

پایش میزان جابه‌جایی ارتفاعی پادگانه‌های دریایی در سواحل مکران (کنارک تا کلات)

علی‌رضا صالحی پورمیلانی*؛ استادیار، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی
راضیه مزروعی سبدانی؛ کارشناس ارشد ژئومورفولوژی و آمایش محیط، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۱۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۱۸

چکیده

پادگانه‌های دریایی مجموعه‌ای از عوارض تکتونیکی در ایران هستند و در طول سواحل دریای عمان از جاسک تا گواتر امتداد دارند. این پادگانه‌ها پیوسته در حال بالا آمدن اند و این امر بر مورفولوژی آن‌ها تأثیر زیادی گذاشته است و نمود بارز آن را می‌توان شکل‌گیری پرتگاه‌های مارنی- ماسه‌سنگی در این مناطق دانست. اما یکی از سوالات مهم در بررسی این پادگانه‌ها، برآورد میزان برخاستگی این پادگانه‌ها در بخش‌های مختلف آن است. هدف از این تحقیق بررسی و برآورد تغییرات ارتفاعی پادگانه‌های دریایی منطقه کنارک تا کلات با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، تکنیک تداخل‌سنجی راداری و همچنین بررسی تأثیر آن بر مورفولوژی این پادگانه‌ها بود. در این تحقیق از تصاویر ماهواره‌ای رادار ENVISAT در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ و از آنالیز سری زمانی SBAS برای تحلیل میزان جابه‌جایی و تغییرات ارتفاع پادگانه‌های دریایی کنارک، گوردیم، تنگ و کلات استفاده شد. نتایج حاصل از این تحقیق بیانگر آن است که میزان برخاستگی سواحل در پادگانه‌های منطقه مورد مطالعه یکسان نیست و میانگین میزان برخاستگی از ۰/۲۵ میلی‌متر در سال در پادگانه کنارک در شرق منطقه مورد مطالعه به سمت غرب تا ۰/۷ میلی‌متر در سال در پادگانه کلات افزایش می‌یابد. در بخش‌هایی از پادگانه‌های دریایی، هم‌زمان با برخاستگی، فرونشست‌هایی مشاهده می‌شود که دلیل آن را می‌توان شکل‌گیری گسل‌های نرمال در این منطقه و فرونشینی سطح پادگانه‌ها دانست. این برخاستگی‌ها و فرونشست‌ها بر مورفولوژی پادگانه‌های دریایی تأثیر گذاشته و اشکال ژئومورفولوژی همانند پرتگاه‌های مارنی- ماسه‌سنگی متعدد را در این منطقه به وجود آورده است. علاوه بر آن بررسی‌ها نشان می‌دهد بالاترین سطوح ارتفاعی در پادگانه‌های دریایی منطبق بر مناطقی است که میزان برخاستگی آن‌ها بیشتر از سایر نقاط است.

کلیدواژگان: برخاستگی و فرونشینی، پادگانه‌های دریایی، تداخل‌سنجی راداری، کلات، کنارک.

مقدمه

سواحل مکران اهمیت استراتژیک دارد و طرح کلان توسعه سواحل مکران، که به منظور بهره‌برداری از پتانسیل‌های این منطقه ساحلی در توسعه اقتصادی کشور صورت گرفته، نشانه جایگاه بسیار بالای این منطقه به‌خصوص از دیدگاه توسعه اقتصادی کشور است. از این رو ارزیابی پایداری سواحل این منطقه اهمیت زیادی دارد و می‌تواند برنامه‌ریزان را جهت بهره‌برداری بهتر از این سواحل یاری دهد. این منطقه از واحدهای ژئومورفولوژی متعدد، همانند پادگانه‌های دریایی و سواحل ماسه‌ای و سدهای ساحلی، تشکیل شده است. پادگانه‌های دریایی عوارض منحصربه‌فرد تکتونیکی در ایران است

و بخش‌هایی از سواحل مکران را به خود اختصاص داده است. سواحل مکران پیوسته در حال بالا آمدن است و این وضعیت بر مورفولوژی و تغییر شکل پادگانه‌های دریایی عمان تأثیر زیادی گذاشته است که نمود بارز آن را می‌توان شکل‌گیری پرتگاه‌های ساحلی در این مناطق دانست. اما یکی از مباحث علمی که دانشمندان علوم زمین به دنبال بررسی آن هستند، برآورد میزان برخاستگی پادگانه‌های دریایی در بخش‌های مختلف سواحل مکران و تأثیر آن بر شکل‌زایی خطوط ساحلی است. مطالعه پادگانه‌های دریایی و میزان جابه‌جایی آن‌ها با استفاده از روش‌های مبتنی بر تعیین سن مطلق، به دلیل هزینه زیاد آن، بسیار محدود است و نتیجه این تعیین سن‌ها فقط می‌تواند میزان برخاستگی یک بخش کوچک و محدود از پادگانه‌ها را نشان دهد و قابل تعمیم به همه سطوح مختلف پادگانه‌های دریایی نیست. از این رو تحلیل دقیق مورفولوژی و آگاهی از روند جابه‌جایی ارتفاعی در این پادگانه‌ها زمانی امکان‌پذیر خواهد بود که سطوح پادگانه‌های دریایی به صورت یکپارچه بررسی شود. استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری در مطالعه پادگانه‌های دریایی امکان بررسی یکپارچه جابه‌جایی (برخاستگی و فرونشست) زمین را فراهم می‌آورد و از طریق آن می‌توان دینامیک این عوارض را بهتر تجزیه و تحلیل کرد. پادگانه‌های دریایی ساحل مکران نتیجه حرکت پوسته اقیانوسی دریای عمان و فرورانش آن به زیر پوسته قاره‌ای ایران است. برخاستگی در خطوط ساحلی حاشیه‌های همگرا می‌تواند تدریجی یا در نتیجه زلزله‌های بزرگ شکل بگیرد (وسون^۱ و همکاران^۲ ۲۰۱۵؛ سیمپسون^۳ ۲۰۱۵؛ سگال^۴ ۲۰۱۰؛ ماتسوئورا^۵ و ساتو ۱۹۸۹؛ لاجوی^۶ ۱۹۸۶؛ کینگ^۷ و همکاران ۱۹۹۸). برخاستگی دائمی حاشیه‌های منطقه فرورانش عموماً به ظهور پادگانه‌های دریایی یا سکناس‌هایی از پلات‌فرم‌های ساحلی منجر می‌شود که از آب بیرون آمده‌اند (کلر^۸ و پینتر^۹ ۲۰۰۲؛ هنری^{۱۰} و همکاران ۲۰۱۴؛ بوربنک^{۱۱} و اندرسون ۲۰۱۴). پادگانه‌های دریایی در طول بیش از ۱۰۰۰ کیلومتر از کراچی پاکستان تا جاسک در ایران گسترش یافته‌اند. پادگانه‌های دریایی در ایران حداکثر ۲۳۶ متر در چابهار و نیز در امتداد سواحل غرب پاکستان با حداکثر ۵۰۰ متر ارتفاع یافته‌اند (شرودر^{۱۲} ۲۰۰۲). تاریخچه سواحل مکران شامل ارتباط پیچیده ناآرامی‌های تکتونیکی، تغییر سطح دریا و فرسایش و رسوب‌گذاری ساحلی است. فرسایش به‌خصوص در کنار پادگانه‌های دریایی بر سایر فرایندها غلبه دارد (شرودر ۲۰۰۲). پادگانه‌های دریایی مکران حدود ۴۲۰۰۰ سال پیش در طول گسل‌های ساحلی و در نتیجه فعالیت‌های تکتونیکی در منطقه شکل گرفته‌اند و هم‌زمان با شکل‌گیری آن‌ها فرایندهای مورفودینامیکی دریا، همانند امواج، به فرسایش آن‌ها پرداخته‌اند. این فرسایش امواج ساحلی باعث شده اکثر پادگانه‌های دریایی با جلگه ساحلی ارتباط پیدا کنند (نورمند^{۱۳} ۲۰۱۹a). قرار گرفتن پادگانه‌های دریایی سواحل دریای عمان در سطوح ارتفاعی مختلف (۶ تا ۲۳۶ متر) نشان می‌دهد بخش‌های مختلف این سواحل تاریخچه تکتونیکی مختص خود را دارد.

