



## Research Article

# Monitoring Morphotectonic Evolution in the Oman Sea Marine Terraces (Chabahar to Quatre)

Ali Reza Salehipour Milani<sup>1\*</sup> , Madeh Eskandari<sup>1</sup>

1-Physical Geography Group, Faculty of Earth Science, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Received: 10 Oct 2020 Accepted: 14 Jun 2021

## Extended Abstract

### Introduction

Marine and lake terraces are one of the geomorphological features that exist in the coastal areas, which are due to the erosion of an old coastal platform, tectonic uplift of coastlines, fluctuations in sea level. The marine terraces may be located above or below sea level, depending on the time of formation. Due to the relatively smooth surface of the terraces, these terraces are commonly used for human activities. The study of sea and lake terraces is done for different purposes and by several methods, which include the use of radar interferometry to estimate marine terraces (rising coasts) one of the most important geomorphological features. Out of 25 marine terrace in the coast of Makran (Iran and Pakistan), there are 12 marine terrace in Iran and their elevation risen under the influence of tectonic processes. In the past, studies on the rate of rise of these marine terraces have been done using the methods of determining the absolute age, but due to the limited number of tests and also the impossibility of generalizing the results to all different parts of the marine terrace, a comprehensive study of this marine terrace are not possible at different elevation levels. Therefore, the use of radar interferometry technique allows a more comprehensive study of this phenomenon.

### Materials and Methods

To measure the deformation behavior of a phenomenon requires examining the time series of that phenomenon in the region. Therefore, several images must be available at different time intervals from that region and several interferometers must be inserted between different time intervals to calculate the rate of deformation in the calculations, which is known as interferometric time series analysis. For interferometric time series processing in this study, by selecting permanent scattering pixels in the whole region, the time series behavior of these pixels was investigated using the short base length (SBAS) method. In this research, ASAR radar sensor image of ENVISAT satellite obtained between 2003 and 2010 (Sarscape software) was used to implement each of the mentioned time series.

### Results and Discussion

The results show that the impact of tectonic activity on marine terrace is not only uplift and in addition there are several subsidence in the terraces. The highest average rate of elevation is related to Lipar marine terrace with 0.73 mm per year (maximum 4.11 mm per year) and then Chabahar with 0.34 mm per year and maximum (maximum 3.17 mm per year) and Guatre terrace. And Pasabandar are in the next ranks.

**Citation:** Salehipour Milani, A.R. and Eskandari, M., 2021. Monitoring Morphotectonic Evolution in the Oman Sea Marine Terraces (Chabahar to Quatre), *Res. Earth. Sci.* 12(3), (202-222) DOI: 10.48308/esrj.2021.101298

\* Corresponding author E-mail address: ar\_salehipour@sbu.ac.ir





### Conclusion

The results of this study show the appropriate efficiency of ENVISAT-ASAR satellite data and SBAS model in the study of deformation of Oman marine terrace. The highest rate of uplift in the study area is observed in Lipar and Chabahar, which has the effect of higher tectonic uplift and the highest altitude of Iranian marine terrace in this area. The uplift rate from the west of the region to the east is gradually decreasing, and this is accompanied by a decrease in the height of the marine terrace. Therefore, it can be assumed that the decrease in altitude of the terraces located in the west of Chabahar (Konarak, Gordim, Tang, Kalat and Jask) has been associated with a decrease in the uplift rate compared to Chabahar, which requires monitoring the altitude changes of the marine terrace in this area. The morphological effect of these uplifts in the study area can be seen in the formation of normal faults and the placement of the terraces in a flat manner and in their margins marl and sandstone precipices. This process has led to the emergence of sequences of sandstone and marl sediments on the surface and more severe erosion of marl sediments than sandstones has created a kind of differential erosion which is one of the morphological features of this coastal zone. Normand et al. (2019) has studied marine terrace on the coasts of Iran, using the method of dating (carbon 14) and with index (optical luminescence simulator) and the highest rate of elevation (sea terraces) In this region during the period (20 to 50 thousand years ago) between (0.5 to 1.2 mm per year) have been estimated. The rate obtained in Normand studies is slightly higher than the rate obtained during the period studied in this study (2003-2009) and the slight difference between the displacement rates of these two studies can be related to its time dimension. He knew because the time period studied by Normand et al. (2019) in the time period is about 30,000 years ago and that during this time the uplift rate can be affected by variable tectonic activity and in some years this high rate More than the transfer rate in the period studied in this research.

**Keywords:** Marine Terrace, Interferogrametry, Deformation, Chabahar, Quatre.



## پایش تغییرات مورفوتکتونیک پادگانه‌های دریایی عمان (چابهار تا گواتر)

علیرضا صالحی پور میلانی\*؛ مائده اسکندری<sup>۱</sup>

۱- گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

(پژوهشی)

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۷/۱۹ تأیید نهایی مقاله: ۱۴۰۰/۳/۲۴

### چکیده

در ایران پادگانه‌های دریایی (سواحل بالا آمده) یکی از مهم‌ترین عوارض ژئومورفولوژیکی در پهنه و خط ساحلی به شمار می‌آید. از ۲۵ پادگانه دریایی در سواحل مکران (ایران و پاکستان) ۱۲ پادگانه دریایی در ایران وجود دارند و تحت تأثیر فرایندهای تکتونیک ارتفاع یافته‌اند. در گذشته مطالعاتی در زمینه نرخ بالآمدگی این پادگانه‌ها با استفاده از روش‌های تعیین سن مطلق انجام گرفته است ولی به واسطه محدود بودن تعداد آزمایش‌ها و هم چنین عدم امکان تعمیم نتایج به کل بخش‌های مختلف پادگانه‌ها، مطالعه یکپارچه این پادگانه‌ها در سطوح مختلف امکان پذیر نمی‌باشد. در این تحقیق سعی شده است تا با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری و داده‌های ENVISAT ASAR و مدل SBAS پایش تغییر شکل پادگانه‌های دریایی چابهار، لیپار، بریس، پسابندر و گواتر در حد فاصل سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۱ انجام گیرد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که تأثیر فعالیت‌های تکتونیک بر روی پادگانه‌های دریایی تنها به صورت بالآمدگی نیست و علاوه بر آن فرونشست‌های متعددی در پادگانه‌های به چشم می‌خورد. بیشترین نرخ میانگین بالآمدگی مربوط به پادگانه دریایی لیپار با میلی‌متر در سال (حداکثر ۴/۱۱ میلی‌متر در سال) و بعد از آن چابهار با ۰/۳۴ میلی‌متر در سال و حداکثر (حداکثر ۳/۱۷ میلی‌متر در سال) و پادگانه‌های گواتر و پسابندر در رتبه‌های بعدی قرار گرفته‌اند.

**واژه‌های کلیدی:** پادگانه‌های دریایی، تداخل سنجی راداری، تغییر شکل، چابهار، گواتر.

## مقدمه

پادگانه‌های دریایی در ایران با ارتفاع حداکثر ۲۳۶ متر و نیز در امتداد سواحل غرب پاکستان با حداکثر ارتفاع ۵۰۰ متر، بالا آمده‌اند (Hroder, 2002). پادگانه‌های دریایی ایران در سواحل دریای عمان، در ادامه پادگانه‌های دریایی پاکستان قرار دارند و به ترتیب عبارت‌اند از تراس گواتر، رأس فسته، بریس، لیپار، چاپهار، تیس، کنارک، گوردیم، رأس تنگ، میدانی، گوهرت و جاسک. قرار گرفتن پادگانه‌های دریایی سواحل دریای عمان به خصوص در سواحل چاپهار و در سطوح ارتفاعی مختلف (۶ تا ۲۳۶ متر) نشان می‌دهد که در بخش‌های مختلف این سواحل نرخ جابه‌جایی زمین یکسان نمی‌باشد. مطالعات متعددی در این زمینه انجام گرفته است ولی اکثر این مطالعات به صورت محدود به چند نقطه خاص از این پادگانه‌ها است. و تحلیل دقیق تغییر شکل در این سواحل نیازمند مطالعه یکپارچه این سواحل و بررسی نرخ بالآمدگی و فرونشست در این مناطق می‌باشد. از این رو تکنیک تداخل سنجی راداری می‌توان در مطالعه تغییر شکل پادگانه‌های دریایی استفاده نمود و نرخ بالآمدگی و فرونشست این پادگانه‌ها را به دست آورد. فرایند-های ائوستاتیکی و ژئوستاتیک در دریاها تغییر نوسان سطح آب دریاها و در نتیجه پیش روی و پس روی خط ساحلی را به همراه خواهد داشت (معتد و غریب رضا، ۱۳۸۶ و رامشت، ۱۳۸۰). پادگانه‌های دریایی و دریاچه‌ای یکی از عوارض ژئومورفولوژیکی در پهنه‌های ساحلی هستند که اغلب از فرسایش یک سکوی ساحلی قدیمی، بالا آمدن تکتونیکي خطوط ساحلی، نوسانات سطح آب دریاها به وجود می‌آیند. پادگانه دریایی بسته به زمان تشکیل ممکن است، بالاتر یا پایین‌تر از سطح دریا واقع شده باشد. به دلیل سطح نسبتاً هموار پادگانه‌ها این عوارض معمولاً برای فعالیت‌های

انسانی مورد استفاده قرار می‌گیرند. مطالعه پادگانه‌های دریایی و دریاچه‌ای با اهداف مختلف و از روش‌های متعددی صورت می‌گیرد که عبارتند از استفاده از تداخل سنجی راداری<sup>۱</sup> با هدف برآورد میزان جابه‌جایی، تغییر شکل زمین سطح زمین (واجیدیان و همکاران، ۱۳۸۹) و همچنین بازسازی نوسانات سطح آب دریا و دریاچه‌ها با مطالعات پالئولیمنولوژی با استفاده از کربن ۱۴ (صالحی پور و همکاران، ۱۳۹۸؛ معتمد و غریب رضا، ۱۳۸۶). نورمند و همکاران (Normand et al, 2019) پادگانه‌های دریایی را در قسمت غرب (سواحل مکران)، با استفاده از روش سن یابی (کربن ۱۴) و با شاخص (شبه‌ساز لومینسانس نوری) مطالعه نموده است و بیش‌ترین میزان نرخ بالآمدگی (تراس‌های دریایی) را در این منطقه در طی دوره (۲۰ تا ۵۰ هزار ساله) را بین ۰/۵ تا ۱/۲ میلی‌متر در سال، برآورد کرده‌اند. وسون (Wesson et al, 2015) بیش‌ترین میزان بالآمدگی پادگانه‌های ساحلی مکران بر اثر عوامل مورفوتکتونیکي (زلزله و فرونشست) متناسب با بیش‌ترین میزان تغییر ارتفاعی مورد تحلیل و بررسی قرار داده‌اند و نتیجه حاصل را به صورت مدل ارتفاعی ارائه داده‌اند. همچنین موری و وودروفه (Murray-Wallace and Woodroffe, 2014) به مطالعه و بررسی بیش‌ترین میزان بالآمدگی تراس‌های دریایی در سواحل مکران در دوره زمین‌شناسی کواترنری با استفاده از تعیین سن روش کربن ۱۴ پرداخته است. یکی از تکنیک‌هایی که هم‌اکنون در رابطه با تغییر شکل زمین به خصوص در سواحل بالا آمده مورد استفاده قرار می‌گیرد، استفاده از تداخل سنجی راداری است. این تکنیک به کمک دو تصویر (Interferogram) به دست می‌آید (مهدویان، چشمه گل، ۱۳۹۳) و امکان مشاهده جابه‌جایی در راستای دید ماهواره‌ای (عمود در راستای پرواز<sup>۲</sup> و

آن نرخ برخواستگی سواحل در بخش‌های مختلف این منطقه و تغییرات آن را تعیین نموده و اثرات آن را بر مورفولوژی سواحل بالا آمده مورد ارزیابی قرار دهد.

