



مرکز پژوهش‌های مطالعات دریایی

سازمان بنادر و دریانوردی به عنوان تنها مرجع حاکمیتی کشور در امور بندری، دریایی و کشتی‌رانی بازرگانی به منظور ایفای نقش مرجعیت دانشی خود و در راستای تحقق راهبردهای کلان نقشه جامع علمی کشور مبنی بر "حمایت از توسعه شبکه‌های تحقیقاتی و تسهیل انتقال و انتشار دانش و سامان‌دهی علمی" از طریق "استانداردسازی و اصلاح فرایندهای تولید، ثبت، داوری و سنجش و ایجاد بانک‌های اطلاعاتی یکپارچه برای نشریات، اختراعات و اکتشافات پژوهشگران"، اقدام به ارایه این اثر در سایت SID می‌نماید.



سازمان بنادر و دریانوردی



دهمین همایش بین المللی سواحل، بنادر و سازه های دریایی ۲۹ آبان لغایت ۱ آذر ۹۱ (تهران-ایران)



بررسی آب گرفتگی خلیج چابهار در اثر سونامی ناحیه فرورو مکران

احسان راست گفتر^۱، محمودرضا اکبرپور جنت^۲، وحید چگینی^۳، محمود رستمی^۴

کلید واژه: مدل سازی سونامی، ناحیه مکران، معادلات بوسینسک، آب گرفتگی.

چکیده

در این مطالعه با استفاده از یک مدل بوسینسکی کاملاً غیرخطی سونامی های احتمالی ناشی از وقوع زمین لرزه در ناحیه مکران شبیه سازی شده و تأثیر و بالاروی آن ها در سواحل خلیج چابهار، که مهم ترین بخش دارای جمعیت سواحل ایران در دریای عمان محسوب می شود، مورد ارزیابی قرار گرفته است. بر خلاف مطالعات پیشین که جهت شبیه سازی سونامی های مکران تنها یک مدل سراسری با محدوده وسیع را در نظر می گرفتند، در تحقیق حاضر یک مدل محلی نیز با شبکه های مکانی ریزتر در محدوده خلیج چابهار تعریف شد تا بالاروی سونامی در این خلیج ثبت شود. نتایج شبیه سازی ها نشان داد حدود ۲۰ دقیقه پس از وقوع زمین لرزه در ناحیه مکران و در مجاورت خلیج چابهار، امواج سونامی به بندر چابهار می رسند. با افزایش بزرگی زلزله ارتفاع امواج و میزان آب گرفتگی در سواحل افزایش می یابد؛ به طوری که در بحرانی ترین سناریوی تعریف شده از وقوع زلزله (با بزرگی گشتاور ۹)، ارتفاع امواج در بندر چابهار به حدود ۱۰ متر می رسد. با این حال میزان آب گرفتگی در بندر چابهار به دلیل سواحل صخره ای و تراز بالای خشکی این بندر خیلی زیاد نیست و در همان بحرانی ترین سناریو در حدود ۵۰۰ متر است. از سوی دیگر بندر کنارک به دلیل اینکه کاملاً در پشت دماغه غربی خلیج واقع شده، امواج سونامی را با ارتفاع کمتری دریافت می نماید و حتی در بحرانی ترین سناریو امواج سونامی با ارتفاع حدوداً ۴ متری نمی توانند سبب ایجاد آب گرفتگی در این بندر شوند.

مقدمه

در پی وقوع سونامی های عظیم و هولناک در سال های اخیر (سونامی سال ۲۰۰۴ اقیانوس هند و سونامی سال ۲۰۱۱ ژاپن)، که خسارات وصف ناپذیری را بر جوامع انسانی تحمیل کرد، بررسی وقوع احتمالی سونامی و اتخاذ پیش بینی های لازم امروزه بیش از هر زمان دیگری ضروری به نظر می رسد. رایج ترین عامل ایجاد سونامی وقوع زمین لرزه در نواحی فرورانش^۵ یا همان مرز صفحات تکتونیک پوسته زمین است. به گونه ای که حتی زلزله های عظیم بستر دریاها در خارج از این نواحی غالباً نمی توانند منجر به ایجاد سونامی شوند. به عنوان مثال زمین لرزه سال اندونزی ۲۰۱۲ با بزرگی ۸/۶ که در خارج ناحیه فرورانش رخ داد، سبب شکل گیری امواج سونامی و هیچ گونه آسیبی نشد؛ در حالی که رخداد زمین لرزه سال ۲۰۰۴ (با بزرگی ۹) در مجاورت همین نواحی و داخل ناحیه فرورانش (در مرز صفحات ساندا و هند) موجب پیدایش امواجی گشت که این امواج در نهایت مرگ بیش از ۲۲۵ هزار نفر از انسان ها را رقم زد.

یکی از نواحی فرورانش زمین به نام مکران در شمال غرب اقیانوس هند و در مجاورت سواحل جنوبی ایران و پاکستان، در اثر برخورد صفحه عربی به صفحه اوراسیا شکل گرفته و از نزدیکی تنگه هرمز تا کراچی به طول تقریبی ۹۰۰ کیلومتر امتداد یافته است (شکل ۱). مجموعه

^۱ مری، موسسه ملی اقیانوس شناسی، ehsan_rastgoftar@sina.kntu.ac.ir

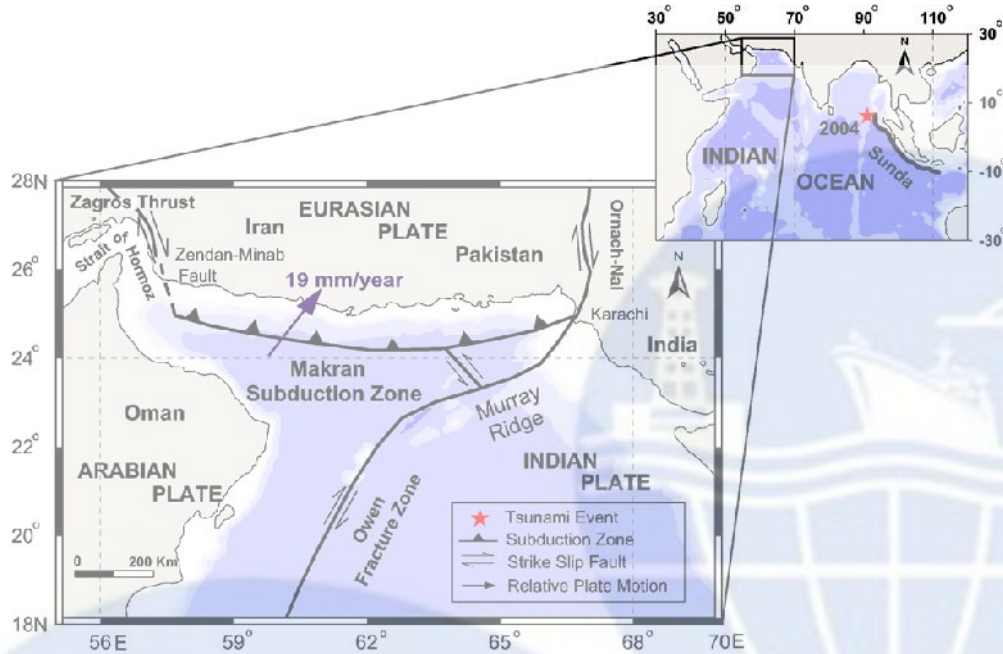
^۲ استادیار، موسسه ملی اقیانوس شناسی، akbarpour@inio.ac.ir