1. Wesson
2. Simpson
3. Segall
4. Matsu'Ura
5. Lajoie
6. King
7. Keller
8. Henry
9. Burbank
10. Shroder
11. Normand

مطالعه ماهیت این پادگانه‌ها را فالکون^۱ (۱۹۴۰ تا ۱۹۴۷) و هریسون^۲ (۱۹۴۱) آغاز کردند و تا کنون مطالعات گسترده‌ای، با تأکید بر تعیین سن آن‌ها و برآورد میزان برخاستگی، روی آن‌ها انجام گرفته است. سن‌های تعیین شده برای این پادگانه‌ها بین ۴۴۵۸۰ تا ۶۰۰۰ سال قبل است که با روش کربن ۱۴ روی پوسته‌های صدف موجود بین لایه‌های این پادگانه‌ها به دست آمده است (ویتافینزی^۳ ۱۹۷۵، ۱۹۸۱، ۱۹۸۲، ۲۰۰۲؛ اسند^۴ ۱۹۶۷ و ریس^۵ و همکاران ۱۹۹۸؛ غریب‌رضا و معتمد ۱۳۸۹؛ لیتل^۶ ۱۹۷۲؛ پگ^۷ و همکاران ۱۹۷۹؛ راجندران^۸ و همکاران ۲۰۱۳؛ نورمند و همکاران ۲۰۱۹b). با وجود این مطالعات، مباحث بسیار زیادی در زمینه ماهیت ژئومورفولوژیکی و زمین‌شناختی این پادگانه‌ها باقی مانده که تا کنون بررسی نشده است. یکی از جنبه‌های کلیدی در مطالعه پادگانه‌های دریایی تعیین میزان برخاستگی این پادگانه‌هاست که می‌تواند رهیافتی جدید در زمینه شکل‌گیری و تغییر شکل و مورفولوژی پادگانه‌ها در اختیار ما قرار دهد. نورمند و همکارانش (۲۰۱۹a) مطالعات جامعی را در زمینه تعیین سن پادگانه‌های دریایی مکران با استفاده از روش رادیو کربن و $^{230}\text{Th}/\text{U}$ و شبیه‌سازی اپتیکی لومینسانس انجام دادند و با استفاده از این نتایج میزان برخاستگی پادگانه‌های دریایی را برآورد کردند. نتایج نشان داد میزان برخاستگی در پادگانه‌های دریایی در مناطق مختلف بسیار متغیر و بین ۰/۲ تا ۱/۵ میلی‌متر در سال است؛ البته این عدد در موارد استثنایی به عددهای بسیار زیاد، حدود ۳ تا ۵ میلی‌متر در سال، نیز می‌رسد. مطالعات مبتنی بر تعیین سن مطلق و اکثر مطالعاتی که در این زمینه با هدف تعیین میزان برخاستگی پادگانه‌های دریایی انجام می‌گیرد، به دلیل هزینه بسیار بالای آزمایش‌های تعیین سن مطلق، اغلب به صورت محدود در بخش‌های خاصی از پادگانه‌های دریایی صورت می‌گیرد. از این رو، استفاده از تکنیک‌هایی که بتواند تحلیل دقیق‌تر و یکپارچه از جابه‌جایی‌های سطح زمین در اختیار محققان قرار دهد بسیار ارزشمند است و تکنیک تداخل‌سنجی راداری این امکان را برای محققان فراهم می‌آورد. تداخل‌سنجی رادار درجه‌م‌صنوعی^۹ (InSAR) ابزاری بسیار قدرتمند برای پایش تغییر شکل^{۱۰} پوسته زمین است. علاوه بر آن در این روش، به واسطه بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای و قابلیت تکرارپذیری آن، پایش تغییرات سطح زمین در کوتاه‌ترین زمان ممکن و با کمترین هزینه قابل اجراست (شریفی‌کیا ۱۳۹۱). یک اینترفروگرام، تصویری حاوی اختلاف فاز دو تصویر راداری است که با دقت نسبت به هم ثبت هندسی شده‌اند (دنیل^{۱۱} و همکاران ۲۰۰۳). این تکنیک‌ها همانند پراکنش‌کننده‌های دائمی^{۱۲} (PS) (فررتی^{۱۳} و همکاران ۲۰۰۱) و الگوریتم خط مبنای کوتاه^{۱۴} (SBAS) اطلاعات بسیار زیادی درباره تغییر شکل سطح زمین در اختیار محققان قرار می‌دهد. این تکنیک حجم بسیار زیادی از تصاویر راداری متعلق به بازه‌های زمانی مختلف را دریافت کرده و با بررسی و

1. Falcon
2. Harrison
3. Vita-Finzi
4. Snead
5. Reyss
6. Little
7. Page
8. Rajendran
9. synthetic aperture radar interferometry
10. deformation
11. Daniel
12. Permanent Scatterers
13. Ferretti
1. Subset Baseline Small

تحلیل آن‌ها در بازه زمانی مشخص میانگین تغییر شکل و جابه‌جایی سطوح را ارائه می‌دهد. از مطالعات تداخل‌سنجی راداری برای بررسی نواحی مستعد وقوع مخاطره‌های طبیعی- همانند فرونشست، زلزله، آتش‌فشان (حاجب و همکاران ۱۳۹۷؛ والاهاشیم و همکاران ۲۰۱۵) و تغییرهای ژئومورفولوژی ساحلی استفاده شده است. بیشتر از یک دهه است که رادار دریچه مصنوعی (SAR) توانایی خود را به منزله ابزاری قدرتمند برای پایش و نقشه‌برداری از مناطق ساحلی در بازه‌های زمانی و مقیاس‌های مکانی مختلف اثبات کرده است (تیاتینی^۱ و همکاران ۲۰۱۲؛ لیو ۲۰۰۹؛ دی پائولا^۲ و همکاران ۲۰۱۸). محققان رهیافت‌های تداخل‌سنجی راداری تفاضلی چندزمانه را در بررسی تغییر شکل پهنه‌های ساحلی به کار گرفته‌اند. مانتوری^۳ و همکارانش (۲۰۱۸) به پایش تأثیر فرونشست پهنه ساحلی بر منابع آب‌های زیر زمین در شمال ایتالیا پرداختند. برونو^۴ و همکارانش (۲۰۱۶) میزان تغییر شکل سازه‌های ساحلی را از طریق تداخل‌سنجی راداری پایش کردند. اما استفاده از تداخل‌سنجی راداری در مطالعه پادگانه‌های دریایی، که در این تحقیق استفاده شده است، از اولین مطالعات در این حوزه محسوب می‌شود و نتایج آن می‌تواند دریچه‌ای جدید در زمینه مطالعات پادگانه‌های دریایی برای محققان علوم زمین باز کند. هدف از این پژوهش بررسی تغییرات ارتفاعی پادگانه‌های دریایی مکران، از کنارک تا کلات، در استان سیستان و بلوچستان، با استفاده از داده‌های راداری در حد فاصل سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۱ بود تا از طریق آن، علاوه بر تعیین میزان برخاستگی در بخش‌های مختلف پادگانه‌های دریایی این منطقه و تغییرات آن در بخش‌های مختلف هر پادگانه، آثار آن بر مورفولوژی پادگانه‌های دریایی ارزیابی شود.

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در حاشیه ساحلی مکران و در حد فاصل کنارک در شرق تا کلات در غرب قرار دارد (شکل ۱). این پادگانه‌ها توسط خلیج پزم و گوردیم از یک‌دیگر جدا شده‌اند. این منطقه ساحلی تحت تأثیر زون فرورانش مکران قرار دارد و در امتداد این منطقه صفحه عربی با سرعتی در حدود ۲ سانتی‌متر در سال به زیر صفحه ایران می‌رود (خان^۵ و همکاران ۲۰۰۸؛ ماسون^۶ و همکاران ۲۰۰۴؛ وارمانت^۷ و همکاران ۲۰۰۴؛ فروهلینگ^۸ و سزلیگا ۲۰۱۶). با وجود اینکه زون فرورانش مکران فعالیت لرزه‌ای تاریخی بسیار کمی به‌خصوص در بخش غربی خود دارد (بایرن ۱۹۹۲)، برخاستگی‌های تکتونیکی منشورهای برافزایشی با حضور تعداد بسیار زیادی پادگانه دریایی در طول سواحل مکران نمود یافته است (نورمند و همکاران ۲۰۱۹b). از لحاظ سنگ‌شناسی سنگ بستر حاشیه ساحلی مکران در شرق ایران شامل ماسه‌سنگ میوسن بالایی تا پلیوسن است (صمدیان و همکاران ۲۰۱۴). این واحدهای سنگی عموماً شامل توالی از ماسه‌سنگ و لایه‌های مارنی ریزدانه‌ای و حاوی صدف‌های دریایی هستند که در حدود ۱ تا ۱۰ متر ضخامت دارند

2. Teatini
3. Di Paola
4. Montori
5. Brono
6. Khan
7. Masson
8. Vernant
9. Frohling

(فالكون ۱۹۴۷؛ اسند ۱۹۹۳). تحت تأثیر فرایندهای دریایی، بخش‌هایی از این پادگانه‌ها برش خورده و دچار فرسایش شده‌اند که رسوبات سواحل ماسه‌ای در این منطقه در نتیجه فرسایش این ماسه‌سنگ‌هاست. این پادگانه‌ها با پیش‌روی و پس‌روی خطوط ساحلی در ارتباط است (هارمس^۱ و همکاران ۱۹۸۴). نوسانات سطح آب دریاهای آزاد (استاتیک) و تغییرات تکتونیکی و حرکات تعادلی گسل‌ها در این منطقه باعث شده است تاریخ تکتونیکی این منطقه به‌خصوص در سواحل دریای عمان بسیار پیچیده باشد و نتیجه نهایی این‌گونه حرکت‌ها بالا آمدن زمین‌ها و ایجاد پادگانه‌های دریایی است که به‌ویژه در سواحل مکران گسترش زیادی یافته‌اند.



شکل ۱. جایگاه منطقه و مرز پادگانه‌های دریایی مورد مطالعه (خطوط قرمز) در ایران

پادگانه‌های دریایی منطقه مورد مطالعه

پادگانه‌های دریایی مکران به صورت پهنه‌های مسطح و در برخی موارد دارای ناهمواری‌های مجزا هستند که پوش سنگ آن حاوی لایه‌ای از ماسه‌سنگ حاوی پوسته‌های صدف است. این پادگانه‌ها در سطوح ارتفاعی متفاوت قرار گرفته‌اند و در چابهار ارتفاع این سطوح با توجه به مدل ارتفاعی رقومی Alos Palsar به بیش از ۲۳۶ متر می‌رسد. در منطقه مورد مطالعه چهار پادگانه وجود دارد که به ترتیب از شرق به غرب عبارت‌اند از: کنارک، گوردیم، تنگ کلات (شکل ۲A).

1. Harms

الف) پادگانه کنارک

این پادگانه از لحاظ ژئومورفولوژی شامل تپه‌هایی با سطوح هموار است و بخش‌هایی از آن توسط امواج بریده شده‌اند. شیب کلی این پادگانه‌ها حدود ۱ درجه و جهت شیب آن‌ها به سمت دریاست. از لحاظ سنگ‌شناسی شامل توالی مارن و ماسه‌سنگ هستند. متوسط ارتفاع پادگانه کنارک حدود ۳۵ متر است و بیشترین ارتفاع این پادگانه در مجاورت بندر پزم تیاب با ارتفاع حدود ۸۸ متر به چشم می‌خورد (شکل ۲A و ۳A). نورمند (۲۰۱۹a) پادگانه‌ای را در ارتفاع ۳۲ متری با استفاده از $^{230}\text{Th}/\text{U}$ تعیین سن کرد و به این نتیجه رسید که سن آن در حدود ۱۴۱۰۰۰ سال است و میزان برخاستگی این بخش از پادگانه را حدود ۰/۱۱ میلی‌متر در سال تعیین کرد.

