

شبیه‌سازی عددی امواج سونامی ناشی از زمین‌لغزش احتمالی در دریای خزر بر اثر منشاء شناسایی شده روبروی مصب سفیدرود

محمودرضا اکبرپور جنت^{۱*}، احسان راست‌گفتار^۲، سمیه فرهنگ بافتانی^۳

- ۱- پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی، تهران، ایران، پست الکترونیکی: akbarpour@inio.ac.ir
۲- پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی، تهران، ایران، پست الکترونیکی: e.rastgoftar@inio.ac.ir
۳- دانش‌آموخته فیزیک دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر، ایران، پست الکترونیکی: baran.farhang@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۳/۱۰

* نویسنده مسوول

تاریخ دریافت: ۹۸/۱۰/۱۵

چکیده

ارزیابی پروفیل‌هایی که از بستر دریا مابین بندر انزلی و مصب رودخانه سفیدرود استخراج شده‌اند، نشان می‌دهد که یک توده‌ی رسوبی با امکان لغزش انتقالی و ایجاد سونامی، روبروی مصب رودخانه سفیدرود واقع شده است. در تحقیق حاضر با تخمین مشخصات و حجم این زمین‌لغزش احتمالی، سونامی ناشی از آن با مدل عددی GEOWAVE شبیه‌سازی شده است. نتایج مدل نشان می‌دهد موج اولیه سونامی مذکور بسیار مرتفع است، اما با انتشار به سمت ساحل به سرعت افت می‌کند. این سونامی سبب رسیدن امواج نسبتاً مرتفع به سواحل مجاور زمین‌لغزش، و ایجاد بالاروی قابل توجه در آن مناطق می‌شود. احتمال هجوم و بالاروی این سونامی به نواحی دورتر و پرجمعیت‌تر بسیار کم است. این مسئله را می‌توان با اثر محدود سونامی‌های زمین‌لغزشی، به دلیل استهلاک شعاعی و پراکندگی مرتبط دانست. بنابر این می‌توان گفت سواحل ایرانی خزر در برابر سونامی مذکور ایمن هستند.

کلمات کلیدی: دریای خزر، سونامی، زمین‌لغزش زیرسطحی، مدل GEOWAVE، مصب سفیدرود

۱. مقدمه

اگر چه محیط آزمایشگاهی برای تولید کنترل شده و قابل تکرار امواج آب مناسب بوده و به کارگیری تجهیزات اندازه‌گیری را ممکن می‌سازد، اما در عین حال امکان وارد کردن تمامی پیچیدگی‌های موجود در طبیعت سونامی به صورت همزمان در این محیط وجود ندارد و بزرگ کردن مقیاس آزمایشگاهی و به کار بردن آن برای مقایسه با داده‌های میدانی نیز به سختی امکان‌پذیر است. بنابراین اغلب مطالعات مربوط به سونامی، بر مدلسازی‌های عددی متمرکز شده است و مدل‌های عددی فراوانی جهت شبیه‌سازی سونامی توسعه داده شده و به کار رفته‌اند.

سونامی، پدیده‌های دریایی است که در اثر عوامل گوناگونی از قبیل زمین‌لرزه‌های درون دریا، زمین‌لغزش‌های زیردریا، آتشفشان‌ها و برخورد اجرام آسمانی با آب دریاها به وجود می‌آید. وقوع سونامی‌های عظیم و هولناک در دهه‌های اخیر، غیرقابل پیش‌بینی بودن و پراکنده بودن مکانیسم‌های تولید آن، مانند زلزله‌ها و زمین‌لغزش‌ها در مکان و زمان، به ضرورت شناخت و اتخاذ پیش‌بینی‌های لازم این پدیده خطرناک می‌افزاید.

در تحقیق حاضر، عوامل مختلف ایجاد سونامی و خطرهای ناشی از آن در دریای خزر (بخشی از سواحل استان گیلان) بررسی و شناسایی شده و هر عاملی که دارای پتانسیل ایجاد سونامی در دریای خزر شناخته شود، به عنوان منشأ سونامی احتمالی در نظر گرفته می‌شود. سپس با بهره‌گیری از مدل‌سازی عددی، سونامی ناشی از عامل یا عوامل سونامی‌زا در منطقه، بازسازی شده و اثرات آن بر سواحل مورد مطالعه بررسی می‌شود.

عدم رخداد سونامی‌های برجسته در دریای خزر سبب شده است تا مطالعه‌ی سونامی برای این حوزه‌ی آبی کمتر مورد توجه قرار گیرد. از معدود تحقیقات انجام شده در این زمینه، می‌توان به مطالعه و بررسی سونامی ناشی از زمین‌لغزش زیرسطحی در دریای خزر اشاره کرد که البته منشأ سونامی در بخش میانی دریای خزر و دور از سواحل ایران بوده و طبق نتایج حاصله بر سواحل ایرانی تأثیری ندارد (Rastgoftar and Soltanpour, 2011). به عنوان مهم‌ترین مطالعه صورت‌گرفته در خارج از کشور نیز می‌توان به تحقیق انجام شده در مؤسسه اقیانوس‌شناسی روسیه Shirshov اشاره کرد که در آن تاریخچه سونامی یا وقایع شبه‌سونامی دریای خزر و همچنین لرزه‌خیزی این دریا مورد بررسی قرار گرفته است. (Dotsenko et al., 2002).

در تحقیق حاضر پس از بررسی عوامل سونامی در منطقه‌ی مورد مطالعه، یک زمین‌لغزش زیرسطحی به عنوان منشأ سونامی احتمالی در دریای خزر تعیین و مدل GEOWAVE به عنوان مناسب‌ترین مدل که قادر باشد زمین‌لغزش را به عنوان منشأ سونامی شبیه‌سازی نماید انتخاب شد.

۲. مواد و روش‌ها

۱-۲ بررسی احتمال رخداد سونامی در دریای خزر و تعیین محدوده‌ی منطقه‌ی مورد مطالعه

بررسی پیشینه‌ی تاریخی دریای خزر نشان می‌دهد که سونامی‌های کوچک یا به عبارت صحیح‌تر، وقایع شبه‌سونامی در گذشته در این دریا مشاهده شده‌اند؛ اما این وقایع چندان قابل توجه نبوده و حداکثر نوساناتی در حدود ۱ تا ۲ متر را در سطح دریا

ایجاد نموده‌اند.

نبود ناحیه فرورانش، یا همان مرزهای صفحات تکتونیکی زمین در دریای خزر را می‌توان علت اصلی عدم رخداد سونامی قابل توجه در این دریا دانست. غالباً زلزله‌هایی که در خارج از مرزهای صفحات تکتونیکی زمین اتفاق می‌افتند، به علت عدم ایجاد تغییر شکل قائم در بستر دریا نمی‌توانند به شکل‌گیری سونامی منجر شوند. بنابر این زلزله‌هایی که در دریای خزر رخ می‌دهند نمی‌توانند به جابه‌جایی بستر دریا و پیدایش موج اولیه سونامی منجر شوند، با این وجود فعالیت لرزه‌ای تنها عامل تولید سونامی در دریای خزر محسوب نمی‌شود، بلکه در دریاهایی مانند خزر امکان وقوع سونامی‌های موضعی مخرب ناشی از زمین‌لغزش‌های زیرسطحی، گسستگی تپه‌های گلی و سایر عوامل نیز وجود دارد. لازم به ذکر است که سایر عوامل یاد شده در این منطقه به دلیل نبود اطلاعات قابل اعتماد و کم بودن فراوانی وقوع، به اندازه کافی مورد مطالعه قرار نگرفته‌اند. (Dotsenko et al., 2002).

زمین‌لغزش‌های زیرسطحی در اشکال گوناگون، پس از زلزله‌های نواحی فرورانش رایج‌ترین عامل ایجاد سونامی به‌شمار می‌رود که بر طبق گزارش‌های موجود احتمال وقوع آن‌ها در دریای خزر نیز وجود دارد. با توجه به شیب بسیار زیاد بستر دریا در بخش جنوبی دریای خزر و در مجاورت سواحل ایران، که عامل ناپایداری شیب‌های زیرسطحی به‌شمار می‌رود، وقوع زمین‌لغزش در این ناحیه محتمل است؛ با این حال تاکنون مطالعه‌ی جامعی در ارتباط با زمین‌لغزش احتمالی در دریای خزر صورت نگرفته و محل دقیق آن نامشخص است.

