






Investigating the impact of earthquakes on man-made structures in the vicinity of coastlines (Case study, earthquake on 2nd of July 2022, Sayekhosh)

Rahbani, M.¹  | Ghaderi, D.¹   | Shamsaie, R.¹  | Salari, Z.¹  | Razi, A. R.² 

1. Department of Atmospheric and Oceanographic Science, Faculty of Marine Science and Technology, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran.

2. Department of Fisheries, Faculty of Marine Science and Technology, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran.

Corresponding Author E-mail: danielghaderi1@gmail.com

(Received: 28 Jan 2023, Revised: 13 May 2023, Accepted: 26 Sep 2023, Published online: 5 May 2024)

Summary

Coastal zones are one of the most sensitive areas with the constant changes due to their dynamic nature. They are also precious zones in terms of fisheries, transportation, recreational activities, and other rich resources. Thus, any changes in such areas can influence all such activities. Natural disasters are one of the main concerns in sensitive areas such as coastal zones. Due to its sensitivities, these areas may be affected significantly by such disasters. Coastal zone management (CZM) mechanism is a proper choice, which is applied and implemented with the aim of ensuring the sustainability of resources and these environment. In the operational and research framework of CZM, natural phenomenon and disasters are considered and their affects are surveyed for best managements of the area. Large-scale natural phenomena such as earthquakes or groundwater depletion due to climate change in coastal low-lying areas cause various types of instability. On the 2nd of July 2022, three strong and consecutive earthquakes occurred in the coastal area of Sayekhosh, Located 123 km from Bandar Abbas city and 70 km from Bandar Lengeh city (South of Iran). As a result of these earthquakes, the Sayekhosh Shrimp farm center was seriously damaged. In this study, using RS and GIS techniques, the impact of these earthquakes on the coastal area has been investigated. Using the data of the SAR images from Sentinel-1 satellite and applying the DInSAR technique, a coherence map, differential interferograms and vertical changes map of the region have been produced, which are used to determine the uplift or subsidence of the land's surface. By using the data of Sentinel-2, Landsat-5, and Landsat-8 satellites and using the band ratio technique, the conditions of the farm ponds and the shoreline of the region were determined. Using the Normalized Difference Water Index (NDWI) (with Green and NIR bands) and applying unsupervised K-means classification, two water and land features have been separated. These were done using ENVI, SNAP and ArcMap software. The surface of the area in the northwestern part of the farm has changed in the form of uplift (up to 0.2 m) and in the eastern part of the farm along the coast in the form of subsidence (up to -0.1 m). Band ratio results showed that after five days of the earthquakes, 189 ponds were discharged. Besides; we detected about -30 m shoreline transformation in the areas close to the farm canals and river mouths due to the earthquakes. The results showed that the location and/or the establishment of traditional shrimp farming system should be reconsider, to avoid such damages in upcoming disasters. Since natural disasters strongly affects man-made structures especially in the coastal area, the use of satellite data and RS and GIS techniques can be useful to precisely monitor and manage the changes in the coastal area.

Keywords: Sayekhosh, Sentinel-1, Sentinel-2, Earthquake, Shrimp farm.

Cite this article: Rahbani, M., Ghaderi, D., Shamsaie, R., Salari, Z., & Razi, A. R. (2024). Investigating the impact of earthquakes on man-made structures in the vicinity of coastlines (Case study, earthquake on 2nd of July 2022, Sayekhosh). *Journal of the Earth and Space Physics*, 50(1), 37-53. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2023.353910.1007494>

E-mail: (1) maryamrahbani@yahoo.com | rahimeh.shamsaie@gmail.com | zarafshansalari7@gmail.com (2) razialireza90@gmail.com



بررسی تأثیر زمین‌لرزه بر سازه‌های انسان‌ساز در مجاورت خطوط ساحلی، (مطالعه موردی، زمین‌لرزه ۱۱ تیر ۱۴۰۱، سایه‌خوش)

مریم راه‌بانی^۱ | دانیال قادری^۱ ✉ | رحیمه شمسایی^۱ | زرافشان سالاری^۱ | علیرضا راضی^۲

۱. گروه علوم غیرزیستی جوی و اقیانوسی، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران.
۲. گروه شیلات، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: danielghaderi@gmail.com

(دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۸، بازنگری: ۱۴۰۲/۲/۲۳، پذیرش نهایی: ۱۴۰۲/۷/۴، انتشار آنلاین: ۱۴۰۳/۲/۱۶)

چکیده

ناحیه ساحلی از حساس‌ترین مناطقی است که به دلیل ماهیت پویای آن همواره در حال تغییر است. وقوع هرگونه تغییر در این چنین مناطقی می‌تواند تغییرات عمده‌ای در عملکرد مناطق ساحلی ایجاد کند. در ۱۱ تیر ۱۴۰۱ سه زمین‌لرزه شدید و متوالی در منطقه ساحلی سایه‌خوش رخ داد. در اثر این زمین‌لرزه‌ها مرکز پرورش میگوی سایه‌خوش دچار آسیب جدی شد. در این مطالعه با به‌کارگیری تکنیک‌های RS و GIS میزان تأثیرگذاری زمین‌لرزه بر منطقه ساحلی موردنظر بررسی شده است. با استفاده از داده‌های ماهواره سنتینل-۱ و به‌کارگیری تکنیک DInSAR، نقشه همدوسی، تداخل‌سنجی راداری نقشه تغییرات قائم منطقه تولید شده است که جهت مشخص کردن میزان بالآمدگی یا فرونشست سطح زمین مورد استفاده قرار گرفته است. با استفاده از داده‌های ماهواره سنتینل-۲، لندست-۵ و لندست-۸ و به‌کارگیری تکنیک نسبت بانندی، وضعیت حوضچه‌های مزرعه و خط ساحلی منطقه مشخص شد. سطح منطقه در ناحیه شمال غربی مزرعه به شکل بالآمدگی (تا ۰/۲ متر) و در نواحی شرقی مزرعه در امتداد ساحل به شکل فرونشست (تا ۰/۱- متر) تغییر داشته است. نتایج نسبت بانندی نشان می‌دهد پس از پنج روز از وقوع زمین‌لرزه‌ها ۱۸۹ حوضچه از آب تخلیه شده است، و از طرفی میزان انتقال خط ساحلی (قبل و بعد از زمین‌لرزه) در نواحی نزدیک به کانال‌های مزرعه و دهانه‌های ورودی رودها به شکل میانگین ۳۰- متر بوده است. نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد جانمایی اولیه برای طراحی و احداث فعالیت‌های اقتصادی، عمر مفید سازه‌های مورد استفاده را کاهش می‌دهد. بنابراین نوع سیستم سنتی پرورش میگوی احداث شده در منطقه منطقی نبوده و همواره در معرض آسیب‌های شدید است.

واژه‌های کلیدی: سایه‌خوش، سنتینل-۱، سنتینل-۲، زمین‌لرزه، مزرعه پرورش میگو.

۱. مقدمه

همکاران، (۲۰۱۸)؛ بنابراین قابل انتظار است که وقوع بلایای طبیعی و اثرات آن در چارچوب عملیاتی و تحقیقاتی CZM در نظر گرفته شود. پدیده‌های طبیعی در مقیاس بزرگ (چه از نظر میزان انرژی آزاد شده و چه از نظر زمان) مانند زمین‌لرزه یا کم‌شدن آب‌های زیرزمینی به دلیل تغییرات آب‌وهوایی در مناطق کم‌ارتفاع ساحلی (low-lying coastal areas) باعث ایجاد انواع ناپایداری می‌شوند (کانوال و همکاران، ۲۰۲۲). سواحل

وقوع بلایای طبیعی در سراسر جهان به‌ویژه در نواحی حساسی همچون مناطق ساحلی (Coastal Zones) موضوعی نگران‌کننده و قابل بررسی است. فلات ایران و نوار ساحلی خلیج فارس و خلیج عمان نیز از دیرباز زمین‌لرزه‌های تاریخی و دستگامی فراوانی را تجربه کرده‌اند (خسروی و همکاران، ۲۰۲۲). سازوکارهای مدیریت مناطق ساحلی (CZM) با هدف تضمین پایداری منابع و محیط‌زیست اعمال و اجرا می‌شود (چانگ و

استناد: راه‌بانی، مریم؛ قادری، دانیال؛ شمسایی، رحیمه؛ سالاری، زرافشان و راضی، علیرضا (۱۴۰۳). بررسی تأثیر زمین‌لرزه بر سازه‌های انسان‌ساز در مجاورت خطوط ساحلی، (مطالعه موردی، زمین‌لرزه ۱۱ تیر ۱۴۰۱، سایه‌خوش). مجله فیزیک زمین و فضا، ۵۰(۱)، ۳۷-۵۳.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2023.353910.1007494>

رایانامه: (۱) maryamrahbani@yahoo.com | rahimeh.shamsaie@gmail.com | zarafshansalari7@gmail.com (۲) razialireza90@gmail.com



ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2023.353910.1007494>

شکل زمین استفاده می‌شوند (نولینو و همکاران، ۲۰۱۷). مطالعات جدیدی با استفاده از این ابزارها و تکنیک‌ها انجام شده است؛ در تحقیقی مبسوط، امین و همکاران (۲۰۲۱)، تغییر شکل زمین را در شهر ساحلی کراچی پاکستان با استفاده از داده‌های سنتینل-۱ در بین سال‌های ۲۰۱۴-۲۰۱۸ با روش (Differential Synthetic Aperture Radar) (Interferometric Synthetic Aperture Radar) مورد مطالعه قرار دادند و میانگین جابه‌جایی قائم را بین ۱۷۹/۷۴ تا ۸۵/۰۵ میلی‌متر برآورد کردند. همچنین فرونشست (Subsidence) و بالاآمدگی (Uplifting) در سطح هشدار، در نقاط مختلفی از منطقه مورد مطالعه را شناسایی کردند. در مطالعه آنها رشد و توسعه شهرنشینی و برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی از عوامل اصلی تغییر شکل زمین ذکر شده است که نیازمند توجه سیاست‌گذاران برای تضمین توسعه پایدار شهری است. کانوال و همکاران (۲۰۲۲) در تحقیقی دیگر تغییر قائم سطح زمین و نقش آن بر فرسایش خط ساحلی با استفاده از داده‌های طیفی و InSAR بررسی کردند. مطالعه مذکور طی سال‌های ۲۰۱۶-۲۰۰۴ در سواحل کراچی پاکستان انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که بخش‌های مختلف سواحل ناپایدار بوده و در حال جابه‌جایی هستند. رشد شدید شهرنشینی، ساخت‌وساز در زمین‌های احیا شده، فرسایش خط ساحلی به دلیل نفوذ آب دریا، شبکه‌های زهکشی/فاضلاب اشتباه باعث تشدید پدیده روانگرایی خاک می‌شود که تغییرات قائم سطح زمین در منطقه را سبب شده است. قادری و راه‌بانی (۲۰۲۲)، با استفاده از روش DInSAR از محصولات ماهواره سنتینل-۱ و روش نسبت بانندی NDWI از محصولات ماهواره سنتینل-۲، فوران گل‌فشان سال ۲۰۲۱ جزیره داشلی در ۷۵ کیلومتری باکو را بررسی کردند. آنها با استفاده از روش DInSAR میزان تغییرات قائم سطح جزیره را بین ۰/۳۲ تا ۰/۴ متر برآورد کردند و با استفاده از نسبت بانندی NDWI نشان دادند که مساحت جزیره حدود ۱۵۵ درصد افزایش یافته است. علاوه بر آن، ژائو و همکاران (۲۰۲۱)،

