

مدل سازی بی‌هنجاری‌های گرانی بوگه و هشدار سونامی ناشی از ساختار فرورانشی منطقه مکران (مطالعه موردی: منطقه بریس)

شهمیر اقتصادی^{۱*} و مهدی شوکتی آقمانی^۲

^۱ دکتر، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران
^۲ کارشناسی ارشد، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۲/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۶/۲۹

چکیده

ساختار کنونی زمین‌ساختی و لرزه‌خیزی بالای منطقه مکران متأثر از فرورانش رو به شمال صفحه اقیانوسی نوتیس به زیر صفحه اوراسیاست. بر طبق شواهد علمی و تاریخی، گسل مکران دارای پتانسیل بسیار بالای لرزه‌خیزی و مستعد ایجاد سونامی ناشی از آن در سواحل جنوب خاوری کشورمان است. توپوگرافی، گرانی هوای آزاد و گرانی بوگه در این منطقه تغییرات برجسته‌ای را نشان می‌دهند که وابسته به تغییرات قابل ملاحظه در ساختارهای ژرف زمین هستند. مقادیر تا حدودی منفی‌تر گرانی هوای آزاد نشان می‌دهد که شیب فرورانش در باختر مکران بیشتر از خاور آن است. بیشتر زمین‌لرزه‌های با بزرگای بیشتری از ۶ منطقه مکران در محدوده تغییرات مثبت به منفی گرانی هوای آزاد رخ داده‌اند که می‌توانند تا حدی پیش‌نشانگر زمین‌لرزه‌های با بزرگای بالا باشند. مقدار گرانی بوگه از ۱۵۰ mGal در پوسته اقیانوسی دریای عمان به ۹۰ mGal در پوسته قاره‌ای اوراسیا می‌رسد. ژرفای موهو در دریای عمان ۱۴ کیلومتر است و به مقدار حدود ۳۲ کیلومتر در زیر پوسته قاره‌ای اوراسیا می‌رسد. شیب فرورانش نیز حدود ۵/۷ درجه است. مطالعه و شبیه‌سازی سیلاب ناشی از سونامی با در نظر گرفتن زمین‌لرزه‌های احتمالی، اهمیت ویژه‌ای دارد. در این پژوهش، سیلاب سونامی‌های ناشی از زمین‌لرزه‌های احتمالی گسل مکران در سواحل استان سیستان و بلوچستان و در بندر بریس به روش عددی شبیه‌سازی و مطالعه شده است. سناریوهای در نظر گرفته شده برای این کار، زمین‌لرزه‌ای با بزرگای ۸ زمین‌لرزه سال ۱۹۴۵ در پاکستان با بزرگای ۵/۸ و زمین‌لرزه فرضی با بزرگای زمین‌لرزه ۲۰۱۰ ژاپن با بزرگای ۹/۰ بوده‌اند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که بیشترین مقدار بالا آمدن آب برای منطقه با زمین‌لرزه با بزرگای ۸ حدود ۰/۵ متر، برای منطقه با زمین‌لرزه با بزرگای ۸/۵ حدود ۳/۴ متر و برای منطقه با زمین‌لرزه با بزرگای ۹ حدود ۱۴ متر است. همچنین بیشترین پهنای منطقه سیلابی حدود ۱/۴ کیلومتر و زمان رسیدن اولین امواج به ساحل حدود ۲۲ دقیقه است. نتایج به دست آمده از این پژوهش می‌تواند در برنامه‌ریزی برای گسترش منطقه مفید باشد.

کلیدواژه‌ها: لرزه‌خیزی، فرورانش مکران، نوتیس، اوراسیا، پوسته، سیلاب، سونامی، بریس، صفحه اقیانوسی، بی‌هنجاری گرانی، ژرفای موهو، شیب فرورانش.

E-mail: seghtesadi@gmail.com

*نویسنده مسئول شهمیر اقتصادی

۱- زمین‌ساخت و لرزه‌خیزی مکران

زمین‌لرزه‌های با بزرگای متوسط و ژرفای ۳۰ تا ۹۰ کیلومتر بیانگر لرزه‌خیزی فعال در این منطقه است (Sandwell & Smith, 1997; Byrne et al., 1992; Quittmeyer & Jacob, 1979). در مقایسه با دیگر مناطق فرورانش، در منطقه مکران، فرورانش با سرعت کمتری صورت می‌گیرد (Heidarzadeh et al., 2006). اندازه‌گیری‌های ژئودیتیک، همگرایی میان صفحه‌های عربی و اوراسیا را در این منطقه نشان می‌دهد و نرخ کوتاه‌شدگی حدود ۲۳ میلی‌متر بر سال با امتداد همگرایی حدود ۲۰ درجه در راستای شمال به خاور است (Sella et al., 2002; Vernant et al., 2004; Bayer et al., 2006). بی‌هنجاری‌های گرانی هوای آزاد (Free-Air Gravity) با چگونگی توزیع چگالی در ژرفای زمین در ارتباط هستند.

مقادیر گرانی هوای آزاد (شکل ۲-الف) در منطقه مکران تغییرات قابل ملاحظه‌ای را نشان می‌دهند (Sandwell & Smith, 1997). نیمرخ‌های باختری-خاوری گرانی هوای آزاد در منطقه مکران نشان می‌دهند که باختر مکران نسبت به خاور آن دارای مقادیر منفی‌تر گرانی است (شکل‌های ۲-ب، پ و ت) که این بیانگر آن است که باختر مکران شیب صفحه فرورونده بیشتری از خاور آن دارد (Zarifi, 2006). در یک پهنه فرورانش، مناطق با مقادیر منفی‌تر گرانی در ارتباط با افزایش لرزه‌خیزی و مناطق با مقادیر مثبت‌تر گرانی در ارتباط با کاهش لرزه‌خیزی هستند (Song & Simons, 2003). دیده می‌شود که در منطقه فرورانش مکران بیشتر زمین‌لرزه‌های بزرگ در محل مقادیر به نسبت منفی‌تر گرانی هوای آزاد رخ می‌دهند و خود می‌تواند پیش‌بینی‌کننده رخداد زمین‌لرزه‌های بزرگ باشد (شکل‌های ۲-ب، پ و ت). رسم شکل‌های لرزه‌خیزی و بی‌هنجاری‌های گرانی با برنامه GMT انجام شده است (Wessel & Smith, 1998).

ناحیه فرورانش مکران (Makran Subduction Zone)، به خاطر ساختار پیچیده زمین‌شناسی، شیب صفحه اقیانوسی فرورونده، سبزی بالایی رسوبات، لرزه‌خیزی پیچیده و سونامی شناخته شده است. این منطقه در یک امتداد خاوری-باختری به طول حدود ۱۰۰۰ کیلومتر گسترده شده است. در محدوده باختر مکران سامانه گسلی میناب-زندان-پالامی (Minab-Zendan-Palami) و در خاور آن گسل‌های ارناج-نال (Ornach-Nal) و چمن (Chaman) قرار دارند. منطقه مکران از شمال به فرورفتادگی جازموریان (Jazmuriyan) و از جنوب به سواحل دریای عمان محدود می‌شود (آقنابتی، ۱۳۸۳؛ Regard et al., 2005). موقعیت کنونی لرزه‌زمین‌ساختی منطقه مکران ناشی از فرورانش صفحه اقیانوسی نوتیس (Neo-Tethys) به زیر صفحه اوراسیا (Eurasia) است که این فرورانش موجب همگرایی رو به شمال میان صفحه عربی و صفحه اوراسیا شده است. زمان احتمالی رخداد فرورانش احتمالاً در طول پالئوسن (Paleocene) است (Platt et al., 1988). این منطقه از دید لرزه‌خیزی (Seismicity) فعال است (شکل ۱-الف). داده‌های ناهمواری (توپوگرافی و ژرفای آب) و بی‌هنجاری‌های گرانی از اطلاعات ماهواره تاپکس (<http://topex.ucsd.edu/pub/Topex>) گرفته شده‌اند (Sandwell & Smith, 1997). اطلاعات رومرکز و کانون زمین‌لرزه‌ها در طی سال‌های ۱۹۶۱ تا ۲۰۱۴ از کاتالوگ AnSS (<http://quake.geo.berkeley.edu/anss>) آورده شده‌اند. لرزه‌خیزی منطقه مکران در اثر فرورانش صفحه اقیانوسی و حرکت رو به شمال آن است (Farhoudi & Karig, 1977). نیمرخ ژرفای زمین‌لرزه‌ها ساختار صفحه فرورونده را نشان می‌دهد (شکل ۱-ب). در سال ۱۹۴۵ زمین‌لرزه بزرگی در منطقه مکران با بزرگای $M_w = 8.5$ رخ داد که سونامی خسارت‌باری را به دنبال داشت.