ب) پادگانه گوردیم

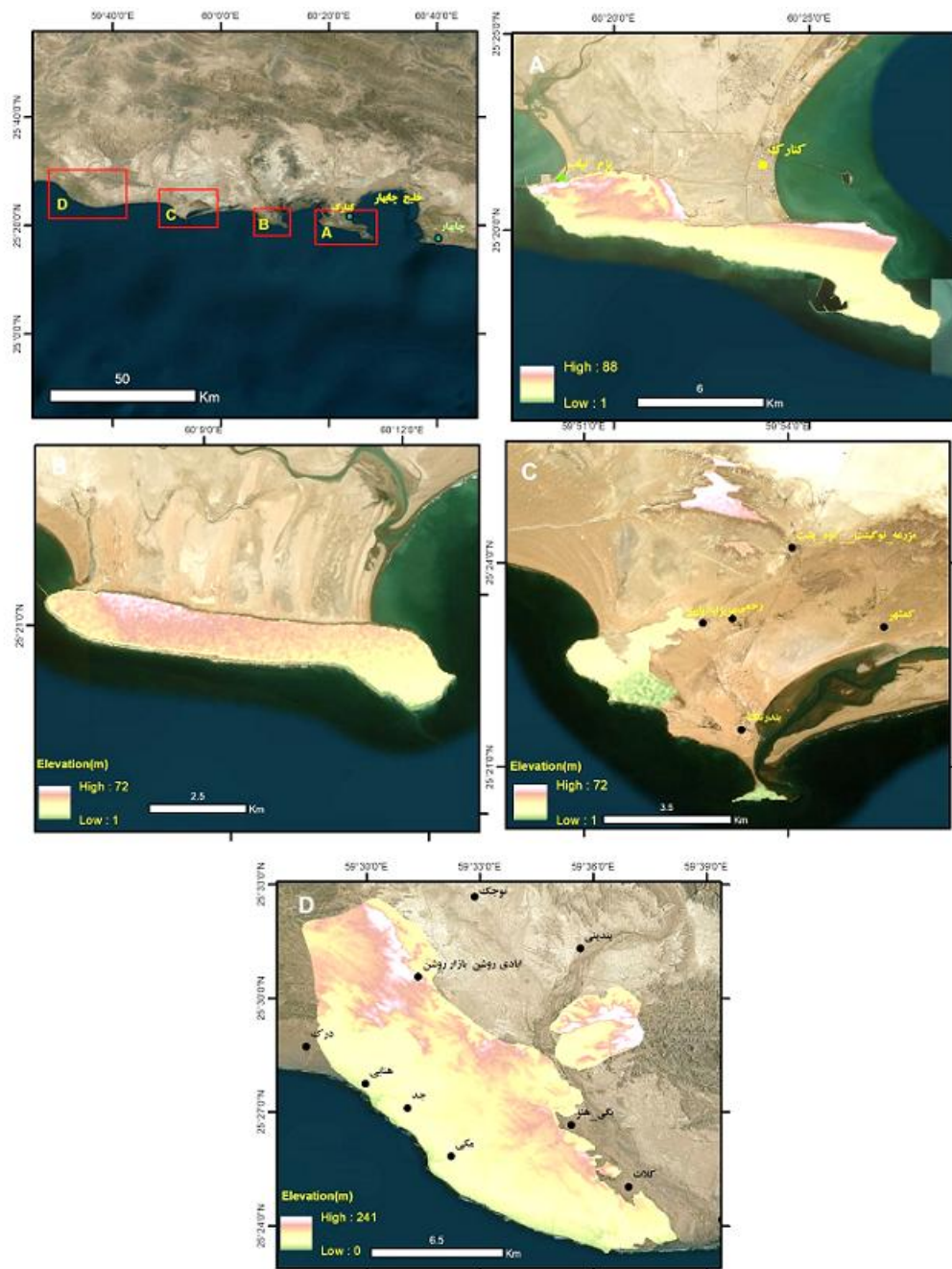
این پادگانه با جهت شرقی- غربی به طول ۱۸ کیلومتر در سواحل عمان کشیده شده است و عرض آن از حدود ۱۰۰ تا ۳۰۰ متر متغیر است. این پادگانه را پرتگاه‌های بسیار پرشیب احاطه کرده است. کمترین ارتفاع این پادگانه در حدود ۱۵ متر و بیشترین ارتفاع آن ۷۲ متر است. نورمند (۲۰۱۹a) بخشی از این پادگانه در ارتفاع ۶۴ متری (شکل ۳D و ۲B) را مطالعه کرد و سن مطلق آن را در حدود ۸۹۰۰۰ سال تخمین زد.

ج) پادگانه تنگ

پادگانه تنگ منطقه مسطح مرتفعی به طول ۱۹ کیلومتر است که بخش‌هایی از آن فرسایش یافته و حاوی پرتگاه‌های مارنی و ماسه‌سنگی است. علاوه بر آن، تومبولویی با طول حدود ۱ کیلومتر بخشی از پادگانه‌های دریایی را به ساحل متصل کرده است. در بخش ساحلی فعالیت امواج دریایی به حفر بسیار شدید این پادگانه‌ها منجر شده است و هم‌زمان با پس‌روی پادگانه‌های دریایی یک استوک در این منطقه بر جای گذاشته است. در شمال خط ساحلی نیز دو پادگانه دیگر به صورت مجزا از یک‌دیگر قرار دارند. ماهیت سنگ‌شناسی این پادگانه‌ها توالی از مارن و ماسه‌سنگ است و شواهدی از فسیل‌های دریایی بین لایه‌های رسوبی مشاهده می‌شود. این پادگانه‌ها ارتفاع متفاوتی از ۳ تا ۷۹ متر دارند (شکل ۳B و ۲C). سن مرتفع‌ترین پادگانه حدود ۳۰۰۰۰ سال و سن پادگانه با ارتفاع پایین‌تر حدود ۲۰۰۰۰ سال است. سن کم‌ارتفاع‌ترین پادگانه متعلق به هولوسن است (شولدر ۲۰۰۲).

د) پادگانه کلات

مساحت این پادگانه در حدود ۱۸۶ کیلومتر مربع است و شامل سطوحی هموار است که به‌شدت و به‌طور نامنظم فرسایش یافته‌اند. تعداد زیادی از این پادگانه‌ها گسل خورده و جهت امتداد آن‌ها شرقی- غربی و شمالی- جنوبی است. بخش‌های ساحلی این پادگانه نیز توسط امواج دریا به‌شدت فرسایش یافته‌اند. میانگین ارتفاعی این پادگانه‌ها حدود ۶۵ متر است و بیشترین ارتفاع آن با ۲۴۱ متر در بخش شمالی آن به چشم می‌خورد (شکل ۳C و ۲D).



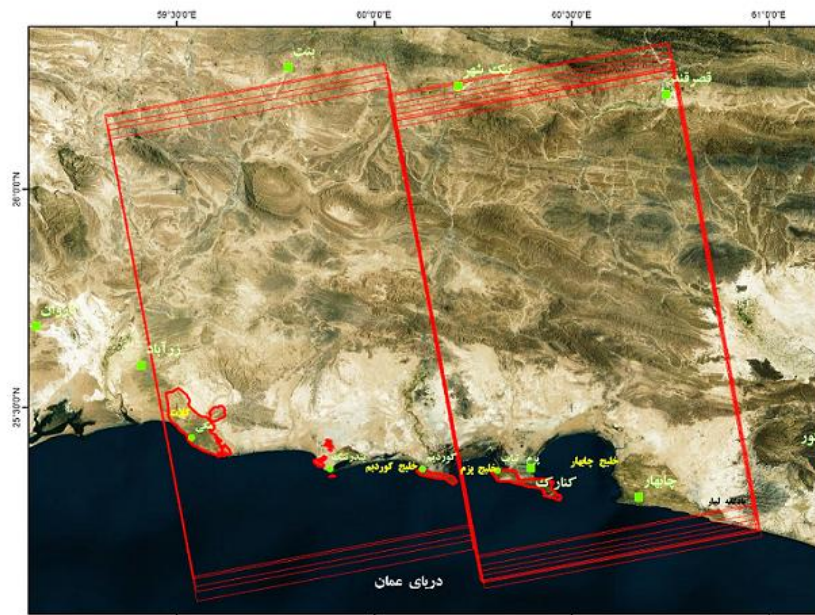
شکل ۲. موقعیت پادگانه‌های دریایی در منطقه مورد مطالعه: (A) پادگانه کنارک؛ (B) پادگانه گوردیم؛ (C) پادگانه تنگ؛ (D) پادگانه کلات



شکل ۳. A) لایه‌های رسوبی پادگانه‌های دریایی کنارک؛ B) استوک در پادگانه دریایی تنگ؛ C) پادگانه دریایی کلات؛ D) پادگانه‌های دریایی گوردیم

روش تحقیق

تداخل‌سنجی راداری با هدف بررسی تغییر یک پدیده و با استفاده از سری زمانی تصاویر ماهواره‌ای راداری انجام می‌گیرد. از طریق این روش می‌توان تغییر شکل پوسته زمین را در حد میلی‌متر اندازه گرفت و در مطالعه فعالیت آتشفشان، زمین‌لغزش، مهندسی ساخت‌وساز، فرونشست، و همچنین فرایندهای تکتونیکی مورد استفاده قرار داد. در این تحقیق با هدف بررسی میزان تغییرات ارتفاعی (برخاستگی و فرونشست) پادگانه‌های دریایی عمان در حد فاصل بندر کنارک تا بندر کلات از داده‌های سنجنده راداری ASAR ماهواره ENVISAT استفاده شد. سری زمانی مورد مطالعه در این تحقیق در حد فاصل سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ است (شکل ۴ و جدول ۱) و تجزیه و تحلیل داده‌ها در نرم‌افزار Sarscape در محیط ENVI 5.3 انجام گرفت.