جنوب ایران (شامل شمال تنگه هرمز و خلیج فارس) به دلیل موقعیت ساختاری و زمین‌ساختی ایران یک منطقه لرزه‌خیز است (موسوی و همکاران، ۲۰۱۶). در ۱۱ تیر ۱۴۰۱ سه زمین‌لرزه شدید و متوالی در منطقه سایه‌خوش، واقع در ۱۲۳ کیلومتری شهر بندرعباس و ۷۰ کیلومتری شهر بندرلنگه (جنوب ایران) رخ داد. هر سه زمین‌لرزه در منطقه ساحلی رخ داده است. در اثر این زلزله یکی از بزرگ‌ترین و قدیمی‌ترین مراکز آبرزی پروری ایران واقع در منطقه ساحلی سایه‌خوش (روستای سایه‌خوش) که نقش مهمی در فقرزدایی و ایجاد فرصت‌های شغلی در منطقه دارد (کلباسی و همکاران، ۲۰۱۳)، دچار آسیب جدی شد. این مزرعه پرورش میگو به‌عنوان یکی از صنایع مهم شیلاتی منطقه ساحلی است و به دلیل خطر بلایای طبیعی و نوع سنتی ساختار مزرعه (سیستم گسترده)، خسارات قابل توجهی را متحمل شده است.

هدف این تحقیق بررسی تأثیر زمین‌لرزه (همانند آن‌چه در ۱۱ تیر ۱۴۰۱ رخ داد) بر خطوط ساحلی و تأسیسات موجود در ساحل بالأخص مزرعه پرورش میگوی مذکور، با استفاده از تکنیک‌ها و فناوری‌های جدیدی است که توانایی جمع‌آوری سریع اطلاعات را دارند. این تکنیک‌ها و فناوری‌ها به پژوهشگران، برنامه‌ریزان، متخصصان، سیاست‌گذاران و جوامع محلی کمک می‌کنند تا تأثیر بالقوه بلایای طبیعی را به‌طور مؤثر و سریع ارزیابی کنند (نولینو و همکاران، ۲۰۱۹). یکی از فناوری‌ها، تکنیک دورسنجی است که می‌تواند کل چرخه مدیریت بلایا را کنترل کند، مطالعات متعددی در این زمینه وجود دارد (از جمله بلو و آینا، ۲۰۱۴؛ نولینو و همکاران، ۲۰۱۹). از دیگر قابلیت‌های تکنیک دورسنجی، عملکرد بهینه آن در مطالعاتی است که به بررسی تغییرات محلی قبل و پس از یک فاجعه می‌پردازد (ویلیامز و همکاران، ۲۰۱۸). امروزه محصولات ماهواره‌ای پیشرفت‌های زیادی کرده‌اند، سیستم‌های نوری و راداری با وضوح مکانی بالا و محصولات جانبی مانند رادار دهانه مصنوعی تداخل‌سنجی (InSAR) در دسترس هستند که برای تهیه نقشه‌های تغییر

بررسی‌هایی را بر روی نواحی ساحلی و دلتای رودخانه شهر شانگهای، دلتای رودخانه مروارید در چین و شهر سن‌پترزبورگ انجام داده‌اند. و با استفاده از اطلاعات چند طیفی و تکنیک‌های DInSAR، اطلاعات ضروری برای برنامه‌ریزی فعالیت‌های علمی حال و آینده‌ی نظارت بر محیط‌های حساس ساحلی فراهم آوردند. از مطالعات پیشین می‌توان استنتاج کرد که امروزه به‌کارگیری هم‌زمان تکنیک‌های مختلف چند طیفی و DInSAR برای تحلیل مسائل کاملاً ضروری است.

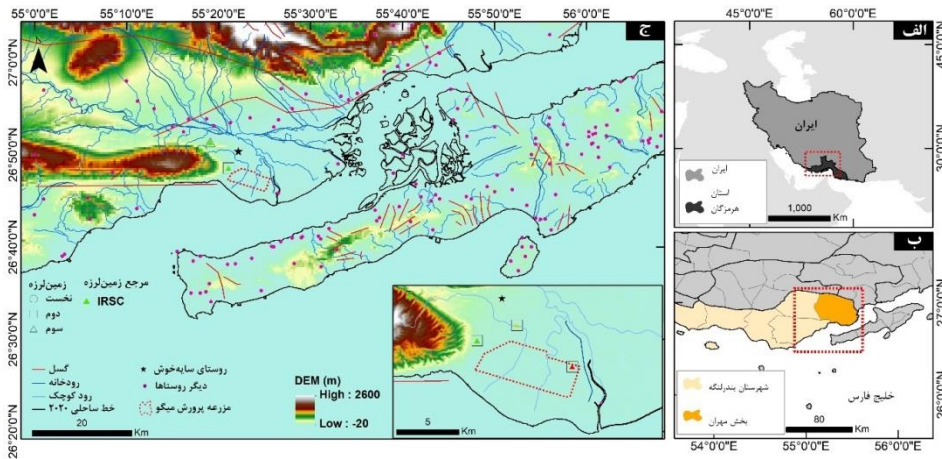
۲. منطقه مورد مطالعه

روستای سایه‌خوش در ۱۲۳ کیلومتری شهرستان بندرعباس و ۷۰ کیلومتری شهرستان بندرلنگه در جنوب ایران و در غرب منطقه حفاظت‌شده حرای خور خوران قرار دارد. این روستا در منطقه ساحلی و در فاصله ۱۰ کیلومتری از دریا (خلیج فارس) واقع شده است (شکل ۱-الف و ب). در نزدیکی این روستا، مزرعه پرورش میگو (در مجاورت خط ساحل، شکل ۱-ج) به مساحت تقریبی ۹۰۰ هکتار در موقعیت جغرافیایی ۲۶/۷۶۳ تا ۲۶/۸۱۱ درجه شمالی و ۵۵/۳۴۷ تا ۵۵/۴۳۰ درجه شرقی قرار دارد (فروغی فرد و همکاران، ۲۰۰۷). وجود این مرکز آبی‌پروری نشان از اهمیت اقتصادی-شیلاتی منطقه دارد. رودخانه مهران در کنار این روستا و مزرعه پرورش میگو قرار دارد (شکل ۱-ج). این رودخانه در مسیر خود پساب مزرعه میگوی سایه‌خوش را دریافت و به خلیج فارس تخلیه می‌کند (مجبی نوذر، ۲۰۱۸). نکته مهمی که باید به آن اشاره کرد منحرف کردن یکی از شاخه‌های رود مهران برای احداث مزرعه پرورش میگو (غرب رود مهران) است. در شکل ۱-ج مسیر شاخه رودخانه نیز

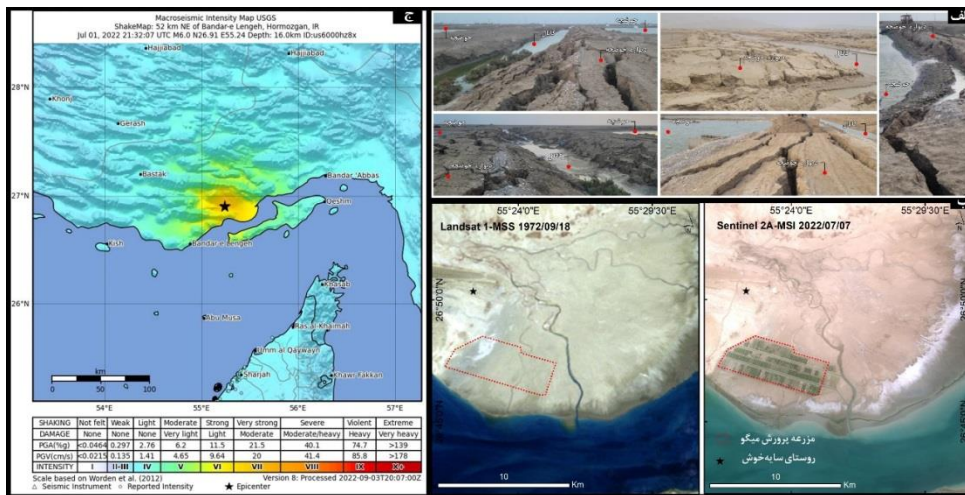
مشخص است، همچنین با توجه به تصاویر تاریخی این مسئله به‌وضوح نمایان است (شکل ۲-ب).

در بازه زمانی دوساعته، سه زمین‌لرزه بزرگ در ۱۱ تیر ۱۴۰۱ در نواحی نزدیک روستای سایه‌خوش به وقوع پیوست. اولین زمین‌لرزه به بزرگی $M_L 6/1$ (Local magnitude scale) در ساعت ۰۲:۰۲:۰۷ (به وقت محلی) در عمق ۱۲ کیلومتری در مختصات $26/88$ درجه شمالی و $55/29$ درجه شرقی رخ داد (دایره در شکل ۱-ج). دومین زمین‌لرزه در ساعت ۰۳:۵۴:۰۳ با بزرگی $M_L 6/1$ در عمق ۱۵ کیلومتری در مختصات $26/86$ درجه شمالی و $55/25$ درجه شرقی رخ داد (مربع در شکل ۱-ج). زمین‌لرزه سوم با بزرگی $M_L 6/2$ در عمق ۱۹ کیلومتری در مختصات $26/88$ درجه شمالی و $55/29$ درجه شرقی در ساعت ۰۳:۵۵:۱۸ رخ داد (مثلث در شکل ۱-ج). همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، هر سه زمین‌لرزه در نزدیکی روستای سایه‌خوش و مزرعه پرورش میگو رخ داده‌است. با بازدیدهای میدانی مشخص شده است که پس از وقوع زمین‌لرزه، استخرهای مزرعه پرورش میگوی سایه‌خوش، تخریب شده و خسارات مالی قابل توجهی را متحمل شده است (شکل ۲-الف). در شکل ۲-ج، نقشه هم‌شدت زلزله و تخریب زمین‌لرزه دوم، ارائه شده توسط مرکز USGS نشان داده شده است.