بنابر گفته‌ی همایون خوشروان، مدیر مرکز ملی مطالعات و تحقیقات دریای خزر، "با توجه به شیبی که در بخش جنوبی دریای خزر وجود دارد احتمال وجود زمین‌لغزش‌هایی است که در صورت بروز، این زمین‌لغزش‌ها می‌توانند امواجی را ایجاد کنند؛ مطالعات ما نشان می‌دهد که سواحل مشرف به بندر انزلی تا منطقه رضوان‌شهر و همچنین منطقه میان رامسر تا نوشهر، به دلیل قرارگیری گودال جنوبی خزر در برابر مخاطرات سونامی از پتانسیل‌های بیشتری برخوردار هستند". با توجه به این اظهارنظر جهت شناسایی زمین‌لغزش احتمالی، باید بستر دریا در میان

طی فرآیند زمین‌لغزش در جهت شیب حرکت کنند. با این حال، تاکنون مطالعه جامعی در ارتباط با زمین‌لغزش احتمالی در دریای خزر صورت نگرفته و محل دقیق آن نامشخص است. مهم‌ترین اطلاعات مورد نیاز جهت تعیین موقعیت و مشخصات زمین‌لغزش‌های زیرسطحی، داده‌های پروفیل‌های بستر دریا هستند. اخیراً پروفیل‌های ثبت شده از بستر دریا در بخش مابین بندر انزلی و مصب رودخانه سفیدرود توسط پژوهشکده علوم زمین در سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی ایران و با استفاده از عمق‌یاب‌های صوتی استخراج شده‌اند (شکل ۱).

بررسی پروفیل‌های ثبت شده از بستر دریا نشان می‌دهد که در بخشی از مسیر پروفیل‌های شماره ۳۵ و ۳۶ (که در شکل ۲ قابل مشاهده است) یک توده رسوبی انباشته که پتانسیل گسیختگی و ایجاد زمین‌لغزش را داراست، واقع شده است (شکل ۳). البته اغلب شیب‌های زیر دریا به طور ذاتی پایدار هستند؛ اما برخی عوامل، نظیر وجود لایه‌های سست در میان طبقات لایه‌ها و افزایش فشار آب، که منجر به کاهش اصطکاک مقاوم در مقابل لغزش می‌شود، سبب بروز ناپایداری در شیب‌ها و وقوع لغزش می‌شوند.

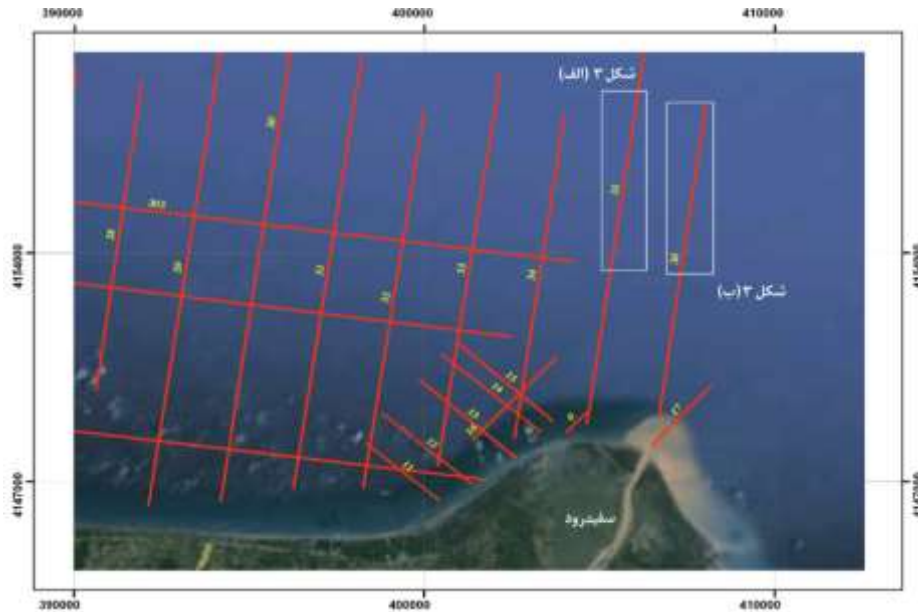
مناطق از محدوده‌ی مذکور که در آن‌ها اطلاعات مناسب قابل دسترسی است، بررسی شود.

اگرچه زمین‌لرزه‌های مرز صفحات تکتونیکی پوسته زمین جزو رایج‌ترین عوامل ایجاد سونامی می‌باشند، گسستگی توده‌های زیردریایی نیز از منابع مهم تولید سونامی‌ها محسوب می‌شوند. سونامی‌های ناشی از گسستگی توده‌های زیردریایی با سونامی‌های حاصل از حرکت مرز صفحات تکتونیک و وقوع زلزله تفاوت‌های اساسی دارند. سونامی‌های ناشی از زمین‌لغزش به دلیل طول‌موج کوتاه و همچنین میرایی ناشی از گستردگی شعاعی، بر خلاف سونامی‌های لرزه‌ای، محلی بوده و اثر چندانی در دوردست ندارند. در نتیجه وقوع سونامی زمین‌لغزشی در خزر میانی و یا نواحی دور از سواحل ایران اثری بر سواحل کشور ندارد. بنابراین به منظور ارزیابی خطر سونامی ناشی از زمین‌لغزش برای سواحل ایران، تنها مطالعه وقوع زمین‌لغزش در نزدیکی سواحل ایران و در بخش جنوبی دریای خزر مورد نیاز می‌باشد.

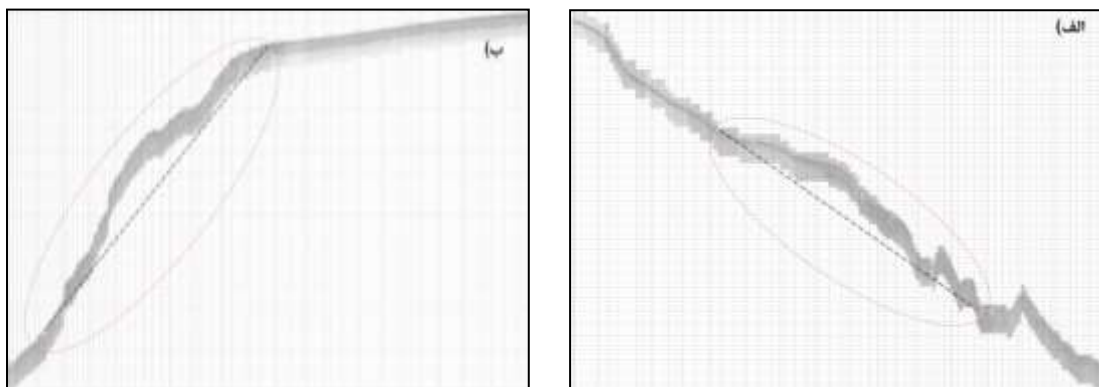
بررسی ژرفاسنجی دریای خزر، از شیب بسیار زیاد بستر آن در بخش جنوبی و در مجاورت سواحل ایران حکایت دارد. بنابر این شیب‌های زیرسطحی در این ناحیه چندان پایدار نیستند و می‌توانند



شکل ۱: مسیر و موقعیت پروفیل‌های ثبت شده از بستر دریا در نواحی مابین بندر انزلی و مصب رودخانه سفیدرود



شکل ۲: مسیر و موقعیت پروفیل‌های بستر دریا در ناحیه دارای پتانسیل ایجاد زمین‌لغزش در مختصات UTM