^۳ استادیار، موسسه ملی اقیانوس شناسی، v_chegini@inio.ac.ir

^۴ مری، موسسه ملی اقیانوس شناسی، rostamivf@yahoo.com

^۵ Subduction zone

اطلاعات به دست آمده از شواهد تاریخی، از وقوع سونامی‌های لرزه‌ای در ناحیه‌ی فرورانش مکران در گذشته و احتمال وقوع آن‌ها در آینده حکایت دارد. برجسته‌ترین این موارد به زلزله و سونامی همراه آن در سال ۱۹۴۵ مربوط می‌شود که حداقل ۴۰۰۰ کشته در سواحل پاکستان، هند، ایران و عمان برجای گذاشت [۱]. بنابر این خطر سونامی برای سواحل ایران در دریای عمان کاملاً ملموس است. مهم‌ترین ناحیه‌ی دارای جمعیت ساحلی ایران در دریای عمان سواحل خلیج چابهار محسوب می‌شود که چندین بندر حائز اهمیت کشور از جمله بندر چابهار، کنارک در اطراف آن جای گرفته است. با جمع‌بندی موارد فوق می‌توان به ضرورت ارزیابی اثر سونامی‌های احتمالی مکران بر خلیج چابهار پی برد.



شکل (۱) نقشه‌ی تکتونیکی ناحیه‌ی فرورانش مکران در شمال غرب اقیانوس هند [۱]

سناریوهای زمین لرزه‌های احتمالی

بدیهی است تخمین دقیق موقعیت و شدت زمین لرزه‌ها امکان‌پذیر نیست؛ زمین لرزه‌ی احتمالی می‌تواند در هر نقطه‌ای از امتداد گسل مکران با بزرگی و ابعاد مختلف رخ دهد. از اینرو ضروری است تا وقوع سناریوهای گوناگون رخداد زمین لرزه تعریف شده و ارزیابی گردد. با توجه به این که هدف اصلی این مطالعه، بررسی آب‌گرفتگی ناشی از سونامی مکران در خلیج چابهار است، سناریوهای موردنظر به گونه‌ای تعریف می‌گردند تا مرکز زمین لرزه احتمالی به طور تقریبی در روبروی خلیج چابهار واقع شوند. از سوی دیگر به منظور بررسی اثرات شدت‌های متفاوت زمین لرزه، بزرگی گشتاور زلزله (M_w) در سناریوهای مختلف در محدوده‌ی بین ۷/۵ تا ۹ تغییر می‌نماید. پس سناریوهای تعریف شده را می‌توان به طور کلی به شکل جدول ۱ خلاصه کرد.

جدول (۱) مشخصات سناریوهای تعریف شده برای وقوع زمین لرزه

شماره‌ی سناریو	بزرگی گشتاور زلزله (متر)	مختصات مرکز زمین لرزه	
		عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی
۱	۷/۵	۲۴/۴۱	۶۰/۷۱
۲	۸	۲۴/۴۷	۶۰/۴۱
۳	۸/۳	۲۴/۴۳	۶۰/۶۸
۴	۸/۵	۲۴/۴۳	۶۱/۱۴
۵	۸/۶	۲۴/۴۷	۶۰/۶۵
۶	۹	۲۴/۴۸	۶۰/۶۵

مدلسازی عددی

طبق روند رایج مدلسازی سونامی، شبیه‌سازی‌های سناریوهای تعریف‌شده شامل سه مرحله‌ی اصلی، یعنی تولید، انتشار و بالاروی (آب‌گرفتگی) امواج است. میزان بالاروی و شدت ضربه‌ی سونامی به اثرات پیچیده‌ی عمق دریا و تراز ساحل در مجاورت ناحیه‌ی مورد نظر وابسته است. ثبت این تأثیرات پیچیده معمولاً نیازمند در اختیار داشتن اطلاعات هیدروگرافی و توپوگرافی با یک درشت‌نمایی بسیار بیشتر از درشت‌نمایی به کاررفته در مدلسازی مراحل تولید و انتشار سونامی است. اطلاعات به کاررفته در مدلسازی انتشار امواج دارای درشت‌نمایی در مرتبه‌ی کیلومتر هستند که برای سونامی‌های با طول موج طویل در آب عمیق کفایت می‌کنند. در مقابل، درشت‌نمایی اطلاعات مدلسازی آب‌گرفتگی سونامی به‌طور نمونه در مرتبه‌ی چند ده متر است [۲].

حجم بالاتر داده‌های هیدروگرافی و توپوگرافی موردنیاز جهت شبیه‌سازی آب‌گرفتگی سونامی، سبب می‌شود اجرای آن به منابع محاسباتی و زمان بسیار بیشتری نسبت به اجرای مدلسازی انتشار سونامی نیاز داشته باشد. از سوی دیگر دستیابی به این داده‌ها با وضوح مورد نیاز مدلسازی بالاروی در سراسر محدوده‌ی شبیه‌سازی سونامی به سختی امکان‌پذیر است. از این رو استفاده از مدل آب‌گرفتگی برای شبیه‌سازی کل فرآیند یک واقعه‌ی سونامی (از تولید تا بالاروی) غیرعملی است و بنابر این در مدل‌های عددی شبیه‌سازی سونامی معمولاً شیوه‌ی ترکیبی به‌کار برده می‌شود و بخش سنگین محاسباتی مدلسازی، یعنی مرحله‌ی بالاروی، تنها به آن منطقه‌ی جغرافیایی که به جزئیات فرآیند آب‌گرفتگی نیازمند است، محدود می‌گردد.

مشابه روند مذکور، در تحقیق حاضر نیز شبیه‌سازی‌ها در دو مدل مجزای سراسری و محلی انجام می‌شود؛ به این صورت که در ابتدا در مدل سراسری که محدوده‌ی آن تقریباً سرتاسر قلمرو دریای عمان و گسل مکران را پوشش می‌دهد، تولید امواج سونامی و سپس انتشار آن‌ها به سمت سواحل شبیه‌سازی می‌شود. در انتهای پیشروی امواج و در آستانه‌ی برخورد آن‌ها با خلیج چابهار اجرای مدل سراسری متوقف شده و مدل محلی آغاز می‌شود. در این مدل که محدوده‌ی آن بر خلیج چابهار متمرکز شده و داده‌های هیدروگرافی و توپوگرافی آن درشت‌نمایی بیشتری دارند، برخورد امواج سونامی با ساحل و بالاروی احتمالی آن‌ها در خشکی مدلسازی می‌شود. محدوده و درشت‌نمایی مدل‌های سراسری و محلی در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲) محدوده و درشت‌نمایی داده‌ها در مدل‌های سراسری و محلی

مدل	درشت‌نمایی (فواصل بین نقاط محاسباتی)	مختصات غرب	مختصات شرق	مختصات جنوب	مختصات شمال
سراسری	۱ دقیقه جغرافیایی (حدود ۱۸۰۰ متر)	۵۷/۰۰	۶۷/۰۰	۲۱/۰۴	۲۸/۰۴
محلی	۳۰ ثانیه جغرافیایی (حدود ۹۰ متر)	۶۰/۳۹	۶۰/۶۵	۲۵/۱۶	۲۵/۴۷

مدل سراسری

در مدل سراسری جهت شبیه‌سازی تولید سونامی، اغتشاش ابتدایی پدید آمده در تراز سطح دریا یا همان موج اولیه سونامی محاسبه می‌شود. به هنگام مدلسازی سونامی‌های ناشی از زلزله معمولاً فرض می‌شود که تغییرات به وجود آمده در اثر وقوع زلزله در بستر دریا، عیناً و بلافاصله به سطح آزاد آب منتقل شده و موج اولیه‌ی سونامی را پدید می‌آورد. بنابر این در مدل سراسری با استفاده از حل نیم‌صفحه‌ی الاستیک مستطیلی Okada (۱۹۸۵) تغییرات بستر یا همان تراز سطح آزاد اولیه محاسبه می‌شود [۳]. در این روش با استفاده از روابط تحلیلی تنش کرنشی و با در اختیار داشتن پارامترهای لرزه‌ای از قبیل طول گسل (L)، عرض گسل (W)، میزان لغزش بر روی سطح گسیختگی (u)، زاویه‌ی شیب گسل (δ)، زاویه‌ی راستای گسل با جهت شمال جغرافیایی در سطح زمین (θ)، زاویه‌ی میل یا لغزش (ϕ) و عمق گسل از سطح دریا (H)، تغییر شکل بستر دریا محاسبه می‌شود.