شکل ۴. پوشش تصاویر ماهواره‌ای داده‌های پایین‌گذر ENVI-SAT ASAR استفاده‌شده در منطقه مورد مطالعه

جدول ۱. مشخصات تصاویر ماهواره‌ای در این مطالعه

کنارک و گوردیم				تنگ و کلات			
ماهواره و سنجنده	تاریخ تصویربرداری	قطبش	حالت مداری	ماهواره و سنجنده	تاریخ تصویربرداری	قطبش	حالت مداری
ENVISAT_ASAR	۲۰۰۳,۰۳,۰۵	VV	Descending	ENVISAT_ASAR	2003.11.08	VV	Descending
ENVISAT_ASAR	۲۰۰۳,۱۱,۲۷	VV	Descending	ENVISAT_ASAR	2004.01.15	VV	Descending
ENVISAT_ASAR	۲۰۰۴,۰۳,۰۲	VV	Descending	ENVISAT_ASAR	2004.04.30	VV	Descending
ENVISAT_ASAR	۲۰۰۴,۰۸,۰۱	VV	Descending	ENVISAT_ASAR	2004.09.18	VV	Descending
ENVISAT_ASAR	۲۰۰۵,۰۵,۰۵	VV	Descending	ENVISAT_ASAR	2005.01.01	VV	Descending
ENVISAT_ASAR	۲۰۰۵,۱۰,۱۱	VV	Descending	ENVISAT_ASAR	2005.07.09	VV	Descending
ENVISAT_ASAR	۲۰۰۶,۰۴,۰۱	VV	Descending	ENVISAT_ASAR	2005.10.8	VV	Descending
ENVISAT_ASAR	۲۰۰۷,۰۳,۰۲	VV	Descending	ENVISAT_ASAR	2006.06.15	VV	Descending
ENVISAT_ASAR	۲۰۰۸,۰۱,۱۰	VV	Descending	ENVISAT_ASAR	2006.11.11	VV	Descending
ENVISAT_ASAR	۲۰۰۷,۰۵,۱۰	VV	Descending	ENVISAT_ASAR	2007.02.24	VV	Descending
ENVISAT_ASAR	۲۰۰۶,۱۲,۲۱	VV	Descending	ENVISAT_ASAR	2008.05.10	VV	Descending
ENVISAT_ASAR	۲۰۰۶,۰۲,۰۹	VV	Descending	ENVISAT_ASAR	2008.11.15	VV	Descending
ENVISAT_ASAR	۲۰۰۹,۰۸,۲۷	VV	Descending	ENVISAT_ASAR	2009.04.04	VV	Descending
ENVISAT_ASAR	۲۰۰۹,۰۳,۰۵	VV	Descending	ENVISAT_ASAR	2009.12.26	VV	Descending
ENVISAT_ASAR	۲۰۰۸,۱۰,۱۶	VV	Descending	ENVISAT_ASAR	2010.03.6	VV	Descending
ENVISAT_ASAR	۲۰۱۰,۰۷,۰۸	VV	Descending	ENVISAT_ASAR	2011.05.26	VV	Descending

به منظور تحلیل سری زمانی و برآورد میزان تغییر شکل پادگانه‌های دریایی از الگوریتم خط مبنای کوتاه^۱ (SBAS) استفاده شد. همچنین، با هدف حذف خطای کرویت، اطلاعات دقیق مداری^۲ (DEOS) در قالب فایل‌های مداری^۳ (ORD)، که به صورت باینری هستند، مورد استفاده قرار گرفت. این داده‌ها حاوی موقعیت‌های دقیق مداری ماهواره‌های ERS1/2 و Envisat است. برای حذف اثر فاز ناشی از توپوگرافی از روی تداخل‌نگارها، مدل ارتفاع رقومی ماهواره راداری Alos-Palsar با قدرت تفکیک مکانی ۱۲/۵ متر به کار رفت. یکی از مشکلاتی که در بررسی سری‌های زمانی در تداخل‌سنجی راداری به‌خصوص در مطالعه محیط‌های طبیعی مشاهده می‌شود تغییراتی است که به واسطه گسترش مراکز سکونتگاهی و تأسیسات انسانی و همچنین فعالیت مرتبط با آن، همانند راه‌سازی و ساخت بنادر و اسکله‌ها و معدن‌کاری، به وجود می‌آید. زیرا هر گونه فعالیت غیرطبیعی که در پهنه‌های مورد مطالعه موجب تغییر چشم‌انداز سطح زمین شود می‌تواند خروجی داده‌ها، که حاصل فعالیت‌های انسانی در منطقه است، را با فعالیت‌های طبیعی ترکیب کند و دقت نتایج را تحت تأثیر قرار دهد. از این رو، در این بررسی‌ها مرز مراکز انسانی و پهنه‌هایی که تحت تأثیر این فعالیت‌هاست، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مکانی بالا، شناسایی و از نتایج مطالعات حذف شد. همچنین برخی از عوارض طبیعی، همانند تپه‌ها و پهنه‌های ماسه‌ای، نیز به دلیل جابه‌جایی زیاد، که مستقل از فعالیت‌های تکنونیک در منطقه مورد مطالعه است، از مطالعه خارج شد. با هدف ارزیابی تأثیر برخواستگی و فعالیت‌های تکنونیک بر مورفولوژی خط ساحلی، خطواره‌های موجود در سطح پادگانه‌های دریایی، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ Oli، در محیط نرم‌افزار Geomatica و Rockwork، استخراج شد.

نتایج

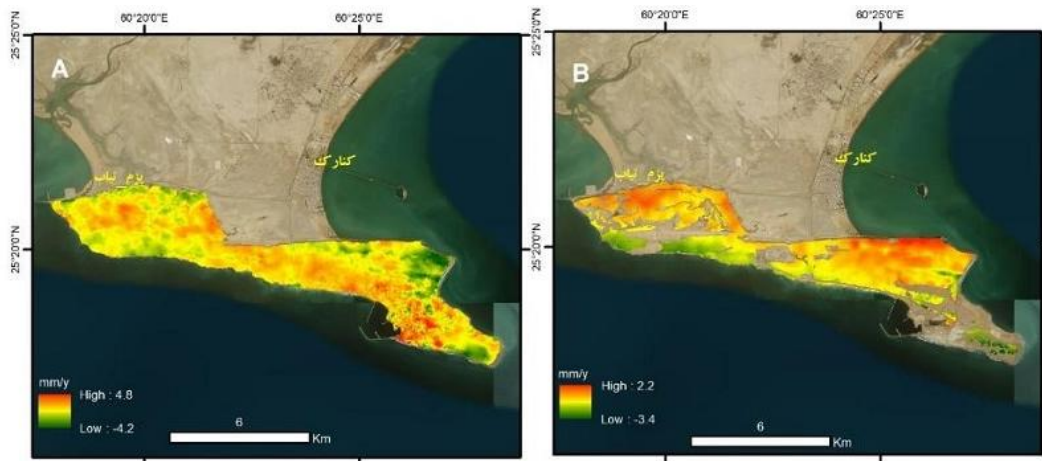
میزان تغییرات ارتفاعی پادگانه‌های دریایی

الف) پادگانه دریایی کنارک

نتایج اولیه حاصل از تداخل‌سنجی راداری نشان داد میزان جابه‌جایی در کل محدوده مورد مطالعه کنارک در حد فاصل سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ بین ۴/۲- میلی‌متر تا ۴/۸ میلی‌متر در سال متغیر است و متوسط آن ۰/۹- میلی‌متر در سال است (شکل ۵A). همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، عوارض طبیعی بسیار فعال در مناطق ساحلی و به‌خصوص در پادگانه‌های دریایی حضور دارند که از آن جمله می‌توان به تپه‌های ماسه‌ای، پهنه‌های ماسه‌ای، و پرتگاه‌های ساحلی اشاره کرد. پایداری این عوارض نسبت به سطوح سنگی پادگانه‌های دریایی بسیار کمتر است. تغییرات آن‌ها به‌شدت بر نتایج به‌دست‌آمده از تداخل‌سنجی راداری تأثیر منفی می‌گذارد و در نظر گرفتن میزان برخواستگی کل پادگانه با در نظر گرفتن تغییراتی که این عوارض در دوره مورد مطالعه داشته است مانع از به دست آمدن میزان واقعی جابه‌جایی پادگانه‌های دریایی در اثر فعالیت‌های تکنونیک می‌شود. علاوه بر آن، فعالیت‌های انسانی و همچنین ساخت‌وسازهایی که در محدوده پایگاه نیروی دریایی- شامل برداشت سطوح سنگی، تسطیح زمین، گسترش سازه‌های نظامی در طول بازه

1. subset baseline small
2. delft institute for earth-oriented space research
3. orbital data record