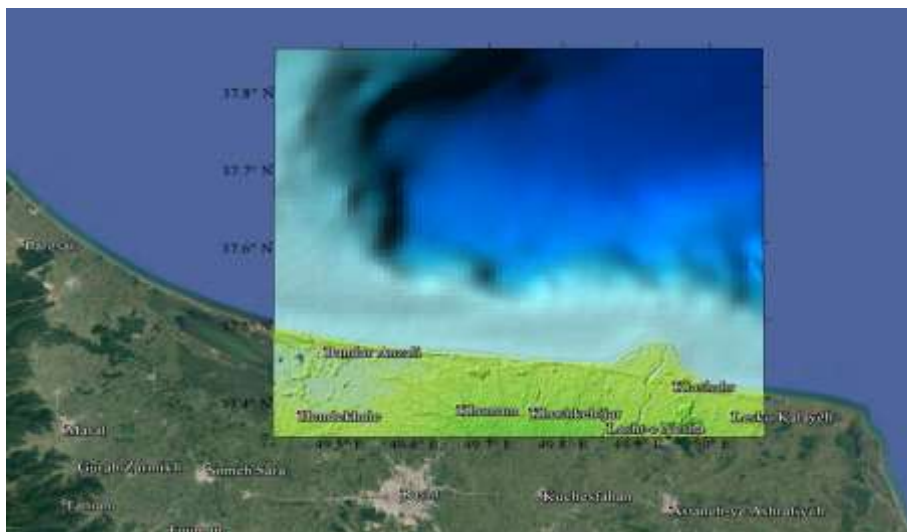
شکل ۳: پروفیل‌های بستر دریا در ناحیه دارای پتانسیل ایجاد زمین‌لغزش؛

(الف) پروفیل شماره ۳۵ بین نقاط (۴۰۵۳۵۵ ، ۴۱۵۳۶۱۱) و (۴۰۶۱۸۸ ، ۴۱۵۹۱۰۲) در مختصات UTM

(ب) پروفیل شماره ۳۶ بین نقاط (۴۰۸۰۹۵ ، ۴۱۵۸۶۱۱) و (۴۰۷۳۶۴ ، ۴۱۵۳۵۴۱) در مختصات UTM

زمین‌لغزش دارا هستند. همان‌گونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود پروفیل‌های شماره ۳۵ و ۳۶ به‌طور تقریبی در روبروی محل ورود رودخانه سفیدرود به دریای خزر واقع شده و بنابراین عامل ایجاد ناپایداری در بستر آن‌ها وجود دارد. پس با جمع‌بندی این مطالب، می‌توان توده رسوبی مشاهده شده در پروفیل‌های شماره ۳۵ و ۳۶ را به‌عنوان یک منبع احتمالی برای فرآیند زمین‌لغزش زیرسطحی در دریای خزر و سونامی ناشی از آن در نظر گرفت.

باتوجه به اینکه رسوبات حمل شده توسط رودخانه‌ها یکی از اصلی‌ترین راه‌های انتقال رسوبات از خشکی به دریا می‌باشد؛ مناطقی که مشرف به مصب رودخانه‌ها هستند، بار رسوبی قابل توجهی را دریافت می‌نمایند که این امر سبب می‌شود در این مناطق لایه‌های سست، در میان طبقات لایه‌ها قرار گرفته و گاهی رسوب‌گذاری‌های سریع اتفاق بیفتد. در نتیجه، شیب‌های مجاور به مصب رودخانه‌ها پتانسیل بیشتری برای بروز ناپایداری و ایجاد



شکل ۴: محدوده مدل عددی در شبیه‌سازی سونامی احتمالی دریای خزر

می‌توانند یک بخش خاص از سونامی (اغلب پیشروی) را شبیه‌سازی نمایند.

در روند رایج و سستی بررسی و شبیه‌سازی عددی سونامی، سه مرحله تولید، پیشروی و بالاروی (آب‌گرفتگی) امواج در نظر گرفته می‌شود. در مرحله اول مکانیزم‌های مختلف تولید سونامی مانند زمین‌لرزه، زمین‌لغزش و غیره شبیه‌سازی شده و اغتشاش ابتدایی سطح دریا و مشخصات اولیه امواج سونامی مانند طول موج و دامنه حاصل می‌گردد. در گام بعد مشخصات اولیه امواج سونامی به عنوان شرایط اولیه به مرحله بعد (انتشار موج) منتقل شده و با حل معادلات انتشار امواج، پیشروی سونامی در اقیانوس، دریا یا دریاچه از محل تولید تا خط ساحلی شبیه‌سازی می‌شود. در مرحله انتهایی نیز، امواج سونامی و حرکت احتمالی موج بر روی سواحل و نواحی خشک مدلسازی می‌شود. در مطالعه حاضر نیز نیازمند مدلی هستیم که بتواند متناسب با شرایط تحقیق مورد نظر، زمین‌لغزش را به‌عنوان منشأ سونامی شبیه‌سازی نماید.

در میان محدود مدل‌هایی که چنین امکانی را دارند مدل GEOWAVE به عنوان مناسب‌ترین مدل عددی شبیه‌ساز سونامی در پروژه حاضر به کار گرفته شده است.

این مدل در بخش شبیه‌سازی انتشار امواج، بر پایه معادلات کاملاً غیرخطی و فازهای پراکنای بوسینسک قرار دارد و می‌تواند اثرات غیرخطی شدن موج و پراکندگی فرکانسی آن را به خوبی در نظر

در ادامه با تخمین مشخصات و حجم این زمین‌لغزش احتمالی و معرفی آن به مدل عددی برگزیده شده، سونامی ناشی از آن شبیه‌سازی شده و اثرات آن بر سواحل شمالی کشور ارزیابی می‌شود.

با توجه به دلایل اشاره شده، منطقه‌ی مورد مطالعه به ناحیه‌ای که تنها بخش‌های مجاور زمین‌لغزش احتمالی را پوشش می‌داد (حداصل نواحی مجاور مصب رودخانه سفیدرود تا سواحل بندر انزلی) محدود شده و به عنوان محدوده مدلسازی در نظر گرفته شد. شکل ۴ محدوده نهایی مدل عددی را در شبیه‌سازی سونامی دریای خزر نشان می‌دهد که در راستای غرب به شرق از $49/41$ تا $30/07$ درجه طول جغرافیایی امتداد دارد. در جهت جنوب به شمال نیز محدوده‌ی مدل از $37/33$ تا $37/83$ درجه‌ی عرض جغرافیایی گسترش یافته است.

۲-۲ مدلسازی عددی

تاکنون مدل‌های عددی فراوانی جهت شبیه‌سازی سونامی توسعه و به کار رفته‌اند. بعضی از این مدل‌ها تمامی مراحل سونامی را شبیه‌سازی می‌کنند و برخی دیگر یک بخش خاص از فرآیند سونامی را بازسازی می‌نمایند و بعضی از مدل‌ها نیز صرفاً جهت شبیه‌سازی امواج سونامی توسعه یافته‌اند و برخی دیگر فقط

جریان پتانسیل کاملاً غیرخطی (Grilli و Watts, 2005؛ Grilli و همکاران، ۲۰۰۵) روابط تجربی پیش‌بینی دامنه و طول‌موج را جهت محاسبه موج اولیه سونامی به کار می‌گیرد. مدل انتشار موج FUNWAVE^۲ که توسط Kirby و همکاران (۱۹۹۸) و Chen و همکاران (۲۰۰۰) در دانشگاه دلاور به وجود آمد، بر پایه معادلات بوسینسک کاملاً غیرخطی Wei و همکاران (۱۹۹۵)، که کامل‌ترین نوع معادلات بوسینسک می‌باشند، قرار دارد. از آن جا که معادلات بوسینسک شامل شکست موج نمی‌شوند، برای امواج قبل از شکست معتبر بوده و به تنهایی در ناحیه زوال موج فاقد اعتبار هستند. بنابر این پس از اصلاحات مختلف برای گسترش کارایی و محدوده اعتبار مدل FUNWAVE، در حال حاضر این مدل قادر است پیشروی و بالاروی امواج سونامی را به خوبی شبیه‌سازی کند.

۲-۱-۲ معادلات حاکم بر تولید سونامی

ابزار TOPICS (بخش شبیه‌ساز تولید موج سونامی در مدل GEOWAVE) در زمین‌لغزش‌های زیر سطحی جهت محاسبه سطح آزاد و سرعت‌های اولیه، از نتایج مدل جریان پتانسیل کاملاً غیرخطی (FNPF) استفاده می‌کند (Grilli et al., 2005). در این مدل‌ها دو نوع ایده‌آل گسستگی اجرام زیر دریا که تقریباً نماینده تمامی آن‌ها هستند، در نظر گرفته می‌شود: لغزش‌های زیر آب که گسستگی‌های انتقالی هستند و ریزش‌های زیر آب که گسستگی‌های دورانی می‌باشند. در لغزش‌های زیر آب، که به نظر می‌رسد زمین لغزش زیرسطحی احتمالی در ناحیه مذکور دریای خزر بیشتر به آن دسته شبیه باشد، زمین لغزش به شکل ایده‌آل یک توده لغزنده بر روی شیب ثابت θ با مقطع بیضی شکل با طول کلی b در راستای محور شیب، عرض کلی w در راستای عمود بر محور شیب، ضخامت حداکثر T در وسط برآمدگی و عمق اولیه d در وسط زمین لغزش در نظر گرفته می‌شود (شکل ۵). همچنین فرض می‌شود که تغییر شکل توده لغزنده زیرسطحی، در حین پیشروی سونامی قابل اغماض است.