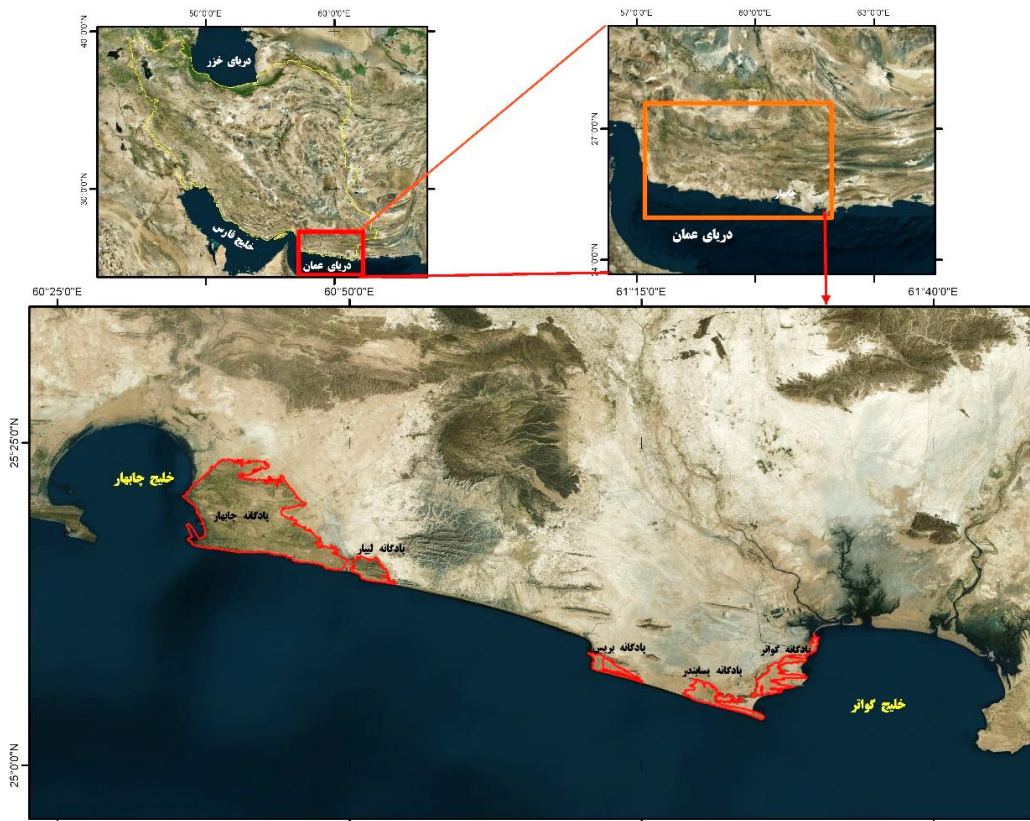
### منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در زون ساحلی مکران و در حد فاصل خلیج چابهار تا خلیج گواتر قرار دارد (شکل ۱) و از نظر نبوی (۱۳۵۵) در واحد مشرق و جنوب شرق ایران و در زون مکران قرار دارد. در قسمت شمال باختری اقیانوس هند، بر اثر فرو رانش صفحه اقیانوسی عمان به زیر صفحه قاره‌ای ایران، ناحیه فرو رانش مکران تشکیل شده است. ناحیه فرو رانش مکران از نزدیکی‌های تنگه هرمز تا حدود مرز هند با طولی حدود ۹۰۰ کیلومتر (Mokhtari, 2005) در امتداد خاوری-باختری گسترش یافته است. مطالعات نشان می‌دهد که کم‌ترین سرعت فرو رانش صفحه عمان به زیر صفحه ایران حدود ۱۹/۵ میلی‌متر در سال است. بیشترین مقدار نیز حدود ۲۷ میلی‌متر در سال برآورد می‌شود (Vernant et al, 2004). نوسانات سطح آب دریاهاى آزاد (استاتیک) و تغییرات تکتونیکی و حرکات تعادلی گسل‌ها در این منطقه باعث شده است که تاریخ تکتونیکی این منطقه به خصوص در سواحل دریای عمان بسیار پیچیده باشد و نتیجه نهایی این گونه حرکت‌ها، بالا آمدن زمین‌ها و ایجاد پادگانه‌های دریایی است که به ویژه در سواحل مکران گسترش زیادی یافته‌اند. پادگانه‌های دریایی عمان تقریباً افقی بوده و گاهی شیب کمی (در حدود ۱۵ درجه) دارند. پادگانه‌های مورد مطالعه در این تحقیق شامل پادگانه‌های دریایی چابهار، لیپار، بریس، پسابندر و گواتر می‌باشد. واحدهای مورد بحث در منطقه چابهار از ماسه سنگ‌های سست، دانه‌ریز تا دانه درشت تشکیل شده است، افق‌های مارنی و

در راستای پرواز<sup>۳</sup> در مدار ماهواره‌ای و در دو مسیر عبوری بالارو<sup>۴</sup> و پایین رو<sup>۵</sup> را فراهم می‌آورد (González et al, 2009). مدل فاز تصویرهایی که از موج‌های راداری بازتابی عوارض سطح زمین که در زمان‌های مختلف از یک منطقه برداشت شده است، پیکسل به پیکسل مقایسه و از هم کم می‌شود، که از تفریق مقدارهای فاز دو تصویر، تصویر جدیدی به دست می‌آید، که به آن تداخل نگار می‌گویند (Hooper, 2006). از زیر مجموعه-های این روش می‌توان به تداخل سنجی راداری پتانسیل و تفاضلی (خوش باطن و شیرانی، ۱۳۹۵) و همچنین روش‌های خط مبنای کوتاه پراکنش کننده دائمی اشاره نمود (بابایی و همکاران، ۱۳۹۵). این تکنیک دور سنجی، فناوری نوینی است که از تصویرهای (SAR) با قدرت تفکیک زمانی و مکانی بالا به عنوان یکی از دقیق‌ترین روش‌ها برای اندازه گیری جابه‌جایی تغییرهای ژئومورفولوژی در پدیده‌های مختلف بر روی زمین استفاده می‌شود (Meyer, F.J. and Sandwell, 2012). همچنین از این مطالعات برای مطالعه نواحی مستعد وقوع مخاطره‌های طبیعی همانند: فرو نشست، زلزله و آتش فشان (حاجب و همکاران، ۱۳۹۷؛ Marghany and Hashim, 2009) و تغییرهای ژئومورفولوژی ساحلی اشاره نمود (Hoffmann, 2013). با وجود مطالعه‌های ارزشمندی که در زمینه تغییر شکل پادگانه‌های دریایی سواحل دریای عمان انجام گرفته است، به دلیل محدودیت‌های موجود در روش‌های تعیین سن مطلق به خصوص بالا بودن هزینه آن امکان، مطالعه جامع تغییر شکل پادگانه‌ها در تمام سطوح آن بسیار مشکل می‌باشد. هدف این پژوهش بررسی تغییرات مورفوتکتونیکی سواحل بالا آمده مکران از چابهار تا گواتر با استفاده از داده‌های راداری در حد فاصل سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۱ است تا از طریق

سیلت استون نیز در آن مشاهده می‌شود که ضخامت آن به‌طور جانبی تغییر می‌نماید. در منطقه پسابندر و بریس و گواتر سنگ‌شناسی این پادگانه‌ها

شامل کنگلومرای آهکی، آهک‌های صدف‌دار، گل‌سنگ، سیلت استون می‌باشد (جعفریان، ۱۳۷۵).



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

## مواد و روش‌ها

### پادگانه‌های دریایی منطقه مورد مطالعه

پادگانه‌های دریایی عمان به صورت پلکانی و چند اشکوبه هستند، طول و عرض این پادگانه‌ها در هر یک از مقاطع به چندین کیلومتر می‌رسد و توسط پرتگاه‌های بسیار پر شیب و تندی که در آنها مخروط افکنه‌ها و یا مخروط واریزه‌ها شکل گرفته‌اند، مشخص می‌گردند. سازندهای متشکله سواحل مذکور، از لایه‌های تقریباً افقی و متناوب سخت و نرم ترکیب و غالباً دارای پوششی از کنگلومرا یا ماسه سنگ هستند که طبقه‌های سست (مارن و امثال آن) در زیر قرار گرفته‌اند؛ لذا

فرسایش حاصله در این تشکیلات عمدتاً به صورت تفریقی (دیفرانسیل) است. لیکن مارن‌های سفید رنگ واقع در پای دامنه‌ها، بر اثر فرسایش آب‌های جاری، بدندهای بسیار شکیل و تیپیک را ارائه داده‌اند. سواحل دریایی عمان دارای ویژگی‌های فوق‌الذکر در قطعه شرقی گسل میناب، یعنی از جاسک تا گواتر به چشم می‌خورند (امین سبحانی، ۱۳۶۵).

### پادگانه چابهار و لیبار

پادگانه دریایی چابهار در بخش شمالی، شمال شرقی شهر چابهار قرار گرفته است (شکل ۲A و ۲B). لایه‌های متشکله آن تقریباً افقی بوده و گاهی

می‌باشد (جعفریان، ۱۳۷۵). پادگانه دریایی بریس مسطح و مرتفع به طول ۱/۴ کیلومتر کشیده شده است. این پادگانه به میزان زیادی به سمت جنوب، سمت دریا، فرویخته و لغزش‌های پلکانی شکلی در یک امتداد به وقوع پیوسته است. مرتفع‌ترین پادگانه این بخش در شرق روستای پشتات و در ارتفاع ۸۶ متری قرار گرفته است (شکل E۲ و شکل F۳). دو روستای پسابندر و پشتات در این بخش قرار گرفته‌اند.

#### پادگانه گواتر

این پادگانه با امتداد شمال شرقی-جنوب غربی در شرق خلیج گواتر از شمال پسابندر تا بندر صیادی گواتر امتداد یافته است. پادگانه‌های دریایی در این بخش تقریباً از ارتفاع ۱ متری بالای سطح آب دریا در بندر صیادی گواتر تا ارتفاع ۷۲ متر در بخش جنوبی آن مشاهده می‌شود (شکل F۲). پیمایش-های میدانی و بررسی تصاویر هوایی و ماهواره‌ای به عمل آمده نشان داد که مهم‌ترین تغییرات محسوس در خطوط ساحلی سنگی دریای عمان پس‌روی یا عقب نشینی آن‌ها است. علاوه بر آن بسیاری از سطوح پادگانه‌های دریایی به تدریج فرسایش یافته و پرتگاه‌های مارنی و ماسه سنگی را شکل داده‌اند. همچنین معدن کاری پادگانه‌ها و استفاده از ماسه سنگ‌های آن به عنوان سنگ لاشه به خصوص برای توسعه موج شکن‌ها، بندرها از عوامل تخریبی پادگانه‌های دریایی در طول دهه‌های اخیر به شمار می‌آید.