منطقه مورد مطالعه دارای زمین‌لرزه‌های تاریخی متعددی است، اما وقوع سه زمین‌لرزه با بزرگی $M_L 6$ یا بزرگ‌تر، نادر است. عبدالی‌زاده و همکاران (۲۰۱۶)، نقشه پهنه‌بندی لرزه زمین‌ساختی و خطر لرزه‌ای منطقه هرمزگان را با استفاده از روش Decision Support System تهیه کرده‌اند که نشان می‌دهد منطقه ساحلی سایه‌خوش در سطح پرخطری قرار دارد.



شکل ۱. الف) موقعیت منطقه مورد مطالعه در ایران، ب) موقعیت منطقه نسبت به شهرستان بندرلنگه و بخش مهران، ج) نقشه توپوگرافی، موقعیت رودخانه‌ها و گسل‌های محدوده مورد مطالعه (نقاط ثبت‌شده زمین‌لرزه و مرجع ثبت‌کننده (IRSC) در مجاورت با روستا و سایت پرورش میگوی سایه‌خوش مشخص شده است).



شکل ۲. الف) تصویر وضعیت استخرهای پرورش میگو پس از زمین‌لرزه، ب) مقایسه تاریخی منطقه مورد مطالعه در ۱۹۷۲ (قبل از احداث مزرعه) و ۲۰۲۲ (در زمان انجام این مطالعه) و ج) نقشه هم‌شدت زلزله و تخریب زمین‌لرزه دوم بر اساس گزارش USGS.

۳. روش کار

۳-۱. داده‌های مورد استفاده

برای بررسی اثر زمین‌لرزه‌های ۱۱ تیر ۱۴۰۱ منطقه سایه‌خوش و اثر آن بر پهنه ساحلی و خط ساحلی از تکنیک‌های RS و GIS استفاده شده است. در این مطالعه از دو روش DInSAR و نسبت بانندی بهره گرفته شده است. در روش DInSAR به دنبال ارزیابی میزان تغییرات قائم زمین ناشی از زمین‌لرزه هستیم و در روش نسبت بانندی، تأثیر زمین‌لرزه بر تغییرات خط ساحلی و مزرعه پرورش میگوی سایه‌خوش با تشخیص دو ویژگی آب و خشکی بررسی شده است. برای تخمین میزان تغییرات قائم زمین، سه مقطع زمانی؛ الف) قبل از زمین‌لرزه (۱۳ ژوئن

۲۰۲۲ و ۲۶ ژوئن ۲۰۲۲)، ب) هنگام زمین‌لرزه (۲۹ می ۲۰۲۲ و ۴ ژوئیه ۲۰۲۲) و ج) پس از زمین‌لرزه (۷ ژوئیه ۲۰۲۲ و ۱۹ جولای ۲۰۲۲)، در نظر گرفته شده است. داده‌های مورد نیاز از مرکز Copernicus Open Access Hub of the ESA (ESA, ۲۰۲۰a) دریافت شده است. داده‌ها مربوط به محصول IW_SLC ماهواره سنتینل-۱A1 است که در روش DInSAR مورد استفاده قرار می‌گیرد (عدالت و همکاران، ۲۰۲۰؛ قادری و راه‌بانی، ۲۰۲۲). اطلاعات کامل داده‌های مورد استفاده در جدول ۱ تشریح شده است. برای تحقق روش نسبت بانندی از داده‌های ماهواره‌های سنتینل-۱A۲، سنتینل-۱B۲، لندست ۵ و لندست ۸ استفاده شده است. داده‌های این بخش از پایگاه داده

مقیاس طول موج حامل و یا پایین تر استفاده می‌کند. تداخل‌سنجی SAR کارآمدتر از روش‌های سنتی نقشه‌برداری برای نظارت بر مناطق در مقیاس‌های منطقه‌ای و محلی است (بالی، ۲۰۱۲؛ پاپادوپولوس و همکاران، ۲۰۲۱). با استفاده از روش تداخل‌سنجی SAR می‌توان تغییرات قائم را اندازه‌گیری کرد (ماسونت و همکاران، ۱۹۹۳؛ ماسونت و فیگل، ۱۹۹۸؛ پاپادوپولوس و همکاران، ۲۰۲۱). برای بررسی تأثیر زمین‌لرزه بر منطقه ساحلی با استفاده از روش DInSAR، دو تصویر SAR مربوط به قبل از زمین‌لرزه (Master) و بعد از زمین‌لرزه (Slave) موردنیاز است. تحلیل تغییر قائم اراضی پهنه ساحلی در سه مقطع زمانی (الف، ب و ج) انجام شده است. با استناد به مطالعات پیشین از جمله پاپادوپولوس و همکاران (۲۰۲۱) و قادری و راه‌بانی (۲۰۲۲)، محصولات IW_SLC ماهواره سنتینل-۱ شامل سه نوار فرعی (Sub-Swaths) است که هر کدام از چندین براست (Bursts) تشکیل شده است. پس از تعیین براست‌های موردنظر، تنظیمات لازم ثبت هم‌زمان تصاویر Master و Slave انجام می‌شود. در شکل ۳ مراحل تخمین جابه‌جایی قائم زمین نشان داده شده است. تمام مراحل با استفاده از برنامه SNAP و افزونه SNAPHU انجام شده است (ESA، ۲۰۲۰b).

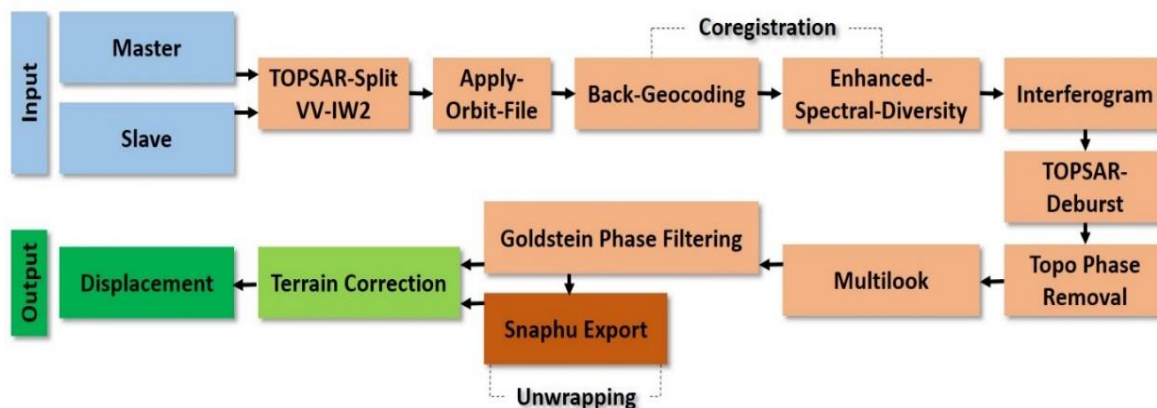
Earth Explorer Database of the U.S. Geological Copernicus Open Access Hub of the Survey و ESA تهیه شده است (USGS، ۲۰۲۰؛ ESA، ۲۰۲۰a). در بخش روش نسبت بانندی، هدف بررسی تغییرات احتمالی خط ساحلی ناشی از وقوع سه زمین‌لرزه ۱۱ تیر ۱۴۰۱ است. برای این منظور ضروری است از تصاویری استفاده شود که سطح تراز آب مشابه داشته باشند (بوآک و ترنر، ۲۰۰۵؛ قادری و راه‌بانی، ۲۰۲۰a). از این رو تصویر ماهواره‌ای سنتینل-B2 در ۳ می ۲۰۲۲ (قبل از زمین‌لرزه) و ۲ ژوئیه ۲۰۲۲ (چند ساعت پس از زمین‌لرزه) مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین از آنجاکه برای برآورد تأثیرگذار بودن زلزله بر تغییر خط ساحلی، نیاز به یک مرجع جهت مقایسه است، تغییرات خطوط ساحلی طی ۳۰ سال گذشته تا پیش از وقوع زلزله به‌عنوان معیاری جهت مقایسه در نظر گرفته شد. برای این منظور تصویر ماهواره‌ای لندست ۵ در ۱۷ ژوئن ۱۹۹۰ و تصویر ماهواره‌ای لندست ۸ در ۷ سپتامبر ۲۰۲۰ در نظر گرفته شد.

۲-۳. پردازش داده‌ها، برآورد تغییرات قائم اراضی

DInSAR از اختلاف فاز بین دو تصویر همدوس با مقادیر مختلط برای استخراج تفاوت‌ها در path-length در

جدول ۱. اطلاعات باندهای مورد استفاده محصولات مختلف ماهواره.

تکنیک	مقطع زمانی	سطح آب (m)	پهنای باند (nm)	مرکز طول موج (nm)	باند مورد استفاده	سنجنده	تاریخ	ماهواره
نسبت بانندی، چند طیفی	بعد از زمین‌لرزه (ج)	۰/۲	۳۶ ۱۰۶	۵۵۹/۸ ۸۳۲/۸	B3, B8	MSI	۲۰۲۲/۰۷/۰۷	سنتینل-A2
	قبل از زمین‌لرزه (الف)	-۰/۱					۲۰۲۲/۰۶/۲۷	
	زمین‌لرزه (ب)	۰/۶	۳۶ ۱۰۶	۵۵۹/۰ ۸۳۲/۹	B3, B8	MSI	۲۰۲۲/۰۷/۰۲	سنتینل-B2
	قبل از زمین‌لرزه	۰/۵					۲۰۲۲/۰۵/۰۳	
	تغییرات ۳۰ ساله		-۰/۵	۸۰ ۱۴۰	۵۶۰/۰ ۸۳۰/۰	B2, B4	TM	۱۹۹۰/۰۶/۱۷
-۰/۵			۶۰ ۳۰	۵۶۰/۰ ۸۶۵/۰	B3, B5	OLI	۲۰۲۰/۰۹/۰۷	لندست ۸
تکنیک	مقطع زمانی	Baseline Perpendicular (m)		Baseline Temporal (d)		محصول	تاریخ	ماهواره
DInSAR	قبل از زمین‌لرزه (الف)	۳		۱۲		IW_SLC	۲۰۲۲/۰۶/۱۳	سنتینل-A1
	زمین‌لرزه (ب)	-۲		-۳۷			۲۰۲۲/۰۵/۲۹	
	بعد از زمین‌لرزه (ج)	۳		-۱۳			۲۰۲۲/۰۷/۰۴	
							۲۰۲۲/۰۷/۱۹	
							۲۰۲۲/۰۷/۰۷	



شکل ۳. مراحل انجام روش DInSAR (قادری و راه‌بانی، ۲۰۲۲).

نشان می‌دهد (استراموندو و همکاران، ۲۰۰۵) همچنین با توجه به شکل و تعداد فرینج‌ها می‌توان میزان تغییرات قائم منطقه را برآورد کرد.