احتمالی در آینده بسیار مهم است. با توجه به اینکه داده‌ها در مورد رویدادهای گذشته برای تفسیر و تحلیل آنها کافی نیست، استفاده از مدل‌سازی عددی برای تعیین سیلاب و بالاروی آب از یک سونامی محلی یا در فاصله دور از ساحل به عنوان ابزاری مفید و مهم شناخته می‌شود. سونامی ۱۹۴۵ ناشی از زمین‌لرزه مکران، با بیش از چهار هزار کشته و اثرات خسارت‌بار اقتصادی، زنگ خطری بود که کشورهای ساحلی مجاور دریای عمان را از خطرات احتمالی بیشتر آگاه ساخت. اندازه سونامی ایجاد شده به وسیله زمین‌لرزه ناحیه فرورانش بستگی به عامل‌های مختلفی شامل بزرگی زمین‌لرزه، ساختار منبع و مکان رخداد دارد (Mokhtari, 2005).

بزرگا و ساختار منبع زمین‌لرزه میزان تغییر شکل سطح را تعیین و در نتیجه، اندازه و مقیاس طول سونامی را ارزیابی می‌کند. هندسه منبع را می‌توان از راه یک فرمول تجربی که طول گسل، پهنا، شیب و مقدار زمان را در نظر می‌گیرد، به دست آورد. در این پژوهش، از نرم‌افزار COMMIT (Community Modeling Interface for Tsunami) واسط گرافیکی مدل مشترک سونامی) به عنوان یک ابزار پژوهش استفاده شد (<http://nctr.pmel.noaa.gov/ComMIT>) که یک واسط اینترنتی مدل مشترک سونامی توسعه یافته توسط مرکز پژوهش سونامی NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) است. اطلاعات ورودی مدل شامل طول و عرض جغرافیایی، احتمالات زمین‌لرزه‌ای، متغیرهای اقیانوس‌شناسی (مانند شوری، دما، چگالی آب) در منطقه و آب‌نگاری کلی منطقه مورد مطالعه و متغیرهای یاد شده در جدول ۲ است. از اطلاعات سونامی‌های رخ داده در منطقه برای کالیبره کردن مدل استفاده می‌شود.

مدل‌سازی سیلاب در ناحیه ساحلی سیستان و بلوچستان برای ارزیابی و یافتن اثرات سونامی ناشی از زمین‌لرزه احتمالی منطقه فرورانش انجام شد. تمرکز این مطالعه تعیین بیشینه ارتفاع موج در خط ساحلی استان سیستان و بلوچستان است.

۴- منابع ایجاد سونامی‌های تهدید کننده سواحل ایران

فرورانش صفحه اقیانوسی سبب جدایی در منطقه مکران می‌شود که منبع اصلی ایجاد پدیده‌های مولد سونامی است (Pararas-Carayannis, 2006; <http://drgeorgepc.com/Tsunami1945Pakistan.html>). هر چند در این ناحیه فرورانش خیلی وسیع نیست؛ با این حال بر پایه داده‌های ثبت شده تاریخی نمی‌توان از پتانسیل ایجاد سونامی در آن چشم‌پوشی کرد (شکل ۱- الف).

۵- مدل‌سازی عددی منبع ایجاد کننده در ناحیه فرورانش مکران

مدل‌سازی عددی ابزاری مفید در شبیه‌سازی ایجاد سونامی در آب‌های ساحلی یا آب‌های ژرف، انتشار موج به سوی منطقه تحت تأثیر و سیلاب در منطقه مورد مطالعه است. در اینجا از مدل MOST (روش جداسازی سونامی، Method Of Splitting Tsunami) تهیه شده به وسیله تیتوف (Titov) از مؤسسه PMEL (Precision Measurement Equipment Laboratories) و سینولاکیس (Synolakis) از دانشگاه کالیفرنیا جنوبی به همراه واسط گرافیکی COMMIT برای ایجاد سونامی، انتشار موج به سوی ناحیه تحت تأثیر و سیلاب در طول منطقه مورد مطالعه استفاده شد؛ برای بازتولید پتانسیل دینامیکی موج در طول مدت اجرای برنامه محاسبه سیلاب، شبکه‌های ژرفاسنجی و ارتفاع‌سنجی با تکنیک‌پذیری بالا مورد نیاز است (Titov & Gonzalez, 1997; Synolakis et al., 2008). در این مطالعه منطقه ایجاد روی ناحیه فرورانش مکران انتخاب شده است.

۵-۱. شبکه‌های مدل

به منظور ارزیابی اثرات سونامی بر سواحل سیستان و بلوچستان، سه شبکه A، B و C انتخاب شد که C زیرمجموعه B و B زیرمجموعه A است. اندازه و تفکیک سه شبکه در جدول ۱ تعریف شده است.

ابزار نقشه‌کشی عمومی که به اختصار با GMT نشان داده می‌شود، یک بسته نرم‌افزاری متن باز است که برای ایجاد و اختصاصی کردن نقشه‌های زمین‌شناسی در مقیاس‌های مختلف کاربرد دارد و از راه خط فرمان در دسترس است. توسعه این نرم‌افزار در دانشگاه هاوایی انجام شده است.

۲- مدل‌سازی دوبعدی گرانی

عامل اصلی ایجاد سونامی، زمین‌لرزه‌های پرن انرژی حاصل از جابه‌جایی صفحه اقیانوسی فرورونده است. در ابتدا حرکت بسیار آرام صورت می‌گیرد و در زمان معین حرکت ناگهانی بزرگ، سبب انتقال انرژی زیاد به توده آب اقیانوس می‌شود. در این پژوهش مدل‌سازی ساختار صفحه اقیانوسی فرورونده در منطقه مکران، با داده‌های ژئوفیزیکی انجام می‌شود. بی‌هنجاری‌های گرانی بویگه (Bouguer Gravity) از تغییرات چگالی در مرز پوسته و گوشته بالایی تأثیر می‌پذیرند. بنابراین از این بی‌هنجاری‌ها در مطالعه و مدل‌سازی تغییرات مرز ناپوستگی موهو (Moho Discontinuity) استفاده می‌شود (Zeyen et al., 2005; Jiménez-Munt et al., 2008; Motavalli-Anbaran et al., 2013). بی‌هنجاری گرانی بویگه در منطقه مکران تغییرات قابل ملاحظه‌ای دارد (شکل ۳) و این بیانگر تغییرات قابل ملاحظه در ساختار ژرفای موهو در این منطقه است (عبداللهی، ۱۳۹۰؛ <http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM>).

در این پژوهش به کمک نرم‌افزار Gmsys-2D مدل‌سازی ساختار چگالی پوسته و گوشته بالایی منطقه فرورانش مکران صورت پذیرفت. برنامه Gmsys-2D از زیربرنامه‌های برنامه ژئوسافت است که برای مدل‌سازی دینامیکی بی‌هنجاری‌های گرانی و مغناطیسی کاربرد دارد. برنامه Gmsys-2D امکان پردازش و رسم نقشه‌ها و داده‌های ژئوفیزیکی و زمین‌شناسی را به صورت تلفیقی فراهم می‌کند.

نیمرخ گرانی بویگه (شکل ۳) عمود بر ساختارهای مهم زمین‌شناسی و واحدهای زمین‌ساختی منطقه مکران و طول آن ۷۹۰ کیلومتر است. مقادیر گرانی بویگه از ۱۵۰ mGal در صفحه اقیانوسی به ۹۰ mGal- در منطقه قاره‌ای کاهش می‌یابد (شکل ۴). با استفاده از داده‌های لرزه‌ای و نظریه‌های موجود مدل اولیه‌ای از توزیع چگالی در امتداد نیمرخ گرانی طراحی شد. در فرایند مدل‌سازی، هندسه و در موارد معدود چگالی لایه‌ها آن قدر تغییر داده شد تا انطباق قابل قبولی میان مقادیر دیده شده و به دست آمده گرانی بویگه به دست آید (Platt et al., 1988; Ebbing et al., 2007; Afonso et al., 2008; Smith, 2013).

به منظور از بین بردن اثر ساختارهای کوچک مقیاس محلی، به فاصله ۵۰ کیلومتر در هر دو سوی نیمرخ، از داده‌ها میانگین‌گیری شد و مقدار میانگین به عنوان مقدار دیده شده در آن نقطه منظور شد (Brunet et al., 2003; Molinaro et al., 2005; Zeyen et al., 2005; Jiménez-Munt et al., 2008; Motavalli-Anbaran et al., 2013). به دلیل استفاده از گرانی بویگه، چگالی آب اقیانوس با مقدار چگالی کاهش یافته (Reduced density) جایگزین می‌شود (Nettleton, 1971; Mantilla-Pimiento et al., 2009). توزیع چگالی به دست آمده، مدل تغییرات ساختار پوسته‌ای اقیانوسی به قاره‌ای اوراسیا را در این منطقه نشان می‌دهد (شکل ۴).

ژرفای موهو از حدود ۱۴ کیلومتر در زیر پوسته اقیانوسی به مقدار حدود ۳۲ کیلومتر در زیر پوسته قاره‌ای می‌رسد. ستبرای پوشش رسوبی (مجموعه نرم و سخت شده (Consolidated)) در زیر دشت مگاک (Abyssal Plain) برابر با ۵ کیلومتر، در زیر شیب قاره‌ای (Continental Slope) بیش از ۱۱ کیلومتر و در منطقه قاره‌ای بین ۳ تا ۵ کیلومتر متغیر است.