با هدف ارزیابی تأثیر جابه‌جایی پادگانه‌های دریایی، نقشه خطواره‌ها با بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای LANDSAT 8 و در محیط نرم‌افزاری ENVI5.3، Arc GIS 10.6، PCI Geomatica و Rock works استخراج گردید. 16

شیب کمی (در حدود ۱۵ درجه) دارند. پادگانه‌های دریایی در این منطقه در سطوح ارتفاعی متفاوتی قرار گرفته‌اند و از حدود ۴ متر در پادگانه‌های دریایی کم ارتفاع در جنوب شهر چابهار (شکل C۳) تا پادگانه‌های مرتفع با ارتفاع بیش از ۲۳۷ متر (مرتفع‌ترین ارتفاع پادگانه‌های دریایی در ایران) از خصوصیت‌های ارتفاعی پادگانه‌های این منطقه به شمار می‌آیند (شکل B۳). این بخش از منطقه مورد مطالعه وسعتی در حدود ۲۳۱ کیلومتر مربع را شامل می‌شود. پادگانه دریایی لیپار در شرق شهر چابهار و در کیلومتر ۲۰ جاده چابهار به بریس قرار دارد. این پادگانه دریایی از لحاظ وسعت بسیار کوچک‌تر از پادگانه چابهار و وسعت آن در حدود ۱۶/۷ کیلومتر مربع است. ارتفاع پادگانه‌های دریایی این بخش از حدود ۳ متر در سواحل جنوبی منطقه تا ارتفاع ۲۲۶ متر در شمال غرب آن متفاوت است (شکل C۲ و شکل D۳).

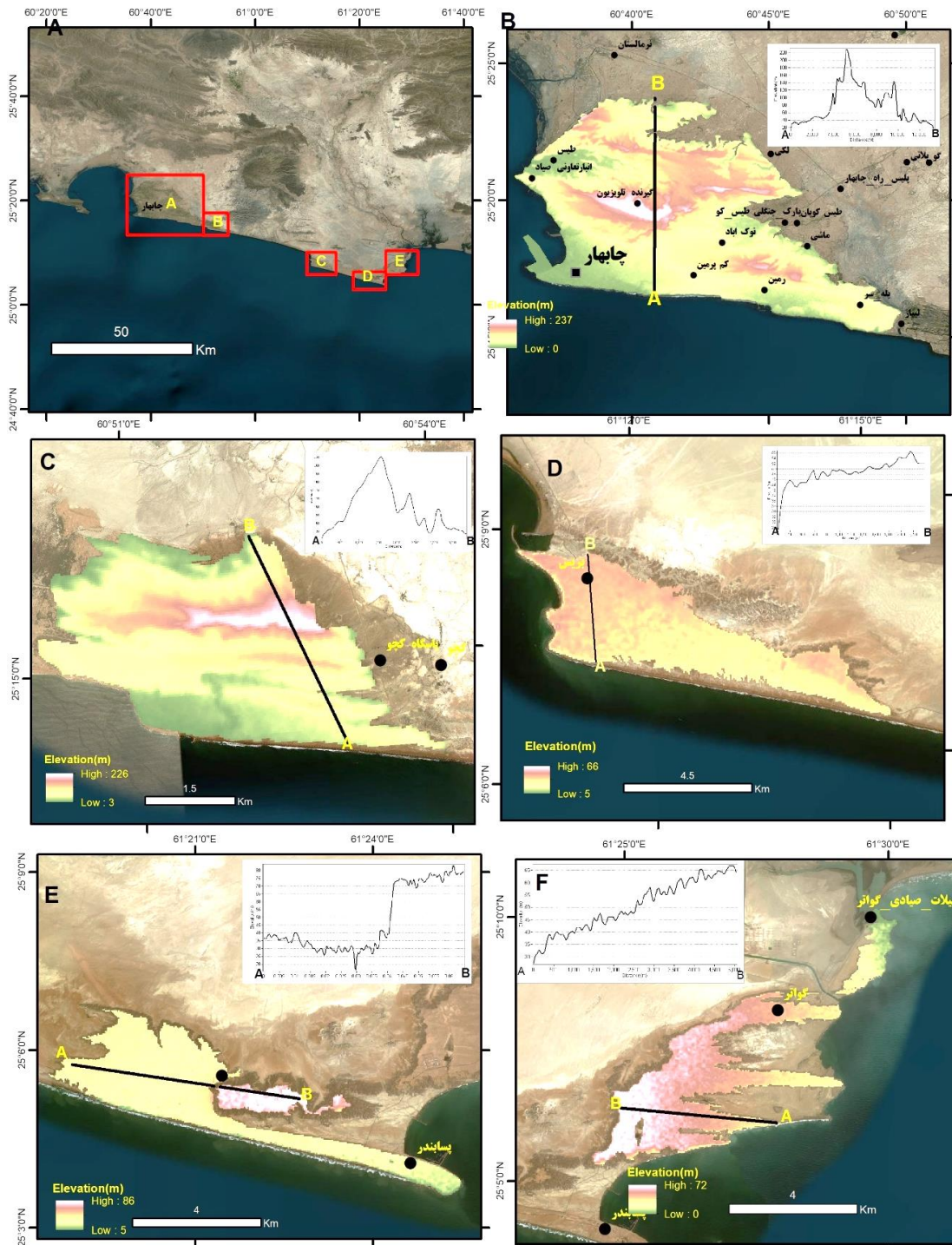
#### پادگانه بریس

جنس این پادگانه کنگلومرای آهکی، گلسنگ می‌باشد (جعفر، ۱۳۷۵). شیب پادگانه یک درجه و به سمت دریا است. حداکثر ارتفاع این بخش از پادگانه‌ها دریایی حدود ۶۶ متر است (شکل D۲ و شکل E۳). در حاشیه این پادگانه دریایی با پرتگاه‌هایی در جنوب به دریای عمان و در سایر بخش‌ها به جلگه دشتیاری مسلط می‌باشد. مهم‌ترین عارضه مسکونی در این منطقه روستا و بندر صیادی بریس است.

#### پادگانه پسابندر (رأس فسته)

این پادگانه‌ها در شرقی‌ترین دماغه ساحل ایران می‌باشد و به صورت مدور به سمت شرق امتداد یافته است. جنس این پادگانه‌ها کنگلومرای آهکی، آهک‌های صدف‌دار، گلسنگ، سیلت استون



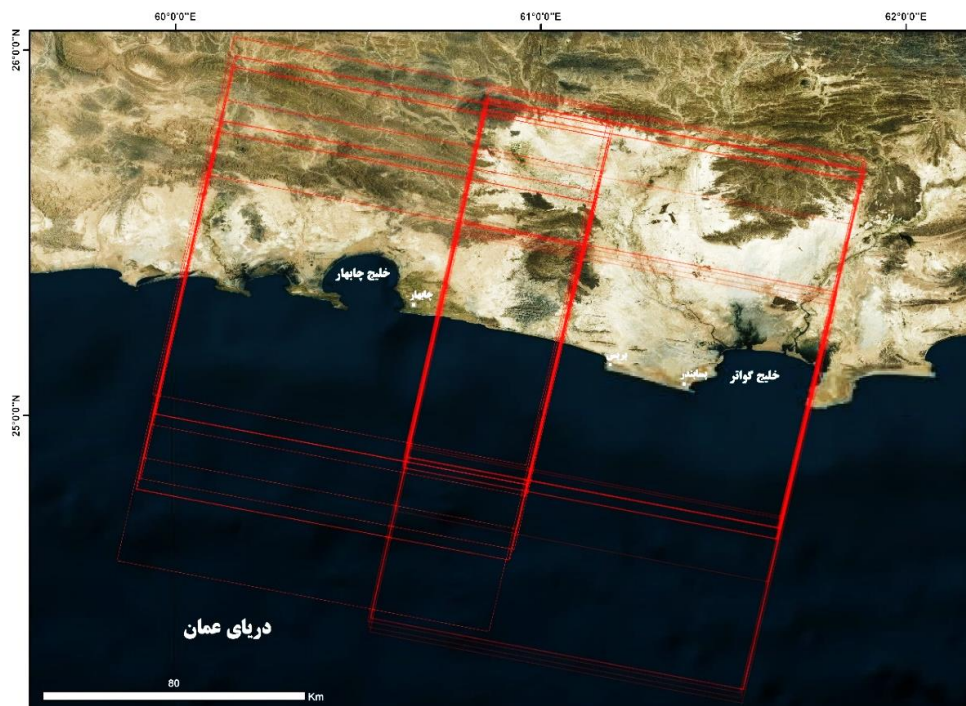


شکل ۲: A) موقعیت پادگانه‌های دریایی و نیمرخ ارتفاعی در منطقه مورد مطالعه، B) پادگانه چابهار، C) پادگانه لیبار، D) پادگانه بریس، E) پادگانه پسابندر و F) پادگانه گواتر.





شکل ۳: پادگانه دریایی (A) رمین، (B) منطقه آزاد چابهار، (C) جنوب شهر چابهار، (D) لیپار، (E) بریس و (F) پشات



شکل ۴: پوشش تصاویر ماهواره‌ای داده‌های پایین گذر ENVISAT\_ASAR مورد استفاده در منطقه مورد مطالعه

جدول ۱: مشخصات تصاویر ماهواره‌ای داده‌های پایین گذر مورد استفاده در منطقه مورد مطالعه

| چابهار و لیپار   |            |      |            | بریس، پسابندر و گواتر |            |      |            |
|------------------|------------|------|------------|-----------------------|------------|------|------------|
| ماهواره و سنجنده | تاریخ      | قطبش | حالت مداری | ماهواره و سنجنده      | تاریخ      | قطبش | حالت مداری |
|                  | برداری     |      |            |                       | برداری     |      |            |
| ENVISAT_ASAR     | ۲۰۰۳/۰۳/۰۵ | VV   | Descending | ENVISAT_ASAR          | ۲۰۰۳/۱۱/۰۸ | VV   | Descending |
| ENVISAT_ASAR     | ۲۰۰۳/۱۱/۲۷ | VV   | Descending | ENVISAT_ASAR          | ۲۰۰۴/۰۱/۱۷ | VV   | Descending |
| ENVISAT_ASAR     | ۲۰۰۴/۰۳/۰۲ | VV   | Descending | ENVISAT_ASAR          | ۲۰۰۴/۰۶/۱۴ | VV   | Descending |
| ENVISAT_ASAR     | ۲۰۰۴/۰۸/۰۱ | VV   | Descending | ENVISAT_ASAR          | ۲۰۰۴/۰۹/۱۸ | VV   | Descending |
| ENVISAT_ASAR     | ۲۰۰۵/۰۵/۰۵ | VV   | Descending | ENVISAT_ASAR          | ۲۰۰۵/۰۱/۰۱ | VV   | Descending |
| ENVISAT_ASAR     | ۲۰۰۵/۱۰/۱۱ | VV   | Descending | ENVISAT_ASAR          | ۲۰۰۵/۰۶/۲۵ | VV   | Descending |
| ENVISAT_ASAR     | ۲۰۰۶/۰۴/۰۱ | VV   | Descending | ENVISAT_ASAR          | ۲۰۰۵/۱۰/۰۸ | VV   | Descending |
| ENVISAT_ASAR     | ۲۰۰۷/۰۳/۰۲ | VV   | Descending | ENVISAT_ASAR          | ۲۰۰۶/۰۸/۱۹ | VV   | Descending |
| ENVISAT_ASAR     | ۲۰۰۸/۰۱/۱۰ | VV   | Descending | ENVISAT_ASAR          | ۲۰۰۷/۰۲/۱۰ | VV   | Descending |
| ENVISAT_ASAR     | ۲۰۰۷/۰۵/۱۰ | VV   | Descending | ENVISAT_ASAR          | ۲۰۰۷/۱۰/۱۳ | VV   | Descending |
| ENVISAT_ASAR     | ۲۰۰۶/۱۲/۲۱ | VV   | Descending | ENVISAT_ASAR          | ۲۰۰۸/۰۵/۱۰ | VV   | Descending |
| ENVISAT_ASAR     | ۲۰۰۶/۰۲/۰۹ | VV   | Descending | ENVISAT_ASAR          | ۲۰۰۹/۰۲/۱۴ | VV   | Descending |
| ENVISAT_ASAR     | ۲۰۰۹/۰۸/۲۷ | VV   | Descending | ENVISAT_ASAR          | ۲۰۰۹/۰۹/۱۲ | VV   | Descending |
| ENVISAT_ASAR     | ۲۰۰۹/۰۳/۰۵ | VV   | Descending | ENVISAT_ASAR          | ۲۰۰۹/۱۲/۲۶ | VV   | Descending |
| ENVISAT_ASAR     | ۲۰۰۸/۱۰/۱۶ | VV   | Descending | ENVISAT_ASAR          | ۲۰۱۰/۰۳/۰۶ | VV   | Descending |
| ENVISAT_ASAR     | ۲۰۱۰/۰۷/۰۸ | VV   | Descending | ENVISAT_ASAR          | ۲۰۱۰/۰۶/۱۹ | VV   | Descending |