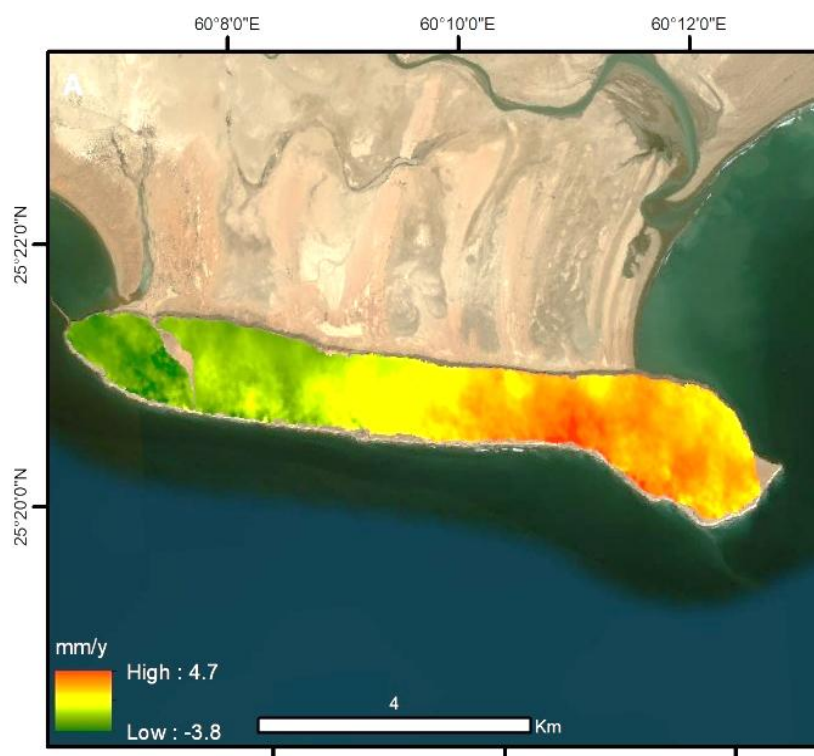
زمانی مورد مطالعه صورت گرفته است می‌تواند بر داده‌های تداخل‌سنجی تأثیر بگذارد. از این رو محدوده این عوارض طبیعی و انسان‌ساخت از مطالعات حذف شد تا نتایج تداخل‌سنجی نهایی فقط دربرگیرنده سطوح سنگی پادگانه‌های دریایی باشد. پس از حذف این سطوح و اصلاح نتایج جابه‌جایی سطوح پادگانه‌ها، میزان تغییرات بین $3/4$ تا $2/2$ میلیمتر در سال قرار گرفت و میانگین میزان جابه‌جایی حدود $0/25$ میلی‌متر در سال محاسبه شد (شکل ۵B). وجود هم‌زمان فرونشست و برخاستگی در این پادگانه نشان‌دهنده عملکرد متفاوت فرایندهای تکتونیکی در این منطقه است. این موضوع نشان می‌دهد پادگانه دریایی کنارک در طول دوره مطالعه بیش از هفت‌ساله ($2003/05/03$ تا $2010/07/08$) به طور متوسط حدود ($1/8$ میلی‌متر) بالاآمدگی داشته است. بیشترین میزان بالاآمدگی در شمال غرب پادگانه در منطقه اسکله پزم تیاب و همچنین شمال شرق منطقه در محدوده شمال شرق و جنوب اسکله بندر کنارک مشاهده می‌شود.



شکل ۵. میزان جابه‌جایی پادگانه دریایی کنارک: (A) بدون حذف عوارض انسان‌ساخت و پدیده‌های طبیعی فعال؛ (B) با حذف عوامل انسان‌ساخت و پدیده‌های طبیعی فعال

(ب) پادگانه دریایی گوردیم

این منطقه، غیر از بخش شمال غرب آن، که جاده‌ای شوسه در آن قرار دارد، فاقد تأسیسات و ساخت‌وسازهای انسانی مهم و عوارض بسیار فعال طبیعی، از جمله تپه‌های ماسه‌ای، است. از این رو، امکان تجزیه و تحلیل دقیق‌تر تغییر شکل در کل پادگانه فراهم است. میانگین میزان جابه‌جایی در پادگانه دریایی گوردیم $0/38$ میلی‌متر در سال است که نشان‌دهنده برخاستگی این پادگانه در طول دوره مورد مطالعه است. بیشینه برخاستگی $4/7$ میلی‌متر در سال و بیشینه فرونشست در این منطقه حدود $3/8$ در سال است. بیشترین میزان برخاستگی در بخش میانی و شرقی این پادگانه مشاهده می‌شود و بخش غربی آن نیز با فرونشست سطح زمین همراه است (شکل ۶).



شکل ۶. میزان جابه‌جایی پادگانه دریایی گوردیم

ج) پادگانه دریایی بندر تنگ

در منطقه بندر تنگ ناهنجاری‌های بسیار زیاد و اعداد نامتوازن در نتایج تداخل‌سنجی راداری مشاهده شد. بررسی‌های انجام‌گرفته با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و مشاهدات میدانی نشان داد سطح این پادگانه‌ها در مرحله اول پوشیده از تپه‌های ماسه‌ای فعال است. حرکت این تپه‌های ماسه‌ای در طول سال و فصول مختلف میزان جابه‌جایی بسیار زیادی را در تصاویر برگرفته از تداخل‌سنجی راداری نشان می‌دهد. علاوه بر آن، در پادگانه‌های شمال غرب بندر تنگ، بسیاری از سطوح سنگی پادگانه‌های دریایی جهت استفاده در ساخت و توسعه بنادر تنگ و همچنین بندر کلات در اثر معدن‌کاری‌های متعدد در دوره مورد مطالعه و بعد از آن از بین رفته‌اند. از این رو، نتایج حاصل از تداخل‌سنجی راداری در این منطقه از اعتبار زیادی برخوردار نیست و مطالعات پادگانه‌های بندر تنگ از محاسبات آماری خارج شد.

د) پادگانه‌های دریایی کلات

نتایج حاصل از تداخل‌سنجی راداری در پادگانه‌های دریایی کلات نشان می‌دهد مجموعه پادگانه به طور میانگین ۰/۵۶ میلی‌متر در سال در حال بالا آمدن است و با وجود این، بیشینه میزان برخاستگی در این منطقه ۱۳/۲ میلی‌متر در سال و بیشترین میزان فرونشست حدود ۱۸/۵- است (شکل ۷A). همان‌طور که مشاهده می‌شود این میزان بیشینه و کمینه

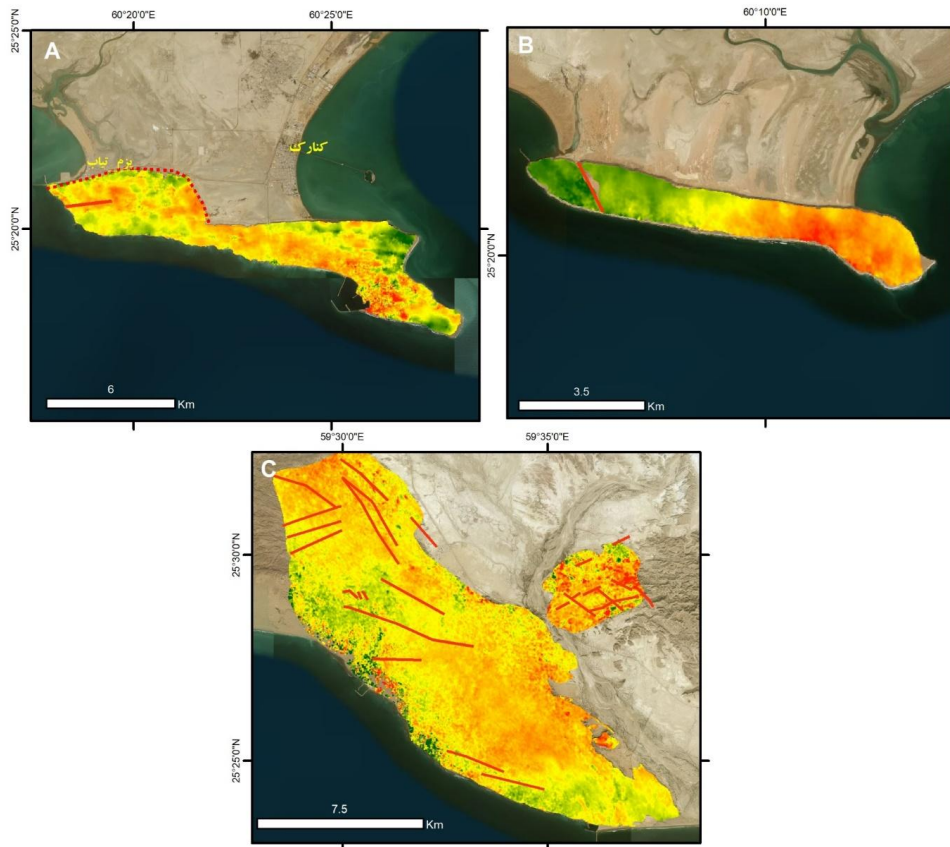
۰/۲۵ میلی متر در سال) به سمت غرب (پادگانه گوردیم ۰/۳۸ میلی متر در سال و پادگانه کلات ۰/۷ میلی متر در سال) افزایش می یابد.

همزمان با برخاستگی پادگانه های دریایی، در بخش هایی از هر یک از سطوح این پادگانه ها فرونشست هایی نیز دیده می شود که ناشی از عملکرد نامتقارن فعالیت های تکتونیکی در این منطقه است. این نتیجه نشان می دهد تصور بالا آمدن مداوم همه سطوح پادگانه های دریایی نادرست است و هر پادگانه با توجه به ماهیت مورفولوژیکی و ساختاری اش عملکرد متفاوتی در بخش های مختلف دارد.

حرکت همگرایی صفحات تکتونیکی در مرزهای صفحه فرورانش به طور معمول شرایط فشارشی به وجود می آورد و به جمع شدن و رانش در صفحه اصلی منجر می شود. البته شواهد نشان می دهد صرفاً این شرایط همراه با فشارش نیست؛ بلکه مثلاً بسیاری از مناطق فرورانش گسل های نرمالی در صفحات بالایی دارند که نشان دهنده توسعه در جهت فرورانش است (آدام و روتر ۲۰۰۰) و سواحل مکران ایران نیز از این امر مستثنی نیست. در مطالعاتی که محققان متعدد در سواحل مکران انجام داده اند شواهد زیادی از این گسل های نرمال مشاهده شده است (حسینی برزی^۱ و تالبوت ۲۰۰۳؛ ایلوز زیمرمن^۲ و همکاران ۲۰۰۷؛ گراندو^۳ و مک کلی ۲۰۰۷؛ برگ^۴ و همکاران ۲۰۱۳؛ روح^۵ ۲۰۱۷؛ نورمند ۲۰۱۹a). همزمان با بالا آمدن پادگانه های دریایی، رسوب های ماری- ماسه سنگی میوسن در این منطقه گسل خوردگی پیدا کرده اند (سپیلی و همکاران ۱۳۷۴؛ محمدخانی و خزایی ۱۳۹۳) (شکل ۸). نتیجه این گسل خوردگی های متعدد به وجود آمدن سطوح متعدد پادگانه های دریایی در ارتفاع های مختلف است.