مقدار طول، عرض و لغزش گسل که مطابق روابط Wells و Coppersmith (۱۹۹۴) به بزرگی زلزله وابسته است (روابط ۱ تا ۳)، در سناریوهای گوناگون تغییر می‌کند [۴]؛ در حالی که مقدار سایر پارامترها مطابق جدول ۳ در نظر گرفته شده و در سناریوهای مختلف ثابت است.

$$\text{Log}(L) = -3.22 + 0.69M_w \quad (۱)$$

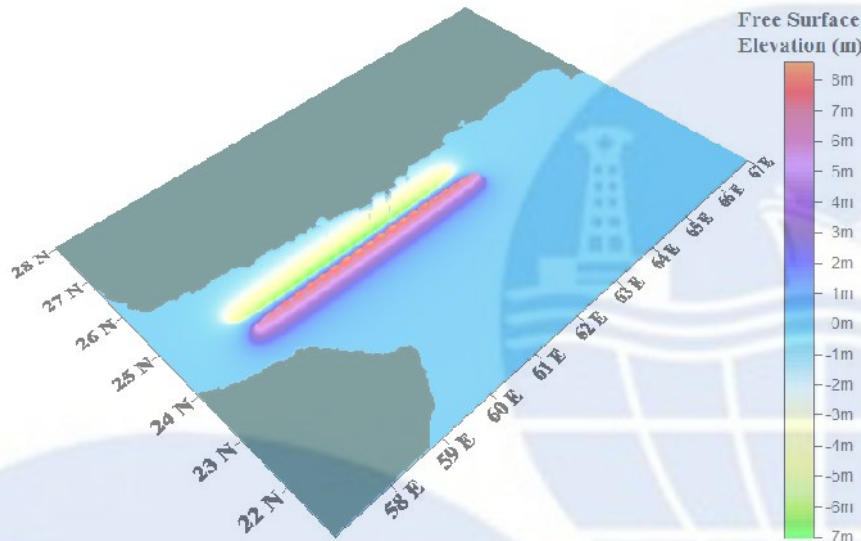
$$\text{Log}(W) = -1.01 + 0.32M_w \quad (۲)$$

$$\text{Log}(u) = -4.80 + 0.69M_w \quad (۳)$$

جدول ۳) پارامترهای لرزه‌ای در نظر گرفته شده برای مدل Okada

زاویه شیب (δ)	زاویه راستا (θ)	زاویه لغزش (ϕ)	عمق گسل (H)
3°	275°	90°	۲۰ کیلومتر

با معرفی مقادیر پارامترهای لرزه‌ای و اجرای مدل سراسری تولید سونامی شبیه‌سازی شده و موج اولیه‌ی سونامی حاصل می‌شود. مطابق انتظار با افزایش بزرگی زلزله در سناریوهای گوناگون میزان تغییرات ایجاد شده در تراز سطح آزاد آب افزایش می‌یابد؛ به طوری که در سناریوی ۶ در اثر وقوع زلزله‌ای با بزرگی ۹، حدود ۷ متر فرورفتگی و ۸ متر بالآمدگی در سطح دریا در لحظه نخست ایجاد می‌شود (شکل ۲). در حالی که برای زلزله‌ای با بزرگی ۷/۵ این مقادیر در حدود ۰/۵ متر هستند.



شکل ۲) سطح آزاد اولیه محاسبه شده در اثر وقوع زلزله (سناریوی ۶)

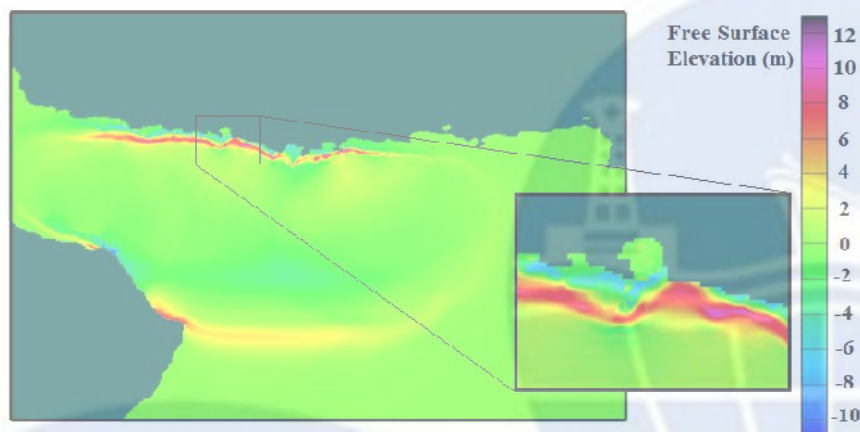
در ادامه‌ی مدل سراسری تراز سطح آزاد آب به دست آمده از بخش شبیه‌ساز تولید سونامی به عنوان شرایط اولیه به معادلات بخش انتشار که معادلات بوسینسکی کاملاً غیرخطی و پراکنا هستند، معرفی می‌شوند. این معادلات قادرند اثرات غیرخطی شدن موج و پراکنندگی فرکانسی آن را به خوبی در نظر بگیرند؛ هر چند با توجه به طول موج زیاد امواج سونامی لرزه‌ای، این امواج در زمره‌ی امواج بلند قرار گرفته و اثر پراکنندگی فرکانسی بر آن‌ها ناچیز است. معادلات مذکور که توسط Wei و همکاران (۱۹۹۵) ارائه شدند [۵]، عبارتند از:

$$\eta_t + \nabla \cdot \left\{ (h + \eta) \left[u_\alpha + \left(z_\alpha + \frac{1}{2}(h - \eta) \right) \nabla (\nabla \cdot (hu_\alpha)) + \left(\frac{1}{2}z_\alpha^2 - \frac{1}{6}(h^2 - h\eta + \eta^2) \right) \nabla (\nabla \cdot u_\alpha) \right] \right\} = 0 \quad (4)$$

$$u_{\alpha t} + (u_\alpha \cdot \nabla) u_\alpha + g \nabla \eta + z_\alpha \left\{ \frac{1}{2} z_\alpha \nabla (\nabla \cdot u_\alpha) + \nabla (\nabla \cdot (hu_\alpha)) \right\} + \nabla \left\{ \frac{1}{2} (z_\alpha^2 - \eta^2) (u_\alpha \cdot \nabla) (\nabla \cdot u_\alpha) + \frac{1}{2} [\nabla \cdot (hu_\alpha) + \eta \nabla \cdot u_\alpha]^2 \right\} + \nabla \left\{ (z_\alpha - \eta) (u_\alpha \cdot \nabla) (\nabla \cdot (hu_\alpha)) - \eta \left[\frac{1}{2} \eta \nabla \cdot u_\alpha + \nabla \cdot (hu_\alpha) \right] \right\} = 0 \quad (5)$$