بگیرد. مزیت دیگر مدل GEOWAVE منبع باز بودن آن است که امکان مشاهده جزئیات و معادلات مدلسازی و همچنین اعمال تغییرات در مدل و توسعه آن را فراهم می‌نماید. مدل GEOWAVE که از ترکیب مدل‌های TOPICS و FUNWAVE در یک مدل واحد به وجود آمده است توسط آژانس اطلاعات مکانی آمریکا (NGA) ارایه شده است. این مدل که در آن با شبیه‌سازی منشأ سونامی توسط مدل TOPICS، موج اولیه سونامی پیش‌بینی و به عنوان شرایط اولیه به مدل FUNWAVE منتقل می‌شود جزو دقیق‌ترین مدل‌های سونامی به شمار می‌رود. بنابرین، مدل GEOWAVE قادر است ضمن شبیه‌سازی مرحله تولید به کمک TOPICS، مراحل انتشار و بالاروی را به کمک FUNWAVE شبیه‌سازی کند. این مدل همچنین می‌تواند سونامی‌هایی را که در اثر چندین منشأ تولید با مکانیزم‌های متفاوت در زمان‌های مختلف پدید می‌آیند، شبیه‌سازی کند.

همان‌گونه که اشاره شد، در تحقیق حاضر نیز بر اساس پروفیل‌های جدید بستر دریای خزر که در مجاورت سواحل ایران شناسایی شده، یک زمین لغزش زیرسطحی به عنوان منبع احتمالی سونامی دریای خزر در نظر گرفته می‌شود. سونامی ناشی از این زمین‌لغزش زیرسطحی با استفاده از مدل عددی GEOWAVE شبیه‌سازی شده و تأثیر آن در سواحل ایران مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این مدل فاز تولید سونامی با استفاده از مدل TOPICS و فازهای انتشار و بالاروی به استفاده از مدل FUNWAVE شبیه‌سازی می‌گردند.

مدل TOPICS^۱ که صرفاً مرحله تولید سونامی را شبیه‌سازی می‌نماید، قادر است علاوه بر زمین‌لرزه، سایر عوامل ایجاد سونامی از قبیل زمین‌لغزش (در اشکال مختلف)، آتشفشان و غیره را نیز شبیه‌سازی نماید. این مدل با ایده برآورد سریع خطر سونامی بدون نیاز به اجرای محاسبات گسترده شکل گرفت؛ به عنوان مثال این مدل در موارد زمین‌لغزش‌های زیرسطحی، به جای اجرای مدل‌های

² Fully Nonlinear Boussinesq Water Wave Model

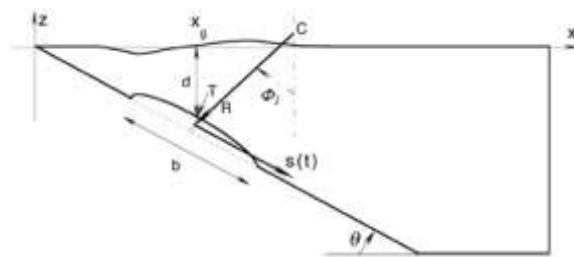
¹ Tsunami Open and Progressive Initial Conditions System

در نهایت به منظور به دست آوردن شرایط اولیه مدل‌های انتشار سونامی، روشی برای محاسبه سه‌بعدی منشاء سونامی بر اساس دامنه مشخصه سه‌بعدی موج سونامی و طول موج مشخصه آن پیشنهاد شد. در این روش یک تابع دوپل گاوسین برای محور x و یک پروفایل مشابه موج سالیتماری (تابع sech^2) برای محور y که در موقعیت اولیه گسستگی زیرسطحی (x_0, y_0) متمرکز می‌شوند، به شکل زیر به کار می‌رود:

$$\eta(x, y) \cong -\frac{\eta_{0,3D}}{\eta_{\min}} \text{sech}^2 \left(\kappa \frac{y - y_0}{w + \lambda_0} \right) \left(\exp \left\{ -\left(\frac{x - x_0}{\lambda_0} \right)^2 \right\} - \kappa' \exp \left\{ -\left(\frac{x - \Delta x - x_0}{\lambda_0} \right)^2 \right\} \right) \quad (4)$$

که در آن $\kappa \approx 3$ می‌تواند فرض شود (برای اطلاعات بیشتر به Vogelmann (۲۰۰۱) مراجعه شود)؛ κ' و Δx پارامترهایی هستند که شکل دوپل گاوسین را برای x_0 و y_0 تعیین شده کنترل می‌کنند. ضمن این که η_{\min} بر کمترین مقدار تابع سمت راست رابطه (۴) به جز جمله اول مربوط به دامنه‌ها، که یک تابع پیچیده از κ' و Δx می‌باشد، دلالت می‌کند. با تغییر این پارامترها (κ' و Δx) می‌توان نسبت η_{\max}/η_{\min} و فاصله بین دو بیشینه در تابع دوپل گاوسین را تنظیم کرد. تابع sech^2 نیز تغییرات جانبی y را فراهم می‌آورد.

به کمک روش شرح داده شده و با در اختیار داشتن پارامترهای ساده هندسی و زمین‌شناختی می‌توان دامنه و طول موج مشخصه سه بعدی موج سونامی و سپس تراز سطح آزاد آب را محاسبه نمود. بدین ترتیب منشاء سونامی ناشی از زمین‌لغزش زیرسطحی بازسازی شده و شرایط اولیه مدل‌های متعارف انتشار سونامی فراهم می‌گردد. ابزار TOPICS همین شیوه را برای شبیه‌سازی تولید سونامی زمین‌لغزشی به کار می‌گیرد و پارامترهای هندسی و زمین‌شناختی مذکور ورودی‌های مورد نیاز آن محسوب می‌شود؛ در نتیجه این پارامترهای مؤثر که همان ابعاد توده لغزنده (b, w, T) ، عمق استغراق اولیه و زاویه شیب بستر می‌باشند، با توجه به اطلاعات ژرفاسنجی منطقه و خصوصیات زمین‌لغزش تعیین و به TOPICS معرفی می‌شوند.



شکل ۵: شمایی از هندسه گسستگی جرم زیرسطحی و پارامترهای اصلی در مدل FNPF

برای لغزش‌های زیرسطحی با بهره‌گیری از مدل FNPF، ۳۲ شبیه‌سازی عددی دو بعدی که محدوده وسیعی از مقادیر پارامترهای حاکم را پوشش می‌داد، صورت گرفت و بر پایه نتایج برازش منحنی‌های حاصل از این شبیه‌سازی‌ها یک رابطه پیش‌بینی دامنه مشخصه دو بعدی موج سونامی، $\eta_{0,2D}$ شکل گرفت (Grilli et al., 2005):

$$\eta_{2D} \cong 0.2139T(1 - 0.7458 \sin \theta + 0.1704 \sin^2 \theta) \left(\frac{b \sin \theta}{d} \right)^{1.25} \quad (1)$$

از آنجایی که بیش از نیمی از زمین‌لغزش‌های زیرسطحی مستعد ایجاد سونامی معیار دو‌بعدی بودن مدل را ارضا نمی‌کردند، شبیه‌سازی‌های سه‌بعدی نیز با مدل FNPF صورت گرفت و سینماتیک لغزش و سطح آزاد محاسبه گردید. مشابه حالت دو‌بعدی، یک رابطه پیش‌بینی برای دامنه مشخصه سه‌بعدی موج سونامی، $\eta_{0,3D}$ ، با توجه به رابطه دو‌بعدی پیشین و لحاظ کردن بقای جرم مطابق زیر ارائه شد:

$$\eta_{3D} \cong 0.2139T(1 - 0.7458 \sin \theta + 0.1704 \sin^2 \theta) \left(\frac{b \sin \theta}{d} \right)^{1.25} \left(\frac{w}{w + \lambda_0} \right) \quad (2)$$