۳- مدل‌سازی عددی سونامی

مدل‌سازی عددی سونامی برای درک رویدادهای گذشته و شبیه‌سازی رویدادهای

۶- تحلیل‌های محاسباتی و نتایج

بر پایه نتایج مدل عددی، توزیع مکانی ارتفاع برآوردی سونامی و سیلاب آن برای مورد سواحل بریس از زمین‌لرزه احتمالی منطقه فرورانش مکران به دست آمد. بیشینه دامنه موج در خروجی مدل MOST در شکل‌های ۹ تا ۱۱ برای زمین‌لرزه‌های ۸، ۸/۵ و ۹ ریشتر آمده است.

۶-۱. بیشینه مقدار سیلاب

منظور از بیشینه سیلاب، بیشینه پیشروی آب در ساحل است. بیشینه ژرفای شارش برابر با ارتفاع آب ورودی در موج رسیده به ساحل است. نتایج بیشینه سیلاب با زمین‌لرزه با بزرگای ۹ برای مدل MOST با استفاده از روش COMMIT در شکل ۱۲ آمده است. بیشینه سیلاب تقریباً ۱/۴ کیلومتر و بیشینه ژرفای شارش ۵ متر است. این شکل توزیع بالاآمدگی آب روی نواحی خشکی در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. بیشینه مقدار بالا آمدن آب برای زمین‌لرزه با بزرگای ۸ حدود ۰/۵ متر، برای زمین‌لرزه با بزرگای ۸/۵ حدود ۳/۴ متر و برای زمین‌لرزه با بزرگای ۹ حدود ۱۴ متر برآورد شده است. بیشینه زمان ممکن برای رخداد سونامی در منطقه مورد مطالعه ۲ ساعت و ۳۰ دقیقه برآورد می‌شود، که در آن ارتفاع موج به کمترین میزان ممکن می‌رسد. این موضوع در شکل ۱۳ دیده می‌شود (Yeh et al., 1995).

۷- نتیجه‌گیری

نتیجه کلی این مقاله از دید ژئوفیزیکی احتمال زیاد رخداد زمین‌لرزه‌های بزرگ در ناحیه فرورانشی مکران است که به دنبال این پدیده ژئوفیزیکی احتمال رخداد سونامی در آب‌های منطقه اجتناب‌ناپذیر است. بر پایه مدل‌سازی بی‌هنجاری‌های گرانی بوگه و در اجرای سناریوهای مختلف با مدل MOST، می‌توان موارد زیر را نتیجه گرفت:

- صفحه اقیانوسی مکران با شیب کم و حدود ۵/۷ درجه زیر اوراسیا فرورانده می‌شود.

- تغییرات برجسته مقادیر بی‌هنجاری‌های گرانی هوای آزاد در مناطق فرورانش مکران دیده می‌شوند که می‌توانند به عنوان پیش‌بینی کننده زمین‌لرزه‌های با بزرگای بالاتر باشند.

- مقادیر منفی تر گرانی هوای آزاد در باختر مکران در مقایسه با خاور آن، بیانگر آن است که شیب صفحه فرورونده در باختر مکران بیشتر از خاور آن است.

- بر پایه خروجی‌های به دست آمده برای بیشینه زمین‌لرزه رخ داده در منطقه (با بزرگای ۸ تا ۸/۵) مقدار سیلاب ایجاد شده با توجه به ارتفاع ساحل قابل ملاحظه نبوده و خطر چندانی در کشور ما ایجاد نمی‌کند. البته چنانچه زمین‌لرزه‌ای با بزرگای ۹ (زمین‌لرزه ۲۰۱۰ ژاپن) در ناحیه فرورانش مکران رخ 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 منطقه وجود دارد. بنابراین ساخت اماکن مسکونی و صنعتی در فاصله ۱/۴ کیلومتر از خط ساحل (بیشینه پهنای سیلاب) بیشترین ریسک را برای این گونه کاربری‌ها در بر دارد.

همچنین بر پایه نتایج به دست آمده در این پژوهش، موارد زیر پیشنهاد می‌شود:

- استفاده از داده‌های ژرفاسنجی دقیق تر سبب به دست آوردن خروجی‌های دقیق تری از مدل MOST می‌شود. بنابراین پیشنهاد می‌شود اجرای مدل با داده‌های به دست آمده از آب‌نگاری محلی اجرا شده تا بتوان منابع دقیق تری برای مراکز تصمیم‌گیری در زمان رخداد بحران احتمالی تهیه کرد.

- در صورت استفاده از نتایج به دست آمده به‌صورت لایه‌های GIS، می‌توان با همراه کردن لایه‌های کاربری زمین‌ها در مناطق مورد نظر، محدوده‌های با ریسک بالا را مشخص و بر پایه آن برنامه‌های توسعه منطقه را بهینه‌سازی کرد.

بر این اساس، ساختار شبکه‌های مدل تعریف و آماده ورود به مراحل بعد شد. در شکل ۵ حدود شبکه‌های مختلف مدل مشخص شده است.

۵-۲. داده‌های ژرفاسنجی

داده‌های ژرفاسنجی مورد استفاده در این مدل، داده‌های جهانی ۲ دقیقه‌ای (ETOPO2: Earth TOPOgraphy map in 2 minute resolution) تهیه شده توسط مرکز ملی داده‌های ژئوفیزیکی به دست آمده از وب سایت <http://nctr.pmel.noaa.gov/data.html> است.

مجموعه داده‌های ETOPO2 از پایگاه داده‌های 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 به دست می‌آید؛ بیشتر داده‌های ژرفاسنجی از مجموعه داده‌های ماهواره راداری ارتفاع سنجی (Sandwell, 1990) به دست می‌آید. توپوگرافی خشکی از مدل ارتفاعی رقومی CGIAR SRTM (Consultative Group on International Agricultural Research - Shuttle Radar Topographic Mission) ۹۰ متر تهیه شده توسط اتحادیه CGIAR اطلاعات فضایی به دست آمده است. مجموعه داده‌های CGIAR نسخه پردازش شده داده‌های توپوگرافی رادار شاتل (SRTM) در مأموریت تعریف شده توسط NASA است (<http://srtm.csi.cgiar.org>). نقشه‌های خطوط هم‌ژرفا برای شبکه‌های A تا C در شکل‌های ۶ تا ۸ آمده است. در شکل ۸ مدل برای محاسبه بالاروی و پایین‌روی موج روی خط ساحلی در ریزترین شبکه خود (C) تنظیم شد.

۵-۳. مقدار و شیب برآوردی در ناحیه منبع

برای این پژوهش ۴ منبع ایجاد زمین‌لرزه با گام زمانی ۰/۲ S با استفاده از شرط CFL (Courant et al., 1928) در نظر گرفته شد:

$$\Delta t \leq \min \Delta x_i / |u_i| + \sqrt{gh_i} \quad (1)$$

نتایج با در نظر گرفتن مقادیر بزرگای ۸، ۸/۵ و ۹ و جابه‌جایی عمودی گسل با مقادیر ۱/۴، ۷/۹ و ۴۴/۳۵ متر آزمایش شد. با توجه به نزدیکی گسل به سواحل سیستان و بلوچستان، زمان اجرای مدل حدود ۲ ساعت در نظر گرفته شد. اولین امواج حدود ۲۰ دقیقه به سواحل بریس می‌رسند. در جدول ۲ متغیرهای مورد استفاده در اجرای مدل Commit آورده شده است.

۵-۴. انتشار موج آب کم‌ژرفا

برای برآورد انتشار امواج سونامی در دریای عرب و سیلاب در طول سواحل سیستان و بلوچستان، معادلات امواج آب کم‌ژرفا (Synolakis, 1995; Titov & Gonzalez, 1997; Synolakis et al., 2008) در حالت شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفت. مدل عددی MOST (روش جداسازی سونامی) تهیه شده به وسیله NOAA/PMEL برای اعمال مدل اقیانوسی آب کم‌ژرفای غیر خطی به کار برده شد. انتشار امواج همراه با طرح‌واره عددی پخش به کار گرفته شد. معادله مدل برای انتشار امواج آب کم‌ژرفا به‌صورت زیر است:

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

$$u_t + u_{xx} + v u_y + gh_x = g d_x \quad (2)$$

$$v_t + u v_x + v v_y + gh_y = g d_y$$

که در آن:

$$d(x,y,z) = d_0(x,y,t) \quad t \leq t_0 \quad (3)$$

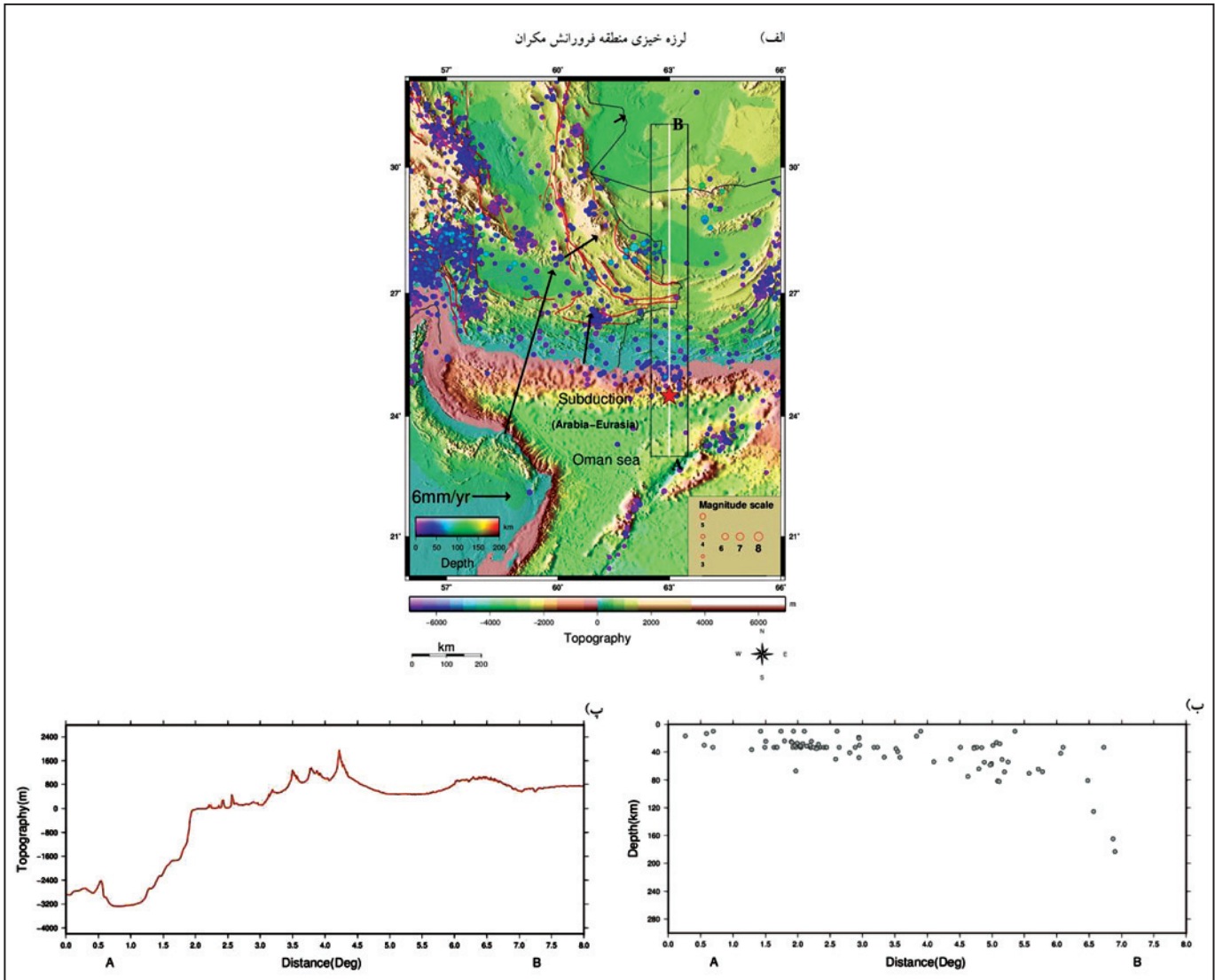
$$d(x,y,t) = d_0(x,y,t_0) \quad t \leq t_0$$

و $h = \eta(x,y,t) + d(x,y,t)$ دامنه موج، $d(x,y,t)$ ژرفای آب غیر متلاطم، $u(x,y,t)$ و $v(x,y,t)$ سرعت متوسط‌گیری شده در ژرفای Z در سواهای X و Y و g شتاب جاذبه است. در این مدل، مجموعه‌ای از معادلات آب کم‌ژرفا با عبارت اصطکاک بستر به وسیله طرح‌واره تفاضل متناهی لپ فرائگ (Leap Frog) جداسازی شدند. این مدل برای شبیه‌سازی انتشار سونامی و سیلاب روی زمین بدون عوارض خاص مفید است.

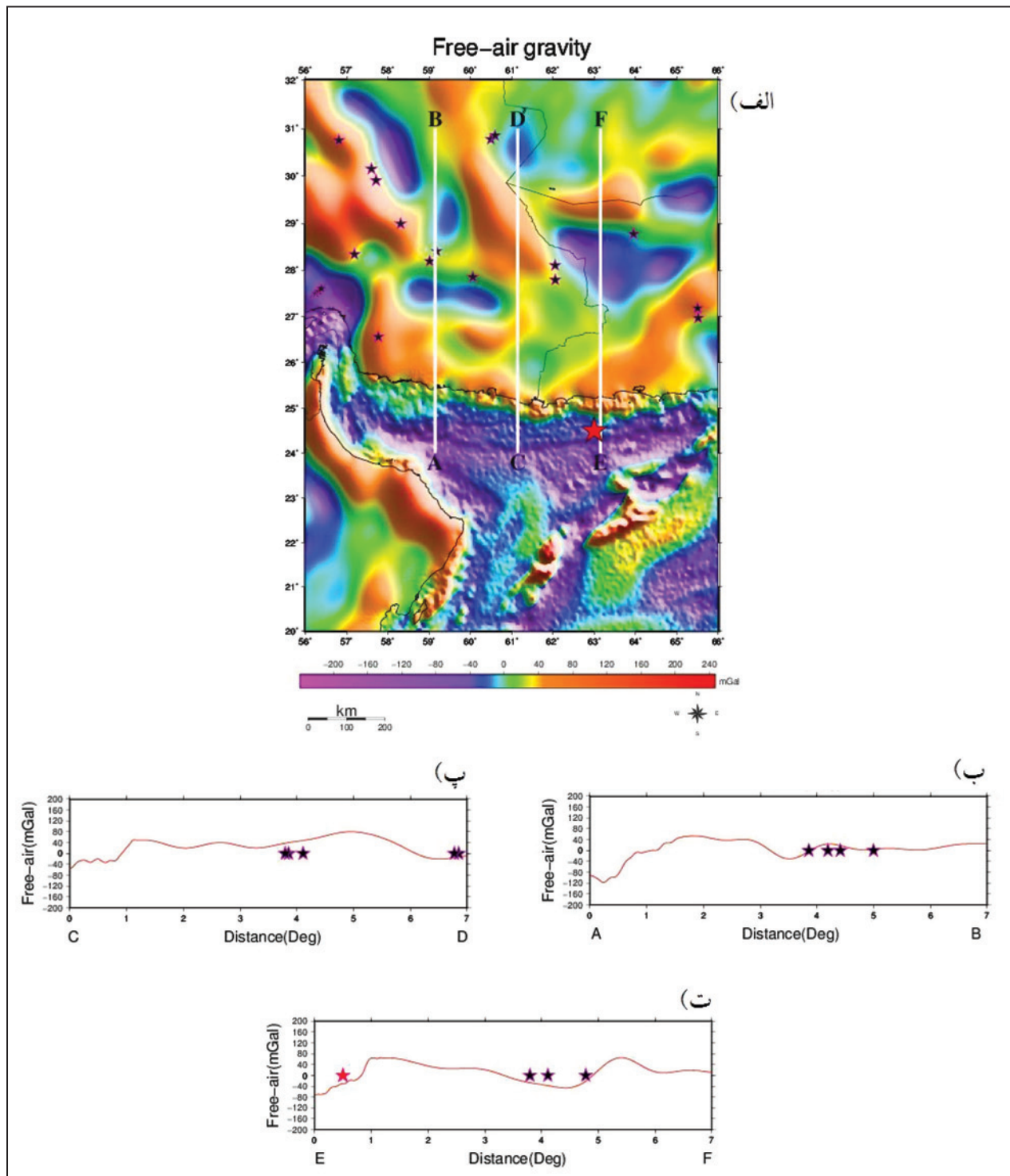
سیاسگزاری

رسم شکل‌های لرزه‌خیزی و بی‌هنجاری‌های گرانی با برنامه GMT انجام شده است (Wessel & Smith, 1998). بنابراین از قرار گرفتن این برنامه در دسترس همگان سپاسگزاری می‌شود.