در این معادلات که به ترتیب بیانگر بقای جرم و اندازه حرکت (در دو راستای متعامد) هستند η تراز سطح، h عمق آب ساکن، u_α بردار سرعت افقی در عمق $z = z_\alpha = -0,531h$ ، $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$ ، گرادیان افقی و اندیس t مشتق جزئی نسبت به زمان را نشان می‌دهد. با حل این معادلات با استفاده از روش تفاضل محدود و یک طرح عددی پیش‌بینی و اصلاح مرتبه‌ی چهارم، تراز سطح آزاد و سرعت‌های افقی در گام‌های زمانی مدل سراسری حاصل می‌شوند و پیشروی امواج مدلسازی می‌گردد. گام زمانی با توجه به فواصل یک دقیقه‌ی جغرافیایی بین نقاط محاسباتی در مدل سراسری و شرایط پایداری عددی، ۲/۴۴ ثانیه تعیین می‌شود.

همان گونه که پیشتر اشاره شد، با رسیدن امواج سونامی به سواحل چابهار مدل سراسری متوقف شده و مدل محلی آغاز می‌شود. تعیین صحیح و دقیق زمان توقف مدل سراسری در محاسبات بالاروی بسیار حائز اهمیت است؛ در صورتی که این زمان دیرتر از لحظه‌ی مناسب برگزیده شود، امواج سونامی در مدل سراسری داخل خشکی نفوذ می‌کنند که این میزان بالاروی با توجه به درشت‌نمایی کم مدل سراسری برای محاسبه‌ی بالاروی دقیق نیست؛ در نتیجه در محاسبه‌ی بالاروی نهایی توسط مدل محلی، که بر پایه‌ی خروجی‌های مدل سراسری استوار است، خطا پدید می‌آید. از سوی دیگر در صورتی که مدل سراسری زودتر از لحظه‌ی مطلوب متوقف شود، امواج سونامی به صورت کامل و حقیقی به مدل محلی منتقل نمی‌شوند و میزان بالاروی کمتر از مقدار واقعی محاسبه می‌شود. بنابر این گام زمانی پایانی مدل سراسری باید به گونه‌ای تعیین شود که موج سونامی در آن لحظه از یک طرف به شکل کامل (به همراه قله‌ی خود) به محدوده‌ی آبی مدل محلی رسیده باشد و از طرف دیگر به شکل قابل توجهی در مناطق خشک محدوده‌ی مدل محلی وارد نشده باشد (شکل ۳). طبیعتاً هر قدر محدوده‌ی مدل محلی گسترده‌تر باشد، شرایط فوق آسان‌تر فراهم می‌شود.

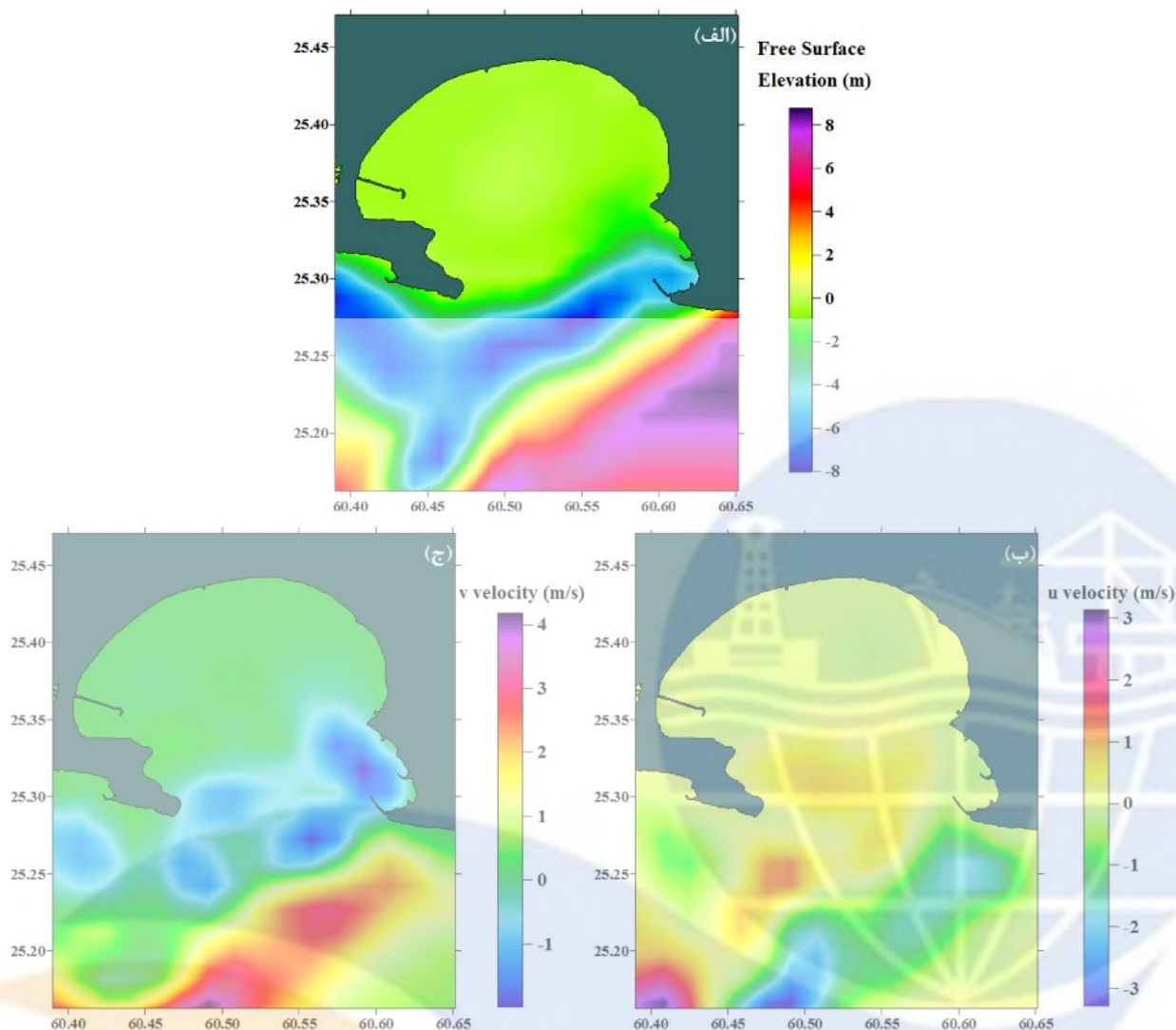


شکل ۳) وضعیت موج سونامی در لحظه‌ی توقف مدل سراسری (سناریوی ۶)

مدل محلی

همان طور که بیان شد مدل محلی بر پایه‌ی انتقال امواج سونامی از مدل سراسری بر آن شکل یافته و خروجی‌های مدل سراسری شرایط اولیه این مدل را فراهم می‌کنند. بنابر این تراز سطح آزاد و سرعت‌های افقی (در دو جهت) در گام زمانی پایانی مدل سراسری ثبت شده و به مدل محلی منتقل می‌شوند. قبل از به کارگیری این خروجی‌ها به عنوان شرایط اولیه، محدوده‌ی جغرافیایی آن‌ها به محدوده‌ی مدل محلی کاهش و درشت‌نمایی داده‌های آن‌ها به میزان درشت‌نمایی مدل محلی افزایش می‌یابد (شکل ۴).

