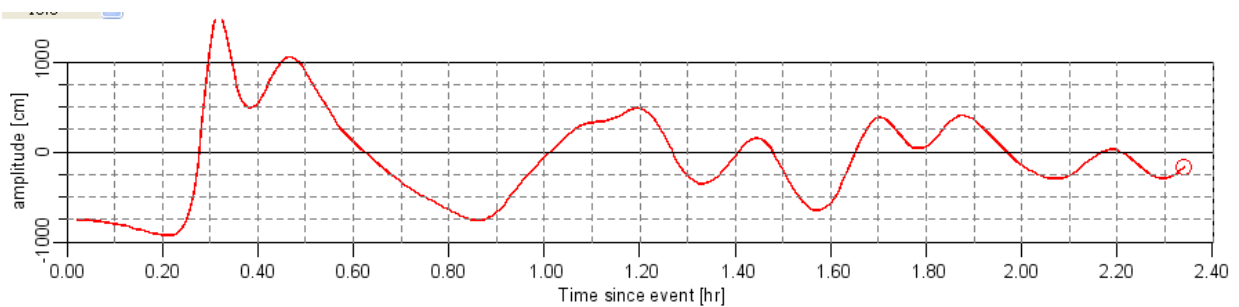
نتایج حداکثر سیلاب برای زلزله‌ای با بزرگای ۹ برای مدل MOST در شکل ۷ آمده است. بیشینه سیلاب نزدیک به ۱/۴ کیلومتر و بیشینه عمق شارش ۵ متر است. این شکل توزیع بالآمدگی آب بر روی نواحی خشکی در منطقه مورد مطالعه را نشان می دهد.





شکل ۶: حداکثر سیلاب ایجاد شده برای سونامی با زلزله ۹ ریشتر

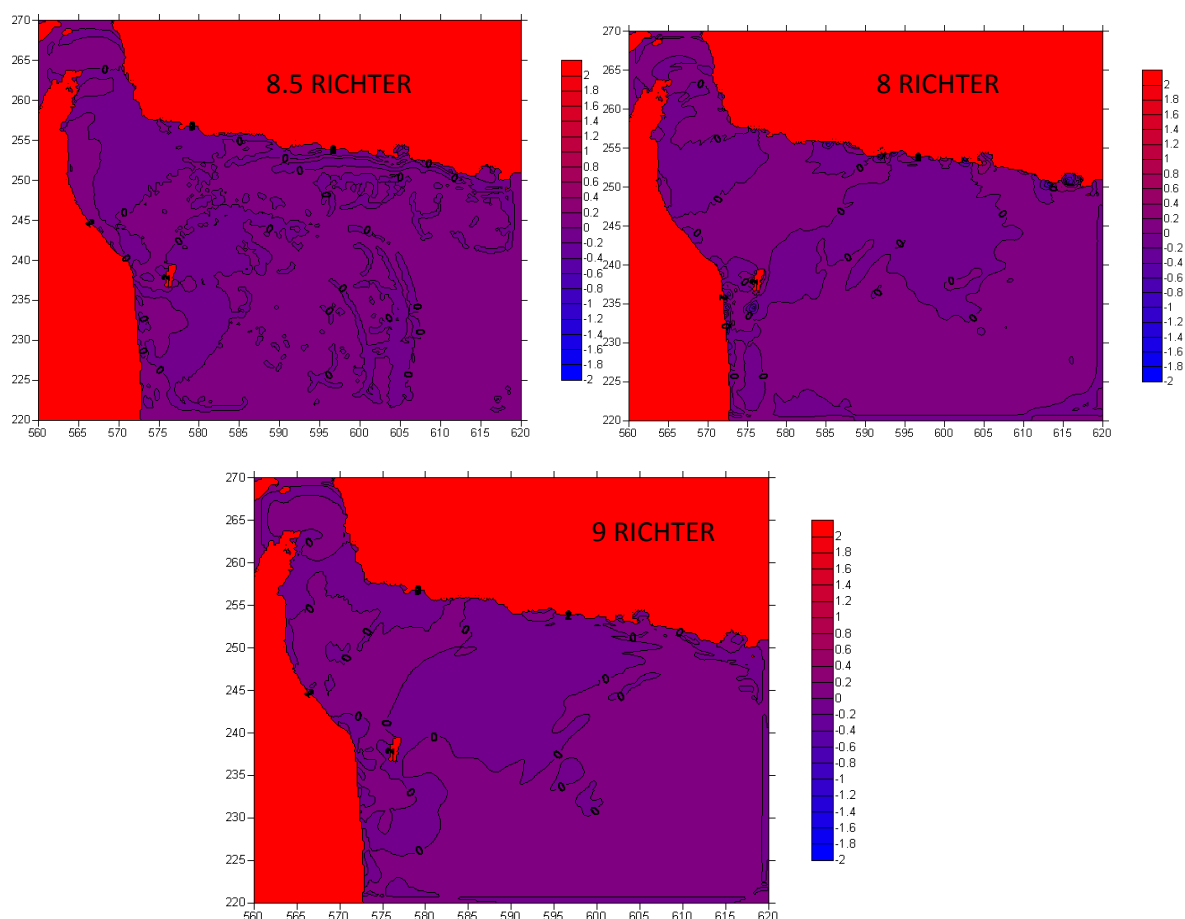
حداکثر مقدار بالا آمدن آب برای منطقه برای زلزله‌ای با بزرگای ۸ حدود ۰/۵ متر و برای زلزله‌ای با بزرگای ۹ حدود ۱۴ متر برآورد شده است. حداکثر زمان ممکن برای حضور سونامی در منطقه مورد مطالعه ۲ ساعت و ۳۰ دقیقه برآورد می‌شود، که در آن ارتفاع موج به حداقل ممکن می‌رسد (شکل ۸).