۳-۳. همدوسی پایین در شرایط معمول

در صورتی که سطح زمین پوشیده از آب یا گیاه، شیب تند و ساخت‌وساز (یا موارد مشابه) باشد، نتایج نقشه همدوسی ذاتاً پایین خواهد بود. با رخ دادن زمین‌لرزه، تخریب‌های حاصل شده بر عوامل کاهش مقادیر همدوسی افزوده می‌شود. از این برآورد نتایج تغییرات قائم سطح زمین تنها در نقاطی قابل اطمینان است که ذاتاً با همدوسی پایین نباشد، بنابراین ضروری است که مقادیر همدوس پایین در شرایط غیر از زمین‌لرزه (مقطع زمانی الف یا ج) از نتایج نقشه همدوسی مقطع زمانی زمین‌لرزه (ب) حذف شود. در این مطالعه با استفاده از معادله پیشنهادی تیم نویسندگان (معادله ۱ و ۲) و با استفاده از برنامه SNAP در زمان تولید خروجی‌های تکنیک DInSAR، مقادیر همدوسی پایین در شرایط معمول از نتایج حذف شده است. برای این منظور، باتوجه به مقادیر نقشه همدوسی که توزیع دوقله‌ای دارد (عمدتاً یا نزدیک به ۱/۰ و یا کمتر از ۰/۴ است)، با استفاده از خوشه‌بندی K-means با ۹۹۹ تکرار و با دو کلاس (کلاس صفر که همدوسی پایین، و یک که همدوسی بالا است) با هدف

پس از اعمال تکنیک DInSAR، نقشه همدوسی (Coherence Map)، تداخل‌سنجی راداری (Differential Interferograms) و نقشه تغییرات قائم، ایجاد خواهد شد. نقشه همدوسی همبستگی بین فاز پیکسل‌های مشابه در تصویر Master و Slave را نشان می‌دهد (آرسینیگاس و همکاران، ۲۰۰۷). مقدار هر پیکسل نقشه همدوسی بین صفر تا یک است، اگر دو پیکسل (تصویر Master و Slave) تغییرات کمی نسبت به یکدیگر داشته باشند، این مقدار نزدیک به یک و اگر تغییرات قابل توجهی داشته باشند نزدیک به صفر است (سی کی و کومار، ۲۰۲۰). نقشه همدوسی ابزاری مناسب برای تحلیل خسارات ناشی از زمین‌لرزه است (تومپولیدی و همکاران، ۲۰۲۱). تغییر شکل زمین، ساخت‌وساز، پوشش گیاهی، تغییرات ضریب دی‌الکتریک و مناطق دارای شیب تند از عوامل از دست‌دادن همدوسی هستند (هانسن، ۲۰۰۱)، بنابراین برای برآورد صحیح تغییرات قائم سطح زمین بایستی عوامل متفرقه (غیر از اثر تخریبی زمین‌لرزه) از نتایج حذف شود. به‌کارگیری نتایج نقشه همدوسی در شرایط معمول (بودن زمین‌لرزه) می‌تواند دید خوبی از تخریب ارائه دهد (آرسینیگاس و همکاران، ۲۰۰۷). تداخل‌سنجی راداری نیز با تحلیل میزان و نحوه تغییرات دو تصویر SAR مشخص می‌شود. این نقشه‌ها می‌تواند متشکل از فرینج‌هایی باشد که فرم و شکل آنها، مکانیسم و فعالیت گسل زمین‌لرزه را

برای ارزیابی NDWI، محصول LIC از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۱ A و سنتینل-۲ B به کار گرفته شده است. این محصول به صورت استاندارد از نظر رادیومتری و هندسی تصحیح شده است (برسی و همکاران، ۲۰۱۸)؛ اما می‌بایست از نظر جوی اصلاح شود. با توجه به مطالعات قادری و راهبانی (۲۰۲۰b)، پیرا-ساندووال و همکاران (۲۰۱۹) و قادری و راهبانی (۲۰۲۲)، در مناطق ساحلی، استفاده از الگوریتم C2RCC برای تصحیح اتمسفری کارآمد است؛ بنابراین در این تحقیق از این الگوریتم استفاده شده است. علاوه بر تصاویر ماهواره سنتینل-۲، تصاویر L1 ماهواره‌های لندست ۵ و لندست ۸ نیز برای بررسی تاریخی تغییرات خط ساحلی (۱۹۹۰ تا ۲۰۲۰) استفاده شده است. محصولات L1 لندست دارای تصحیح هندسی هستند و از برنامه ENVI برای اعمال تصحیح رادیومتری و اتمسفری استفاده شده است (قادری و راهبانی، ۲۰۲۰b؛ دو و همکاران، ۲۰۱۹).

پس از اعمال شاخص NDWI بر روی تصاویر موردنظر، برای جداسازی خودکار ویژگی‌های آب و خشکی، از طبقه‌بندی نظارت‌نشده K-Means استفاده شد. با استفاده از این روش طبقه‌بندی، تصاویر توزیع دو وجهی (تبدیل مقادیر پیکسل به صفر و یک) تولید می‌شود که در برنامه ArcMap به راحتی به دو بخش آب و خشکی تفکیک می‌شود. روش k-means یکی از روش‌های محبوب و پرکاربرد برای خوشه‌بندی تصاویر است (توره و همکاران، ۲۰۱۹)، اساس الگوریتم k-means به حداقل رساندن شاخص عملکرد خوشه با توجه به مربع خطا و معیار خطا است. ساختار تابع k-means در معادله ۴ نشان داده شده است (لی و وو، ۲۰۱۲؛ الیور و همکاران، ۲۰۰۶).

$$e^2(K) = \sum_{k=1}^K \sum_{i \in C_k} (x_i - c_k)^2 \quad (4)$$

که در آن c_k مرکز خوشه C_k و K تعداد خوشه‌ها (معروف به پیش‌بینی) است (قادری و راهبانی، ۲۰۲۰a).

ایجاد تصاویر باینری، بر تصاویر نقشه همدوسی اعمال می‌شود. در ادامه نیز مقادیر همدوسی پایین به پیکسل NaN تبدیل و عملاً برآورد میزان تغییرات قائم سطح زمین حذف می‌شود.

$$\begin{aligned} coh_A \times Bcoh_A &= Ncoh_A \\ \text{if } Ncoh_A \leq 0 \text{ then NaN else } Disp_A &= NDisp_A \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} coh_B \times Bcoh_A &= Ncoh_B \\ \text{if } Ncoh_B \leq 0 \text{ then NaN else } Disp_B &= NDisp_B \end{aligned} \quad (2)$$

در معادله ۱، coh_A نقشه همدوسی در شرایط معمول، $Bcoh_A$ نقشه همدوسی باینری شده، $Ncoh_A$ نقشه همدوسی جدید بودن پیکسل‌های دارای همدوسی پایین، $Disp_A$ نقشه تغییرات قائم سطح زمین حاصل از تکنیک DInSAR و $NDisp_A$ نقشه تغییرات قائم تنها ناشی از اثر زمین‌لرزه است. در معادله ۲ نیز به ترتیب اندیس A و B مربوط به شرایط معمول (مقطع زمانی الف) و شرایط زمین‌لرزه (مقطع زمانی ب) است. با جای‌گذاری شرایط مقطع زمانی الف در نقشه همدوسی مقطع زمانی ب، تنها مقادیر همدوس پایین ناشی از تخریب زلزله نگه داشته می‌شود.

۳-۴. پردازش داده‌ها، محصولات چندطیفی

به منظور تعیین تغییرات خط ساحلی و همچنین وضعیت حوضچه‌های مزرعه پرورش میگوی سایه‌خوش، از شاخص تفاوت نرمال شده آب (NDWI) (مک فیتز، ۱۹۹۶)، استفاده شده است. با کمک این نسبت بانندی، بهترین تمایز بین ویژگی‌های آب و خشکی حاصل می‌شود (قادری و راهبانی، ۲۰۲۰a؛ ۲۰۲۲) شاخص NDWI بر اساس معادله ۳ برآورد می‌شود. این شاخص از باندهای سبز و مادون قرمز نزدیک استفاده می‌کند و سبب می‌شود ویژگی‌های مربوط به آب نمایان تر شود. بدنه آبی تشعشعات پایین را منعکس و طول موج‌های مرئی تا مادون قرمز را عمدتاً جذب می‌کند (پاتل و همکاران، ۲۰۲۱).

$$NDWI = \frac{BGREEN - BNIR}{BGREEN + BNIR} \quad (3)$$

این نقشه به‌خوبی نشان می‌دهد که خطوط هم‌لرزشی مجموع سه زمین‌لرزه دقیقاً در غرب روستای سایه‌خوش و در شمال غربی مزرعه پرورش میگوی سایه‌خوش قرار دارد. با توجه به شکل و تعداد فرینج‌های ظاهر شده می‌توان میزان تغییرات قائم منطقه را تخمین زد که در خروجی سوم روش DInSAR مشخص خواهد شد (شکل ۴-ز-ح - ط). نقشه‌های جابه‌جایی (تغییرات قائم) تولید شده نشان می‌دهد که تغییرات منطقه بین $0/2$ - (نشست) و $0/2$ + (بالاآمدگی) است. میزان بالاآمدگی در سمت غرب روستا و مزرعه پرورش میگوی سایه‌خوش است. همچنین، فرونشست عمده در منطقه شرقی روستا و در مجاورت با خط ساحلی رخ داده است (شکل ۴-ح).

به‌منظور بررسی دقیق‌تر تأثیر زمین‌لرزه بر روستا و مزرعه پرورش میگوی سایه‌خوش، شکل ۵ ارائه شده است. با مقایسه هیستوگرام‌ها (شکل ۵-الف - ج) مشخص می‌شود که وضعیت قبل از زمین‌لرزه (مقطع زمانی الف) و بعد از زمین‌لرزه (مقطع زمانی ج) مشابه است و هیستوگرام دارای دو قله است، همدوسی پایین به عواملی غیر از تخریب مرتبط است؛ اما در شرایط زمین‌لرزه (مقطع زمانی ب) مشخص است که اکثر پیکسل‌های نقشه همدوسی کمتر از $0/4$ هستند و هیستوگرام تک قله‌ای است (شکل ۵-ب). در سطر ج شکل ۵، نقشه همدوسی باینری شده (معادله ۲ $Bcoh$) با خوشه‌بندی K-means نشان داده شده است که برای تولید نقشه همدوسی جدید (شکل ۵ سطر ه) مطابق با معادله ۲ ($Ncoh$)، استفاده شده است. نقشه جابه‌جایی (شکل ۵-ن) تولید شده با استفاده از نقشه همدوسی جدید (شکل ۵-ک)، تغییرات قائم را بدون در نظر گرفتن پیکسل‌هایی که به‌طور طبیعی دارای همدوسی پایین هستند نشان می‌دهد؛ بنابراین می‌توان گفت که وقوع زمین‌لرزه در پهنه ساحلی باعث شده است که ناحیه غربی و نزدیک به مرکز زمین‌لرزه (مناطق آبی‌رنگ در شکل ۵-ن) نسبت به خط نگاه ماهواره بالاآمدگی داشته باشد؛ و مناطق نزدیک به