ICOPMAS



شکل ۴) شرایط اولیه مدل محلی (سناریوی ۶): الف) سطح آزاد ب) سرعت در راستای طول جغرافیایی ج) سرعت در راستای عرض جغرافیایی

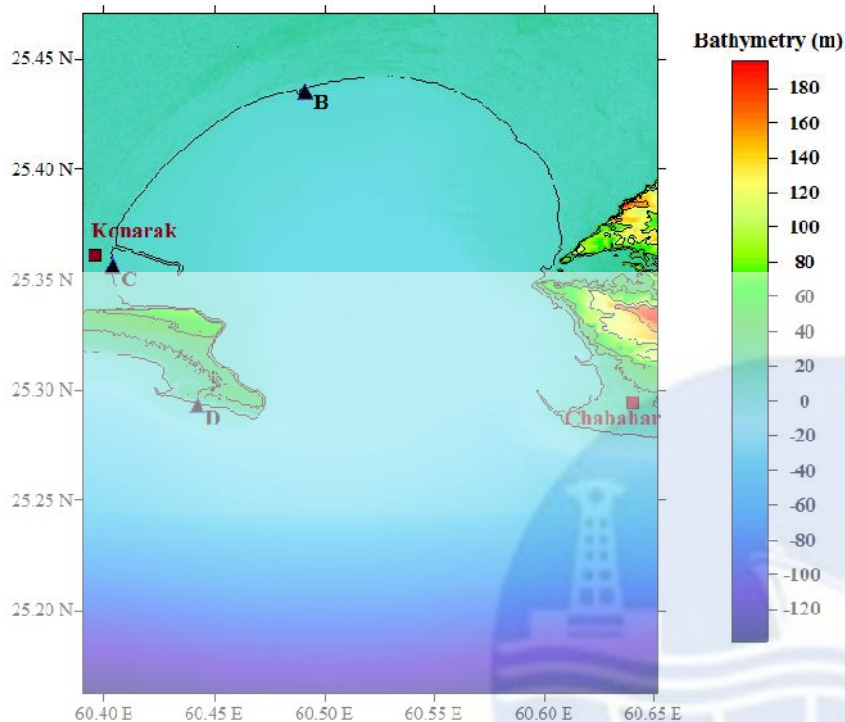
سرانجام با معرفی شرایط اولیه به معادلات مدل محلی و اجرای مدل، ضربه‌ی امواج سونامی در خلیج چابهار محاسبه می‌شود. معادلات مدل محلی همان معادلات بوسینسکی به کار رفته در مرحله‌ی انتشار هستند؛ با این تفاوت که جهت ثبت شکست موج و بالاروی امواج، عبارتهایی به معادلات افزوده می‌شود. به منظور در نظر گرفتن اثر شکست امواج یک روابط نوع لزجت گردابه‌ای ساده به معادلات ممتهم اضافه می‌شوند تا استهلاك و آشفتگی ناشی از شکست را مدل کنند [۶]. از سوی دیگر برای قادر ساختن معادلات به ثبت بالاروی روش مجرا^۷ (بستر قابل نفوذ) که توسط (۱۹۸۳) ارائه شد، استفاده می‌شود [۷]. در این روش به‌جای ساحلی با بستری یکپارچه، فرض می‌شود که ساحل متخلخل است و مجراهای باریکی دارد. لذا اصلاحاتی در معادلات پیوستگی اعمال شده و این امکان برای تراز آب به‌وجود می‌آید تا زیر تراز خشکی قرار گیرد. در نهایت با حل معادلات تکمیلی بالاروی امواج شبیه‌سازی می‌شود.

نتایج

با پایان یافتن شبیه‌سازی نتایج مدنظر مرحله‌ی بالاروی، یعنی ارتفاع بالاروی و آب‌گرفتگی^۷، حاصل می‌گردد. منظور از ارتفاع بالاروی و آب‌گرفتگی به ترتیب ارتفاع امواج سونامی در مجاورت خط ساحلی و میزان پیشروی افقی سونامی در داخل سواحل می‌باشد. به منظور محاسبه‌ی دقیق موج سونامی و ارتفاع بالاروی چندین نقطه‌ی خروجی در مجاورت خط ساحلی و در مدل محلی تعریف شده است تا سری زمانی امواج را ثبت نمایند. موقعیت مکانی این نقاط به همراه توپوگرافی و هیدروگرافی خلیج چابهار در شکل ۵ و سری‌های زمانی ثبت شده توسط نقاط خروجی در شکل ۶ ارائه شده است.