ناشی از مسطح بودن زمین (کرویت) از اطلاعات دقیق مداری (DEOS<sup>۶</sup>) به صورت فایل‌های مداری (ORD<sup>۷</sup>) که فایل‌های باینری هستند و در بردارنده موقعیت‌های دقیق مداری ماهواره‌های ERS1/2 و Envisat) به کار گرفته شد. در ابتدا مرز کلی پادگانه‌های دریایی در مناطق مورد مطالعه با استفاده از تصویرهای ماهواره‌ای Sentinel-2 با قدرت تفکیک مکانی (۱۰ متر) در نرم‌افزار Arc/GIS 10.4 استخراج گردید و نتایج حاصل از تداخل سنجی راداری در این مناطق مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه به منظور حذف خطاهایی که می‌تواند فعالیت‌های انسانی در طول دوره مطالعه در نتایج تداخل سنجی راداری و در بررسی نرخ جابه‌جایی پادگانه‌های دریایی داشته باشد (ساخت و ساز، گسترش شهر و روستاها و معدن کاری) و همچنین عوارض طبیعی پویا (تپه‌های ماسه‌ای و پرتگاه‌های ماری و ماسه سنگی) این مناطق با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2 و همچنین تصاویر ۳-Worldview شناسایی و از نتایج به دست آمده از تداخل سنجی راداری حذف گردید.

برای رفتارسنجی تغییرشکل یک پدیده نیازمند بررسی سری زمانی آن پدیده در منطقه مورد نظر است. بنابراین می‌بایست چندین تصویر در بازه‌های زمانی متفاوت از آن منطقه در دسترس بوده و چندین تداخل نگار بین بازه‌های زمانی متفاوت برای محاسبه نرخ تغییرشکل در محاسبات وارد گردد، که به تحلیل سری زمانی تداخل سنجی معروف می‌باشد. برای پردازش سری زمانی تداخل سنجی در این پژوهش با انتخاب پیکسل‌های پراکنش‌کننده دائمی در کل منطقه، رفتار سری زمانی این پیکسل‌ها با استفاده از روش طول مبنای کوتاه (SBAS) بررسی شد. در این پژوهش از تصویر سنجنده راداری ASAR ماهواره ENVISAT اخذ شده بین سال‌های (۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰) و برای پیاده‌سازی هر یک از سری‌های زمانی یاد شده از نرم‌افزار (Sarscape) استفاده گردید (شکل و جدول ۱). برای حذف اثر فاز ناشی از توپوگرافی از روی تداخل نگارها مدل ارتفاع رقومی ماهواره راداری ناسا (SRTM) با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر و هم‌چنین برای حذف فاز

جاسک و بریس ۳/۵ میلی‌متر در سال می‌باشد. طبق نتایج به دست آمده توسط ویتافنزی (۱۹۷۹) مناطقی که کمتر تحت تاثیر فعالیت‌های گسل‌ها بوده‌اند با نرخ ۲/۷۴ میلی‌متر در سال بالا آمدگی دارند. با استفاده از فسیل‌های (صدف‌های) موجود در رسوب‌های پادگانه‌های مورد اشاره و تعیین سن به روش کربن ۱۴، سن این سواحل مرتفع، بین ۵ تا ۴۰ هزار سال به دست آمده است (جدول ۲) (درویش‌زاده، ۱۳۷۰). آنچه که از جدول ذیل استنباط می‌شود، این است که هم مقدار ارتفاع این پادگانه‌ها و هم سن آن‌ها بسیار متغیر است. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد، در این میان بیشترین ارتفاع و سن مربوط به ناحیه کنارک-چابهار است و از کنارک به طرف شرق این رقم‌ها کاهش قابل ملاحظه‌ای را می‌دهند. این ویژگی به طرف غرب کنارک هم سرایت می‌کند، زیرا در جاسک، پادگانه‌های دریایی ارتفاعی حدوداً ۶ متر حضور دارند که سن نمونه‌هایی از آن‌ها ۲۵۶۰۰ سال برآورد شده (درویش‌زاده، ۱۳۷۰). نورمند و همکاران (Normand et al, 2019) پادگانه‌های دریایی در سواحل ایران را با استفاده از روش سن یابی (کربن ۱۴) و با شاخص (شبه‌ساز لومینسانس نوری) مطالعه نموده و بیشترین میزان نرخ بالاآمدگی (تراس‌های دریایی) را در این منطقه در طی دوره (۲۰ تا ۵۰ هزار ساله) را بین (۰/۵ تا ۱/۲ میلی‌متر در سال) برآورد کرده‌اند.

در ادامه تأثیر این تغییر شکل بر ژئومورفولوژی و همچنین ارتفاع پادگانه‌های دریایی مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

## بحث و نتایج

### بالاآمدگی پادگانه‌های دریایی

بالاآمدگی سواحل دریای عمان عمدتاً مربوط به فرآیند فرو رانش پوسته اقیانوسی کف عمان به زیر پوسته قاره‌ای جنوب شرق ایران می‌شود و چنین وضعیتی قطعاً بیانگر عدم تعادل ایزوستازی در این نواحی است. البته حرکات قائم گسل‌های میناب و بشاگرد نیز ممکن است در بالا آمدن سطوح مذکور مؤثر بوده باشند. بنابراین فلات ایران هنوز تحت-تأثیر حرکات تکتونیک (نئوتکتونیک) بوده و این مسئله موقعیت ژئومورفولوژی سواحل جنوبی ایران را تحت تأثیر و تغییر قرار داده و بر فرآیندهای شکل‌زایی کنونی مؤثر افتاده است. طبق یافته‌های ویتافنزی (۱۹۷۹) و بررسی‌های به عمل آمده در این تحقیق تراس‌های دریایی از غرب به سمت شرق سواحل دریای عمان مرتفع‌تر شده‌اند به طوری که تراس دریایی منطقه جاسک حداکثر ۸ متر و در غرب خلیج پزم به ۱۰۴ متر رسیده است. به اعتقاد فلینت (Flint, 1971) سرعت و میزان بالاآمدگی ساحلی در محل‌های مختلف سواحل جنوبی ایران متفاوت و متغیر است. به عنوان نمونه در غرب بندر عباس معادل ۱/۵ میلی‌متر در سال، در توجک ۲/۵ میلی‌متر در سال و در مناطق بین

جدول ۲: سن پادگانه‌های سواحل جنوب شرقی ایران براساس سن فسیل‌های برداشت شده از نقاط مختلف (درویش‌زاده، ۱۳۷۰)

| سن فسیل یا پادگانه سال | ارتفاع برداشت فسیل از سطح دریا m | نوع فسیل     | محل برداشت فسیل |
|------------------------|----------------------------------|--------------|-----------------|
| بیش از ۳۹۹۰۰           | ۹۱/۴                             | آستراکد      | چابهار          |
| ۳۱۰۵۰ ± ۹۵۰            | ۱۸                               | دو کفه‌ای    |                 |
| ۵۷۸۰ ± ۱۱۵             | ۲۴                               | خرده‌های صدف | گواتر           |
| ۲۳۶۰۰ ± ۶۵۰            | ۱/۵                              | خرده‌های صدف |                 |

## برآورد نرخ جابه‌جایی پادگانه‌های دریایی

## پادگانه دریایی چابهار و لیپار

محدوده مورد مطالعه پادگانه دریایی چابهار در حدود ۲۳۱ کیلومتر مربع وسعت دارد. همان‌طور که در شکل A مشاهده می‌شود، در پادگانه دریایی چابهار نرخ جابه‌جایی بین ۸/۴۵- تا ۷/۰۵ میلی‌متر در سال قرار دارد و میانگین آن در حدود (۰/۰۴ - میلی‌متر) در سال است (شکل A۵). وجود عوارض انسانی و طبیعی پویا در منطقه مورد مطالعه از جمله عواملی است که می‌تواند بر دقت برآورد نرخ تغییر شکل در مناطق مختلف تأثیر بگذارد. از جمله این عوامل می‌توان به ساخت و ساز انسانی و گسترش شهر چابهار، منطقه آزاد و روستاهای اطراف آن در طول بازه زمانی مورد مطالعه اشاره نمود. به‌طور مثال ساخت ساز در دوره زمانی مورد مطالعه در مناطق شهری و روستایی می‌تواند نتایج حاصل از تداخل سنجی راداری به صورت بالآمدگی پادگانه‌های دریایی نشان دهد و در کنار آن معدن کاری و برداشت ماسه سنگ‌های پادگانه‌های دریایی به عنوان سنگ لاشه برای ساخت اسکله و همچنین دپوی بقایای آن از عوامل تأثیرگذار بر نتایج حاصل از تداخل سنجی راداری است. عوامل طبیعی نیز می‌تواند بر نرخ تغییر شکل منطقه مورد مطالعه تأثیر بگذارد. از آن جمله می‌توان به جابه‌جایی تپه‌های ماسه‌ای فعال به خصوص در منطقه رمین و همچنین ناپایداری پرتگاه‌های مارنی و ماسه سنگی فعال اشاره نمود. از این رو این عوارض از نتایج حاصل از تداخل سنجی راداری منطقه حذف گردید و نتایج صرفاً بر پادگانه‌های دریایی که این عوامل کمترین تأثیر را بر روی آنها داشته است، متمرکز گردید. با حذف این مناطق نرخ جابه‌جایی در پادگانه دریایی چابهار بین ۲/۳۶- تا ۳/۱۷ میلی‌متر در سال اصلاح گردید (شکل B۵). از این رو میانگین نرخ جابه‌جایی پادگانه‌های