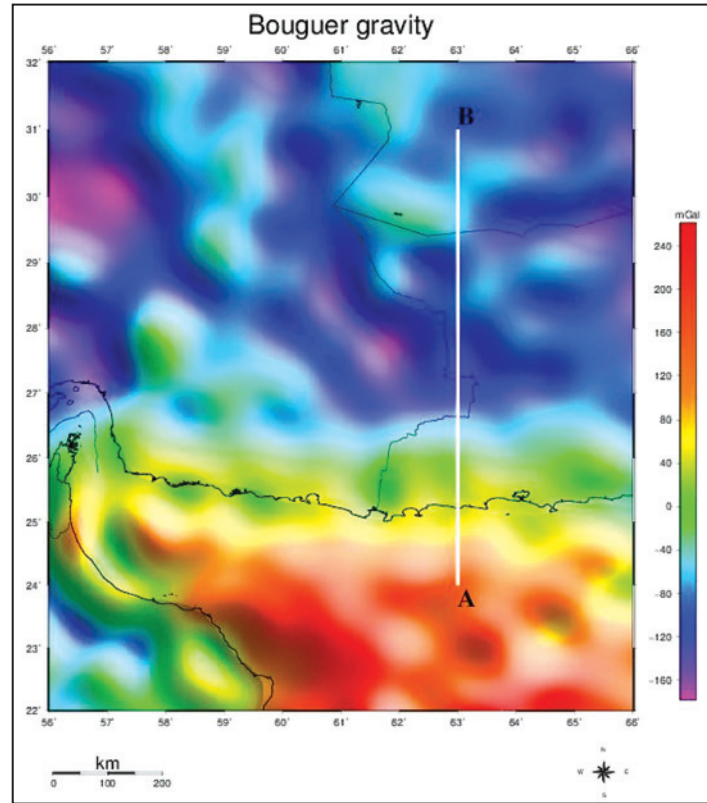
اطلاعات خروجی مدل‌های سه‌بعدی تلفیقی ساختار گرمایی و توزیع چگالی پوسته و گوشته بالایی در منطقه فرورانش مکران می‌تواند با دیگر اطلاعات اقیانوسی و هیدرولیکی منطقه، موجب بالابردن دقت و مفیدتر شدن مدل‌های ژئوفیزیکی و اقیانوسی شود.



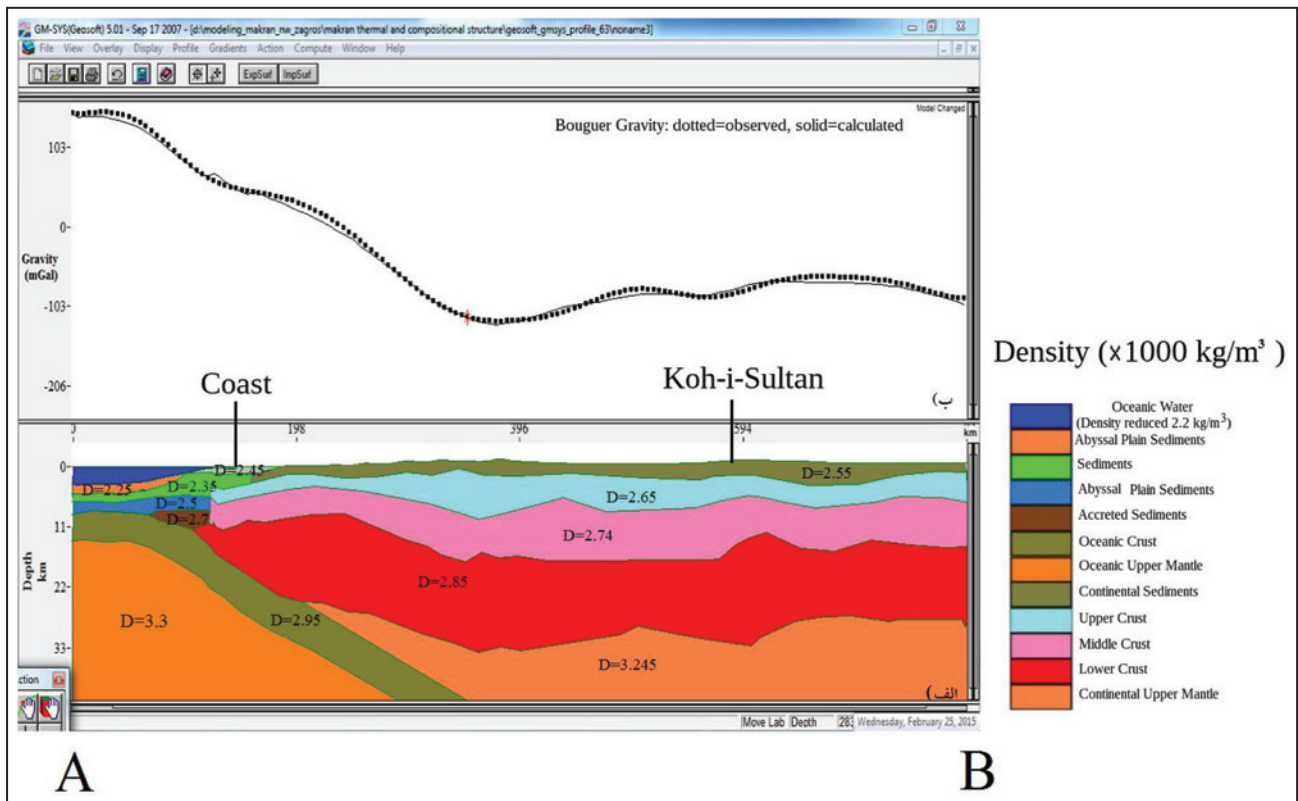
شکل ۱- الف) نقشه توپوگرافی و زمین‌ساختی منطقه فرورانش مکران. اطلاعات زمین‌لرزه‌ها از کاتالوگ AnSS گرفته شده‌اند. رنگ بنفش، زمین‌لرزه‌های با ژرفای صفر و رنگ سرخ، زمین‌لرزه‌های ژرف‌تر را نشان می‌دهد. قطر دایره‌ها با بزرگای زمین‌لرزه‌ها مقیاس‌بندی شده‌اند. خطوط سیاه رنگ مرزهای سیاسی کشورها را نشان می‌دهند. خطوط پیوسته سرخ رنگ گسل‌های منطقه مکران ایران هستند. پیکان‌های سیاه رنگ، سو و اندازه همگرایی صفحه‌های عربی- اوراسیا هستند (Vernant et al., 2004). ستاره سرخ، محل زمین‌لرزه بزرگ ۱۹۴۵ پاکستان است؛ ب) در امتداد نیمرخ سفید رنگ A-B توزیع ژرفایی زمین‌لرزه‌های درون مستطیل سیاه رنگ (نیم درجه در هر دو سوی نیمرخ A-B) را نشان می‌دهد؛ پ) این نمودار تغییرات توپوگرافی در امتداد نیمرخ سفید رنگ A-B است (Wessel & Smith, 1998).



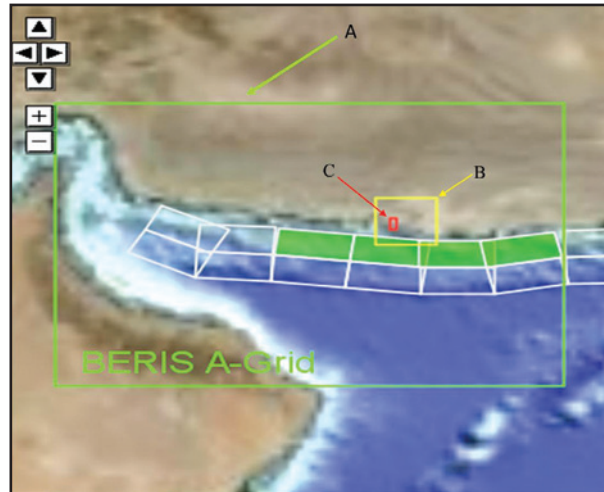
شکل ۲- الف) نقشه بی‌هنجاری هوای آزاد در منطقه مکران، گرفته شده از اطلاعات ماهواره‌ای تاپکس (Sandwell & Smith, 1997). محل رو مرکز زمین لرزه‌های با بزرگای بیش از ۶ (ستاره‌های سیاه) در این شکل نشان داده شده‌اند (گرفته شده از کاتالوگ AnSS). ستاره سرخ رنگ محل زمین لرزه بزرگ ۱۹۴۵ پاکستان را نشان می‌دهد. خطوط سفید رنگ A-B، C-D و E-F نیمرخ‌هایی باختری-خاوری هستند که در امتداد آنها تغییرات بی‌هنجاری هوای آزاد به ترتیب در شکل‌های ب، پ و ت رسم شده‌اند؛ ب) ستاره‌های توپر محل زمین لرزه‌های با بزرگای بیشتر از ۶ را نشان می‌دهند که در امتداد نیمرخ سفید رنگ A-B و به پهنای یک درجه در دو سوی نیمرخ و هماهنگ با شکل الف با فاصله از ابتدای نیمرخ A-B رسم شده‌اند (نقطه صفر در نمودار ب آغاز نیمرخ A-B یعنی همان نقطه A در شکل الف است)؛ پ) ستاره‌های توپر محل زمین لرزه‌های با بزرگای بیشتر از ۶ را نشان می‌دهند که در امتداد نیمرخ سفید رنگ C-D و به پهنای یک درجه در دو سوی نیمرخ و هماهنگ با شکل الف با فاصله از ابتدای نیمرخ C-D رسم شده‌اند؛ ت) ستاره‌های توپر محل زمین لرزه‌های با بزرگای بیشتر از ۶ را نشان می‌دهند که در امتداد نیمرخ سفید رنگ E-F و به پهنای یک درجه در دو سوی نیمرخ و هماهنگ با شکل الف با فاصله از ابتدای نیمرخ E-F رسم شده‌اند. ستاره سرخ رنگ فاصله زمین لرزه ۱۹۴۵ پاکستان از ابتدای نیمرخ E-F است.



