تحلیل تغییرات ژئومورفولوژیکی و دینامیک زمین در جزیره تنب بزرگ با تکیه بر داده‌های تداخل‌سنجی راداری: رویکردی به سوی توسعه پایدار

دکتر ابوالقاسم گورابی

دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران،

چکیده:

جزیره تنب بزرگ به‌عنوان یکی از گنبدهای نمکی فعال در خلیج فارس، دستخوش تغییرات ژئومورفولوژیکی قابل‌توجهی است که پایداری زمین و توسعه پایدار زیرساخت‌های آن را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در این مطالعه، با بهره‌گیری از تکنیک تداخل‌سنجی راداری (InSAR) و پردازش داده‌های ماهواره‌ای **سنتینل-۱** طی بازه زمانی **۲۰۱۴ تا ۲۰۲۰**، نرخ تغییرات دینامیک زمین شامل **بالاآمدگی و نشست** در این جزیره تحلیل شده است. از الگوریتم **PSInSAR**برای پردازش داده‌ها و استخراج نقاط پایدار استفاده شد که دقت بالایی در شناسایی تغییرات جزئی سطح زمین دارد. نتایج نشان داد که **بخش‌های شمالی جزیره** بیشترین نرخ بالاآمدگی با حداکثر مقدار **۳۵,۸۳ میلی‌متر در سال** را تجربه کرده‌اند که ناشی از فعالیت‌های تکتونیک نمکی در گنبد زیرسطحی است. در مقابل، نشست زمین در مناطقی مانند **اسکله** با نرخ **۷,۲- میلی‌متر در سال** مشاهده شد که احتمالاً تحت تأثیر عوامل انسانی و بارگذاری سازه‌ای رخ داده است. علاوه بر این، تغییرات در **باند فرودگاه** به‌صورت ترکیبی از بالاآمدگی و نشست بوده و نیاز به پایش دقیق و اقدامات تثبیت‌کننده دارد. تحلیل نقشه‌های تغییرات نشان داد که نرخ تغییرات به‌طور کلی **پایدار** بوده اما در برخی نقاط، تغییرات ناگهانی رخ داده است. این تغییرات تهدیدی جدی برای زیرساخت‌های حیاتی جزیره محسوب می‌شوند و نیاز به برنامه‌ریزی توسعه پایدار و مدیریت کاربری اراضی متناسب با نرخ تغییرشکل دارند. در نهایت، این مطالعه اهمیت پایش مداوم و استفاده از داده‌های بلندمدت InSAR را برای پیش‌بینی رفتار گنبدهای نمکی و مدیریت مناطق ناپایدار در جزایر مشابه خلیج فارس برجسته می‌کند. نتایج این تحقیق می‌تواند به‌عنوان مرجع مهمی برای برنامه‌ریزی توسعه پایدار در جزایر دارای ساختارهای زمین‌شناسی مشابه مورد استفاده قرار گیرد.

واژگان کلیدی: تداخل‌سنجی راداری، PSInSAR، تغییرات ژئومورفولوژیکی، گنبد نمکی، توسعه پایدار، جزیره تنب بزرگ

۱. مقدمه:

جزایر خلیج فارس به‌عنوان بخش مهمی از قلمرو جغرافیایی ایران، همواره از اهمیت ژئواستراتژیک، اقتصادی و محیط‌زیستی برخوردار بوده‌اند. در این میان، جزیره تنب بزرگ با ساختار **گنبد نمکی** خود، نمونه‌ای از پدیده‌های زمین‌شناسی پیچیده است که تغییرات ژئومورفولوژیکی آن به دلیل فعالیت‌های تکتونیکی و عوامل انسانی قابل‌توجه بوده است. تغییرات دینامیکی زمین مانند **بالاآمدگی و نشست** در این مناطق می‌توانند بر زیرساخت‌ها و کاربری‌های اراضی تأثیرات مخربی داشته باشند و برنامه‌ریزی‌های توسعه پایدار را با چالش‌هایی مواجه سازند. بررسی این تغییرات با استفاده از فناوری‌های نوین مانند تداخل‌سنجی راداری (InSAR) امکان پایش دقیق و کم‌هزینه تغییرات سطح زمین را در بازه‌های زمانی مختلف فراهم می‌کند (Ferretti et al., 2001: 67). تاکنون مطالعات معدودی در خصوص تغییرات ژئومورفولوژیکی جزایر خلیج فارس انجام شده است و تنها یک تحقیق با داده‌های ماهواره‌ای Envisat به این موضوع پرداخته است. پژوهش حاضر با استفاده از تکنیک پیشرفته **PSInSAR**و داده‌های سنتینل-۱ در بازه زمانی **۲۰۱۴ تا ۲۰۲۰** به تحلیل تغییرات دینامیک زمین در جزیره تنب بزرگ می‌پردازد.