ضمن این که طول موج مشخصه به عنوان معرف میزان گسترش افقی سونامی تولید شده به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\lambda_0 \cong t_0 \sqrt{gd} \quad (3)$$

در مدل FUNWAVE جهت انجام محاسبات یک رویکرد متفاوت مرتبه‌ی بالا استفاده می‌شود. بدین صورت که یک روش عددی Adams-Bashforth-Moulton ترکیبی (گام پیش‌بینی^۱ Adams-Bashforth مرتبه‌ی سوم و گام تصحیح کننده^۲ Adams-Moulton مرتبه‌ی چهارم) به کار برده شده و مدل در گام‌های زمانی پیش می‌رود. جملات مشتق مکانی مرتبه اول با تقریب تفاضلی دارای دقت مرتبه‌ی چهار، $O(Dx^4)$ ، به کمک رابطه پنج نقطه‌ای گسسته‌سازی می‌شوند. بنابراین تمامی خطاهای موجود در معادلات غیرخطی آب کم‌عمق که زیرمجموعه‌ای از کل معادلات مدل محسوب و تنها مشتقات مکانی مرتبه اول را شامل می‌شوند، تا حد مرتبه چهار کاهش می‌یابند. گسسته‌سازی جملات پراکندگی که مشتقات مرتبه بالاتری را دارا هستند، با دقت مرتبه دو در زمان و مکان صورت می‌گیرد. این امر مجدداً خطاهای برش را به اندازه‌ای کوچک‌تر از خود جملات پراکندگی کاهش می‌دهد.

۲-۲-۲ تخمین پارامترهای زمین‌لغزش احتمالی دریای خزر و تعیین ورودی‌های مدل

پیش‌بینی این که توده رسوبی مشاهده شده در پروفیل‌های شماره ۳۵ و ۳۶ (به عنوان منبع احتمالی سونامی دریای خزر) در چه ابعادی دچار گسیختگی و لغزش می‌شود، ممکن نیست؛ بنابراین در تحقیق حاضر دو سناریوی مختلف برای لغزش توده رسوبی مذکور در نظر گرفته می‌شود: لغزش در حجم کوچک و لغزش در حجم بزرگ (شکل ۶). در هر یک از این دو حالت، با استفاده اطلاعات پروفیل‌های ثبت شده از بستر دریا، مشخصات و ابعاد زمین‌لغزش یا به عبارت دیگر ورودی‌های مدل TOPICS تخمین زده می‌شود. تمامی مشخصات زمین‌لغزش برای دو حالت مورد نظر در جدول ۱ ارائه شده است.

به دلیل این که پروفیل ثبت‌شده‌ای از بستر دریا، در راستای عمود بر توده رسوبی لغزنده احتمالی دریای خزر موجود نیست، تخمین دقیق عرض لغزش امکانپذیر نیست. با این حال با بررسی پروفیل

معادلات اساسی انتشار در مدل FUNWAVE معادلات بوسینسک کاملاً غیرخطی Wei و همکاران (۱۹۹۵) که کامل‌ترین نوع معادلات بوسینسک محسوب می‌شوند، عبارتند از:

$$\eta_t + \nabla \cdot M = 0$$

$$M = (h + \eta) \left[\begin{aligned} & u_\alpha + \left(z_\alpha + \frac{1}{2}(h - \eta) \right) \nabla (\nabla \cdot (hu_\alpha)) + \\ & \left[\left(\frac{1}{2} z_\alpha^2 - \frac{1}{6}(h^2 - h\eta + \eta^2) \right) \nabla (\nabla \cdot u_\alpha) \right] \end{aligned} \right] \quad (1-1)$$

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

در این معادلات که به ترتیب بیانگر بقای جرم و تکانه هستند، η تراز سطح آزاد، h عمق آب ساکن، u_α بردار سرعت افقی در عمق $z = z_\alpha = -0.531h$ هستند. لازم به ذکر است در نظر گرفتن پدیده‌هایی مثل شکست موج، بالاروی، زبری بستر و غیره سبب می‌شود که عبارت‌هایی به معادلات نهایی مدل اضافه گردند که این معادلات با استفاده از روش تفاضل محدود حل می‌شوند.

در روش تفاضل محدود، خطاهای برش در اثر صرف نظر کردن از جملات مرتبه بالاتر در تقریب‌های تفاضلی، که جایگزین مشتقات موجود در معادلات شده‌اند، ناشی می‌شود. در صورتی که خطای برش در حدی رشد کند که با جملات مربوط به اثرات پراکندگی موجود در معادلات بوسینسک قابل قیاس گردد، حل عددی این معادلات دچار اختلال می‌شود. بسیاری از روش‌های توسعه یافته‌ی حل معادلات بوسینسک از تکنیک تفریق صریح جملات قابل قیاس با مرتبه‌ی برجسته‌ی خطاهای برش استفاده می‌کنند تا خطاهای نامتوازن باقی‌مانده را به یک مرتبه بالاتر از جملات مربوط به اثرات پراکندگی و غیرخطی ارتقا دهند.

¹ Predictor step

² Corrector step

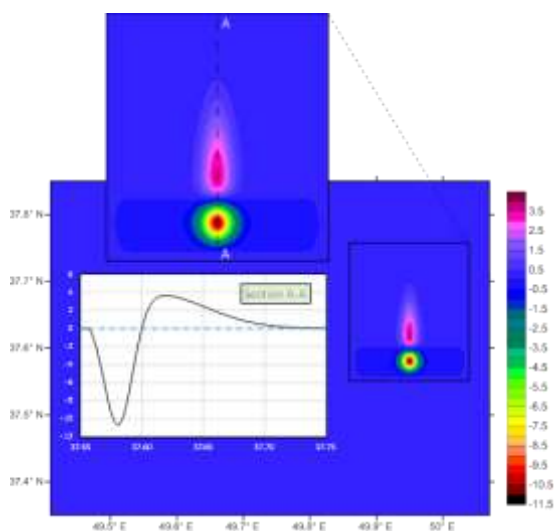
۳. بحث و نتایج

با معرفی ورودی‌های مورد نیاز مطابق با جدول ۱ به ابزار TOPICS، این مدل مرحله تولید سونامی را شبیه‌سازی نموده و خروجی‌های مربوط به آن را فراهم می‌نماید. جدول ۲ پارامترهای سینماتیک لغزش را در کنار چند پارامتر دیگر که معرف وضعیت زمین لغزش هستند و همگی توسط TOPICS محاسبه شده‌اند، ارائه می‌دهد.

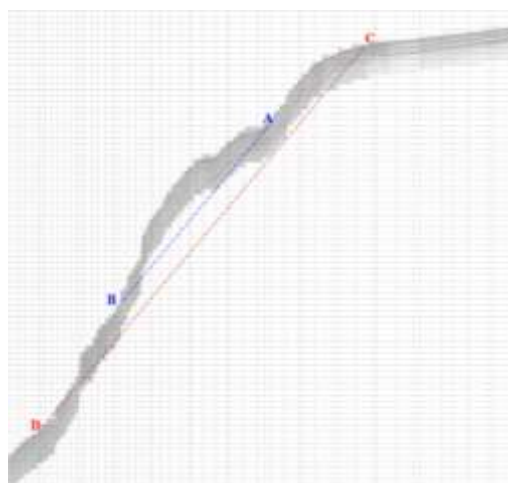
خروجی اصلی شبیه‌سازی مرحله تولید، که تراز سطح آزاد آب در سراسر محدوده مدل و در زمان مشخص (پس از آغاز حرکت زمین لغزش) است، برای هر دو سناریوی تعریف شده به دست آمده و به عنوان شرایط اولیه به مدل FUNWAVE معرفی می‌شود. نمایش این خروجی به ترتیب برای زمین لغزش کوچک و زمین لغزش بزرگ در اشکال شماره ۷ و ۸ قابل مشاهده است.