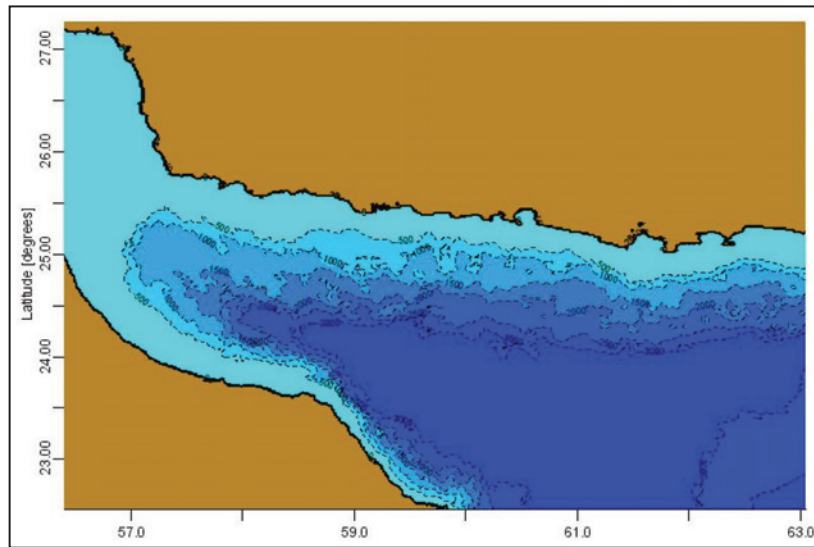
شکل ۳- نقشه بی‌هنجاری بوگه در منطقه فرورانش مکران، خط سفید پیوسته امتداد نیمرخ مدلسازی گرانیتی را نشان می‌دهد.



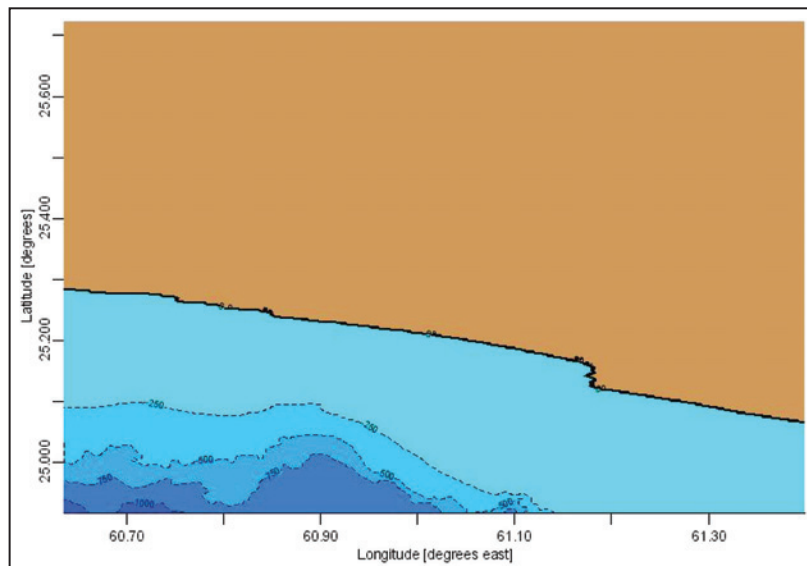
شکل ۴- الف) مدل ساختار پوسته و گوشته بالایی محاسبه شده در امتداد نیمرخ گرانیتی در منطقه فرورانش مکران؛ اعداد مقادیر چگالی را نشان می‌دهند؛ ب) نمودارهای مقادیر محاسبه شده (منحنی پیوسته) و دیده شده (منحنی نقطه چین) گرانیتی بوگه.



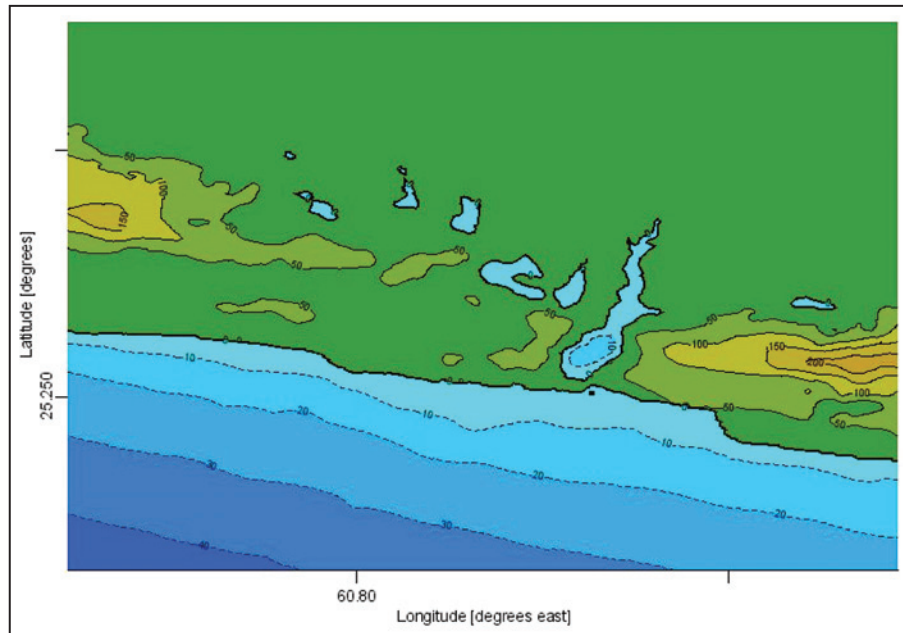
شکل ۵- شبکه‌های A، B و C مدل MOST.



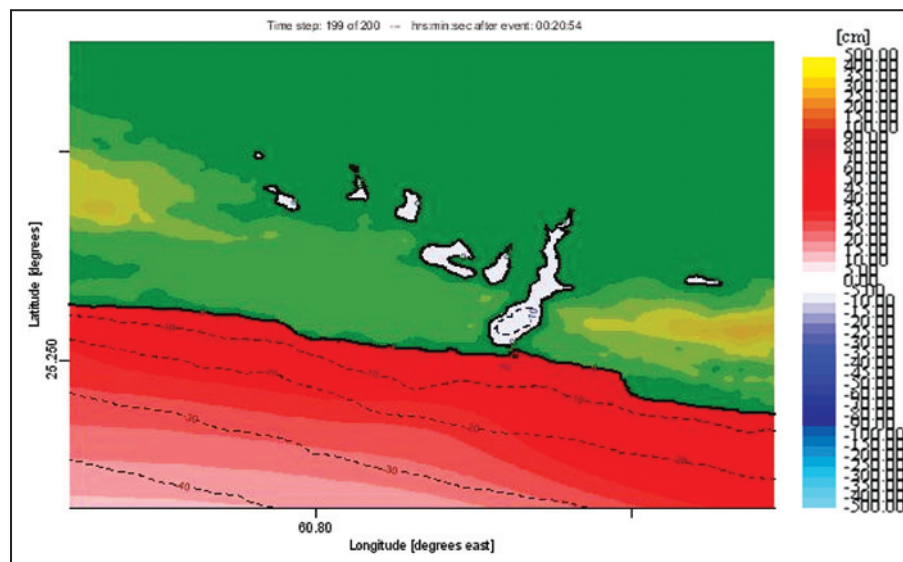
شکل ۶- خطوط هم‌ارتفاعی دریای عمان مربوط به شبکه A.



شکل ۷- خطوط هم‌ارتفاعی سواحل سیستان و بلوچستان مربوط به شبکه B.

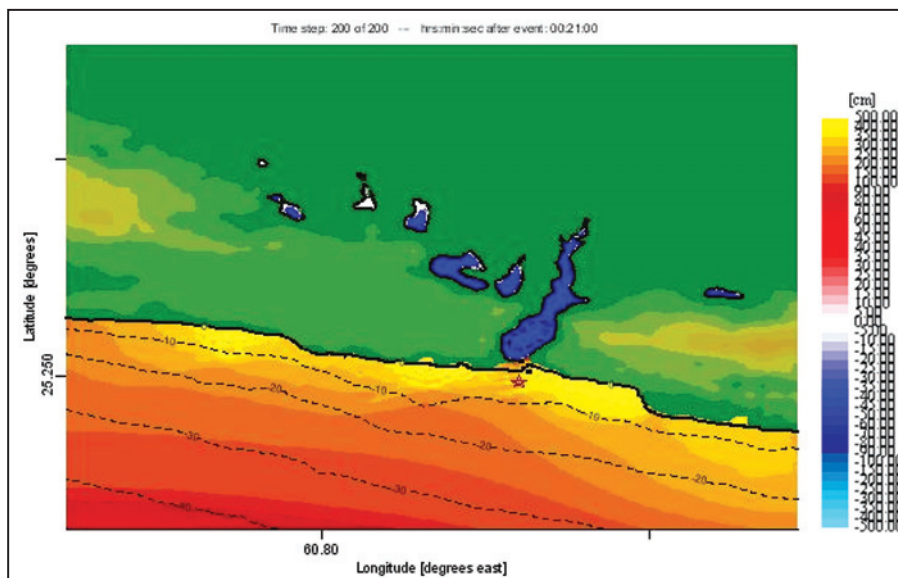


شکل ۸- خطوط هم‌ژرفای نزدیک سواحل بریس مربوط به شبکه C.