[Downloaded from igapg.khu.ac.ir on 2025-02-11]

فعالیت‌های تکتونیکی گنبدهای نمکی یکی از مهم‌ترین عوامل تغییرات سطح زمین در مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شود. این گنبدها به دلیل **رفتار پلاستیک و چگالی پایین نمک** نسبت به لایه‌های بالایی، در معرض نیروهای تکتونیکی به سمت سطح زمین حرکت می‌کنند و باعث بالاآمدگی می‌شوند(Jackson & Talbot, 1991: 45). در جزیره تنب بزرگ، تغییرات ناشی از تکتونیک نمکی می تواند موجب بالاآمدگی گردد. از طرفی، نشست زمین نیز ناشی از انحلال در مناطقی به‌عنوان چالش‌های مهم ژئومورفولوژیکی مطرح شوند. این پدیده‌ها می‌توانند تحت تأثیر عوامل انسانی مانند بارگذاری سازه‌ای، برداشت آب‌های زیرزمینی یا تغییرات کاربری اراضی رخ دهند. مطالعات ژئومورفولوژیکی چنین مناطقی از منظر **توسعه پایدار** بسیار حائز اهمیت است زیرا می‌تواند برنامه‌ریزان و مدیران را در اتخاذ تصمیمات بهینه یاری رساند.

استفاده از تکنیک‌های تداخل‌سنجی راداری، به‌ویژه **PSInSAR**، یکی از کارآمدترین روش‌ها برای پایش و تحلیل تغییرات سطح زمین است(Goorabi et all , 2020 :33). این روش با شناسایی پراکنده‌های پایدار بر سطح زمین و مقایسه فاز امواج راداری در تصاویر ماهواره‌ای، نرخ تغییرات جابجایی زمین را با دقت بسیار بالایی استخراج می‌کند (Berardino et al., 2002: 40).

هدف اصلی این مطالعه، ارائه **تحلیل دقیق ژئومورفولوژیکی و دینامیک زمین** در جزیره تنب بزرگ و بررسی اثرات این تغییرات بر توسعه پایدار است. از نتایج این پژوهش می‌توان برای مدیریت بهینه زیرساخت‌ها، پایش مداوم مناطق حساس و برنامه‌ریزی کاربری‌های اراضی متناسب با نرخ تغییرشکل استفاده کرد. همچنین این تحقیق می‌تواند الگویی برای مطالعات مشابه در سایر جزایر خلیج فارس که تحت تأثیر فعالیت‌های تکتونیکی گنبدهای نمکی هستند، ارائه دهد. در نهایت، پایش بلندمدت با استفاده از داده‌های SAR و مطالعات ژئوفیزیکی تکمیلی مانند لرزه‌نگاری و گرانی‌سنجی پیشنهاد می‌شود تا رفتار گنبد نمکی در بازه‌های زمانی آینده به‌طور دقیق پیش‌بینی و مدیریت شود.

۲. مفاهیم و چارچوب نظری:

تغییرات ژئومورفولوژیکی و دینامیک زمین در مناطق مختلف زمین‌شناختی، به‌ویژه در مناطق دارای ساختارهای گنبد نمکی، به دلیل پویایی طبیعی و دخالت‌های انسانی، از موضوعات اساسی در مطالعات ژئومورفولوژی و علوم زمین محسوب می‌شود. گنبدهای نمکی به‌عنوان پدیده‌های تکتونیکی، زمانی ایجاد می‌شوند که نیروی جانبی ناشی از لایه‌های نمک زیرسطحی، موجب حرکت صعودی آن به سمت سطح زمین می‌شود. این فرآیند که به **تکتونیک نمکی**[1] معروف است، در طول زمان سبب بالاآمدگی و تغییر شکل سطح زمین می‌شود (Jackson & Talbot, 1991: 45) . در این میان، تحلیل دقیق تغییرات سطح زمین نیازمند چارچوب نظری و مفهومی متناسب با **پایش دینامیک زمین** و ارتباط آن با توسعه پایدار است.