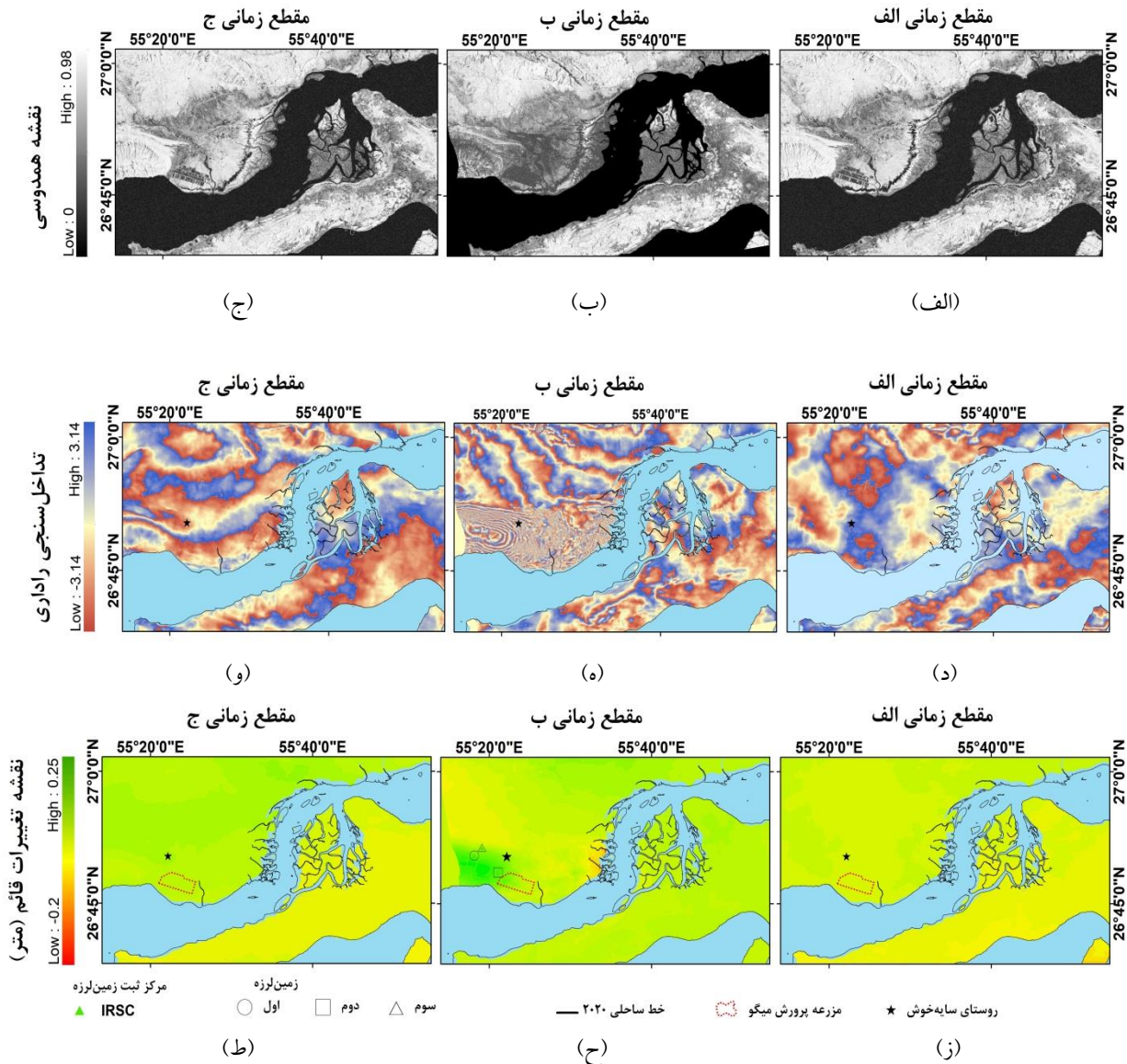
از سوی دیگر برای بررسی تغییرات خط ساحلی از ابزار شاخص Digital Shoreline Analysis System (DSAS) و شاخص NSM استفاده شد. ابزار DSAS توسعه یافته توسط USGS در محیط ArcGIS است که توانایی تجزیه و تحلیل خط ساحلی را دارد (تیلر و همکاران، ۲۰۰۹). مطالعات متعددی مانند قادری و راه‌بانی (۲۰۲۰a)، مسکنانفولا و همکاران (۲۰۲۰)، نصار و همکاران (۲۰۱۹) و ناث و همکاران (۲۰۲۲)، در زمینه بررسی خطوط ساحلی با استفاده از این ابزار انجام شده است. شاخص NSM فاصله بین قدیمی‌ترین و جوان‌ترین خط ساحلی هر ترانسکت را بیان می‌کند و می‌تواند شامل یک مقدار مثبت (به معنی رسوب‌گذاری)، یا یک مقدار منفی (به معنای فرسایش) و یا صفر (به معنی عدم تغییرات) باشد (تیلر و همکاران، ۲۰۰۹).

۴. نتایج و بحث

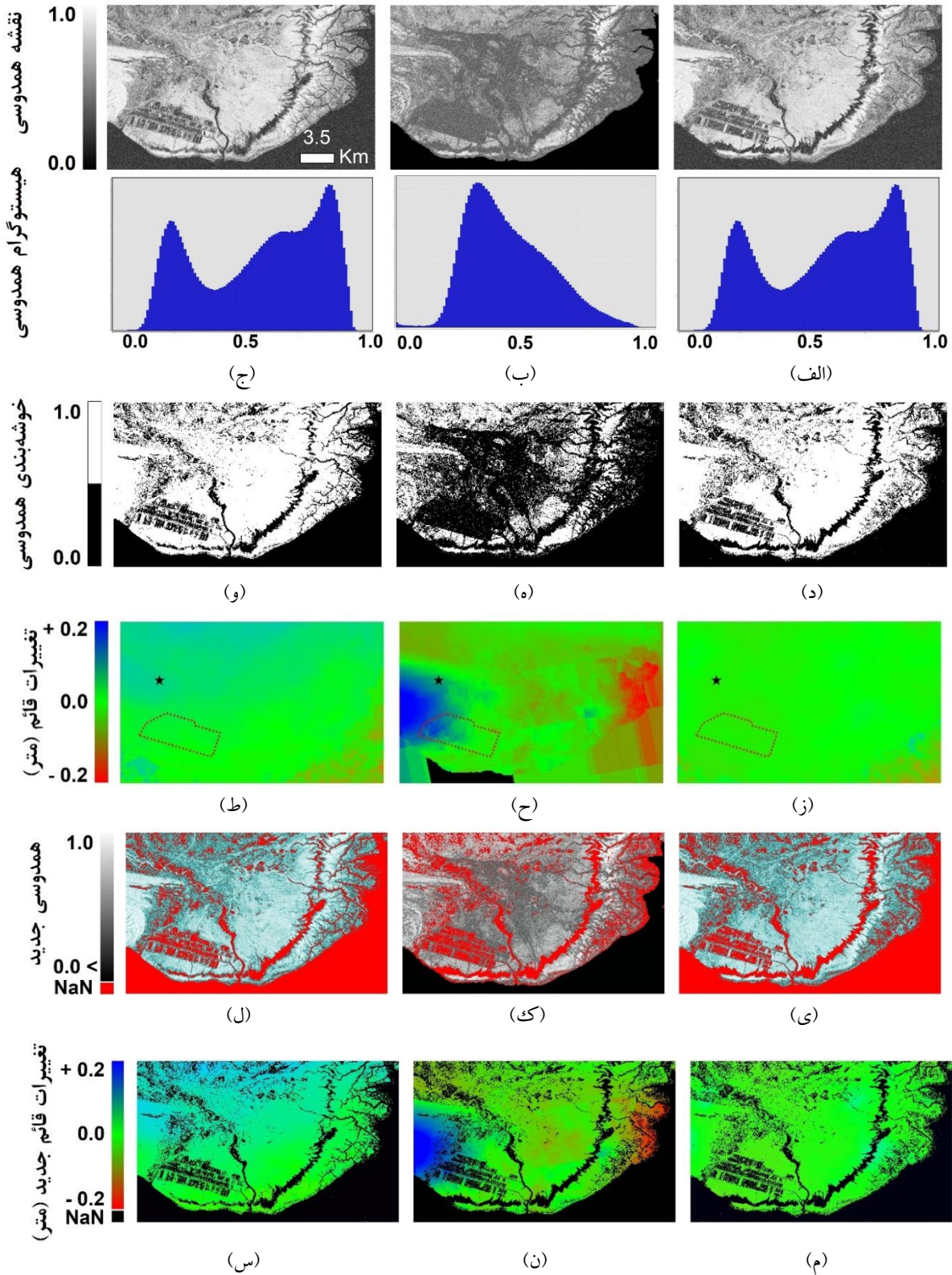
۴-۱. تغییرات قائم لایه‌های سطحی

در شکل ۴ تصاویر منطقه مورد مطالعه برای سه مقطع زمانی الف، ب و ج به سه صورت نقشه همدوسی (ردیف اول)، تداخل‌سنجی راداری (ردیف دوم)، و نقشه تغییرات قائم (ردیف سوم) نشان داده شده است. همان‌طور که می‌توان انتظار داشت، تصاویر گویای این است که تنها در شرایط زمین‌لرزه (مقطع زمانی ب) تغییرات قابل توجهی دیده می‌شود (شکل ۴-الف-ه - ح). منطقه سایه‌خوش عاری از پوشش گیاهی قابل توجه، بدون ساخت‌وساز و دارای شیب کم است (شکل ۱-ج)، بنابراین همدوسی کم (مناطق تیره در شکل ۴-ب) کاملاً ناشی از خسارت زمین‌لرزه است. این مسئله با مقایسه سه تصویر ردیف اول شکل ۴ تایید می‌شود. در شکل ۴-ه که مربوط به تداخل‌سنجی راداری مقطع زمانی ب است، فرینج‌های متعددی ظاهر شده است که گویای فعالیت هم‌لرزشی ناشی از رخ دادن زمین‌لرزه است. مراکز ثبت مرکز سه زمین‌لرزه با مرکز فرینج‌های ظاهر شده در نقشه تداخل‌سنجی راداری مقطع زمانی ب مطابقت خوبی دارد.

ساحل در ضلع شرقی مرکز زمین لرزه (مناطق قرمز رنگ در شکل ۵-ن) دارای فرونشست است. با تمرکز بر سایت مزرعه میگوی سایه‌خوش (شکل ۵-ن)، مشخص می‌شود که نواحی شمال غربی سایت عمدتاً با بالا آمدگی در حدود ۰/۲ متر همراه بوده و نواحی جنوبی و مرکزی تقریباً تغییرات صفر داشته‌اند. همچنین در برخی از نواحی شمال شرقی سایت و نواحی شرقی در مجاورت با ساحل مقداری فرونشست (بین ۰ و ۰/۱- متر) مشاهده می‌شود.