جدول ۲: پارامترهای محاسبه شده زمین لغزش احتمالی دریای خزر

پارامترهای سینماتیک لغزش	زمین لغزش حجم کوچک	زمین لغزش حجم بزرگ
مسافت مشخصه، S_0 (m)	۶,۲۳۳	۱۳,۳۳۳
زمان مشخصه، t_0 (s)	۱۴۴	۲۳۰
مسافت طی شده در زمان مشخصه، (m)	۲,۷۰۲	۳,۷۹۳
شتاب اولیه، a_0 (m/s^2)	-۰/۳	-۰/۲۳
سرعت نهایی، u_f (m/s)	۴۳	۳۸
طول موج سونامی (m)	۶۶۰۰	۱۰,۳۸۰



شکل ۷: تراز سطح آزاد اولیه آب بر مبنای زمین لغزش احتمالی دریای خزر در حجم کوچک (مطابق جدول ۱)



شکل ۶: نمایش خط گسیختگی توده رسوبی در دو حالت لغزش در حجم کوچک (AB) و لغزش در حجم بزرگ (CD)

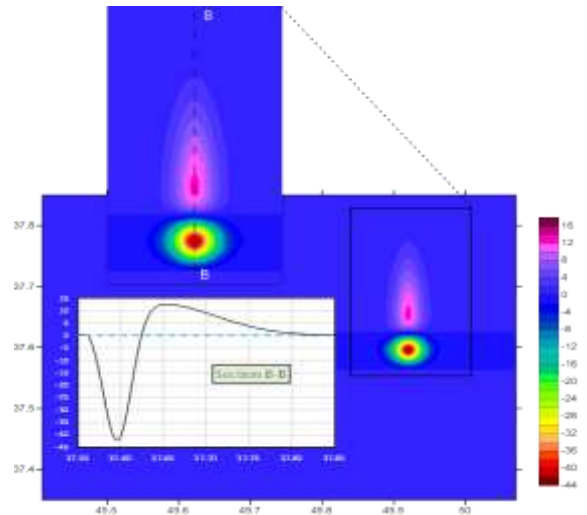
جدول ۱: مشخصات زمین لغزش احتمالی دریای خزر

سناریوی لغزش	طول توده لغزنده (متر)	عرض توده لغزنده (متر)	ضخامت توده لغزنده (متر)	عمق استغراق مرکز (متر)	شیب لغزش (درجه)
حجم کوچک (AB)	۱۴۰۰	۱۰۰۰	۲۰۰	۲۱۵	۶
حجم بزرگ (CD)	۳۰۰۰	۲۰۰۰	۳۰۰	۲۱۵	۵

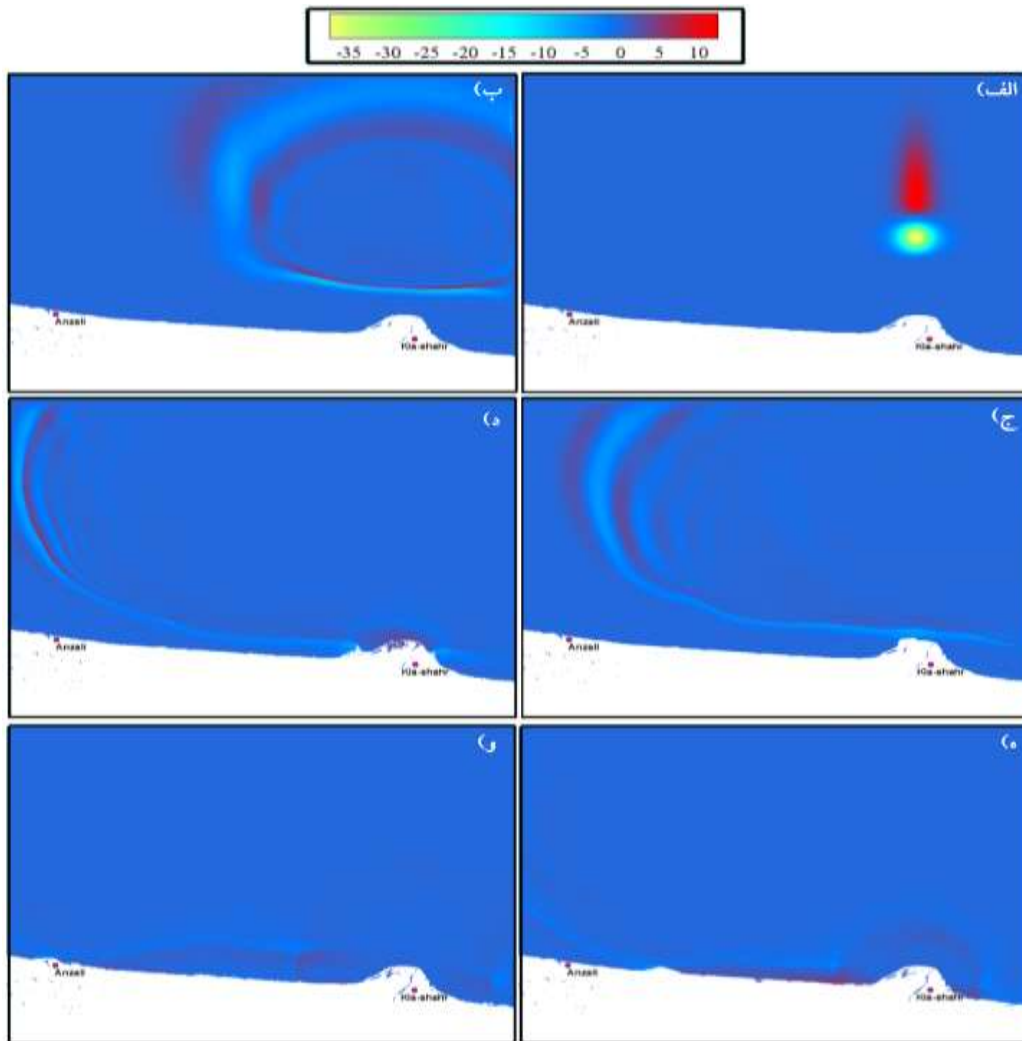
شماره ۳۵ که در نزدیکی پروفیل شماره ۳۶ و به موازات آن واقع شده است، می‌توان مشاهده کرد که توده رسوبی در راستای عمود بر خود نیز امتداد یافته و در هر دو حالت لغزش کوچک و لغزش بزرگ عرض قابل توجهی دارد. بنابر این با توجه به فاصله بین پروفیل‌های ۳۵ و ۳۶ و همین‌طور نسبت‌های متداول بین طول و عرض زمین لغزش‌ها می‌توان عرض تقریبی زمین لغزش را تخمین زد. بنابر وقایع مشاهده شده، نسبت رایج عرض به طول زمین لغزش‌های زیرسطحی حداکثر ۲ به ۳ است (Grilli et al., 2005). با توجه به رابطه (۲) ارتفاع موج سونامی با افزایش عرض توده لغزنده افزایش می‌یابد؛ بنابراین در اینجا برای در نظر گرفتن بحرانی‌ترین حالت ممکن نسبت ۲ به ۳ برای نسبت رایج عرض به طول زمین لغزش‌های احتمالی برگزیده می‌شود (جدول ۱). در نهایت مشخصات تخمینی زمین لغزش احتمالی در هر دو سناریوهای مدنظر به مدل TOPICS معرفی شده و این مدل سطح آزاد اولیه سونامی زمین لغزشی را به عنوان شرایط اولیه مدل انتشار (FUNWAVE) فراهم می‌کند.

همان‌گونه که در این اشکال مشاهده می‌شود سونامی‌های زمین‌لغزشی، در مقایسه با سونامی‌های ناشی از زلزله، سبب ایجاد تغییرات نسبتاً زیادی در تراز سطح آزاد اولیه آب دریا می‌شوند؛ به عبارت دیگر موج اولیه سونامی ناشی از زمین‌لغزش مرتفع‌تر است که این امر با توجه به روابطی که دامنه موج سونامی لغزشی را متناسب با حجم توده لغزنده (طول، عرض و ضخامت) بیان می‌کردند منطقی به نظر می‌رسد.

در شکل شماره ۹، شبیه‌سازی پیشروی امواج سونامی در بخشی از سواحل دریای خزر به هنگام وقوع زمین‌لغزش در ابعاد بزرگ و در زمان‌های مختلف، قابل مشاهده است.