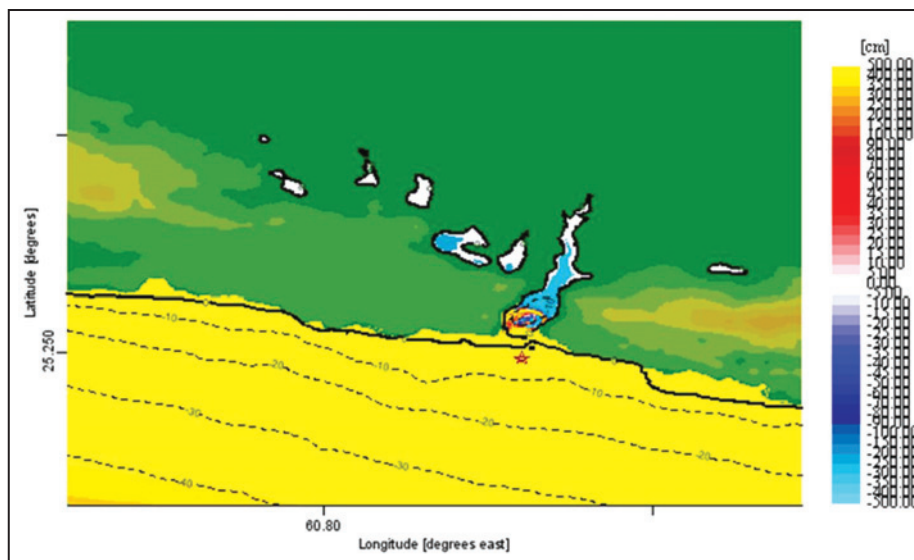


شکل ۹- بیشینه ارتفاع سونامی برای زمین‌لرزه با بزرگای ۸.

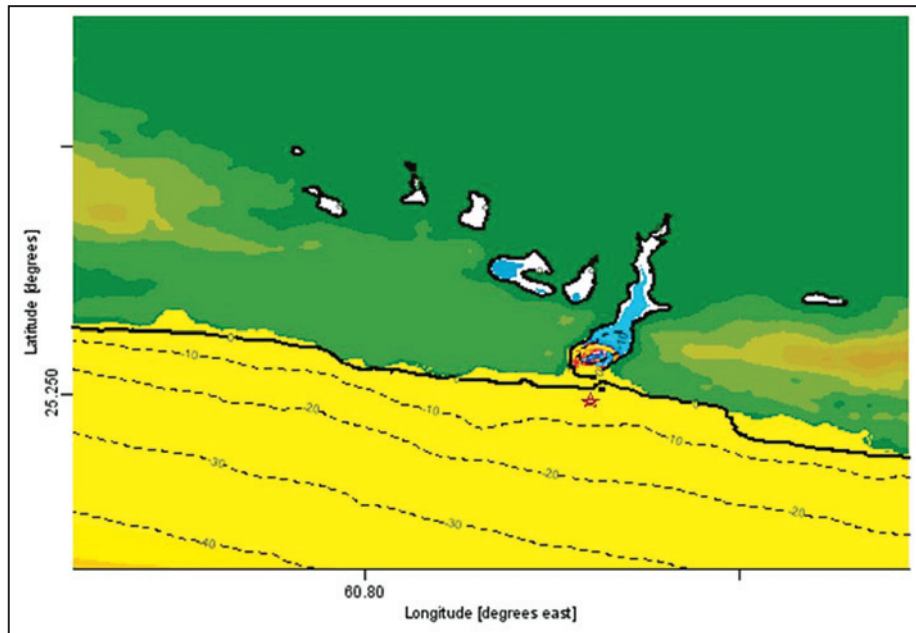
Time step:199 of 200 – hrs min sec after event:00:20:54



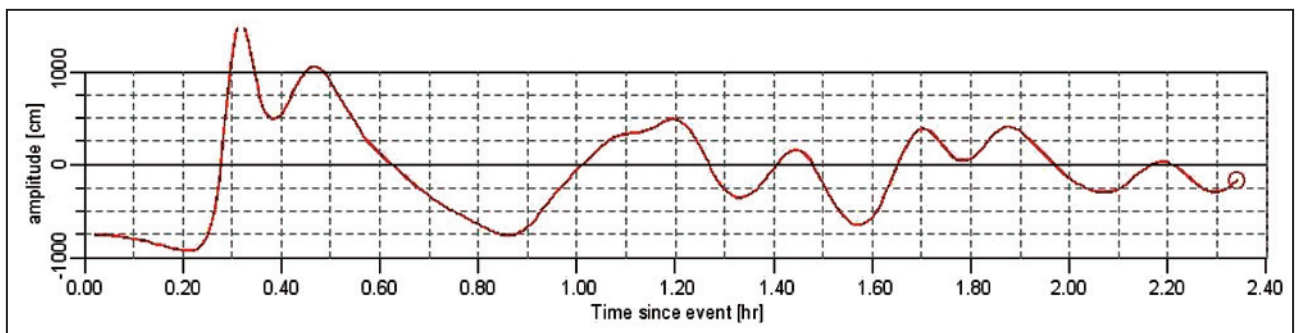
شکل ۱۰- بیشینه ارتفاع سونامی برای زمین لرزه با بزرگای ۸/۵.
Time step 200 of 200 – hrs min sec after event: 00:21:00



شکل ۱۱- بیشینه ارتفاع سونامی برای زمین لرزه با بزرگای ۹.
Time step: 194 of 200 – hrs min sec after event: 00:20:24



شکل ۱۲- پیشینه سیلاب ایجاد شده برای سونامی با زمین‌لرزه با بزرگای ۹.



شکل ۱۳- منحنی پیشینه ارتفاع موج در منطقه ساحلی بريس (خشکی).

جدول ۱- ویژگی‌های شبکه‌های مورد استفاده در مدلسازی.

| 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 |

جدول ۲- متغیرهای مورد استفاده برای اجرای مدل Commit.

| | | |
|---|-----------------------------------|------------------------------------|
| Total Magnitude: <input type="text" value="9.0"/> Mw | | |
| <input type="text" value="mksza5"/> | <input type="text" value="25.0"/> | <input type="text" value="44.35"/> |
| <input type="text" value="mksza6"/> | <input type="text" value="25.0"/> | <input type="text" value="44.35"/> |
| <input type="text" value="mksza7"/> | <input type="text" value="25.0"/> | <input type="text" value="44.35"/> |
| <input type="text" value="mksza8"/> | <input type="text" value="25.0"/> | <input type="text" value="44.35"/> |
| <input type="button" value="Add/Del"/> to Site <input type="button" value="to Site"/> | | |

| | |
|-------------------------------------|--|
| <input type="text" value="0.0050"/> | Minimum amp. of input offshore wave (m) |
| <input type="text" value="5.0"/> | Minimum depth of offshore (m) |
| <input type="text" value="0.1"/> | Dry land depth of inundation (m) |
| <input type="text" value="0.0009"/> | Friction coefficient (n^2) |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Let A-Grid and B-Grid run up |
| <input type="text" value="3000.0"/> | Max eta before blow-up (m) |
| <input type="text" value="0.20"/> | Time step (sec) |
| <input type="text" value="6000"/> | Total number of time steps in run |
| <input type="text" value="5"/> | Time steps between A-Grid computations |
| <input type="text" value="2"/> | Time steps between B-Grid computations |
| <input type="text" value="30"/> | Time steps between output steps |
| <input type="text" value="0"/> | Time steps before saving first output step |
| <input type="text" value="1"/> | Save output every n-th grid point |

کتابنگاری

آفانیاتی، س.ع، ۱۳۸۳- زمین شناسی ایران، وزارت صنایع و معادن، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
 عبدالمهی، س، ۱۳۹۰- برآورد عمق ناپیوستگی موهو در ایران با استفاده از داده‌های گرانی حاصل از مدل ژئوپتانسیل جاذبی مبتنی بر اندازه‌گیری‌های ماهواره‌ای. دانشکده علوم زمین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی در علوم پایه زنجان- ایران.