شکل ۴. خروجی‌های تکنیک DInSAR. (الف) نقشه همدوسی در مقطع زمانی قبل از زمین لرزه، (ب) نقشه همدوسی در مقطع زمانی زمین لرزه، (ج) نقشه همدوسی مقطع زمانی بعد از زمین لرزه، (د) تداخل‌سنجی راداری در مقطع زمانی قبل از زمین لرزه، (ه) تداخل‌سنجی راداری در مقطع زمانی زمین لرزه، (و) تداخل‌سنجی راداری در مقطع زمانی بعد از زمین لرزه، (ز) نقشه تغییرات قائم سطح در مقطع زمانی قبل از زمین لرزه، (ح) نقشه تغییرات قائم سطح در مقطع زمانی زمین لرزه، (ط) نقشه تغییرات قائم سطح در مقطع زمانی بعد از زمین لرزه.

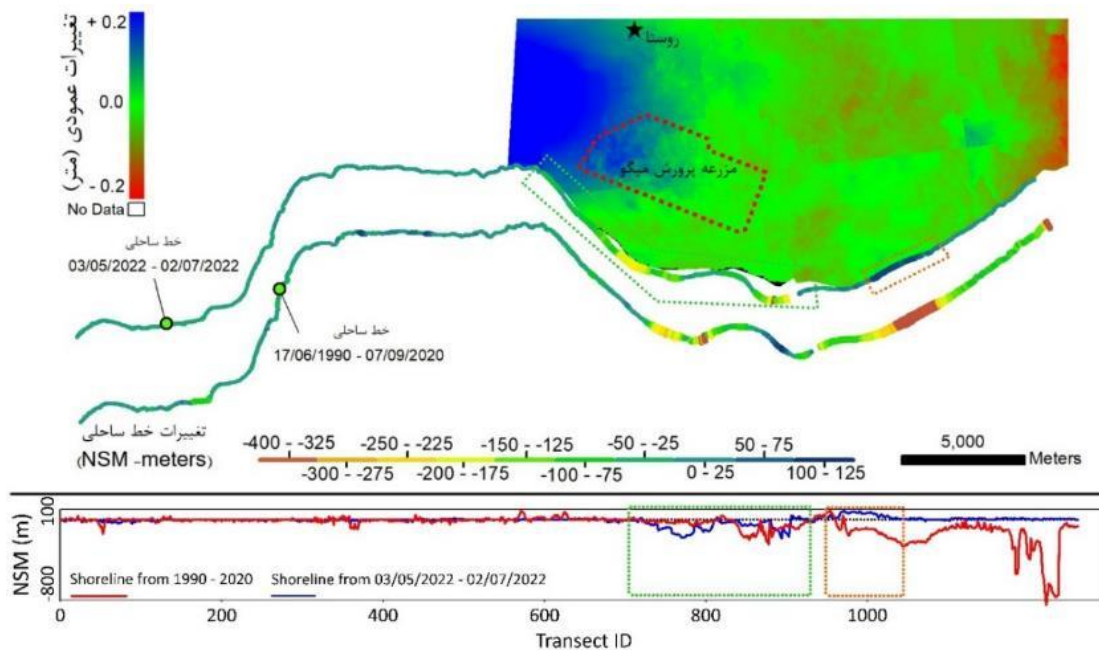


شکل ۵. الف تا ج) نقشه همدوسی و هیستوگرام همدوسی در سه مقطع زمانی (الف، ب و ج، د تا و) نقشه باینری همدوسی در سه مقطع زمانی، ز تا ط) نقشه تغییرات قائم در سه مقطع زمانی، ی تا ل) نقشه همدوسی جدید (مقطع زمانی ب) باتوجه به همدوسی باینری مقطع زمانی الف است) و م تا س) نقشه تغییرات قائم جدید (مقطع زمانی ب) باتوجه به شرایط همدوسی مقطع زمانی الف است).

۲-۴. تغییرات خط ساحلی

تغییرات خط ساحلی منطقه با استفاده از روش نسبت بانندی NDWI و خوشه‌بندی k-means برآورد شده است. ابتدا وضعیت تغییرات ۳۰ ساله (۱۹۹۰ تا ۲۰۲۰) خط ساحلی منطقه سایه‌خوش مشخص شده است (شکل ۶، نمودار قرمز). تغییرات دهانه رود مهران و شاخه‌های آن در طول ۳۰ سال زیاد بوده که قابل‌انتظار است. همچنین نواحی غربی خط ساحلی منطقه نیز طی ۳۰ سال گذشته دستخوش تغییراتی شده است. میانگین انتقال خط ساحلی طی ۳۰ سال ۶۶/۴- متر با انحراف معیار ۱۴۲/۵ است (بیشترین و کمترین انتقال خط ساحلی به ترتیب ۱۰۸/۶ و ۱۰۶۰- متر است). انتقال خط ساحلی در دوره کوتاه قبل و بعد از زمین‌لرزه (شکل ۶ نمودار آبی) با میانگین ۱۲/۳- متر با انحراف معیار ۴۶/۰ برآورد شده که عمدتاً در دهانه رود مهران و شاخه‌های آن است (جعبه‌های سبز و قرمز در شکل ۶). نتایج تغییرات خط ساحلی در کوتاه‌مدت در اکثر مناطق نزدیک به صفر است، اما در حدفاصل مزرعه پرورش میگو و ساحل و در دهانه شاخه‌های رود مهران تغییرات

چشم‌گیری ایجاد شده است که به نظر می‌رسد ناشی از اثر زمین‌لرزه ۱۱ تیر ۱۴۰۱ است. مزرعه پرورش میگو سایه‌خوش با قطع یکی از شاخه‌های رود مهران ساخته شده است (شکل ۲-ب). همان‌طور که در شکل ۶ مشخص است بخش‌هایی از سطح زمین که فرونشست رخ داده است (پیکسل‌های قرمز، دهانه رود مهران) تغییرات کوتاه‌مدت خط ساحلی نیز قابل توجه است. با توجه به بازدید میدانی و نظر کارشناسان، مزرعه پرورش میگو متشکل از خاک شنی و سست است و با این‌وجود در همین بستر حوضچه‌های پرورش میگو ساخته شده است. تخریب و تخلیه ناگهانی حوضچه‌های پرورش میگو پس از وقوع زمین‌لرزه منجر به حمل‌آورد رسوبی رودخانه (منطقه شنی منطقه) به ساحل شده است؛ بنابراین می‌توان گفت خط ساحلی منطقه در مدت زمان کوتاه تحت تأثیر دو عامل زمین‌لرزه و ساختار سنتی مزرعه پرورش میگو دچار تغییرات قابل‌ملاحظه‌ای شده است. همچنین در قسمت شرقی مزرعه پرورش میگو که دارای فرونشست نسبی (شکل ۵-ن) است، تغییرات خط ساحلی قابل توجه است (شکل ۶، کادر قرمز).

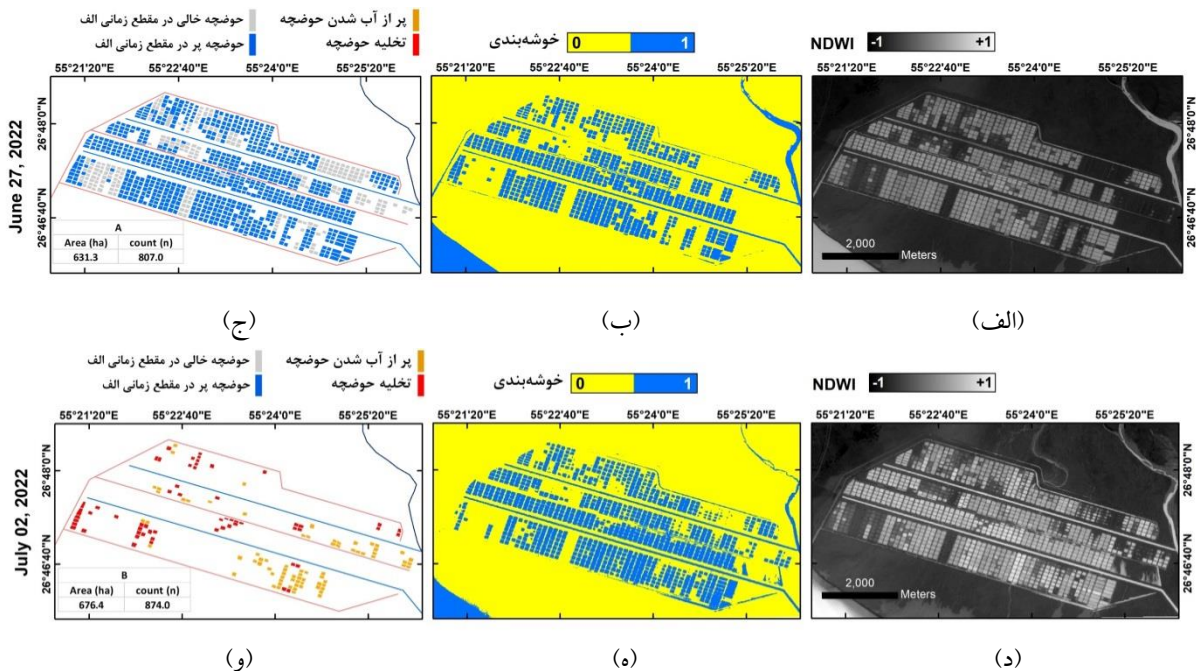


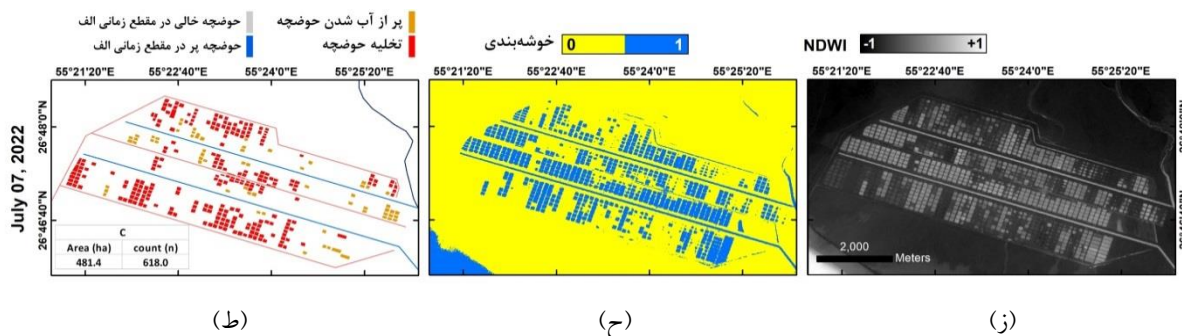
شکل ۶. شماتیک تغییرات خط ساحلی و تغییرات قائم سطح زمین. نمودار خطی تغییرات خط ساحلی (NSM) در دو مقطع زمانی بلندمدت ۱۹۹۰/۰۶/۱۷ و ۲۰۲۰/۰۹/۰۷ (نمودار قرمز) و مقطع زمانی کوتاه‌مدت ۲۰۲۲/۰۵/۰۳ قبل از زمین‌لرزه و ۲۰۲۲/۰۷/۰۲ پس از زمین‌لرزه (نمودار آبی).