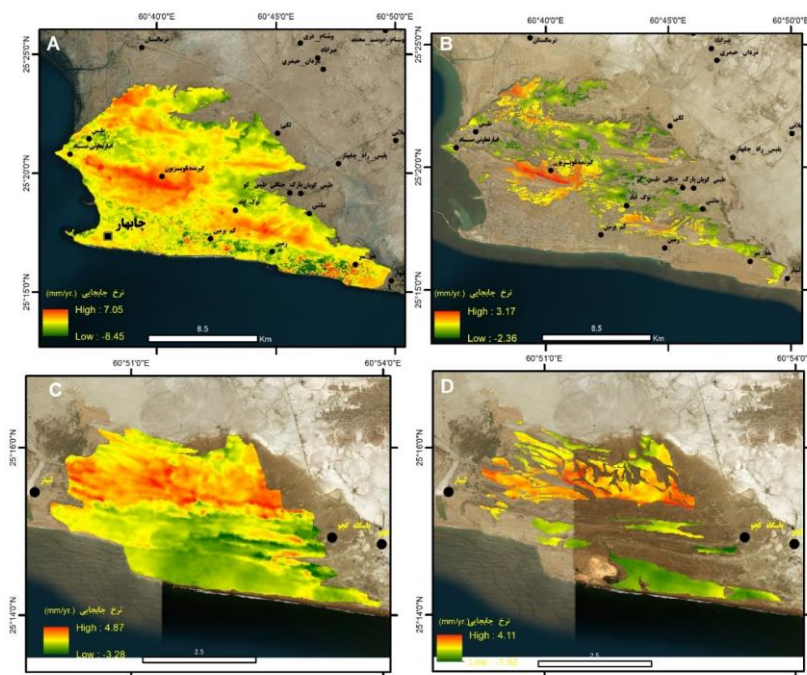
دریایی در حدود ۰/۳۴ میلی‌متر در سال به دست آمد. این امر نشان می‌دهد پادگانه دریایی چابهار در طول دوره مطالعه بیش از هفت ساله (۲۰۰۳/۰۵/۰۳ تا ۲۰۱۰/۰۷/۰۸) در حدود (۲/۵ میلی‌متر) بالآمدگی داشته است. بیشترین میزان بالآمدگی در نزدیکی گیرنده تلویزیونی در منطقه آزاد چابهار و بیشترین نرخ فرونشست در پادگانه‌ای در نزدیکی روستا لکی و پارک جنگلی طیس کویان در شرق چابهار قرار دارد. میزان نرخ جابه‌جایی منطقه لیپار از ۳/۲۸- تا ۴/۸ میلی‌متر در سال متغیر است و میانگین کل منطقه در حدود ۰/۳۳ میلی‌متر در سال است (شکل C۵). ولی پس از حذف پارامترهای انسانی و طبیعی موثر بر نتایج تداخل سنجی راداری، نرخ جابه‌جایی بین ۱/۹۲- تا ۴/۱۱ میلی‌متر در سال تغییر یافت و میانگین نرخ جابه‌جایی در این منطقه در حدود ۰/۷۳ میلی‌متر در سال محاسبه گردید (شکل D۵) بیشترین میزان بالآمدگی در بخش شرقی این پادگانه به چشم می‌خورد و این بخش از پادگانه، بالاترین ارتفاع این منطقه (۲۲۶ متر) را نیز به خود اختصاص داده است. پادگانه دریایی لیپار بیشترین نرخ بالآمدگی را در بین پادگانه‌های دریایی مورد مطالعه به خود اختصاص داده است و در طول دوره مورد مطالعه به‌طور میانگین در حدود ۵/۴ میلی‌متر بالآمدگی داشته است (شکل ۵).

## پادگانه دریایی بریس

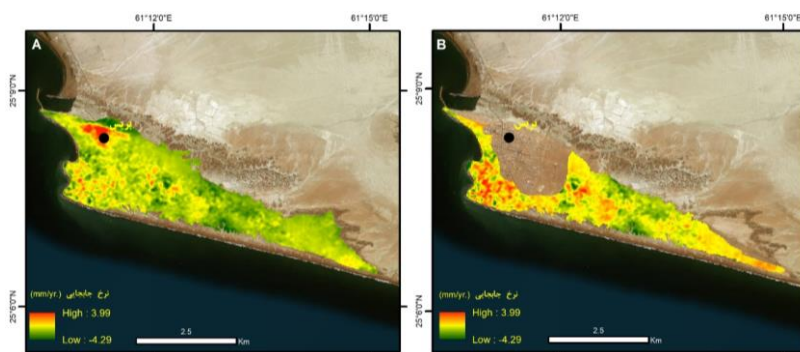
نرخ جابه‌جایی در پادگانه دریایی بریس بین ۴/۲۹- تا ۳/۹۹ میلی‌متر در سال و میانگین آن در حدود ۰/۰۱ در سال برآورد می‌شود (شکل A۶). نکته‌ای که در رابطه با این پادگانه می‌توان به آن اشاره نمود این است که علاوه بر وجود فعالیت‌های انسانی در این منطقه به خصوص وسعت زیاد روستای بریس، در بخش سطحی این بخش از پادگانه‌های دریایی پهنه‌های ماسه‌ای فعال به چشم می‌خورد. این پهنه

بریس از منطقه میانگین نرخ جابه‌جایی در حدود ۰/۱۲- میلی‌متر در سال را نشان می‌دهد (شکل B۶) که با واقعیت تغییر شکل این پادگانه هم‌خوانی ندارد. از این رو استفاده از نتایج تداخل سنجی راداری در این منطقه نمی‌تواند واقعیت تغییر شکل در این منطقه را به خوبی نشان دهد و نتایج معتبری را در اختیار محققین قرار دهد.

های ماسه‌ای هر ساله به واسطه جابه‌جایی رسوب‌های سطحی در حد چندین میلی‌متر تغییر مکان و ارتفاع می‌دهند. این جابه‌جایی‌ها بر نتایج حاصل از تداخل سنجی راداری در این پادگانه دریایی تأثیر می‌گذارد و مانع از این می‌شود تا نرخ واقعی جابه‌جایی خود پادگانه دریایی در این منطقه به دست بیاید. به گونه‌ای که با حذف روستای



شکل ۵: نرخ جابه‌جایی پادگانه دریایی (A) چابهار بدون حذف پرتگاه‌ها و عوارض انسان ساخت، (B) چابهار با حذف پرتگاه‌ها و عوامل انسان ساخت، (C) نرخ جابه‌جایی پادگانه دریایی لیپار بدون حذف پرتگاه‌ها و عوارض انسان ساخت، (D) نرخ جابه‌جایی پادگانه دریایی لیپار با حذف پرتگاه‌ها و عوارض انسان ساخت.



شکل ۶: نرخ جابه‌جایی پادگانه دریایی بریس (A) بدون حذف پرتگاه‌ها و عوارض انسان ساخت، (B) با حذف پرتگاه‌ها و عوامل انسان ساخت.

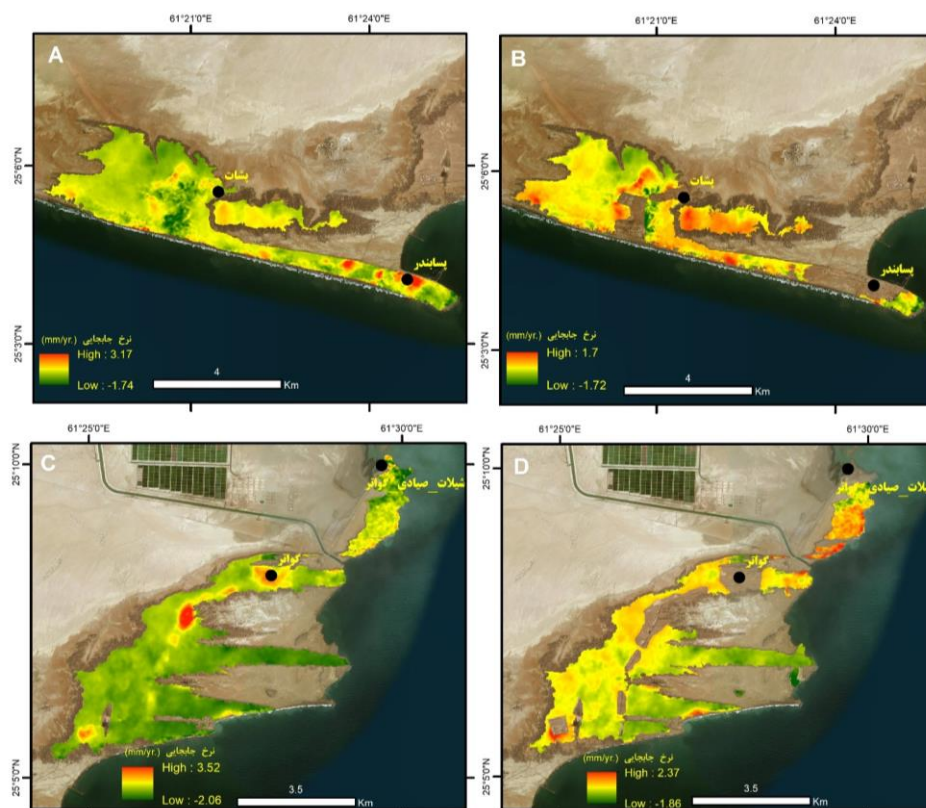


## پادگانه دریایی پسابندر و گواتر

## پادگانه دریایی پسابندر

نتایج حاصل از تداخل سنجی راداری در منطقه پسابندر نشان می‌دهد که نرخ جابه‌جایی در این منطقه بین  $۱/۴۷$  تا  $۳/۱۷$  میلیمتر در سال و میانگین آن در حدود  $۰/۰۷$  میلیمتر در سال است (شکل A). در این منطقه دو نقطه روستایی پسابندر و پشتات وجود دارد و علاوه بر آن آبگیرهایی (هوتک) در جنوب پشتات وجود دارد که می‌تواند بر نتایج حاصل از تداخل سنجی راداری تأثیر منفی بگذارد. از این رو، این مناطق از بررسی‌ها حذف گردید و نرخ جابه‌جایی بین  $۱/۷۲$  تا  $۱/۷$  میلیمتر در سال و میانگین آن در حدود  $۰/۰۶$  در طول دوره مورد مطالعه برآورد گردید (شکل B). بیشترین

نرخ بالآمدگی در این منطقه مربوط به ارتفاع‌های جنوب پشتات است که بالاترین ارتفاع پادگانه‌های دریایی را در این بخش از منطقه مورد مطالعه با  $۸۶$  متر به خود اختصاص داده است. در منطقه گواتر نیز نرخ بالآمدگی بین  $۲/۰۶$  تا  $۳/۵۲$  میلی‌متر در سال متغیر می‌باشد (شکل C) و میانگین آن در حدود  $۰/۳۸$  میلی‌متر در سال است. در این منطقه وجود روستای گواتر و همچنین حوضچه‌های آبگیر مصنوعی از جمله عوارضی است که حذف آن می‌تواند دقت نتایج حاصل از تداخل سنجی راداری را بهبود بخشد. با حذف این عوارض نرخ جابه‌جایی بین  $۱/۸۶$  و  $۲/۳۷$  میلی‌متر در سال و میانگین حدود  $۰/۲۴$  میلی‌متر در سال برآورد می‌شود (شکل D).