در پادگانه های دریایی مکران گسل های نرمال متعددی منجر به جابه جایی رسوبات و پادگانه ها شده است (شکل ۹). این گسل های نرمال در ارتباط با فرونشینی منطقه ای جلگه ساحلی است؛ هر چند امکان دارد این وضعیت به صورت محلی نتیجه برخاستگی تفریقی باشد (نورمند ۲۰۱۹b). شواهدی از گسل های معکوس در منطقه مورد مطالعه در این بررسی و سایر بررسی هایی که نورمند (۲۰۱۹) انجام داده بود مشاهده نشده است.

-
1. Hosseini-Barzi
 2. Ellouz-Zimmermann
 3. Grando
 4. Burg
 5. Ruh

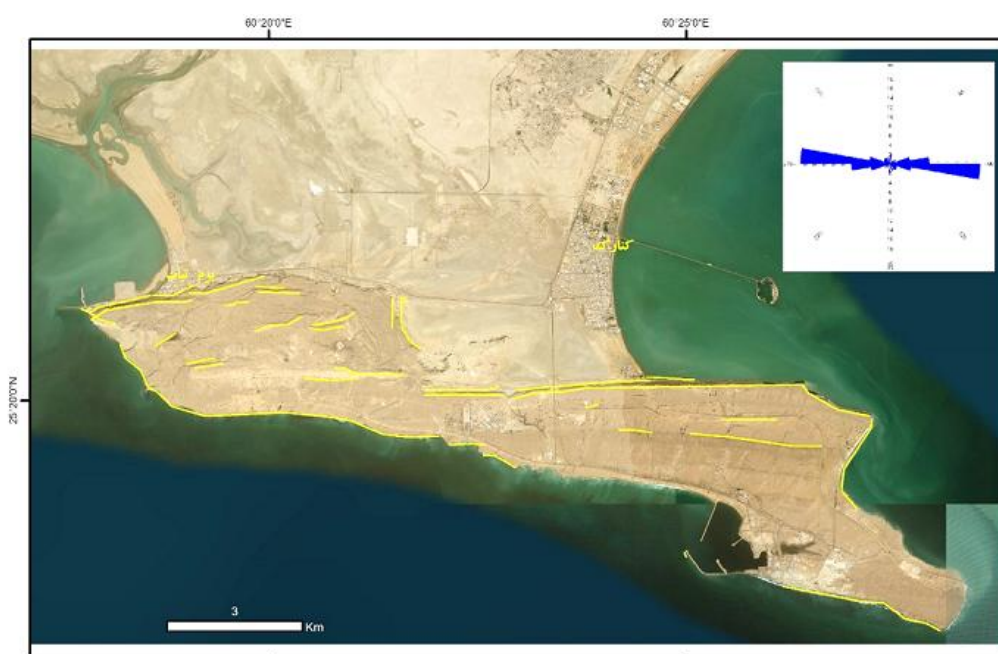


شکل ۸. گسل‌ها: (A) پادگانه دریایی کنارک؛ (B) پادگانه دریایی گوردیم (برگرفته از نورمند ۲۰۱۹)



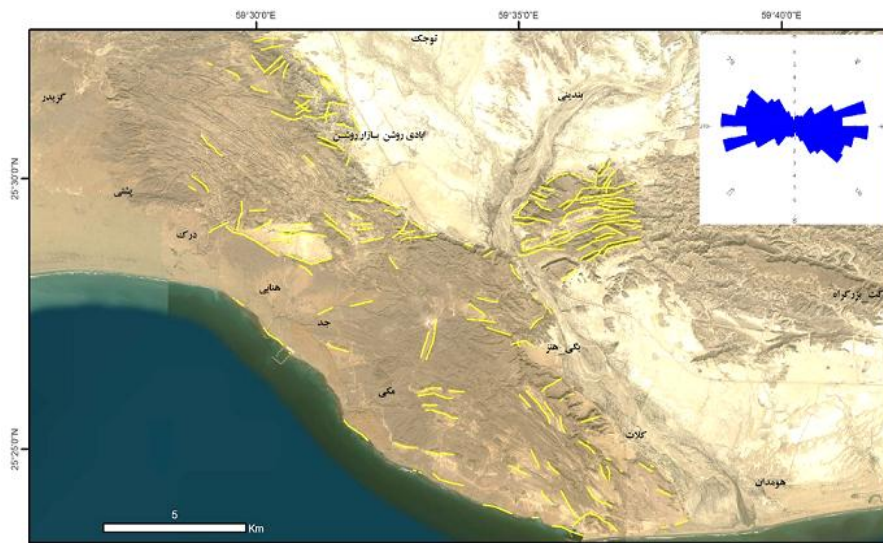
شکل ۹. گسلش نرمال در پادگانه کنارک، بندر یزم تیاب (دید از شمال)

با هدف ارزیابی تأثیر برخاستگی و فعالیت‌های تکتونیکی بر مورفولوژی خط ساحلی، خطواره‌های موجود در سطح پادگانه‌های دریایی، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ Oli، در محیط نرم‌افزار Geomatica و Rockwork استخراج شد. این خطواره‌ها غالباً شامل پرتگاه‌های ماری- ماسه‌سنگی هستند. بر مبنای مطالعات انجام‌گرفته و نمودار گل سرخی به‌دست‌آمده از تصاویر ماهواره‌ای، در پادگانه دریایی کنارک، روند غالب خطواره‌ها بیشتر جهت شرقی- غربی دارد و آزمون ۹۵ درجه بیشترین فراوانی خطواره‌ها را در این منطقه به خود اختصاص داده است (شکل ۱۰). در منطقه گوردیم خطواره قابل توجهی به چشم نمی‌خورد و شامل دو خطواره در بخش‌های شمالی و جنوبی است که منطبق بر روند قرارگیری پرتگاه‌های ساحلی و جهت آن شرقی- غربی است.



شکل ۱۰. پراکندگی و رز دیاگرام خطواره‌ها (خطوط زرد) در پادگانه کنارک

در منطقه کلات نیز روند جهت‌یافتگی خطواره‌ها بیشتر شرقی- غربی است و بعد از آن روند شمال غرب- جنوب شرق بیشترین فراوانی را در این پادگانه به خود اختصاص داده است (شکل ۱۱).



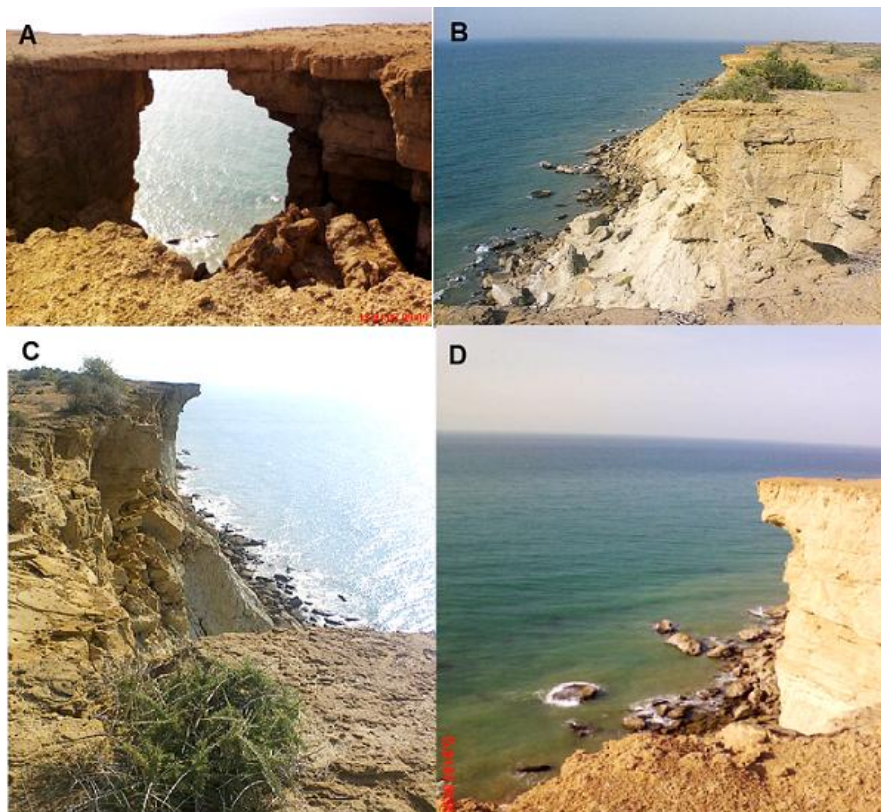
شکل ۱۱. پراکندگی و رز دیاگرام خطواره‌ها (خطوط زرد) در پادگانه دریایی کلات

امتداد خطواره‌های اصلی در پادگانه‌های دریایی منطقه مورد مطالعه کنارک تا کلات بیشتر شرقی- غربی است و این روند با امتداد شرقی- غربی زون فروانش مکران در یک جهت قرار دارد و نشان می‌دهد که فروانش صفحه عربستان به زیر پوسته ایران، علاوه بر برخاستگی پادگانه‌های دریایی در سواحل عمان در ایران، گسل‌ها و پرتگاه‌های مارنی- ماسه‌سنگی را در این پادگانه‌ها به وجود آورده است و امتداد آن در جهت فروانش زون سابداکشن مکران به زیر صفحه ایران است (شکل ۱۲).



شکل ۱۲. جایگاه منطقه مورد مطالعه (کادر مشکی) و ساختارهای تکتونیکی اصلی (برگرفته از Normand et al. 2019)

نتیجه بالا آمدن پادگانه‌های دریایی در این منطقه شکل‌گیری پرتگاه‌های مارنی-ماسه‌سنگی، به‌خصوص در جنوب پادگانه دریایی کنارک و گوردیم و تنگ و کلات- است و این پرتگاه‌ها، علاوه بر مناطق ساحلی، در سایر بخش‌های پادگانه‌های دریایی به چشم می‌خورد. این پرتگاه‌های ساحلی غالباً توالی از مارن و ماسه‌سنگ هستند و در بخش‌های جنوبی و در مناطق مجاور دریا به واسطه مقاومت آن‌ها در برابر فرایندهای فرسایشی، به‌خصوص امواج دریا، با ارتفاع زیاد به دریا و دشت‌های ساحلی مسلطاند (شکل ۱۳).