شکل ۸: منحنی حداکثر ارتفاع موج در منطقه ساحلی بریس (خشکی)

همچنین خروجی‌های مدل GEOWAVE برای سه سناریوی ۸، ۸/۵ و ۹ ریشتر در شکل ۹ آمده است. مقایسه این خروجی‌ها با خروجی‌های مشابه مدل COMMIT-MOST تطابق خوبی را نشان می‌دهد.





شکل ۹: الگوهای انتشار موج سونامی برای زلزله‌های ۸، ۸/۵ و ۹ ریشتر پس از گذشت ۳۰ دقیقه

## نتیجه‌گیری

بر اساس خروجی‌های به دست آمده در اجرای سناریوهای مختلف با مدل MOST، می‌توان موارد ذیل را نتیجه گرفت:

۱. با توجه به تطابق نتایج مدل GEOWAVE و مدل MOST می‌توان در مناطقی که مشخصات گسل آن به صورت ONLINE از سایت مدل COMMIT-MOST قابل دسترسی نیست (مانند دریای خزر) استفاده نمود.
۲. بر اساس خروجی‌های به دست آمده برای بیشینه زلزله رخ داده در منطقه (با بزرگای ۸/۰) مقدار سیلاب ایجاد شده با توجه به ارتفاع ساحل قابل ملاحظه نبوده و خطر چندانی ایجاد نمی‌کند. شایان ذکر است چنانچه زلزله ای با بزرگای ۹ (همانند زمینلرزه ۲۰۱۰ ژاپن) در زون فرورانش مکران روی دهد، امکان تخریب بالا در این ناحیه برای کاربری‌های مسکونی و صنعتی وجود دارد. با در نظر گرفتن زمان رسیدن اولین امواج سونامی به این منطقه (۲۲ دقیقه) مدت زمان کمی برای هر گونه هشدار به ساکنان وجود دارد. بنابراین ساخت اماکن مسکونی و صنعتی در فاصله ۱/۴ کیلومتر از خط ساحل (حداکثر پهنای سیلاب) بیشترین ریسک را برای این گونه کاربری‌ها در بر دارد.

## فهرست مراجع

Ambraseys NN and Melville CP, History A of Persian Earthquakes, 219 pp., Cambridge University Press, New York, 1982

Carayannis G (2004) Seismo-Dynamics of Compressional Tectonic Collision-Potential for Tsunami Genesis along Boundaries of the Indian, Eurasian & Arabian Plates. Abstract Submitted to the International Conference HAZARDS 2004, Hyderabad, India, 2-4 Dec.2004

Page EB, Poggio JP and Keith TZ (1997) Computer Analysis of Student Essays: Finding Trait Differences in the Student Profile in AERA/NCME Symposium on Grading Essays by Computer GMT software, Paul Wessel and Walter Smith HF

Kearey P and Vine F J (1996) Global Tectonics, Second edition: Oxford, Blackwell Publishing, 338p

Mokhtari M (2005) Seismological Aspect and EWS of Tsunami Prone area of Iranian Coasts with Special Emphases on Makran (Sea of Oman). International Symposium on Disaster Reduction on Coasts, Monash University, Melbourne, Australia

Courant, Friedrichs K and Lewy H (1928) Über die partiellen Differenzgleichungen der mathematischen Physik, Mathematische Annalen, vol. 100, no. 1, pages 32–74

Sandwell, D. T., Geophysical Applications of Satellite Altimetry, Reviews of Geophysics Supplement, p. 132-137, 1990

Synolakis CE, Bernard EN, Titov VV, Kânoğlu U and González FI (2008): Validation and verification of tsunami numerical models. Pure Appl. Geophys., 165(11–12), 2197–2228

Synolakis CE (1995) Tsunami Prediction, SCIENCE, 270, pp. 15- 16

Titov VV and Gonzalez FI (1997) Implementation and testing of the method of splitting tsunami (MOST) model. PMEL NOAA Technical Memorandum ERL PMEL-112 -15

Yeh H, Titov VV and Kaistrenko V( 1995) The 1994 Shikotan earthquake tsunami, Pure and Applied Geophysics, 144, nos. 3/4, pp. 569-593