References

- Afonso, J. C., Fernández, M., Ranalli, G., Griffin, W. L. & Connolly, J. A. D., 2008- Integrated geophysical-petrological modeling of the lithosphere and sublithospheric upper mantle: Methodology and applications. *Geochem. Geophys. Geosystems*, 9, no. 5, pp. Q05008.
- Bayer, R., Chery, J., Tatar, M., Vernant, Ph., Abbassi, M., Masson, F., Nilforoushan, F., Doerflinger, E., Regard, V. & Bellier, O., 2006- Active deformation in Zagros-Makran transition zone inferred from GPS measurements. *Geophys. J. Int.*, 165, p. 373-381.
- Brunet, M. F., Korotaev, M. V., Ershov, A. V. & Nikishin, A. M., 2003- The South Caspian Basin: A review of its evolution from subsidence modeling. *Sedimentary Geology*, 156, p. 119-148.
- Byrne, D. E. & Sykes, L. R., 1992- Great thrust earthquakes and aseismic slip along the plate boundary of the Makran subduction zone. *Journal of Geophysical Research*, 97 (B1), pp. 449-478.
- Courant, R., Friedrichs, K. & Lewy, H., 1928- Uber die partiellen Differenzengleichungen der mathematischen Physik, *Mathematische Annalen*, 100, no. 1, pages 32-74.
- Ebbing, J., Braitenberg, C. & Wienecke, S., 2007- Insights into the lithospheric structure and tectonic setting of the Barents Sea region from isostatic considerations. *Geophys. J. Int.*, 171, 1390-1403.
- Farhoudi, G. & Karig, D., 1977- Makran of Iran and Pakistan as an active arc system. *Geology*, 5, p. 664-668.
<ftp://topex.ucsd.edu/pub>
- Heidarzadeh, M., Pirooz, M. D., Zaker, N. H. & Mokhtari, M., 2006- Tsunami hazard associated with Makran subduction zone along the southern coast of Iran. In: *Proceedings of ICOPMAS 2006, The 7th International conference on coastal, ports, and marine structure*.
<http://drgeorgepc.com/Tsunami1945Pakistan.html>.
<http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM>.
<http://nctr.pmel.noaa.gov/ComMIT/>.
<http://nctr.pmel.noaa.gov/data.html>.
<http://quake.geo.berkeley.edu/anss>.
<http://srtm.csi.cgiar.org/>.

- Jiménez-Munt, I., Fernández, M., Vergés, J. & Platt, J. P., 2008- Lithosphere structure underneath the Tibetan Plateau inferred from elevation, gravity and geoid anomalies. *Earth and Planetary Science Letters*, 267(1-2), 276-289.
- Mantila-Pimiento, A., Jentzsch, G., Kley, J. & Alfonso-Pava, C. A., 2009- Configuration of the SW Colombian Caribbean margin: constraints from 2D seismic reflection data and 3D gravity modeling. In: *Subduction Zone Geodynamics*, *Frontiers in Earth Science*.
- 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.
- Molinaro, M., Zeyen, H. & Laurencin, X., 2005- Lithospheric Structure beneath the South-Eastern Zagros Mountains, Iran: Recent Slab Break-Off? *Terra Nova*, 17, 1-6.
- Motavalli-Anbaran, S. H., Zeyen, H. & Ebrahimzadeh Ardestani, V., 2013- 3D joint inversion modeling of the lithospheric density structure based on gravity, geoid and topography data : application to the Alborz Mountains (Iran) and South Caspian Basin region. *Tectonophysics*, 586, Pages 192–205.
- Nettleton, L. L., 1971- *Elementary Gravity and Magnetism for Geologists and Seismologists*. Society of Exploration Geophysicists Monograph Series, No. 1.
- Pararas-Carayannis, G., 2006- The Earthquake and Tsunami of 28th November, 1945 in south of Pakistan. [http://drgeorgepc.com / Tsunami1945Pakistan.html](http://drgeorgepc.com/Tsunami1945Pakistan.html).
- Platt, J. P., Leggett, J. K. & Alam, S., 1988- Slip vectors and fault mechanics in the Makran accretionary wedge, southwest Pakistan. *J. Geophys. Res.*, 93, 7955-7973.
- Quittmeyer, R. C. & Jacob, K. H., 1979- Historical and modern seismicity of Pakistan, Afghanistan, northwestern India, and southeastern Iran. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 69 (3), pp. 773-823.
- Regard, V., Bellier, O., Thomas, J., Bourles, C. & Bonnet Stéphane, D., 2005- Cumulative right-lateral fault slip rate across the Zagros-Makran transfer zone: role of the Minab-Zendan fault system in accommodating Arabia-Eurasia convergence in southeast Iran. *Geophys. J. Int.*, 160, 1–25.
- Sandwell, D. T. & Smith, W. H. F., 1997- Marine gravity from Geosat and ERS 1 satellite altimetry. *Journal of Geophysical Research*, 102, pp. 103. 10045-9.
- Sandwell, D. T., 1990- *Geophysical Applications of Satellite Altimetry*. *Reviews of Geophysics Supplement*, p. 132-137.
- Sella, G. F., Dixon, T. H. & Mao, A., 2002- REVEL: A model for recent plate velocities from space geodesy. *J. Geophys. Res.*, 107(B4), 10.1029/2000JB000033.
- Smith, G. L., 2013- The structure, fluid distribution and earthquake potential of the Makran Subduction Zone, Pakistan. University of Southampton, Ocean and Earth Science, Doctoral Thesis, 142pp.
- Song, T. A. & Simons, M., 2003- Large trench parallel gravity variations predict seismogenic behavior in subduction zones. *Science*, 301, 630–633.
- Synolakis, C. E., 1995- Tsunami Prediction *SCIENCE*, 270, pp. 15- 16.
- Synolakis, C. E., Bernard, E. N., Titov, V. V., Kânoğlu, U. & Gonzalez, F. I., 2008- Validation and verification of tsunami numerical models. *Pure Appl. Geophys.*, 165(11–12), 2197–2228.
- Titov, V. V. & Gonzalez, F. I., 1997- Implementation and testing of the Method of Splitting Tsunami (MOST) model (NOAA technical memorandum ERL PMEL).
- Vernant, P., Nilforoushan, F., Hatzfeld, D., Abbassi, M., Vigny, C., Masson, F., Nankali, H., Martinod, J., Ashtiani, M., Bayer, R., Tavakoli, F. & Chéry, J., 2004- Present-day crustal deformation and plate kinematics in the Middle East constrained by GPS measurements in Iran and northern Oman. *Geophys. J. Int.*, 157 (1), 381-398.
- Wessel, P. & Smith, W. H. F., 1998- New, improved version of the Generic Mapping Tools released. *EOS Trans AGU*, 79, 579.
- Yeh, H., Titov, V. V. & Kaistrenko, V., 1995- The 1994 Shikotan earthquake tsunami. *Pure and Applied Geophysics.*, 144, nos. 3/4pp. 569-593.
- Zarifi, Z., 2006- Unusual subduction zones: Case studies in Colombia and Iran. PhD thesis. University of Bergen, Norway, p 78.
- Zeyen, H., Ayarza, P., Fernández, M. & Rimi, A., 2005- Lithospheric structure under the western African-European plate boundary : A transect across the Atlas Mountains and the Gulf of Cadiz. *Tectonics*, 24, 2. TC2001, doi : 10.1029/2004TC1639.

Modeling of Bouguer gravity anomaly and Tsunami warning due to Makran subduction zone (Case study: Beris region)

Sh. Eghtesadi ^{1*} & M. Shokati Amghani ²

¹ Ph.D., Geological Survey of Iran, Tehran, Iran

² M.Sc., Geological Survey of Iran, Tehran, Iran

Received: 2015 May 04

Accepted: 2015 September 20

Abstract

The present tectonic structure and high seismicity of the Makran zone is affected by the northward subduction of the Neo-Tethys oceanic plate under the Eurasian plate. According to scientific and historical evidences, the Makran fault has high seismicity and is completely capable of causing tsunami hazard on Iranian southeastern and Pakistanian western coasts. Topography, Free-Air and Bouguer gravity anomalies show critical changes over this region, which are related to the changes in the Earth deep structures. More negative Free-Air gravity values are observed in the western rather than eastern parts, indicating that the subducting plate beneath the western Makran is steeper than of that beneath the eastern part. Many of the earthquakes of magnitudes greater than 6 in the Makran have occurred in places where the Free-Air gravity changes abruptly from positive to negative values. Such areas could predict, to some extent, large earthquakes. Bouguer gravity values change from 150 mGal in the oceanic crust of Oman Sea to -90 mGal in the Eurasian continental region. Moho depth is about 14 km beneath the Oman Sea and increases up to 32 km under the Eurasian continental crust. The subducting plate dips around 5.7°. Studying and numerical simulation of flooding water due to tsunami, and considering possible earthquakes, is very important. In this research, the run up of tsunami caused by the possible earthquakes of the Makran fault in Sistan and Baluchestan province coastlines (Beris region) has been studied using numerical methods. The scenarios were tested by three earthquakes including an 8-magnitude earthquake, the 1945 Pakistan earthquake with a magnitude of 8.5, and 9-magnitude earthquake in Japan, 2010. Results show that the maximum flood height of the model was up to 0.5m (for the 8-magnitude earthquake), 3.4m (for the 8.5-magnitude earthquake) and 14m (for the 9-magnitude earthquake). The maximum flood width is estimated to be 1.4 km and the arrival time of the first tsunami waves is inferred to be 22 minutes. These results could be useful in determining high risk regions to optimize development planning.

Keywords: Seismicity, Makran Subduction, Neo-Tethys, Eurasia, Crust, Run up, Tsunami, Beris, Oceanic Plate, Gravity Anomalies, Moho Depth, Subduction Dip.

For Persian Version see pages 105 to 116

*Corresponding author: Sh. Eghtesadi; E-mail: seghtesadi@gmail.com