^۶ Slot Method

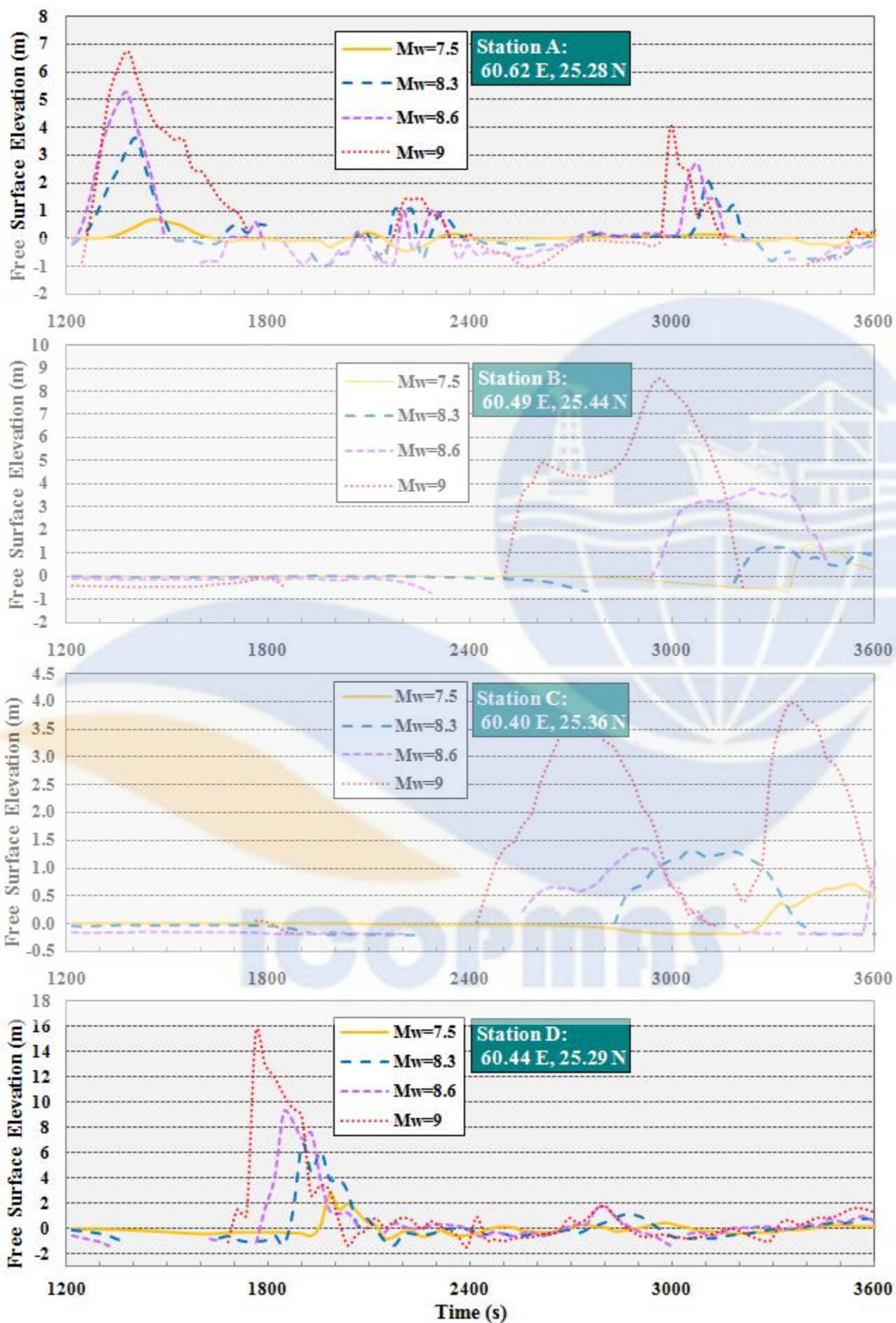
^۷ Inundation



شکل ۵) توپوگرافی و هیدروگرافی خلیج چابهار و موقعیت نقاط خروجی سری زمانی امواج

بررسی نقاط خروجی مدل عددی در شکل ۶ نشان می‌دهد افزایش بزرگی زلزله سبب می‌شود، مطابق انتظار، امواج مرتفع‌تری در سواحل خلیج چابهار ثبت شود. عملکرد گسل مکران به‌گونه‌ای است که فرورفتگی ایجاد شده در سطح آزاد دریا در اثر زلزله (حضيض موج) در سمت سواحل ایران قرار می‌گیرد (شکل ۲). بنابر این پس از انتشار سونامی در ابتدا حضيض موج در سواحل ایران مشاهده شده و تراز سطح آب پایین می‌رود که سری زمانی موج‌های ثبت شده این امر را تأیید می‌نمایند. این کاهش تراز سطح آب سبب می‌شود در مناطقی که دریا عمق چندانی نداشته باشد (عمق آب از میزان این کاهش تراز سطح آزاد کمتر باشد) خشکی در دریا نفوذ یافته و دریا عقب نشیند. در نقاط خروجی مدل نیز، که در مجاورت خط ساحلی هستند و عمق چندانی ندارند، این پدیده مشاهده می‌شود و در هنگامی که کاهش تراز سطح آب از عمق بستر در نقطه‌ی خروجی تجاوز می‌کند، سری زمانی امواج منقطع می‌شود.

ICOPMAS



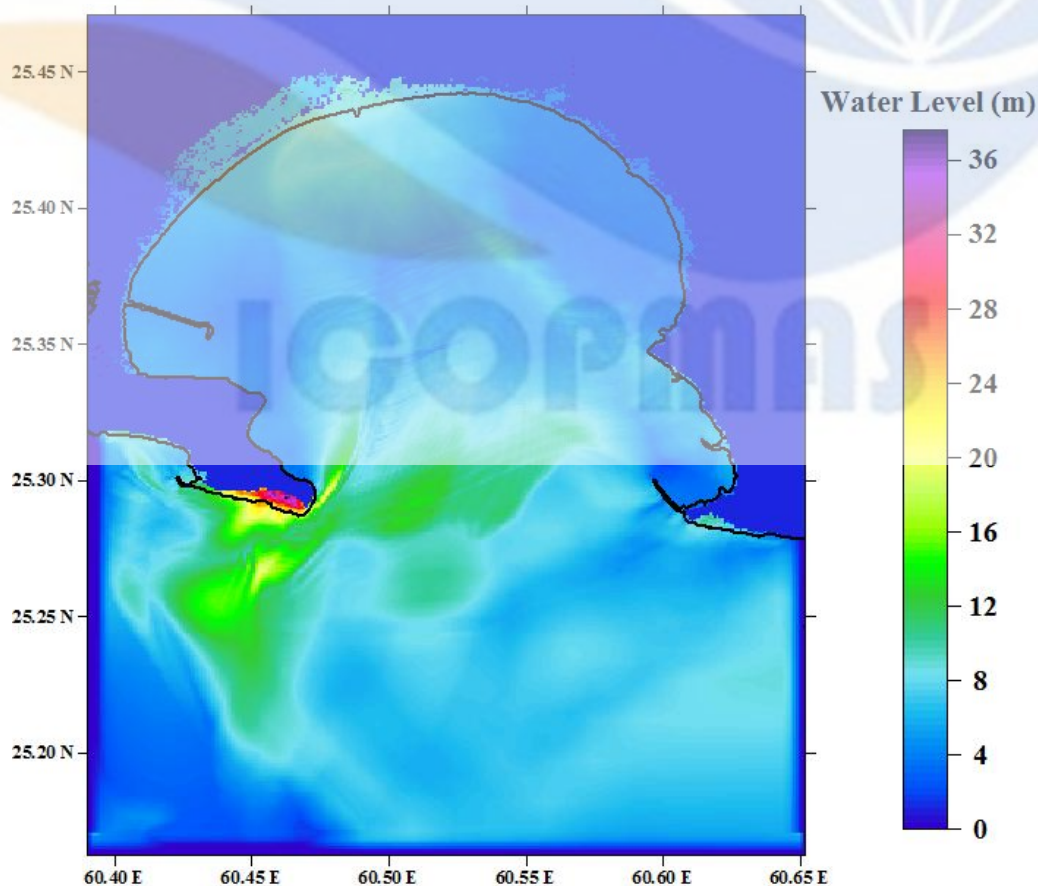
شکل ۶ سری زمانی ارتفاع امواج در نقاط خروجی مدل محلی

با توجه به شکل ۳ و شکل ۴ (الف) ملاحظه می‌شود امواج سونامی از سمت دماغه‌ی شرقی در حال برخورد به خلیج چابهار هستند و از این رو همان گونه که سری‌های زمانی نشان می‌دهند نقطه A اولین نقطه‌ای است که موج سونامی را در گام‌های زمانی ابتدایی مدل محلی دریافت می‌نماید. زمان رسیدن امواج سونامی به این نقطه‌ی خروجی که در مجاورت بندر چابهار قرار گرفته است، در حدود ۲۰ دقیقه پس از وقوع زمین‌لرزه و تقریباً برابر با زمان توقف مدل سرلسری است.

امواج سونامی در سناریوهای یکسان تقریباً با همان ارتفاع ثبت شده در بندر چابهار (نقطه A) در سواحل داخلی خلیج چابهار نیز (نقطه B) مشاهده می‌شوند اما با ارتفاع خیلی کمتر (حدود نصف) به بندر کنارک می‌رسند (نقطه C)؛ زیرا بندر کنارک کاملاً در پشت دماغه‌ی خلیج غربی پنهان شده و امواج اصلی سونامی به این بندر برخورد نمی‌کنند. از سوی دیگر فاصله‌ی زمانی نسبتاً بین رسیدن امواج سونامی به نواحی خارجی خلیج و نقاط داخلی دیده می‌شود. با توجه به طول موج زیاد امواج سونامی این امواج در گروه امواج آب کم عمق (امواج بلند) شمرده می‌شوند. در نتیجه با فرض تئوری موج خطی، سرعت فازی این امواج با جذر عمق اقیانوس متناسب خواهد بود ($c = (gh)^{1/2}$). بنابراین این داخل خلیج چابهار به دلیل عمق کم آب، سرعت امواج سونامی کاهش می‌یابد و این امر فاصله‌ی زمانی زیاد مذکور را توجیه می‌نماید.