شکل ۸: تراز سطح آزاد اولیه آب بر مبنای زمین لغزش احتمالی دریای خزر در حجم بزرگ (مطابق جدول ۱)



شکل ۹: پیشروی امواج سونامی محاسبه شده در زمان‌های مختلف برحسب ثانیه پس از آغاز حرکت زمین‌لغزش در محدوده انزلی تا کیشهر

جدول ۳: مختصات جغرافیایی نقاط خروجی سری زمانی امواج

عرض جغرافیایی (درجه شمالی)	طول جغرافیایی (درجه شرقی)	نقاط ثبت سری زمانی امواج
۳۷/۴۷۵۰	۴۹/۵۰	G1
۳۷/۴۶۳۳	۴۹/۶۰	G2
۳۷/۴۵۵۰	۴۹/۷۰	G3
۳۷/۴۴۶۶	۴۹/۸۰	G4
۳۷/۴۳۹۲	۴۹/۹۰	G5
۳۷/۴۱۹۲	۵۰/۰	G6

با مشاهده سری‌های زمانی مشخص می‌شود که مطابق پیش‌بینی اولیه، افزایش حجم زمین‌لغزش سبب می‌شود امواج مرتفع‌تری در سواحل پدید آید. هنگام وقوع زمین‌لغزش در حجم بزرگ، نقاط خروجی نزدیک به زمین‌لغزش، امواجی با دامنه‌ی نسبتاً زیاد (در حدود ۴-۳ متر) را تجربه می‌کنند.

سواحل روبروی ناحیه زمین‌لغزش یعنی نواحی مجاور مصب رودخانه سفیدرود اولین نواحی هستند که امواج سونامی پس از گذشت تقریباً ۱۳ دقیقه از وقوع زمین‌لغزش به آن‌ها برخورد می‌کنند. ضمن این که همان‌طور که پیشتر اشاره شد تمامی نقاط خروجی ابتدا پایین رفت سطح دریا را در اثر سونامی ثبت می‌کنند که این امر سبب می‌شود در مواردی که کاهش تراز سطح آب به میزان بیش از عمق محلی دریا باشد، نمودار سری زمانی امواج منقطع گردد؛ این امر به معنای پیشروی خط ساحلی در درون دریا در لحظه مورد نظر می‌باشد.

در نهایت حداکثر تراز سطح آزاد ثبت شده، در خلال کل زمان شبیه‌سازی، برای تمام نقاط محاسباتی مدل در حجم کوچک و بزرگ به ترتیب در اشکال شماره ۱۲ و ۱۳ به نمایش در آمده است.

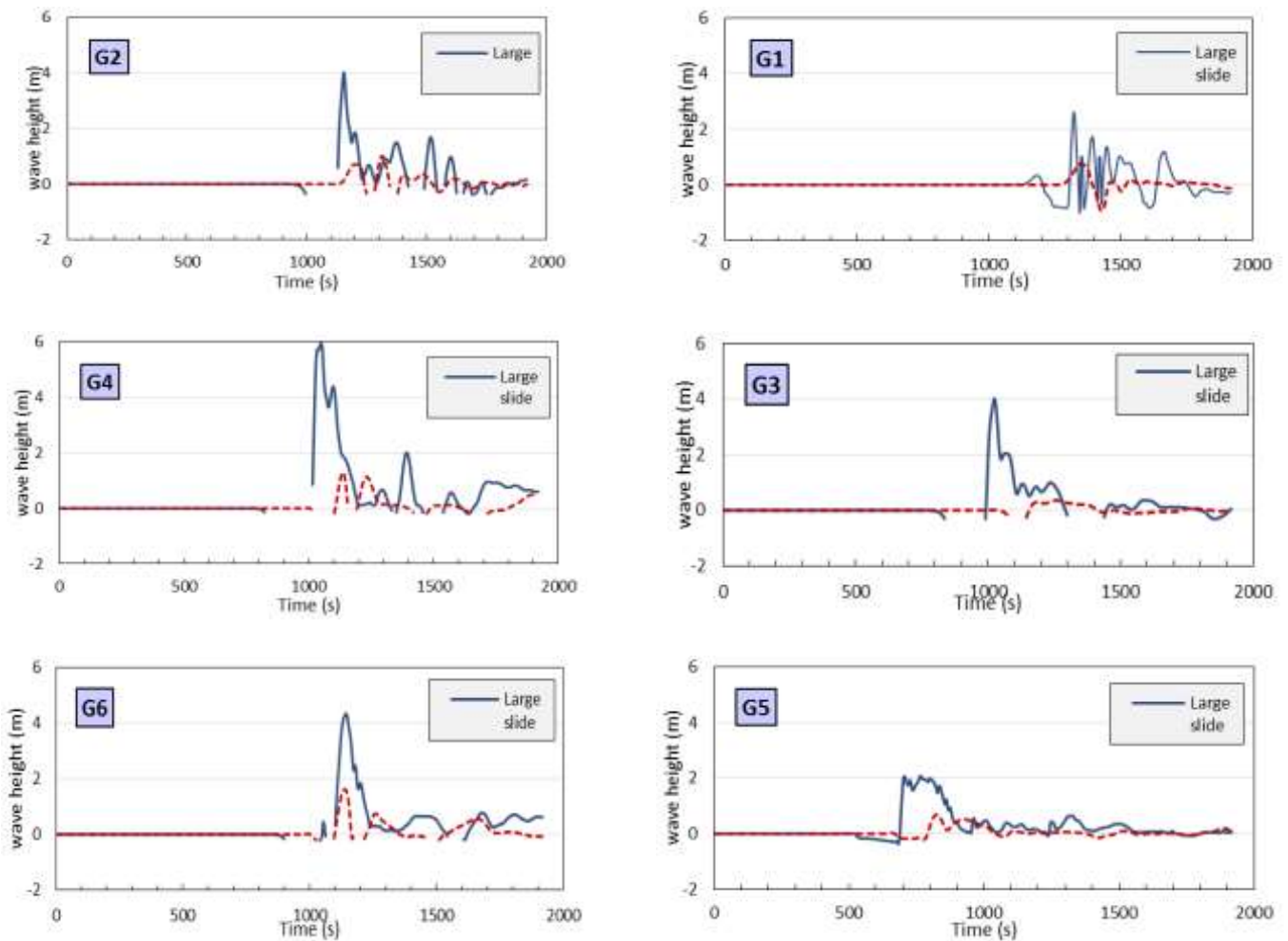
طبیعتاً با افزایش حجم زمین‌لغزش، حداکثر تراز سطح آزاد ثبت شده نیز افزایش یافته است. ضمن این که حداکثر سطح آزاد در نقاط وقوع زمین‌لغزش و سواحل مجاور آن بسیار بیشتر از سایر نقاط محدوده مدل می‌باشد که این امر افت و استهلاک شدید سونامی ناشی از زمین‌لغزش را به دلیل گسترش شعاعی و اثر پراکندگی نشان می‌دهد.

طبق این نتایج، امواج سونامی مطابق انتظار، از ناحیه زمین‌لغزش به شکل حلقه‌های دوار منتشر می‌شوند. این امواج با آغاز پیشروی و دور شدن از محل زمین‌لغزش، به شدت مستهلک شده و افت می‌کنند. اما با نزدیک شدن به سواحل مجاور به علت کاهش عمق دریا و ژرفاکاستگی، ارتفاع آن‌ها مجدداً شروع به افزایش نموده و تقویت می‌شود. در نتیجه این امواج مرتفع در سواحل روبروی ناحیه زمین‌لغزش، یعنی در نواحی مجاور مصب رودخانه سفیدرود نفوذ یافته و سبب بروز آب‌گرفتگی در این مناطق می‌شوند. اما امواج در نواحی دورتر مثل سواحل انزلی، به علت افت زیادی که تا رسیدن به آن مناطق پیدا کرده‌اند، حتی در اثر افزایش مجدد ارتفاع به دلیل ژرفا کاستگی، نمی‌توانند در خشکی نفوذ کنند.