شکل ۱۳. (A) فرسایش مارن و شکل‌گیری طاق، گوردیم؛ (B) پرتگاه‌های ساحلی مارنی و ماسه‌سنگی، تنگ؛ (C و D) ریزش پرتگاه‌های ساحلی در اثر فعالیت امواج

یکی دیگر از نتایج برخاستگی پادگانه‌های دریایی ارتفاع یافتن آن‌ها در سواحل مکران است؛ به گونه‌ای که در خطوط ساحلی عوارضی مشخص و بر مناطق مجاور مسلطاند. اما، همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، به دلیل وجود عملکرد برخاستگی و فرونشست در بخش‌های مختلف، پادگانه‌ها در سطوح ارتفاعی مختلف قرار گرفته‌اند. با هدف درک بهتر تأثیر برخاستگی‌ها و فرونشست سطح زمین بر مورفولوژی پادگانه‌های دریایی، ارتباط بین ارتفاع پادگانه‌های دریایی و میزان برخاستگی بررسی شد. از این رو سطوح هر پادگانه از لحاظ ارتفاعی به ۵ طبقه با توجه به دامنه ارتفاعی هر پادگانه تقسیم شد و میزان جابه‌جایی ارتفاعی در هر سطح از هر پادگانه با میانگین میزان بالآمدگی همان سطح ارتفاعی مقایسه شد. نتایج نشان داد بخش‌هایی که بیشترین ارتفاع را دارند هم‌زمان حداکثر میزان برخاستگی را در هر پادگانه به خود

اختصاص داده‌اند و بالعکس سطوحی که ارتفاع پایین‌تری دارند یا در حال فرونشینی هستند یا سرعت برخاستگی آن‌ها نسبت به مناطق مرتفع‌تر در همان پادگانه بسیار کمتر است (جدول ۳). مثلاً نتایج به‌دست‌آمده نشان داد میانگین میزان جابه‌جایی در پایین‌ترین سطح ارتفاعی پادگانه دریایی کنارک (۱ تا ۱۶/۸ متر) در حدود ۳/۴- میلی‌متر در سال و روند غالب این بخش با فرونشینی همراه است. این سطح ارتفاعی در طول دوره مورد مطالعه در حدود ۱۱/۵- میلی‌متر فرونشست داشته است. ولی به تدریج در سطوح ارتفاعی بالاتر میزان برخاستگی افزایش می‌یابد و این روند در بالاترین سطح ارتفاعی پادگانه کنارک (۷۰/۲ تا ۸۸ متر) با برخاستگی به حدود ۱/۳۵ میلی‌متر در سال همراه است. این روند در سایر پادگانه‌ها نیز مشاهده می‌شود.

جدول ۳. میزان جابه‌جایی پادگانه‌های دریایی در طبقات ارتفاعی

نام پادگانه	طبقه ارتفاعی پادگانه دریایی (متر)	حداقل جابه‌جایی (mm/yr.)	حداکثر جابه‌جایی (mm/yr.)	میانگین جابه‌جایی (mm/yr.)	میانگین جابه‌جایی در طول دوره مورد مطالعه (۲۰۰۳ - ۲۰۱۰) (mm)
کنارک	۱۶,۸-۱	۳/۴-	۱/۷	۰,۷-	-۱۱/۵
	۳۴,۶-۱۶,۸	۳/۲۵-	۲/۲۴	-۰/۱۲	۰/۸۷
	۵۲,۴-۳۴,۶	۱/۹۸-	۲/۱۳	۰/۵۱	۳/۷۲
	۷۰,۲-۵۲,۴	۰/۴۲-	۲/۱۶	۰/۸۹	۶/۵
	۸۸-۷۰,۲	-۰,۰۲	۲,۱۷	۱/۳۵	۹/۸۵
	۱۵,۲-۱	-۲/۷	۲/۳۰	۰/۰۶-	-۱۸/۶
گوردیم	۲۹,۴-۱۵,۲	-۲/۸	۳/۲	۰/۷۷	۵/۶
	29.4-43.6	۳/۶۵-	۴/۱۱	۱/۱	۸/۰۳
	43.6-57.8	-۳/۷۵	۳/۱۸	۱/۰۵	۷/۶۶
	57.8-72	-۳/۸	۴/۲۴	۱,۲	۸/۷۶
کلات	۳۷,۸-۱۳	-۱/۸	۳/۸	-۰/۱۳	-۰/۹۴
	۸۸,۶-۳۷,۸	-۵/۶	۵/۱	۰/۶۷	۴/۹۶
	۱۳۹,۴-۸۸,۶	-۶/۰۹	۷/۵۴	۱/۰۶	۷/۷۴
	۱۹۰,۲-۱۳۹,۴	-۰,۵۶	۴,۸	۰,۵۶	۴/۸
	۲۴۱-۱۹۰,۲	-۲/۱۵	۵/۹۵	۱/۴۹	۱۰/۸۷

نتیجه

بین اشکال ژئومورفولوژیکی موجود در نواحی ساحلی ایران در مکران، پادگانه‌های دریایی از اهمیت بسیار زیادی در حوزه مطالعات مورفوتکتونیک و مورفولوژی برخوردار است. این منطقه ساحلی تحت تأثیر زون فرورانش مکران قرار دارد و این فرورانش به برخاستگی سواحل در این منطقه و شکل‌گیری پادگانه‌های دریایی منجر می‌شود. این تحقیق با هدف پایش میزان جابه‌جایی و تغییرات ارتفاعی پادگانه‌های دریایی مکران در حد فاصل کنارک تا کلات انجام گرفت. در این مطالعه، که با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای ENVISAT-ASAR و مدل SBAS انجام گرفت، میزان برخاستگی و فرونشست پادگانه‌های دریایی در این بخش از سواحل ایران بررسی شد و نتایج نشان‌دهنده دقت مناسب این داده‌ها و مدل در

مطالعات پادگانه‌های دریایی بود. از این رو استفاده از داده‌های راداری می‌تواند ابزار مناسبی برای برآورد میزان جابه‌جایی در سطوح پادگانه‌های دریایی و مناطق ساحلی باشد. فعالیت‌های تکتونیکی در بخش‌های مختلف این مناطق عملکرد متفاوتی دارد و این وضعیت به شکل‌گیری برخاستگی و فرونشست در نقاط مختلف این پادگانه‌ها منجر شده است. ارتفاع پادگانه‌های دریایی با میزان برخاستگی آن‌ها رابطه مستقیم دارد و میزان برخاستگی از غرب منطقه مورد مطالعه (کلات) به سمت شرق کاهش می‌یابد. این نتیجه با فرضیات پیشین، مبنی بر اینکه میزان برخاستگی پادگانه‌های دریایی از غرب (جاسک) به سمت شرق افزایشی است، هم‌خوانی ندارد و میزان برخاستگی پادگانه‌ها می‌تواند تابع ویژگی‌های زمین‌شناختی هر منطقه باشد و به طور محلی واکنش هر بخش از خطوط ساحلی به فرایندهای تکتونیکی حاکم بر هر منطقه متفاوت باشد. فیلینت (۱۹۷۱) بر آن است که میزان برخاستگی پادگانه‌های دریایی در حد فاصل جاسک تا بریس حدود ۳/۵ میلی‌متر در سال بوده است و علاوه بر آن معتمد و همکارانش (۱۳۸۷) در بررسی خطوط ساحلی منطقه چابهار به این نتیجه رسیدند که میزان برخاستگی سواحل ماسه‌ای طی ۱۰۰۰۰ سال گذشته از ۰/۸۵ میلی‌متر در سال به ۱۲/۵ میلی‌متر در سال در ۷۲۰ سال گذشته رسیده است. اما، نتایج به‌دست‌آمده نشان داد میانگین میزان برخاستگی این سواحل در بازه زمانی مورد بررسی در کل پادگانه‌های دریایی در منطقه فقط حدود ۰/۴۵ میلی‌متر در سال است و با نتایج این محققان فاصله زیادی دارد. نورمند و همکارانش (۲۰۱۹ا) بررسی جامعی بر پادگانه‌های دریایی منطقه مورد مطالعه انجام دادند. آن‌ها بر اساس تعیین سن مطلق روی صدف‌های موجود در لایه‌های رسوبی پادگانه‌ها میزان برخاستگی سواحل را در پادگانه کنارک ۰/۲۴ میلی‌متر در سال و در پادگانه گوردیم ۰/۷۸ میلی‌متر در سال برآورد کردند. نتایج مطالعه نورمند و همکارانش (۲۰۱۹ا) با نتایج به‌دست‌آمده در این مطالعه مطابقت بیشتری دارد؛ میزان برخاستگی در سواحل کنارک در این مطالعه (۰/۲۵ میلی‌متر در سال) تقریباً معادل میزان برخاستگی‌ای است که نورمند و همکارانش (۲۰۱۹) به دست آورده‌اند. در مطالعه پادگانه گوردیم نیز میزان برخاستگی (۰/۳۸ میلی‌متر در سال) نزدیک به نتایج مطالعه فوق است. با توجه به کارایی داده‌های ماهواره‌ای راداری در مطالعه پادگانه‌های دریایی در منطقه مورد مطالعه می‌توان این رویکرد و تکنیک را برای کل پادگانه‌های دریایی مکران تعمیم داد و با بررسی یکپارچه آن به طور هم‌زمان ساختار و تاریخچه تکتونیکی سواحل مکران را بررسی و تحلیل کرد.

منابع

- حاجب، ز.؛ رضایی، ا.؛ معصومی؛ موسوی، ز. (۱۳۹۷). «بررسی فرونشست دشت قم با استفاده از تداخل‌سنجی راداری»، مجموعه مقاله‌های هجدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، صص ۳۵۲ - ۳۵۵.
- سهیلی، م.؛ قاسمی، ع.؛ حسینی، م. (۱۳۷۴). نقشه زمین‌شناسی بندینی سازمان زمین‌شناسی کشور.
- شریفی‌کیا، م. ر. (۲۰۱۲). «تعیین میزان و دامنه فرونشست زمین به کمک روش تداخل راداری (D-InSAR) در دشت نوق- بهرمان»، برنامه‌ریزی و آمایش فضا، ۱۶ (۳)، صص ۵۵ - ۷۷.
- صمدیان، م. ر.؛ قماش، ا.؛ محبی، ا. ر.؛ جعفریان، م. ب.؛ عبداللهی، م.؛ احمدزاده هروی، م. (۱۳۷۷). نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ چابهار، سازمان زمین‌شناسی کشور.