شکل ۷: نرخ جابه‌جایی پادگانه دریایی (A) پسابندر بدون حذف پرتگاه‌ها و عوارض انسان ساخت، (B) پسابندر با حذف پرتگاه‌ها و عوامل انسان ساخت، (C) نرخ جابه‌جایی پادگانه دریایی گواتر بدون حذف پرتگاه‌ها و عوارض انسان ساخت، (D) نرخ جابه‌جایی پادگانه دریایی گواتر با حذف پرتگاه‌ها و عوارض انسان ساخت.



جدول ۳: نرخ جابه‌جایی پادگانه‌های دریایی منطقه مورد مطالعه

| پادگانه دریایی | حد اقل<br>(mm/yr.) | حداکثر<br>(mm/yr.) | میانگین<br>(mm/yr.) | میانگین بالآمدگی در طول<br>دوره مورد مطالعه (۲۰۰۲-۲۰۱۰) (mm) |
|----------------|--------------------|--------------------|---------------------|--------------------------------------------------------------|
| چابهار         | -۲/۳۶              | ۳/۱۷               | ۰/۳۴                | ۲/۵                                                          |
| لیپار          | -۱/۹۲              | ۴/۱۱               | ۰/۷۳                | ۵/۴                                                          |
| پسابندر        | -۱/۷۲              | ۱/۷                | ۰/۰۶                | ۰/۴۴                                                         |
| گواتر          | -۱/۸۶              | ۲/۳۷               | ۰/۲۴                | ۱/۷۵                                                         |

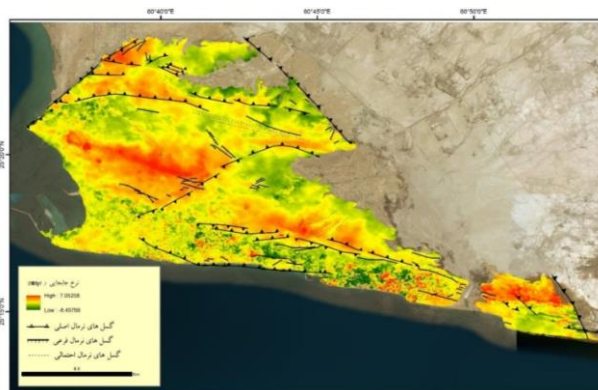
## بحث

### بالآمدگی و تأثیر آن در تغییر شکل پادگانه‌های دریایی

بالآمدگی پادگانه‌های دریایی منطقه مورد مطالعه تحت تأثیر فرورانش صفحه عربستان به زیر صفحه ایران در منطقه ساحلی منجر به شکل‌گیری گسل خوردگی نرمال به موازات خط ساحلی شده است (Harms et al, 1984; Platt and Leggett, 1986; Burg et al, 2012; Back and Morley, 2016; Dolati and Burg, 2012).

پادگانه‌های دریایی منطقه مورد مطالعه از طریق مجموعه‌ای از گسل‌های نرمال شرقی-غربی، شمال شرق-جنوب غربی و شمال غرب - جنوب شرقی محدود شده است که شیب آن‌ها به سمت دریا قرار دارد. در کنار آن این گسل‌های نرمال اصلی دماغه چابهار توسط گسل‌های نرمال فرعی بسیار کوچک در حد چند متر بریده شده است. روند این گسل‌ها شمال شرق-جنوب غربی و شمال غربی-جنوب

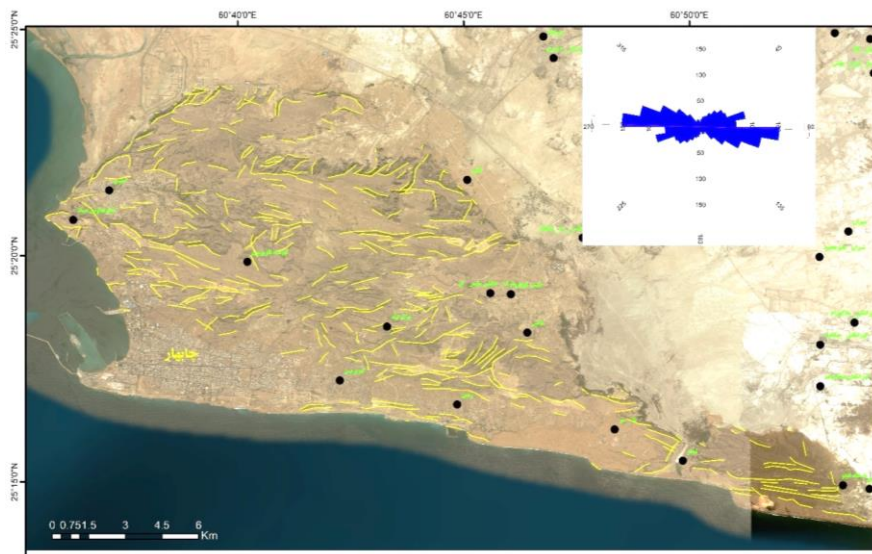
شرقی هستند. بسیاری از این گسل‌ها موازی ساحل هستند و شیب آنها به سمت جنوب است (شکل ۸) (Normand et al, 2019). شواهدی از گسل معکوس در این منطقه مشاهده نشده و بیش از نیمی از گسل‌های موجود در منطقه مورد مطالعه از نوع نرمال هستند. وجود این سطوح جابه‌جا شده نشان دهنده این است که در دوره پلیوستوسن پایانی فعالیت داشته‌اند و همزمان با بالا آمدن پادگانه‌های دریایی و رسوب‌های ماری میوسن در این منطقه گسل خوردگی پیدا نموده‌اند. نتیجه این گسل خوردگی‌های متعدد به وجود آمدن سطوح متعدد پادگانه‌های دریایی در ارتفاع‌های مختلف است. مقایسه نقشه گسل‌ها در منطقه چابهار و نرخ بالآمدگی پادگانه‌های دریایی نشان می‌دهد تراکم نسبی گسل‌ها در مکان‌هایی که نرخ بالآمدگی زیادتر است بیشتر به چشم می‌خورد. این امر منجر به شکل‌گیری پادگانه‌های مطبق در سطوح ارتفاعی متفاوت در پادگانه‌های دریایی مکران شده است.



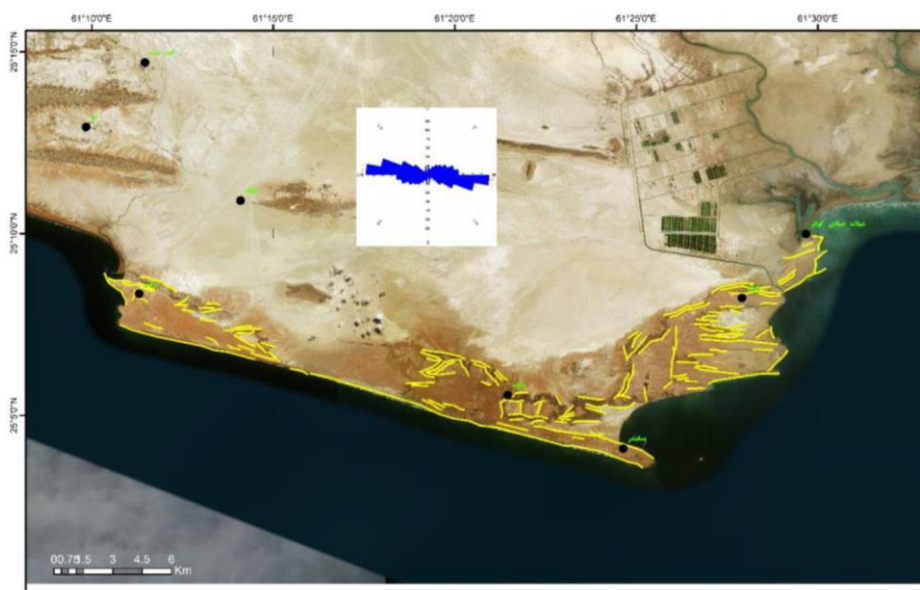
شکل ۸: ارتباط بین گسل‌های نرمال در منطقه چابهار و لیپار (Normand et al, 2019) و نرخ جابه‌جایی در لیپار و چابهار

۴۵ تا ۹۰ قرار دارد (شکل ۹). آزمون غالب خطواره‌های پادگانه دریایی چابهار با جهت شرقی غربی است و آزمون  $91/6$  درجه بیشترین تعداد خطواره‌ها را به خود اختصاص داده است. در منطقه پسابندر، بریس و گواتر نیز روند خطواره‌ها مشابه منطقه چابهار است و بیشترین خطواره‌ها دارای روند شرقی- غربی (میانگین درجه) است.

مشاهده‌های انجام شده و نمودار گلسرخی رسم شده براساس جهت یافتگی خطواره‌ها که می‌تواند شامل گسل‌ها و پرتگاه‌های مارنی و ماسه‌سنگی باشد، حاکی از این موضوع است که دو دسته خطواره غالب در این منطقه وجود دارد که با توجه به فراوانی آن به ترتیب دسته اول با آزمون‌های بین ۲۷۰ تا ۳۱۵، دسته دوم با آزمون‌های بین



شکل ۹: پراکندگی و رز دیاگرام خطواره‌ها (خطوط زرد) در پادگانه‌های دریایی چابهار و لیپار



شکل ۱۰: پراکندگی و رز دیاگرام خطواره‌ها (خطوط زرد) در پادگانه‌های دریایی بریس، پسابندر و گواتر

منطقه مورد مطالعه (چابهار تا گواتر) تقریباً در بخش میانی یک منطقه بسیار فعال بر افزایشی قرار دارد و گودال مکران تقریباً در امتداد جهت شرقی-غربی کشیده شده است (Farhoudi and Karig, 1977; White and Ross, 1979). فرورانش آن به سمت شمال و دارای شیب بسیار کم ده درجه‌ای است (شکل ۱۱) (Kopp et al, 2000; Shad Manaman et al, 2011; White and Louden, 1982). زون سابداکشن مکران به وسیله دو گسل امتداد لغز در شرق (گسل سونا) و غرب (گسل میناب) محدود شده است و از طریق این دو گسل با سیستم‌های برخوردی قاره‌ای زاگرس و هیمالیا در ارتباط است (شکل ۱۱). داده‌های برداشت شده از نقشه‌برداری جی پی اس در اطراف مکران مشخص نمود که همگرایی فعال بین فرورانش صفحه عربی و صفحه اوراسیا به میزان ۲۰ میلی‌متر در سال است (Bayer et al, 2006; Frohling and Szeliga, 2016; Khan et al,

همگرایی به نظر می‌رسد منجر به تشکیل گسل‌های معکوس در منطقه زون بر افزایشی مکران شده است، ولی در منطقه ساحلی گسل خوردگی نرمال به موازات خط ساحلی روی داده است. همان‌طور که در شکل‌های ۹ و ۱۰ مشاهده می‌شود، امتداد خطواره‌های اصلی در پادگانه‌های دریایی منطقه مورد مطالعه شرقی-غربی است و این روند با امتداد شرقی-غربی زون سابداکشن مکران در یک راستا قرار دارد و نشان دهنده این است که تأثیر فرورانش صفحه عربستان به زیر پوسته ایران، منجر به تغییر شکل منطقه ساحلی دریای عمان شده است که نتیجه آن، علاوه بر بالا آمدن پادگانه‌های دریایی در سواحل عمان در ایران، گسل‌ها و پرتگاه‌های مارنی-ماسه سنگی را در این پادگانه‌ها به وجود آورده است و امتداد آن در راستای فرورانش زون سابداکشن مکران به زیر صفحه ایران است.