۳-۴. تغییرات مزرعه پرورش میگو

مشخص است که برخی از حوضچه‌ها تخلیه شده و تعداد قابل توجهی از آنها نیز مجدد پر از آب شده‌اند. با توجه به بازدید میدانی و نظرات کارشناسان مزرعه پرورش میگو؛ به دلیل خطر بالایی که مجموعه با آن مواجه بوده است، بلافاصله پس از وقوع زمین‌لرزه تعدادی حوضچه توسط پرسنل تخلیه شده است و از طرفی تعدادی حوضچه نیز به دلیل تخریب دیوارها تخلیه شده است. مطابق شکل ۷-۷ ج ۳، پس از گذشت پنج روز از زمین‌لرزه، بخش قابل توجهی از حوضچه‌ها تخلیه شده است (۱۸۹ حوضچه). تخلیه ناشی از تخریب احتمالی استخرها، سست شدن دیوارها در اثر زمین‌لرزه و یا به شکل کنترل شده توسط پرسنل باهدف برداشت میگو بوده است. به دلیل مدیریت غیر یکپارچه شرکت‌های صاحب حوضچه‌ها، جداسازی حوضچه‌های تخلیه شده به دلیل تخریب و یا به شکل کنترل شده آسان نیست؛ اما پر از آب شدن حوضچه‌هایی که قبل از زمین‌لرزه خالی بوده‌اند قطعاً ناشی از تخریب دیواره حوضچه‌هاست (هیچ‌یک از حوضچه‌ها به یکدیگر متصل نیستند). در صورت تخلیه ناگهانی استخرها نشان می‌دهد که زمین‌لرزه زیرساخت‌های مرکز پرورش میگو و مدیریت آن را با مشکل اساسی مواجه کرده است.

در شکل ۷ با استفاده از نسبت بانندی NDWI، وضعیت حوضچه‌ها در سه تاریخ پنج روز قبل از زمین‌لرزه، چند ساعت پس از زمین‌لرزه و پنج روز پس از زمین‌لرزه (به ترتیب شکل ۷-الف - د - ز) بررسی شده است. از الگوریتم خوشه‌بندی k-means برای شمارش و محاسبه مساحت پیکسل‌های (حوضچه) پوشیده شده توسط آب استفاده شده است (شکل ۷-ب - ه - ح). دوره پرورش میگو در این مرکز از اوایل اسفندماه (۱۳ اسفند) به مدت ۹۰ روز بوده و زمان اوج برداشت اکثر حوضچه‌ها حدوداً در هفته اول تیرماه بوده است؛ به عبارت دیگر زمین‌لرزه درست قبل از شروع برداشت حوضچه‌ها رخ داده است. بنابراین، انتظار می‌رود که اکثر حوضچه‌ها قبل از زمین‌لرزه پر از آب باشند، شرایطی که در شکل ۷-الف - ۳ نیز به خوبی مشخص است و نشان می‌دهد که حدود ۶۳۱ هکتار (۸۰۷ حوضچه) از مزرعه پر از آب است. در حالی که چند ساعت پس از زمین‌لرزه (شکل ۷-د - ه) حدود ۶۷۶ هکتار (۸۷۴ حوضچه) از مزرعه پر از آب است. این افزایش حجم آب در مزرعه تنها می‌تواند به دلیل تخریب دیوارهای حوضچه بر اثر زمین‌لرزه باشد. با توجه به شکل ۷-و،





شکل ۷. حوضچه‌های مزرعه پرورش میگو با استفاده از روش NDWI، الف) نتیجه روش NDWI در مقطع زمانی الف، ب) خوشه‌بندی K-means در مقطع زمانی الف، ج) نقشه تغییرات حوضچه‌های مزرعه در مقطع زمانی الف، د) نتیجه روش NDWI در مقطع زمانی ب، ه) خوشه‌بندی K-means در مقطع زمانی ب، و) نقشه تغییرات حوضچه‌های مزرعه در مقطع زمانی ب، ز) نتیجه روش NDWI در مقطع زمانی ج، ح) خوشه‌بندی K-means در مقطع زمانی ج و ط) نقشه تغییرات حوضچه‌های مزرعه در مقطع زمانی ج.

ساحلی است، بنابراین برای باور هستیم که بلایای طبیعی می‌تواند در مباحث CZM مهم تلقی شود. از دو روش DInSAR با استفاده از محصولات ماهواره سنتینل ۱ و نسبت بانندی NDWI با استفاده از محصولات سنتینل ۲ و لندست ۵ و ۸، استفاده شده است. با استفاده از نتایج نقشه همدوسی، نقشه تداخل‌سنجی راداری و نقشه تغییرات قائم به‌دست‌آمده از روش DInSAR، تغییرات سطح زمین ناشی از زمین‌لرزه در منطقه ساحلی سایه‌خوش بررسی شده است. با استفاده از نسبت بانندی NDWI نیز تغییرات خط ساحلی منطقه و حوضچه‌های پرورش میگوی سایه‌خوش برآورد شده است.

نتایج نشان می‌دهد که منطقه سایه‌خوش پس از زمین‌لرزه حداکثر ۰/۲ متر بالا آمدگی و ۰/۲ متر فرونشست داشته است. بالا آمدگی در مرکز زمین‌لرزه و محدوده غربی آن رخ داده و نواحی شرق مرکز زمین‌لرزه تا ساحل با فرونشست همراه بوده است. منطقه شمال و شمال غرب مزرعه پرورش میگوی سایه‌خوش دچار بالا آمدگی شده است. مزرعه پرورش میگو دقیقاً در مسیر یکی از شاخه‌های رودخانه مهران ساخته شده است، همچنین این منطقه در ناحیه‌ای با خطر زمین‌لرزه بالا قرار دارد. از طرفی جنس بخش مرکزی مزرعه شنی است که موجب سست شدن دیواره‌های حوضچه‌ها شده که نتیجه آن آسیب‌پذیری بیشتر در پی زمین‌لرزه است. نتایج NDWI مزرعه، تغییرات دقیق حوضچه‌ها را نشان می‌دهد. بخش

مزارع سنتی میگو با سیستم‌های گسترده یا نیمه فشرده در نزدیکی ساحل (در منطقه ساحلی) واقع شده و با مکانیسم کشند آب‌گیری و تخلیه توسط کانال‌های آب‌گیری (خط آبی در شکل ۷-ج) و کانال‌های زهکشی (خط قرمز در شکل ۷-ج) انجام می‌شود (گونالان، ۲۰۱۵). ساخت نامناسب استخرها، محیط حساس منطقه ساحلی و وقوع حوادثی مانند زمین‌لرزه می‌تواند خسارات زیادی را به صنعت پرورش میگو وارد کند، موضوعی که در زمین‌لرزه ۱۱ تیر ۱۴۰۱ به‌خوبی مشاهده شد؛ بنابراین توصیه می‌شود، در مباحث CZM، سیستم‌های مدرن مزرعه میگو مانند سیستم‌های فشرده و مدیریت استاندارد با در نظر گرفتن رویدادهایی مانند زمین‌لرزه همواره در نظر گرفته شود. در سیستم‌های فشرده، بلایای طبیعی تأثیر بسیار کمتری دارند و کنترل آب‌گیری و تخلیه با پمپ مدیریت می‌شود و تنها به مکانیسم طبیعی کشند وابسته نیست، همچنین، استفاده از تکنیک‌های RS و GIS در مانیتورینگ و پایش این مزارع مفید و کارآمد خواهد بود.

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش تلاش شده است با استفاده از قابلیت‌های انواع محصولات ماهواره‌ای، تأثیر احتمالی زمین‌لرزه ۱۱ تیر ۱۴۰۱ در منطقه سایه‌خوش واقع در ۱۲۳ کیلومتری شهر بندرعباس در جنوب ایران مورد ارزیابی قرار گیرد. زمین‌لرزه در مکانی رخ داده است که جزئی از منطقه

است.

به‌کارگیری و تحلیل محصولات ماهواره‌ای مختلف می‌تواند اطلاعات ضروری و دانش ما را نسبت به محیط‌های حساس ساحلی افزایش دهد. چنین تحلیل‌هایی برای ارزیابی عواملی که آسیب‌پذیری مناطق ساحلی کم ارتفاع را تهدید می‌کنند، حیاتی هستند. تیم تحقیقاتی ما معتقد است در بحث CZM می‌بایست مسائل مربوط به بلایای طبیعی مناطق ساحلی مانند زمین‌لرزه و استانداردهای مناسب برای احداث صنایع حساس مانند مزارع پرورش میگو در نظر گرفته شود. همچنین با توجه به ضعف سیستم‌های پرورش میگوی سنتی با سیستم گسترده یا نیمه متراکم پیشنهاد می‌شود از سیستم‌های مدرن پرورش میگو مانند سیستم‌های فشرده در مناطق حساس ساحلی مانند سایه‌خوش که منطقه لرزه‌خیز است استفاده شود.

مراجع

- Abdolizadeh, S., Maleki, Z., & Arian, M. (2016). Earthquake Hazard Zonation and Seismotectonics of the Bandar Abbas Area, Zagros, Iran. *Open Journal of Geology*, 06(03), 210–224. <https://doi.org/10.4236/ojg.2016.63019>
- Amin, G., Shahzad, M. I., Jaweria, S., & Zia, I. (2021). Measuring land deformation in a mega city Karachi-Pakistan with sentinel SAR interferometry. *Geocarto International*, 1–20. <https://doi.org/10.1080/10106049.2021.1903572>
- Arciniegas, G. A., Bijker, W., Kerle, N., & Tolpekin, V. A. (2007). Coherence- and Amplitude-Based Analysis of Seismogenic Damage in Bam, Iran, Using ENVISAT ASAR Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(6), 1571–1581. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.883149>
- Bally, P. (2012). Satellite Earth Observation for Geohazard Risk Management—The Santorini Conference, Santorini, Greece, European Space Agency: Paris, France. <https://doi.org/http://doi.org/10.5270/esa-geo-hzrd-2012>
- Barsi, J. A., Alhammoud, B., Czaplá-Myers, J., Gascon, F., Haque, M. O., Kaewmanee, M., Leigh, L., & Markham, B. L. (2018). Sentinel-2A MSI and Landsat-8 OLI radiometric cross comparison over desert sites. *European Journal of Remote Sensing*, 51(1), 822–837. <https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1507613>
- Bello, O. M., & Aina, Y. A. (2014). Satellite Remote Sensing as a Tool in Disaster Management and Sustainable Development: Towards a Synergistic Approach. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 120, 365–373. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.02.114>
- Boak, E. H., & Turner, I. L. (2005). Shoreline Definition and Detection: A Review. *Journal of Coastal Research*, 214(4 (214)), 688–703. <https://doi.org/10.2112/03-0071.1>
- C K, C., & Kumar, S. (2020). DInSAR based Analysis of January 2020 Eruption of Fernandina Volcano, Galapagos, 2020 IEEE India Geoscience and Remote Sensing Symposium (InGARSS), 250–253. <https://doi.org/10.1109/InGARSS48198.2020.9358954>
- Chang, Y., Chu, K., & Chuang, L. Z.-H. (2018). Sustainable coastal zone planning based on historical coastline changes: A model from case study in Tainan, Taiwan. *Landscape and Urban Planning*, 174, 24–32. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.02.012>
- Do, A. T. K., Vries, S. de, & Stive, M. J. F.