حداکثر ارتفاع ثبت شده از موج سونامی ناشی از وقوع زمین‌لرزه‌ی با بزرگی گشتاور ۹ (سناریوی ۶) در سرتاسر مدل محلی در شکل ۷ نمایش داده شده است. ضمن این که در این شکل می‌توان میزان آب‌گرفتگی یا همان نفوذ امواج به خشکی را مشاهده کرد. با بررسی شکل ۷ می‌توان دریافت سونامی ناشی از زمین‌لرزه‌ی با بزرگی ۹ می‌تواند امواجی در حدود ۱۰ متر را در بندر چابهار و سواحل داخلی خلیج چابهار ایجاد نماید. با این وجود میزان آب‌گرفتگی در بندر چابهار نسبت به نواحی داخلی خلیج چابهار، که خالی از سکنه هستند، کمتر است (حدود ۵۰۰ و ۱۵۰۰ متر). دماغه‌ی غربی خلیج با توجه به تراز بالای ساحل در آن ناحیه (شکل ۵) به مانند دیواره‌ی مرتفعی در مقابل امواج سونامی عمل می‌کند و این امر سبب می‌شود حداکثر ارتفاع امواج سونامی در این نواحی شکل گیرد. با این وجود میزان آب‌گرفتگی در این نواحی نیز با توجه به ارتفاع امواج چندان زیاد نیست (حدود ۵۰۰ متر).

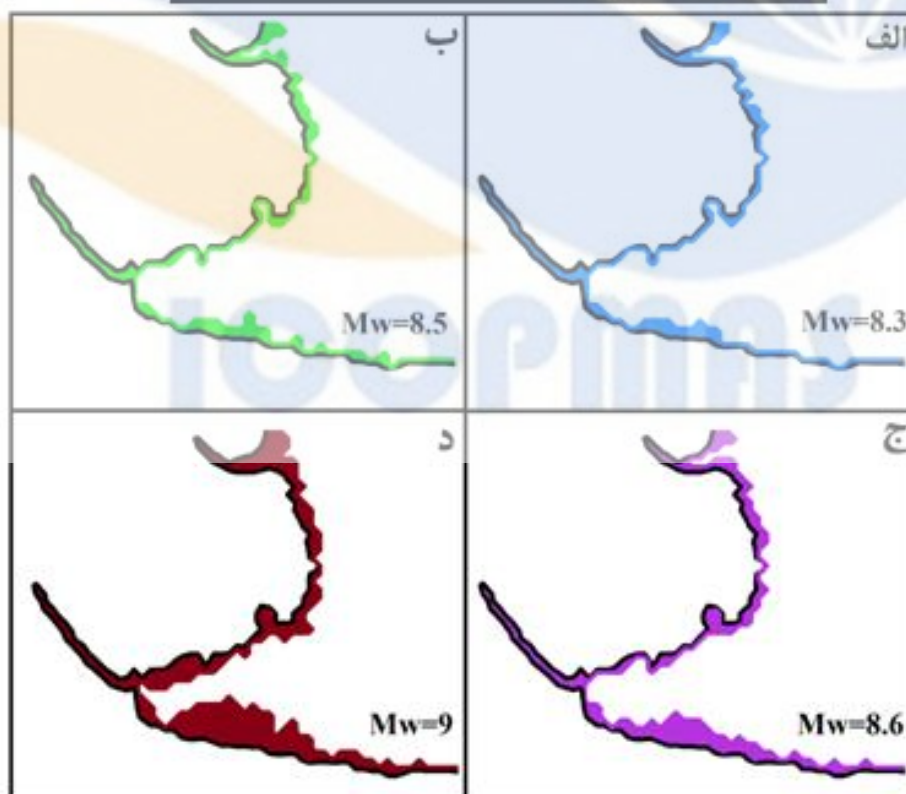
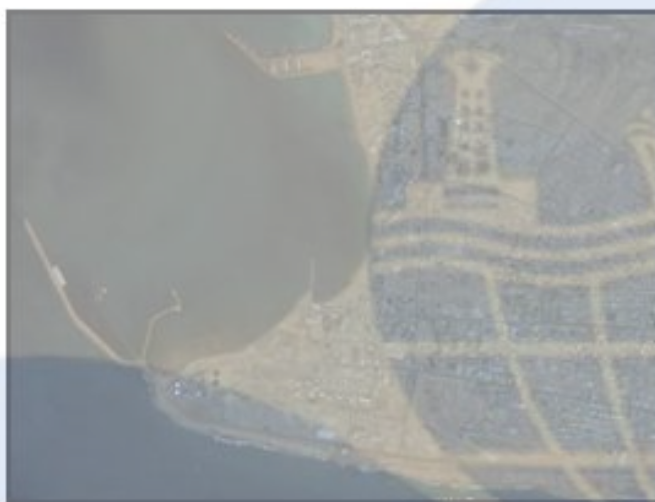
تغییرات مشاهده شده در میزان آب‌گرفتگی بین سواحل داخلی و سواحل خارجی (بندر چابهار و دماغه‌ی غربی) خلیج چابهار را می‌توان با توجه به صخره‌ای بودن ساحل در مجاورت بندر چابهار و کلاً تمامی سواحل بیرونی این خلیج و همچنین توپوگرافی خلیج چابهار که بیانگر تراز زیاد خشکی در بندر چابهار و دماغه‌ی غربی است، توجیه نمود (شکل ۵). در حالی که در نواحی داخلی خلیج چابهار، سواحل بسیار پست و دارای شیب ملایم هستند و از این رو امواج سونامی آسان‌تر در آن‌ها پیشروی می‌نمایند.



شکل ۷) حداکثر تراز سطح آب در محدوده‌ی خلیج چابهار (سناریوی ۶)

از سوی دیگر با دقت در شکل ۷ مشاهده می‌شود که در اثر سونامی زمین‌لرزه‌ی با بزرگی ۹ تقریباً هیچ آب‌گرفتگی در بندر کنارک رخ نمی‌دهد. البته در این ناحیه، بر خلاف بندر چابهار، مرتفع بودن ساحل علت کم‌تر بودن آب‌گرفتگی نسبت به سواحل داخلی خلیج چابهار نیست؛ بلکه همان‌گونه که ذکر شد به دلیل اینکه بندر کنارک کاملاً در پشت دماغه‌ی غربی خلیج واقع شده، امواج سونامی با ارتفاع کم‌تری به آن برخورد می‌کنند (حدود ۴ متر).

آب‌گرفتگی‌های پدید آمده در بندر چابهار در صورت وقوع زمین‌لرزه‌های مطابق با سناریوهای تعریف شده، در شکل ۸ نمایش داده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود و پیش‌بینی می‌شد با کاهش بزرگی زلزله در سناریوها، محدوده‌ی ناحیه‌ی آب‌گرفتگی کاهش می‌یابد. به دلیل این که طبق نتایج حاصله، در سناریوهای مربوط به زمین‌لرزه‌های با بزرگی کمتر از $8/3$ آب‌گرفتگی قابل توجهی در بندر چابهار پدید نمی‌آید، بنابراین برای این سناریوها (سناریوهای ۱ و ۲) در شکل ۸ نقشه‌ی آب‌گرفتگی ارائه نشده است. ضمن اینکه همان‌طور که بیان شد زمین‌لرزه‌ی با بزرگی ۹ تقریباً نمی‌تواند آب‌گرفتگی در بندر کنارک ایجاد کند. پس بدیهی است در سایر سناریوها نیز امواج سونامی قادر نیستند در بندر کنارک نفوذ کنند و از اینرو برای این بندر نقشه‌ی آب‌گرفتگی نمایش داده نشده است.