شکل ۱۱: جایگاه منطقه مورد مطالعه (کادر مشکی) و ساختارهای تکتونیکی اصلی (برگرفته از Normand et al, 2019)



پادگانه‌های دریایی منطقه مورد مطالعه به چشم می‌خورند و در منطقه ساحلی دریابارها را شکل داده‌اند. این دریا بارها به‌طور عمده از نوع ضعیف و قابل فرسایش شدید هستند. در چنین منطقه‌هایی اثرات مضاعف امواج و آب و هوا و لغزش‌های عظیمی از سنگ‌ها با توده‌های بسیار بزرگ را به وجود آورده‌اند که عظمت آنها چشمگیر است. در ساحل جنوبی چابهار از پایان محدوده شهری چابهار تا رمین و از لیپار تا ساحل ماسه‌ای بریس می‌توان مشاهده نمود. و در ادامه در سواحل جنوبی بریس، پسابندر و گواتر مشاهده می‌شوند (شکل ۱۲).

همان‌طور که در بالا اشاره شد، از لحاظ سنگ-شناسی پادگانه‌های دریایی عمان تناوبی از ماسه سنگ‌هایی است که بر روی مارن‌های میوسن قرار گرفته‌اند. گسل خوردگی‌های متعددی که در این منطقه به واسطه بالآمدگی پادگانه‌های دریایی شکل گرفته‌اند، باعث شده است تا رخنمون‌های ماسه سنگی منطقه به دلیل مقاومت بیشتر به صورت برجستگی‌هایی در این منطقه‌ها ظاهر گردد و در مقابل آن رسوب‌های مارنی با سرعت بیشتری فرسایش یافته و باعث شده است که در منطقه فرسایش تفریقی از فرایندهای غالب در این منطقه به شمار آید. این فرسایش تفریقی در تمامی



شکل ۱۲: فرسایش تفریقی در پادگانه‌های دریایی پسابندر

۲۰۱۰) در حدود ۱۶ میلی‌متر افزایش ارتفاع داشته است و به تدریج با کاهش ارتفاع نرخ بالآمدگی به تدریج کاهش می‌یابد به گونه‌ای که پایین‌ترین طبقه ارتفاعی (۱۱ تا ۵۶/۲ متر) جابه‌جایی به صورت فرونشست ظاهر می‌شود و جابه‌جایی بین ۲/۳۷- تا ۱/۱۵ میلی‌متر در سال متغیر است و میانگین فرونشست در حدود ۰/۴۶- میلی‌متر در سال است. این روند در لیپار نیز به چشم می‌خورد. بالاترین طبقه ارتفاعی (۱۹۳-۲۲۶ متر) با حداکثر میانگین بالآمدگی (۲/۲ در سال) و بالعکس پایین‌ترین طبقه ارتفاعی (۱۰ تا ۵۳/۲ متر) با

به منظور درک بهتر تأثیر جابه‌جایی پادگانه‌های دریایی بر مورفولوژی و ارتفاع یافتگی پادگانه‌های دریایی هر یک از منطقه‌های مورد مطالعه از لحاظ ارتفاعی به ۵ طبقه تقسیم‌بندی گردیدند. نتایج نشان می‌دهد که در چابهار، لیپار و پسابندر بیشترین ارتفاع در هر یک از این منطقه‌ها با بیشترین نرخ جابه‌جایی همراه است. همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، در بالاترین طبقه ارتفاعی چابهار (۱۹۹-۲۳۷ متر) نرخ جابه‌جایی بین ۱/۴۴ و ۳/۴ میلی‌متر در سال است و این محدوده ارتفاعی در طول دوره مورد مطالعه (۲۰۰۳ تا

ارتفاع پادگانه‌های دریایی در منطقه مورد مطالعه به تدریج از چابهار و لیپار به سمت شرق (گواتر) روند کاهشی دارد و عامل اصلی کاهش ارتفاع از چابهار و لیپار به سمت پسابندر کاهش نرخ بالآمدگی پادگانه‌های دریایی است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که نرخ بالآمدگی در هر پادگانه دریایی ثابت نیست و هر بخش از پادگانه‌های دریایی عملکرد و نرخ جابه‌جایی مثبت و منفی مختص به خود را دارد و این امر در کنار فرسایش تفریقی و گسلش نرمال مورفولوژی پادگانه‌های دریایی را به صورت پادگانه‌های مجزا و مطابق شکل داده است.

بیشترین میزان فرورنشست (میانگین  $0/06$  - میلی - متر در سال) هم‌خوانی دارد. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، منطقه‌هایی که بیشترین میزان فرورنشست را دارد عموماً، منطبق با بخش‌های فرو رو گسل‌های نرمال به خصوص در شرق لیپار و شمال شرق چابهار منطبق هستند. این روند در پسابندر نیز مشاهده می‌شود و بالاترین طبقه ارتفاعی با  $(59/8$  تا  $86$  متر) با بالاترین نرخ جابه‌جایی (بالآمدگی) پادگانه‌های دریایی در این منطقه همراه است و بالاترین میانگین جابه‌جایی  $(0/35$  میلی‌متر در سال) را به خود اختصاص می‌دهد. مجموعه این بررسی‌ها نشان می‌دهد که

جدول ۴: نرخ 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 (mm)(۲۰۱۰-۲۰۰۳) |
|-------------|-----------------------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------------|-----------------------------------------------------------|
| چابهار      | ۱۱-۵۶/۲                           | ۲/۳۷-                    | ۱/۱۵                      | ۰/۴۶-                      | ۳/۴-                                                      |
|             | ۵۶/۳-۱۰۱/۴                        | ۱/۵-                     | ۱/۸                       | ۰/۱                        | ۰/۷                                                       |
|             | ۱۰۱/۵-۱۴۶/۶                       | ۱/۴-                     | ۲/۳                       | ۰/۴۴                       | ۳/۲                                                       |
|             | ۱۴۶/۷-۱۹۱/۹                       | ۰/۴۶-                    | ۳/۱۷                      | ۱/۳۳                       | ۹/۷                                                       |
|             | ۱۹۲-۲۳۷                           | ۱/۴۴                     | ۳/۴                       | ۲/۲۷                       | ۱۶/۶                                                      |
| لیپار       | ۵/۲-۵۳/۲                          | ۱/۹۲-                    | ۲/۳۰                      | ۰/۰۶-                      | ۰/۴-                                                      |
|             | ۵۳/۳-۹۶/۴                         | ۱/۹-                     | ۳/۲                       | ۰/۷۷                       | ۵/۶                                                       |
|             | ۹۵/۵-۱۳۹/۶                        | ۰/۴۹-                    | ۴/۱۱                      | ۱/۳                        | ۹/۵                                                       |
|             | ۱۳۹/۷-۱۹۳                         | ۰/۹۹                     | ۳/۴                       | ۱/۸۸                       | ۱۳/۸                                                      |
|             | ۱۹۳-۲۲۶                           | ۰/۹                      | ۳/۴۵                      | ۲/۲                        | ۱۶/۱                                                      |
| پسابندر     | ۵/۲۱-۲۱/۱                         | ۱/۷۲-                    | ۱/۵۷                      | ۱/۵-                       | ۱/۱-                                                      |
|             | ۲۱/۲-۳۷/۴                         | ۱/۵۹-                    | ۱/۵۹                      | ۰/۰۱                       | ۰/۱                                                       |
|             | ۳۷/۵-۵۳/۶                         | ۰/۵۶-                    | ۰/۸۲                      | ۰/۱۱                       | ۰/۸                                                       |
|             | ۵۳/۷-۶۹/۸                         | ۰/۳-                     | ۰/۸۳-                     | ۰/۲۹                       | ۲/۱                                                       |
|             | ۶۹/۸-۸۶                           | ۰/۳۴-                    | ۱/۰۵                      | ۰/۳۵                       | ۲/۶                                                       |
| گواتر       | ۲-۱۶                              | -۱/۷۶                    | ۲/۳                       | ۰/۵                        | ۳/۷                                                       |
|             | ۱۶/۱۳-۳۰                          | -۱/۶۱                    | ۲/۳۵                      | ۰/۳۱                       | ۲/۳                                                       |
|             | ۳۰/۱-۴۴                           | -۱/۰۱                    | ۲/۱۸                      | ۰/۷                        | ۵/۱                                                       |
|             | ۴۴/۱-۵۸                           | ۰/۰۷                     | ۱/۴                       | ۰/۲۱                       | ۱/۵                                                       |
|             | ۵۸/۱-۷۲                           | -۰/۴۹                    | ۲/۳۷                      | ۰/۳۴                       | ۲/۵                                                       |

## نتیجه‌گیری

پادگانه‌های دریایی عمان از جمله شاخصه‌های مهم ژئومورفولوژیکی در سواحل جنوب کشور به شمار می‌آیند و مطالعه آنها از دیدگاه مورفولوژیکی و ساختاری در طول بازه‌های زمانی متفاوت و با استفاده از تکنیک‌های پردازش رقومی تصاویر ماهواره‌ای می‌تواند رهیافت‌های جدیدی را در زمینه مطالعه این پدیده ژئومورفولوژیکی به همراه داشته باشد. نتایج حاصل از این مطالعه نشان دهنده کارایی مناسب داده‌های ماهواره‌ای ENVISAT-ASAR و مدل SBAS در مطالعه تغییر شکل پادگانه‌های دریایی عمان است. بیشترین نرخ بالآآمدگی در منطقه مورد مطالعه در لیپار و چابهار مشاهده می‌شود که تأثیر آن برخاستگی تکتونیک بیشتر و ثبت بالاترین ارتفاع پادگانه‌های دریایی ایران در این منطقه است.

نرخ برخاستگی از غرب منطقه مورد مطالعه به سمت شرق به تدریج کاهش می‌یابد و این امر با کاهش ارتفاعی پادگانه‌های دریایی همراه است که از چابهار در غرب به سمت گواتر در شرق منطقه مورد مطالعه همراه است. تأثیر مورفولوژیکی این بالآآمدگی‌ها در منطقه مورد مطالعه را می‌توان در شکل‌گیری گسل‌های نرمال و قرار گرفتن پادگانه‌ها به صورت مطبق و در حاشیه آنها پرتگاه‌های مارنی

و ماسه‌سنگی مشاهده نمود. این روند منجر به رخنمون توالی از رسوب‌های ماسه‌سنگی و مارنی در سطح زمین شده است و فرسایش شدیدتر رسوبات مارنی نسبت به ماسه‌سنگ‌ها نوعی فرسایش تفریقی را به وجود آورده است که از اختصاصات مورفولوژیکی این پهنه ساحلی به شمار می‌آید (Normand et al, 2019). پادگانه‌های دریایی را در سواحل ایران، با استفاده از روش سن-یابی (کربن ۱۴) و با شاخص (شبه‌ساز لومینسانس نوری) مطالعه نموده است و بیشترین میزان نرخ بالآآمدگی (تراس‌های دریایی) را در این منطقه در طی دوره (۲۰ تا ۵۰ هزار ساله) را بین ۰/۵ تا ۱/۲ میلی‌متر در سال برآورد کرده‌اند. نرخ به دست آمده در مطالعه‌های نورمند کمی بالاتر از نرخ به دست آمده در طول دوره مورد مطالعه در این تحقیق (۲۰۰۳-۲۰۱۰) است و اندک اختلاف موجود بین نرخ جابه‌جایی این دو مطالعه را می‌توان به بعد زمانی آن در ارتباط دانست زیرا بازه زمانی مورد مطالعه توسط نورمند و همکاران (Normand et al, 2019). در بازه زمانی حدود ۳۰۰۰۰ سال قبل است و این که در طول این زمان نرخ بالآآمدگی می‌تواند تحت تأثیر فعالیت‌های تکتونیک متغیر بوده باشد و در بعضی سال‌ها این نرخ بالاتر از نرخ جابه‌جایی در دوره مورد مطالعه این تحقیق باشد.