قابل توجهی از حوضچه‌ها چند ساعت پس از زمین‌لرزه تخلیه و یا پر از آب شده است. حوضچه‌های تخلیه شده عمدتاً در خط مرکزی مزرعه پرورش میگو (مطابق با مسیر قدیمی شاخه‌ی رودخانه مهران) و ضلع شرقی مزرعه قرار دارند (مطابق با شیب منطقه).

استفاده هم‌زمان از روش‌های DInSAR و نسبت بانندی NDWI به‌خوبی وضعیت حوضچه‌ها را نمایان می‌کند. نتایج تغییرات ۳۰ساله خط ساحلی نشان می‌دهد که میانگین انتقال خط ساحلی در منطقه مورد مطالعه ۶۶/۴- متر است و تغییرات کوتاه‌مدت (قبل و بعد از زمین‌لرزه) در بیشتر سواحل منطقه نزدیک به صفر است، اما در حدفاصل مزرعه پرورش میگو و لبه‌ی ساحل (Shore) و دهانه شاخه‌های رود مهران قابل توجه است (به‌شکل میانگین ۳۰- متر و بیشینه و کمینه انتقال خط ساحلی به‌ترتیب ۱۰۵ و ۲۳۵- متر است) که ناشی از سستی خاک در منطقه و آورد رسوبی ناشی از تخلیه ناگهانی حوضچه‌های مزارع در هنگام زمین‌لرزه

- (2019). The Estimation and Evaluation of Shoreline Locations, Shoreline-Change Rates, and Coastal Volume Changes Derived from Landsat Images. *Journal of Coastal Research*, 35(1), 56. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-18-00021.1>
- Edalat, A., Khodaparast, M., & Rajabi, A. M. (2020). Detecting Land Subsidence Due to Groundwater Withdrawal in Aliabad Plain, Iran, Using ESA Sentinel-1 Satellite Data. *Natural Resources Research*, 29(3), 1935–1950. <https://doi.org/10.1007/s11053-019-09546-w>
- ESA. (2020a). Copernicus Open Access Hub of the ESA. <https://scihub.copernicus.eu/>
- ESA. (2020b). SNAP Download | STEP. <http://step.esa.int/main/download/snap-download/>
- Foruogoghi-e-Fard, H., Masandani, S., Gharavi, B., Tazikeh, E., Zarshenass, G., & Aghajery, S. (2007). Evaluation of shrimp culturing and hatcheries sites in Hormozgan province. <https://aquadocs.org/handle/1834/12920>
- Ghaderi, D., & Rahbani, M. (2020a). Shoreline change analysis along the coast of Bandar Abbas city, Iran using remote sensing images. *International Journal of coastal and offshore engineering*, 4(2), 51–64. <http://ijcoe.org/article-1-214-en.html>
- Ghaderi, D., & Rahbani, M. (2020b). Detecting shoreline change employing remote sensing images (Case study: Beris Port-east of Chabahar, Iran). *International Journal of coastal and offshore engineering*, 3, 1–8. <https://doi.org/10.29252/ijcoe.3.4.1>
- Ghaderi, D., & Rahbani, M. (2022). Mud volcano as a feature of emergence in Caspian Sea, Oceanologia. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2022.03.006>
- Gunalan, B. (2015). Semi-intensive Culture Techniques for Shrimp Farming, In *Advances in Marine and Brackishwater Aquaculture* (pp. 151–162, Springer India. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2271-2_13
- Hanssen, R. F. (2001). *Radar Interferometry* (Vol. 2), Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/0-306-47633-9>
- Kalbassi, M. R., Abdollahzadeh, E., & Salari-Joo, H. (2013). A review on aquaculture development in Iran, *Ecopersia*, 1(2), 159–178. <http://dorl.net/dor/20.1001.1.23222700.2013.1.2.4.6>
- Kanwal, S., Ding, X., Wu, S., & Sajjad, M. (2022). Vertical Ground Displacements and Its Impact on Erosion along the Karachi Coastline, Pakistan, *Remote Sensing*, 14(9), 2054. <https://doi.org/10.3390/rs14092054>
- Khosravi, H., Safari, M., Javan Doloei, G., Afshar, A., & Hessami, Kh. (2022). North-West Bandar Abbas earthquake doublet (Mw 6.1, 6.4) and its source identification. *Iranian Journal of Geophysics*, 16(3), 89–103. <https://doi.org/10.30499/ijg.2022.335246.1414>
- Li, Y., & Wu, H. (2012). A Clustering Method Based on K-Means Algorithm. *In Physics Procedia*, 25, 1104–1109. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.03.206>
- Massonnet, D., & Feigl, K. L. (1998). Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. *Reviews of Geophysics*, 36(4), 441–500. <https://doi.org/10.1029/97RG03139>
- Massonnet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F., Peltzer, G., Feigl, K., & Rabaute, T. (1993). The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. *Nature*, 364(6433), 138–142. <https://doi.org/10.1038/364138a0>
- McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International journal of remote sensing*, 17(7), 1425–1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
- Mohebbi-Nozar, S. L. (2018). Distribution and ecological risk of DDTs in sediments from Hormozgan Province, south of Iran. *Research In Marine Sciences*, 3(3), 345–351.
- Mosavi, M. R., Kavei, M., Shabani, M., & Hatem Khani, Y. (2016). Interevent times estimation of major and continuous earthquakes in Hormozgan region based on radial basis function neural network. *Geodesy and Geodynamics*, 7(1), 64–75. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2016.03.004>
- Muskananfolo, M. R., Supriharyono, & Febrianto, S. (2020). Spatio-temporal analysis of shoreline change along the coast of Sayung Demak, Indonesia using Digital Shoreline Analysis System. *Regional Studies in Marine Science*, 34, 101060. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2020.101060>
- Nassar, K., Mahmud, W. E., Fath, H., Masria, A., Nadaoka, K., & Negm, A. (2019). Shoreline change detection using DSAS technique: Case of North Sinai coast, Egypt, *Marine Georesources & Geotechnology*, 37(1), 81–95. <https://doi.org/10.1080/1064119X.2018.1448912>
- Novellino, A., Cigna, F., Brahmi, M., Sowter, A., Bateson, L., & Marsh, S. (2017). Assessing the Feasibility of a National InSAR Ground Deformation Map of Great Britain with Sentinel-1. *Geosciences*, 7(2), 19. <https://doi.org/10.3390/geosciences7020019>

- Novellino, A., Jordan, C., Ager, G., Bateson, L., Fleming, C., & Confuorto, P. (2019). Remote Sensing for Natural or Man-Made Disasters and Environmental Changes (pp. 23–31), https://doi.org/10.1007/978-981-13-0992-2_3
- Oliver, A., Muñoz, X., Batlle, J., Pacheco, L., & Freixenet, J. (2006). Improving clustering algorithms for image segmentation using contour and region information, In 2006 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics, AQTR (Vol. 2), <https://doi.org/10.1109/AQTR.2006.254652>
- Papadopoulos, G. A., Agalos, A., Karavias, A., Triantafyllou, I., Parcharidis, I., & Lekkas, E. (2021). Seismic and Geodetic Imaging (DInSAR) Investigation of the March 2021 Strong Earthquake Sequence in Thessaly. *Central Greece, Geosciences*, 11(8), 311. <https://doi.org/10.3390/geosciences11080311>.
- Patel, K., Jain, R., Patel, A. N., & Kalubarme, M. H. (2021). Shoreline change monitoring for coastal zone management using multi-temporal Landsat data in Mahi River estuary, Gujarat State. *Applied Geomatics*, 13(3), 333–347. <https://doi.org/10.1007/s12518-021-00353-8>
- Pereira-Sandoval, M., Ruescas, A., Urrego, P., Ruiz-Verdú, A., Delegido, J., Tenjo, C., Soria-Perpinyà, X., Vicente, E., Soria, J., & Moreno, J. (2019). Evaluation of Atmospheric Correction Algorithms over Spanish Inland Waters for Sentinel-2 Multi Spectral Imagery Data. *Remote Sensing*, 11(12), 1469. <https://doi.org/10.3390/rs11121469>
- Stramondo, S., Moro, M., Tolomei, C., Cinti, F. R., & Doumaz, F. (2005). InSAR surface displacement field and fault modelling for the 2003 Bam earthquake (southeastern Iran). *Journal of Geodynamics*, 40(2–3), 347–353. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2005.07.013>
- Thieler, E. R., Himmelstoss, E. A., Zichichi, J. L., & Ergul, A. (2009). The Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0-an ArcGIS extension for calculating shoreline change. <https://doi.org/https://doi.org/10.3133/ofr20081278>
- Tompolidi, A.-M., Parcharidis, I., & Sykioti, O. (2021). Investigation of Sentinel-1 capabilities to detect hydrothermal alteration based on multitemporal interferometric coherence: the case of Nisyros volcano (Greece). *Procedia Computer Science*, 181, 1027–1033. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.01.297>
- Toure, S., Diop, O., Kpalma, K., & Maiga, A. (2019). Shoreline Detection using Optical Remote Sensing: A Review, *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(2), 75. <https://doi.org/10.3390/ijgi8020075>
- United States Geological Survey. (2020). EarthExplorer. <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- Williams, J. G., Rosser, N. J., Kinsey, M. E., Benjamin, J., Oven, K. J., Densmore, A. L., Milledge, D. G., Robinson, T. R., Jordan, C. A., & Dijkstra, T. A. (2018). Satellite-based emergency mapping using optical imagery: experience and reflections from the 2015 Nepal earthquakes. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(1), 185–205. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-185-2018>
- Zhao, Q., Pan, J., Devlin, A., Xu, Q., Tang, M., Li, Z., Zamparelli, V., Falabella, F., Mastro, P., & Pepe, A. (2021). Integrated Analysis of the Combined Risk of Ground Subsidence, Sea Level Rise, and Natural Hazards in Coastal and Delta River Regions. *Remote Sensing*, 13(17), 3431. <https://doi.org/10.3390/rs13173431>