شکل ۸) آب‌گرفتگی بندر چابهار در اثر وقوع زمین‌لرزه‌های مطابق با سناریوهای جدول ۱؛
 الف) سناریوی ۳، ب) سناریوی ۴، ج) سناریوی ۵ و د) سناریوی ۶

نتیجه گیری

با توجه به قرارگیری ناحیه‌ی فرورانش مکران در مجاورت سواحل کشور در دریای عمان، سناریوهای گوناگونی از وقوع زمین‌لرزه (با بزرگی گشتاور متفاوت) در دریای عمان و در مجاورت خلیج چابهار و سونامی همراه آن تعریف شد. در هر یک سناریوها پارامترهای لرزه‌ای مورد نیاز تعیین و اغتشاش اولیه‌ی ایجاد شده در سطح آب یا همان تولید سونامی شبیه‌سازی شد. در ادامه با استفاده از معادلات بوسینسکی مدل‌سازی انتشار امواج سونامی صورت گرفت. بر خلاف مطالعات پیشین که جهت شبیه‌سازی سونامی‌های مکران تنها یک مدل سراسری با محدوده‌ی وسیع را در نظر می‌گرفتند، در تحقیق حاضر یک مدل محلی نیز با شبکه‌های مکانی ریزتر در محدوده‌ی خلیج چابهار تعریف شد تا بالاروی سونامی در این خلیج ثبت و محاسبه گردد. در آستانه‌ی رسیدن امواج به خلیج چابهار مدل سراسری متوقف و مدل محلی اجرا گشت. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد در صورت وقوع زمین‌لرزه در ناحیه‌ی مکران و در مجاورت خلیج چابهار، امواج سونامی پس از یک بازه‌ی زمانی ۲۰ و ۴۰ دقیقه‌ای به ترتیب به بندر چابهار و کنارک می‌رسند. البته در سمت سواحل ایران، قبل از رسیدن امواج سونامی در ابتدا حوض موج مشاهده شده و تراز سطح آب پایین می‌رود که ساکنان مناطق ساحلی می‌توانند از این مورد به عنوان یک هشدار طبیعی استفاده کنند. همچنین طبق نتایج حاصله با افزایش بزرگی زلزله در سناریوهای مختلف ارتفاع امواج و میزان آب‌گرفتگی در سواحل افزایش می‌یابد. به طوری که در بحرانی‌ترین سناریو با بزرگی ۹، ارتفاع امواج در بندر چابهار و برخی بخش‌های داخلی خلیج به حدود ۱۰ متر می‌رسد. با این حال میزان آب‌گرفتگی در بندر چابهار به دلیل سواحل صخره‌ای و تراز بالای خشکی این بندر خیلی زیاد نیست و در همان بحرانی‌ترین سناریو در حدود ۵۰۰ متر است. در حالی که در سواحل ملایم و پست بخش داخلی خلیج میزان آب‌گرفتگی به ۱۵۰۰ متر نیز می‌رسد. در بندر کنارک به دلیل قرارگیری آن در پشت دماغه‌ی غربی خلیج، امواج سونامی با ارتفاع کمتری دریافت می‌شوند. از اینرو حتی در بحرانی‌ترین سناریو با بزرگی ۹ که امواج سونامی با ارتفاع حدوداً ۴ متر به بندر کنارک می‌رسند، آب‌گرفتگی در این بندر رخ نمی‌دهد.

مراجع

- [۱]- Heidarzadeh, M., Pirooz, M. D., Zaker, N. H., Yalciner, A. C., Mokhtari, M., Esmaily, A. (۲۰۰۸), Historical Tsunami in the Makran Subduction Zone off the Southern Coasts of Iran and Pakistan and Results of Numerical Modeling, Ocean Engineering, Vol. ۳۵ (۸-۹), ۷۷۴-۸۸۶.
- [۲]- Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC), Manuals and Guides ۵۲, (June ۲۰۰۹), Tsunami Risk Assessment Mitigation for the Indian Ocean; knowing Your Tsunami Risk – and What to Do About it.
- [۳]- Okada, Y., (۱۹۸۵), Surface Deformation due to Shear and Tensile Faults in a Half Space, Bulletin of Seismological Society of America, Vol. ۷۵, No. ۴, ۱۱۳۵-۱۱۵۴.
- [۴]- Wells, D. L., Coppersmith, K. J., (۱۹۹۴), New Empirical Relationships Among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement, Bulletin of the Seismology Society of America, Vol. ۸۴, No. ۴, ۹۷۴-۱۰۰۲.
- [۵]- Wei, G., Kirby, J. T., Grilli, S. T., Subramanya, R. (۱۹۹۵), a Fully Nonlinear Boussinesq Model for Free Surface Waves. Part ۱: Highly Nonlinear Unsteady Waves, Journal of Fluid Mechanics, Vol. ۲۹۴, ۷۱-۹۲.
- [۶]- Kennedy, A.B., Chen, Q., Kirby, J. T., and Dalrymple, R. A. (۱۹۹۹), Boussinesq Modeling of Wave Transformation, Breaking, and Runup; I: ۱D, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, Vol. ۱۲۶, No. ۱, ۳۹-۴۷.
- [۷]- Tao, J., (۱۹۸۳), Computation of Wave Run-up and Wave Breaking, Internal Report, Danish Hydraulics Institute, Denmark.

Evaluation of Chabahar Bay Inundation Associated with Tsunami of Makran Subduction Zone

E. Rast Goftar, Research assistant, Iranian National Institute Oceanography

Ehsan_rastgoftar@sinakntu.ac.ir

M. R. Akbarpour Jannat, assistant professor, Iranian National Institute Oceanography

Akbarpour@inio.ac.ir

V. Chegini, assistant professor, Iranian National Institute Oceanography

V_chegini@inio.ac.ir

M. Rostami, Research assistant, Iranian National Institute Oceanography

rostamivf@yahoo.com

Abstract:

In this paper, using a fully nonlinear Boussinesq model, probable tsunamis caused by MSZ earthquakes is simulated and their effect and probable following run-up on Chabahar Bay's coasts, most important populated region of Iranian coasts in Oman Sea, is evaluated. Unlike previous studies which considered only a global model with limited area for simulating Makran tsunamis, the present research defines a local model with finer networks in the Chabahar bay in order to record tsunami run-ups this region. The simulation results revealed that about twenty minutes after an earthquake in Makran zone and Chabahar bay neighborhood, the tsunami waves reach Chabahar port. With the increase of earthquake magnitude, the wave's height and inundation increases in coasts; in a way that in the most critical scenario (with the magnitude of torques nine), the wave's height in Chabahar port reaches to ten meter. Nonetheless, because of rocky coasts and the high level of land, inundation in Chabahar port is not too much and in the most critical scenario it reaches to 500 meter. On the other hand, Kenarak port is place behind the western cape of bay and receives tsunami waves with lower height and even in the most critical scenario, the tsunami waves with the height of 4 meter cannot result in inundation in this port.

Key word: Tsunami modeling, Makran subduction zone, Chabahar Bay