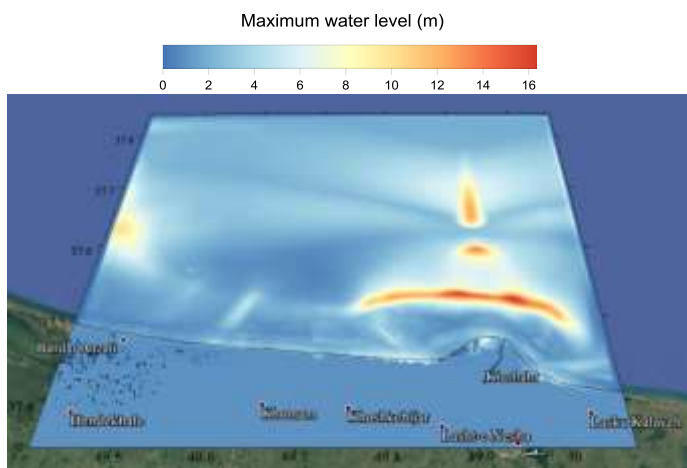
با توجه به نتایج حاصله می‌توان اظهار کرد که آن‌جا که جهت حرکت زمین‌لغزش و شیب بستر در راستای جنوب به شمال بوده و فرورفتگی موج اولیه سونامی به سمت ساحل و تاج موج به سمت فراساحل تشکیل می‌شود، ساکنین نواحی جنوبی محل زمین‌لغزش خزر ابتدا پایین افتادن سطح دریا را در اثر سونامی مشاهده می‌کنند. این امر به این معناست که هنگام وقوع سونامی، در سواحل ایران در ابتدا تراز سطح آب پایین رفته و در مناطقی که ساحل دارای شیب ملایم باشد، خشکی در دریا نفوذ یافته و دریا عقب می‌نشیند؛ که این مورد در شکل شماره ۹ قابل مشاهده است. اما پس از مشاهده امواج منفی یا ناو سونامی، امواج اصلی و ویرانگر به ساحل می‌رسند. بنابراین ساکنان مناطق ساحلی باید این مورد را به عنوان یک هشدار طبیعی در نظر داشته و در صورت مشاهده میزان قابل توجهی از پایین رفتن سطح دریا (حدود چند متر) و یا عقب‌گرد دریا در مناطق کم‌عمق (چند صد متر) سریعاً به تخلیه این مناطق بپردازند. به منظور ارزیابی دقیق‌تر چگونگی امواج، چندین نقطه خروجی در مدل عددی تعریف می‌شود تا سری زمانی سونامی ثبت و تعیین شود. موقعیت مکانی این نقاط در شکل شماره ۱۰ و مختصات جغرافیایی دقیق آن‌ها در جدول ۳ قابل مشاهده است. ضمن این که سری‌های زمانی امواج ثبت شده توسط نقاط خروجی در شکل ۱۱ ارایه شده است.



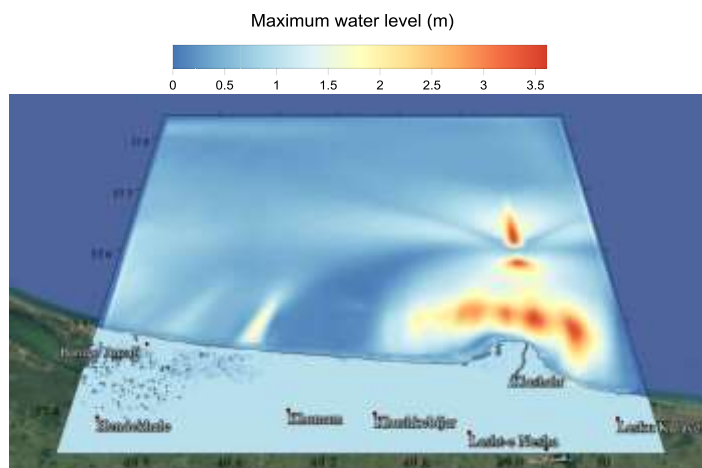
شکل ۱۰: موقعیت نقاط خروجی سری زمانی امواج



شکل ۱۱: سری زمانی ارتفاع امواج در نقاط خروجی مدل



شکل ۱۳- حداکثر تراز سطح آزاد ثبت شده در تمام نقاط محاسباتی محدوده مدل برای زمین لغزش در حجم بزرگ



شکل ۱۲- حداکثر تراز سطح آزاد ثبت شده در تمام نقاط محاسباتی محدوده مدل برای زمین لغزش در حجم کوچک

بنابراین می‌توان سواحل ایرانی خزر را در برابر سونامی زمین لغزش مذکور ایمن دانست اگرچه ارزیابی احتمال هجوم این سونامی به نواحی دورتر و پرجمعیت مثل سواحل انزلی، در اثر زمین لغزش مذکور، جهت بررسی جامع خطر سونامی دریای خزر در سواحل ایران، ضروری به نظر می‌رسد.

۵. تشکر و قدردانی

بدین وسیله از پژوهشگاه ملی اقیانوس‌شناسی و علوم جوی به دلیل حمایت‌های بی‌دریغ از طرح پژوهشی مربوطه و زحمات سرکار خانم مهندس مریم پارسا در تهیه مقاله حاضر، تقدیر و تشکر می‌نمایم.

۶. منابع

- Dotsenko, S.F.; Kuzin, I.P.; Levin, B.V.; Solovieva, O.N., 2002. Tsunamis in the Caspian Sea: Historical Events, Regional Seismicity and Numerical Modeling. Proceedings of the International Workshop on "Local Tsunami Warning and Mitigation", Sep. 10-15 Petropavlovsk-Kamchatskiy, Russia, pp 23-31.
- Vogelmann, S., 2001. Sensitivity study of numerical simulation of tsunamis generated by submarine slope

۴. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از ارزیابی خطر سونامی در بخشی از سواحل استان گیلان در دریای خزر حاکی از آن است که به دلیل نبود ناحیه فرورانش در این دریا، امکان شکل‌گیری سونامی ناشی از زلزله وجود ندارد. اگرچه سواحل اطراف این دریا و به‌ویژه سواحل ایران در برابر خطر سونامی لرزه‌ای مصون هستند اما ارزیابی‌ها و مطالعات حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که توده رسوبی روبروی محل ورود رودخانه سفیدرود به دریای خزر را به عنوان یک منبع احتمالی برای فرآیند زمین‌لغزش زیرسطحی در دریای خزر و پدیده سونامی در این دریا می‌توان در نظر گرفت. نتایج مدل نشان داد که سونامی مذکور در دریای خزر سبب رسیدن امواج حدوداً ۴ متری به سواحل مجاور زمین‌لغزش در مصب رودخانه سفیدرود، و ایجاد بالاروی قابل توجه در آن مناطق می‌شود که خوشبختانه این ناحیه تقریباً دور از حوزه شهری بوده و فاقد جمعیت ساکن چندانی است. احتمال پیشروی این سونامی به نواحی دورتر و پرجمعیت مثل سواحل انزلی، در اثر زمین لغزش مذکور، حتی در بدترین سناریوی شبیه‌سازی (بیشترین حجم زمین‌لغزش) بسیار کم بوده و نمی‌توان بالاروی چشمگیری را انتظار داشت. این مساله را می‌توان با اثر محدود سونامی‌های زمین‌لغزشی با در نظر گرفتن استهلاک شعاعی و پراکندگی (به دلیل طول‌موج کوتاه آن‌ها نسبت به سونامی‌های ناشی از زلزله)، مرتبط دانست.

- Wei, G.; Kirby, J. T.; Grilli, S. T.; Subramanya, R., 1995. *A fully nonlinear Boussinesq model for free surface waves. Part 1: Highly nonlinear unsteady waves*. Journal of Fluid Mechanics, 294: 71-92.
<https://doi.org/10.1017/S0022112095002813>
- Grilli, S.T.; Watts, P.; Tappin, D.R.; Freyer, G.J., 2005. *Tsunami generation by submarine mass failure; II: Predictive equations and case studies*. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 131: 298-310. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(2005\)131:6\(298\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(2005)131:6(298))
- failure*. Msc Thesis. University of Rhode Island, USA.
- Soltanpour, M.; Rastgoftar, E., 2011. *Study of tsunami attacks on neighboring countries of Caspian Sea caused by a probable submarine landslide*. Journal of Coastal Research. 64: 1195-1199.
- McSaveney, M. J.; Goff, J. R.; Darby, D. J.; Goldsmith, P.; Barnett, A.; Elliot, S.; Nongkas, M., 2000. *The 17 July 1998 tsunami, Papua New Guinea: evidence and initial interpretation*. Marine Geology Journal, 170: 81-92.
[https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(00\)00067-0](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(00)00067-0)