## پانویس

- 1-Synthetic aperture radar interferometry
- 2-Cross track
- 3-Along track
- 4-Ascending

- 5-Descending
- 6-Delft Institute for Earth-oriented Space Research
- 7-Orbital Data Record

## منابع

-بابایی، س.، موسوی، ز. و روستایی، م.، ۱۳۹۵. آنالیز سری زمانی تصاویر راداری با استفاده از روش‌های طول خط مبنای کوتاه (SBAS) و پراکنش کننده‌های دائمی (PS) در تعیین نرخ

-امین سبحانی، ا.، ۱۳۶۷. ژئومورفولوژی و نقش آن در امور دفاعی، مجموعه مقالات سمینار جغرافیای کاربردی و جنگ، دانشگاه امام حسین (ع)، تهران.



- سنجی راداری در مطالعه زلزله، نخستین همایش ملی کاربرد مدل‌های پیش‌رفته تحلیل فضایی (سنجش از دور و GIS) در آمایش سرزمین، اسفند. -درویش زاده، ع.، ۱۳۸۲. زمین‌شناسی ایران، موسسه انتشارات امیرکبیر، ۱۵۷ ص.
- رامشت، م.ح.، ۱۳۸۰. دریاچه‌های دوران چهارم بستر تبلور و گسترش مدنیت در ایران، مجله پژوهشی دانش گاه اصفهان (علوم انسانی)، جلد پانزدهم، شماره ۱ و ۲، ص ۱۳-۳۸.
- صالحی پور میلانی، ع.ر.، لک، ر. و یمانی، م.، ۱۳۹۸. شواهد ژئومورفولوژیکی رویدادهای هنریج در شمال غرب ایران، جغرافیا و توسعه، دوره ۱۷، شماره ۵۵، ص ۱۰۹-۱۳۲.
- واجدیان، س.، سراجیان، م.ر. و منصور، ب.، ۱۳۹۰. استخراج میدان جابه‌جایی سه‌بعدی با استفاده از فن تداخل‌سنجی رادار با دریاچه مصنوعی (SAR)؛ بررسی موردی گسل بم، فیزیک زمین و فضا، شماره ۳۷(۲)، ص ۸۳-۹۶.
- نبوی، م.ح.، ۱۳۵۵. دیباچه‌ای بر زمین‌شناسی ایران، انتشارات سازمان زمین‌شناسی کشور، ۱۲۵ ص.
- فرونشست دشت قزوین. علوم و فنون نقشه‌برداری، دوره ۵، شماره ۴، ص ۹۵-۱۱۱.
- حاجب، ز.، رضایی، ا.، معصومی، ز. و موسوی، ز.، ۱۳۹۷. بررسی فرونشست دشت قم با استفاده از تداخل‌سنجی راداری، مجموعه مقاله‌های هجدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، اردیبهشت، ص ۳۵۲-۳۵۵.
- خوش باطن، م. و شیرانی، ک.، ۱۳۹۵. بررسی و پایش زمین لغزش فعال با استفاده از روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری (مطالعه موردی: زمین لغزش نقل، سمیرم). فصل‌نامه کوآترنری ایران (علمی-پژوهشی)، دوره ۲، شماره ۱، بهار، ص ۵۳-۶۵.
- جعفریان، م.ر.، ۱۳۷۵. نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ نگور و جوانی، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- معتمد، ا. و غریب، م.ر.، ۱۳۸۹. تکامل مکران ساحلی، طی کوآترنر پسین، پژوهشهای جغرافیای طبیعی، شماره ۶۳، تابستان، ص ۷۷-۸۷.
- مهدویان چشمه گل، ع.ا. و مهدویان چشمه گل، ا.ب.، ۱۳۹۳. اصول و روش کاربرد روش تداخل

-Back, S. and Morley, C.K., 2016. Growth faults above shale—Seismic-scale outcrop analogues from the Makran foreland, SW Pakistan. *Marine and Petroleum Geology*, v. 70, p. 144-162.

-Bayer, R., Chery, J., Tatar, M., Vernant, P., Abbassi, M., Masson, F., Nilforoushan, F., Doerflinger, E., Regard, V. and Bellier, O., 2006. Active deformation in Zagros—Makran transition zone inferred from GPS measurements. *Geophysical Journal International*, v. 165(1), p. 373-381.

-Burg, J.P., Dolati, A., Bernoulli, D. and 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*, Springer, Berlin, Heidelberg, p. 239-259.

-Dolati, A. and Burg, J.P., 2013. Preliminary fault analysis and paleostress evolution in the Makran Fold-and-Thrust Belt in Iran. In *Lithosphere dynamics and sedimentary basins: The Arabian Plate and analogues*, Springer, Berlin, Heidelberg, p. 261-277.

-Flint, R.F., 1971. *Glacial and Quaternary geology*, John Wiley and Sons Inc., New York, USA, 456 p.

-Farhoudi, G. and Karig, D.E., 1977. Makran of Iran and Pakistan as an active arc system. *Geology*, v. 5(11), p. 664-668.

- Frohling, E. and Szeliga, W., 2016. GPS constraints on interplate locking within the Makran subduction zone. *Geophysical Supplements to the Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 205(1), p. 67-76.
- Ghasemi, M.R., 1996. Geology map of Negour and Juvani. Geological Survey of Iran.
- Gonzalez, P.J., Fernandez, J. and Camacho, A.G., 2009. Coseismic three-dimensional displacements determined using SAR data: theory and an application test. *Pure and Applied Geophysics*, v. 166(8-9), p. 1403-1424.
- Harms, J.C., Cappel, H.N. and Francis, D.C., 1984. The Makran coast of Pakistan: its stratigraphy and hydrocarbon potential. *Marine geology and oceanography of Arabian Sea and coastal Pakistan*, v. 3, p. 41-77.
- Hoffmann, G., Reicherter, K., Wiatr, T., Grützner, C. and Rausch, T., 2013. Block and boulder accumulations along the coastline between Fins and Sur (Sultanate of Oman): tsunamigenic remains? *Natural hazards*, v. 65(1), p. 851-873.
- Hooper, A.J., 2006. Persistent scatter radar interferometry for crustal deformation studies and modeling of volcanic deformation.
- Khan, M.A., Bendick, R., Bhat, M.I., Bilham, R., Kakar, D.M., Khan, S.F., Lodi, S.H., Qazi, M.S., Singh, B., Szeliga, W. and 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*, v. 41, p. 71-87.
- Kopp, C., Fruehn, J., Flueh, E.R., Reichert, C., Kukowski, N., Bialas, J. and Klaeschen, D., 2000. Structure of the Makran subduction zone from wide-angle and reflection seismic data. *Tectonophysics*, v. 329(1-4), p. 171-191.
- Marghany, M. and Hashim, M., 2009. Differential synthetic aperture radar interferometry (DInSAR) for 3D coastal geomorphology reconstruction. *International Journal of Computer Science and Network Security*, v. 9(5), p. 59-63.
- Masson, F., Anvari, M., Djamour, Y., Walpersdorf, A., Tavakoli, F., Daignieres, M., Nankali, H. and 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*, v. 170(1), v. 436-440.
- Meyer, F.J. and Sandwell, D.T., 2012. SAR interferometry at Venus for topography and change detection. *Planetary and Space Science*, v. 73(1), p. 130-144.
- Mokhtari, M., 2005. Seismological aspect and EWS of tsunami prone area of Iranian coasts with special emphases on Makran (Sea of Oman). In *International Symposium of Disaster Reduction on Coasts Scientific-Sustainable-Holistic-Accessible*, p. 14-16.
- Mousavi, Z., Masoumi, Z. and Rezaei, A., 2020. Investigation of Qom plain subsidence using synthetic aperture radar Interferometry and aquifer hydrogeological characterization. *Geosciences*, v. 29(114), p. 251-258.
- Murray-Wallace, C.V. and Woodroffe, C.D., 2014. *Quaternary sea-level changes: a global perspective*. Cambridge University Press, 127 p.
- Normand, R., Simpson, G., Herman, F., Biswas, R.H., Bahroudi, A. and Schneider, B., 2019. Dating and morphostratigraphy of uplifted marine terraces in the Makran subduction zone (Iran). *Earth Surface Dynamics*, v. 7(1), p. 321-344.

- Normand, R., Simpson, G. and Bahroudi, A., 2019. Pleistocene coastal evolution in the Makran subduction zone. *Frontiers in Earth Science*, v. 7(186).
- Platt, J.P. and Leggett, J.K., 1986. Stratal extension in thrust footwalls, Makran accretionary prism: implications for thrust tectonics. *AAPG Bulletin*, v. 70(2), p. 191-203.
- Shad Manaman, N., Shomali, H. and Koyi, H., 2011. New constraints on upper-mantle S-velocity structure and crustal thickness of the Iranian plateau using partitioned waveform inversion. *Geophysical Journal International*, v. 184(1), p. 247-267.
- Shirani, K. and Khoshbaten, M., 2016. The study and monitoring of an active landslide using differential interferometry synthetic aperture RADAR (Case study: Noghol landslide, Semirum), *Quaternary Journal of Iran*, v. 2(1), p. 53-65.
- Shroder, J.R., 2002. *Himalaya to the sea: geology, geomorphology and the Quaternary*, Routledge, 205 p.
- Vernant, P., Nilforoushan, F., Hatzfeld, D., Abbassi, M.R., Vigny, C., Masson, F., Nankali, H., Martinod, J., Ashtiani, A., Bayer, R. and Tavakoli, F., 2004. Present-day crustal deformation and plate kinematics in the Middle East constrained by GPS measurements in Iran and northern Oman. *Geophysical Journal International*, v. 157(1), p. 381-398.
- Vita-Finzi, C., 1980. 14 C dating of recent crustal movements in the Persian Gulf and Iranian Makran, *Radiocarbon*, v. 22(3), p. 763-773.
- Vita Finzi, C., 1979. Contributions to the Quaternary Geology of Southern Iran. *Geological and mineral survey of Iran, Report*, v. 47, p. 30-47.
- Wesson, R.L., Melnick, D., Cisternas, M., Moreno, M. and Ely, L.L., 2015. Vertical deformation through a complete seismic cycle at Isla Santa Maria, Chile. *Nature Geoscience*, v. 8(7), p. 547-551.
- White, R.S. and Loudon, K.E., 1982. The Makran continental margin: structure of a thickly sedimented convergent plate boundary: convergent margins: field investigations of margin structure and stratigraphy.
- White, R.S. and Ross, D.A., 1979. Tectonics of the western Gulf of Oman. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, v. 84(B7), p. 3479-3489.