غریب‌رضا، م. ر.؛ معتمد، ا. (۱۳۸۹). «تکامل مکران ساحلی طی کوتاه‌تر پسون»، پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی، ش ۶۳، صص ۷۷ - ۸۷.

محمد خانی، ه.؛ خزایی، م. (۱۳۹۳). نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ کنارک، سازمان زمین‌شناسی کشور.

- Burbank, D. W. & Anderson, R. S. (2009). *Tectonic geomorphology*, John Wiley & Sons.
- Burg, J. P., Dolati, A., Bernoulli, D., & Smit, J. (2013). "Structural style of the Makran Tertiary accretionary complex in SE-Iran", in *Lithosphere dynamics and sedimentary basins: The Arabian Plate and analogues* (pp. 239-259), Springer, Berlin, Heidelberg.
- Daniel, R. C., Maisons, C., Carnec, S., Mouelic, L., King, C., & Hosford, S. (2003). "Monitoring of slow ground deformation by ERS radar interferometry on the Vauvert salt mine (France) Comparison with ground-based measurement", *Remote Sensing of Environment*, 88 (4), pp. 468-478.
- Di Paola, G., Alberico, I., Aucelli, P. P. C., Matano, F., Rizzo, A., & Vilardo, G. (2018). "Coastal subsidence detected by Synthetic Aperture Radar interferometry and its effects coupled with future sea-level rise: the case of the Sele Plain (Southern Italy)", *Journal of Flood Risk Management*, 11 (2), pp. 191-206.
- Ellouz-Zimmermann, N., Deville, E., Müller, C., Lallemand, S., Subhani, A. B., & Tabreez, A. R. (2007). "Impact of sedimentation on convergent margin tectonics: Example of the Makran accretionary prism (Pakistan)", in *Thrust Belts and Foreland Basins* (pp. 327-350). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Falcon, N. L. (1947). "Raised beaches and terraces of the Iranian Makran coast", *Geographical Journal*, 109, pp. 149-151.
- Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2001). "Multibaseline phase unwrapping for InSAR topography estimation", *Il nuovo cimento C*, 24 (1), pp. 159-176.
- Frohling, E. & Szeliga, W. (2016). "GPS constraints on interplate locking within the Makran subduction zone", *Geophysical Supplements to the Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 205 (1), pp. 67-76.
- Grando, G. & McClay, K. (2007). "Morphotectonics domains and structural styles in the Makran accretionary prism, offshore Iran", *Sedimentary Geology*, 196 (1-4), pp. 157-179.
- Harms, J. C., Cappel, H. N., & Francis, D. C. (1984). "The Makran coast of Pakistan: its stratigraphy and hydrocarbon potential", *Marine geology and oceanography of Arabian Sea and coastal Pakistan*, 3, p. 27.
- Harrison, J. V. (1941). "Coastal Makran", *The Geographical Journal*, 97 (1), pp. 1-15.
- Henry, H., Regard, V., Padoja, K., Husson, L., Martinod, J., Witt, C., & Heuret, A. (2014). "Upper Pleistocene uplifted shorelines as tracers of (local rather than global) subduction dynamics", *Journal of Geodynamics*, 78, pp. 8-20.
- Hosseini-Barzi, M. & Talbot, C. J. (2003). "A tectonic pulse in the Makran accretionary prism recorded in Iranian coastal sediments", *Journal of the Geological Society of London*, Vol. 160, doi, 10, 0016-764903.
- Khan, M. A., Bendick, R., Bhat, M. I., Bilham, R., Kakar, D. M., Khan, S. F., & Wahab, A. (2008). "Preliminary geodetic constraints on plate boundary deformation on the western edge of the Indian plate from TriGGnet (Tri-University GPS Geodesy Network)", *J. Himal.*

- Earth Sci*, 41, pp. 71-87.
- King, G. C., Stein, R. S., & Rundle, J. B. (1988). "The growth of geological structures by repeated earthquakes 1. Conceptual framework", *Journal of Geophysical research: solid Earth*, 93 (B11), pp. 13307-13318.
- Lajoie, K. R. (1986). Coastal tectonic, Active tectonics, Impact on Society, edited by: Wallace, R., 95–124, National Academy Press, Washington DC 95-124.
- Little, R. D. (1972). Terraces of the Makran Coast of Iran and parts of West Pakistan (Doctoral dissertation, University of Southern California).
- Liu, X., Zhang, Z., & Peterson, J. (2009). "Evaluation of the performance of DEM interpolation algorithms for LiDAR data", in *Proceedings of the 2009 Surveying and Spatial Sciences Institute Biennial International Conference (SSC 2009)* (pp. 771-779). Surveying and Spatial Sciences Institute.
- Masson, F., Anvari, M., Djamour, Y., Walpersdorf, A., Tavakoli, F., Daignieres, M., & Van Gorp, S. (2007). Large-scale velocity field and strain tensor in Iran inferred from GPS measurements: new insight for the present-day deformation pattern within NE Iran, *Geophysical Journal International*, 170 (1), pp. 436-440.
- Matsu'Ura, M. & Sato, T. (1989). "A dislocation model for the earthquake cycle at convergent plate boundaries", *Geophysical Journal International*, 96 (1), pp. 23-32.
- Normand, R., Simpson, G., & Bahroudi, A. (2019b). "Pleistocene coastal evolution in the Makran subduction zone", *Frontiers in Earth Science*, 7, p. 186.
- Normand, R., Simpson, G., Herman, F., Biswas, R. H., Bahroudi, A., & Schneider, B. (2019a). "Dating and morpho-stratigraphy of uplifted marine terraces in the Makran subduction zone (Iran)", *Earth Surface Dynamics*, 7 (1), pp. 321-344.
- Page, W. D., Alt, J. N., Cluff, L. S., & Plafker, G. (1979). "Evidence for the recurrence of large-magnitude earthquakes along the Makran coast of Iran and Pakistan", *Tectonophysics*, 52 (1-4), pp. 533-547.
- Pinter, N. & Keller, E. A. (2002). Active Tectonics: Earthquakes, Uplift, and Landscape.
- Rajendran, C. P., Rajendran, K., Shah-Hosseini, M., Beni, A. N., Nautiyal, C. M., & Andrews, R. (2013). "The hazard potential of the western segment of the Makran subduction zone, northern Arabian Sea", *Natural hazards*, 65 (1), pp. 219-239.
- Reyss, J. L., Pirazzoli, P. A., Hagherpour, A., Hatte, C., & Fontugne, M. (1999). "Quaternary marine terraces and tectonic uplift rates on the south coast of Iran", *Geological Society, London, Special Publications*, 146 (1), pp. 225-237.
- Ruh, J. B., Vergés, J., & Burg, J. P. (2018). "Shale-related minibasins atop a massive olistostrome in an active accretionary wedge setting: Two-dimensional numerical modeling applied to the Iranian Makran", *Geology*, 46 (9), pp. 791-794.
- Segall, P. (2010). Earthquake and volcano deformation, Princeton University Press.
- Shroder Jr, J. F. (Ed.). (2002). *Himalaya to the sea: geology, geomorphology and the Quaternary*, Routledge.
- Simpson, G. (2015). "Accumulation of permanent deformation during earthquake cycles on reverse faults", *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120 (3), pp. 1958-1974.
- Snead, R. E. (1967). "Recent morphological changes along the coast of west pakistan 1", *Annals of the Association of American Geographers*, 57 (3), pp. 550-565.

- Snead, R. E. (1967). "Recent morphological changes along the coast of west pakistan 1", *Annals of the Association of American Geographers*, 57 (3), pp. 550-565.
- Snead, R. J. (1993). "Uplifted marine terraces along the Makran coast of Pakistan and Iran", Himalaya to the Sea, Routledge, London, pp. 327-362.
- Teatini, P., Tosi, L., Strozzi, T., Carbognin, L., Cecconi, G., Rosselli, R., & Libardo, S. (2012). "Resolving land subsidence within the Venice Lagoon by persistent scatterer SAR interferometry", *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 40, pp. 72-79.
- Vernant, P., Nilforoushan, F., Hatzfeld, D., Abbassi, M. R., Vigny, C., Masson, F., & Chéry, J. (2004). "Present-day crustal deformation and plate kinematics in the Middle East constrained by GPS measurements in Iran and northern Oman", *Geophysical Journal International*, 157 (1), pp. 381-398.
- Vita-Finzi, C. (1980). "14C dating of recent crustal movements in the Persian Gulf and Iranian Makran", *Radiocarbon*, 22 (3), pp. 763-773.
- Vita-Finzi, C. (1981). "Late Quaternary deformation on the Makran coast of Iran", *Zeitschrift für Geomorphologie*, Supplementband Stuttgart, (40), pp. 213-226.
- Vita-Finzi, C. (1982). "Recent coastal deformation near the Strait of Hormuz, Proceedings of the Royal Society of London. A.", *Mathematical and Physical Sciences*, 382 (1783), pp. 441-457.
- Vita-Finzi, C. (2002). "Neotectonics on the Arabian Sea coasts", *Geological Society, London, Special Publications*, 195 (1), pp. 87-96.
- Wala Hashim Bashari, D., Mirghani, A. H., & Bahreldin, I. Z. (2015). "Spatial impact of gender variation on Khartoum city river side public open space", *Urban Development*.
- Wesson, R. L., Melnick, D., Cisternas, M., Moreno, M., & Ely, L. L. (2015). "Vertical deformation through a complete seismic cycle at Isla Santa Maria, Chile", *Nature Geoscience*, 8 (7), pp. 547-551.