ژئومورفولوژی دینامیک به مطالعه تغییرات فرم‌های سطح زمین و فرآیندهای مؤثر بر آن در طول زمان می‌پردازد. تغییرات سطح زمین در مناطقی مانند جزایر دارای گنبدهای نمکی ناشی از ترکیب عوامل تکتونیکی و محیطی است. در گنبدهای نمکی، فرآیند **دیاپیریسم**[2] به دلیل فشار کمتر و رفتار پلاستیک نمک موجب می‌شود تا نمک از اعماق زمین به سطح حرکت کند و موجب **بالاآمدگی** شود (Jackson & Hudec, 2017: 28) . این بالاآمدگی‌ها به‌مرور زمان بر زیرساخت‌ها و کاربری‌های اراضی تأثیر می‌گذارند و چالش‌هایی برای توسعه پایدار ایجاد می‌کنند. در مقابل، **نشست زمین** ممکن است ناشی از بارگذاری بیش‌ازحد سازه‌ها، برداشت آب‌های زیرزمینی یا فعالیت‌های انسانی باشد که تعادل ژئومورفولوژیکی منطقه را مختل می‌کند (Berardino et al., 2002: 40). برای تحلیل دقیق این تغییرات، **تکنیک‌های تداخل‌سنجی راداری (InSAR)**به‌عنوان یکی از پیشرفته‌ترین فناوری‌ها در پایش تغییرات سطح زمین معرفی شده‌اند. در این میان، الگوریتم

[1] Salt Tectonics
[2] Diapirism

[Downloaded from igapg.khu.ac.ir on 2025-02-11]

PSInSAR (Persistent Scatterer InSAR)به دلیل دقت بالا در شناسایی پراکنده‌های پایدار و استخراج نرخ جابجایی سطح زمین در مقیاس میلی‌متری، به‌طور گسترده در مطالعات ژئومورفولوژیکی و پایداری زمین استفاده می‌شود (Ferretti et al., 2001: 67). چارچوب نظری این پژوهش بر اساس **پایش تغییرات دینامیک زمین** و ارزیابی اثرات آن بر توسعه پایدار است.

توسعه پایدار به معنای مدیریت بهینه منابع طبیعی و زیرساخت‌ها با توجه به پایداری در طول زمان است. تغییرات دینامیک زمین در مناطقی مانند جزیره تنب بزرگ که دارای ساختار گنبد نمکی است، تهدیدی جدی برای زیرساخت‌های حیاتی مانند اسکله، باند فرودگاه و دیگر کاربری‌های اراضی محسوب می‌شود. بر این اساس، چارچوب نظری این پژوهش شامل **سه محور کلیدی** است:

۱. **تحلیل ژئومورفولوژیکی و تغییرات دینامیک زمین** با استفاده از داده‌های تداخل‌سنجی راداری.

۲. **بررسی تأثیر تغییرات بر زیرساخت‌ها و کاربری‌های اراضی** و میزان پایداری آن‌ها.

۳. **ارائه راهکارهایی برای پایش و مدیریت توسعه پایدار** مناطق مشابه، به‌ویژه جزایر دارای ساختارهای زمین‌شناختی حساس مانند گنبدهای نمکی.

با توجه به اینکه مناطق دارای ساختار گنبد نمکی از نظر تغییرات دینامیک سطح زمین بسیار فعال هستند، نتایج این پژوهش می‌تواند به‌عنوان یک چارچوب نظری برای برنامه‌ریزی توسعه پایدار در جزایر مشابه خلیج فارس و دیگر مناطق جهان مورد استفاده قرار گیرد.

۳. روش تحقیق:

جزیره **تنب بزرگ**، به‌عنوان منطقه مورد مطالعه در این تحقیق، یکی از جزایر مهم خلیج فارس است که در محدوده **تنگه هرمز** و در جنوب استان هرمزگان قرار دارد. این جزیره به دلیل ویژگی‌های **زمین‌شناختی پیچیده** و ساختار **گنبد نمکی فعال** از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. همان‌گونه که در **شکل ۱** مشاهده می‌شود، تنب بزرگ در نزدیکی سایر جزایر مهم خلیج فارس از جمله **تنب کوچک** و **بوموسی** واقع شده و از نظر موقعیت جغرافیایی و استراتژیک، جایگاه مهمی دارد.

تنب بزرگ با مساحت حدود **۱۱ کیلومتر مربع** از جمله مناطق دارای **فعالیت دیاپیری** محسوب می‌شود. ساختار زیرسطحی نمکی جزیره و نیروهای تکتونیکی می تواند منجر به فرآیند **بالاآمدگی سطح زمین** در برخی نقاط آن شود. در مقابل، برخی نواحی می تواند دچار **نشست شوند** که می‌تواند ناشی از عوامل انسانی مانند بارگذاری بیش‌ازحد یا تغییرات سطح آب زیرزمینی و انحلال باشد.

همان‌طور که در **شکل ۱** مشخص است، این جزیره در موقعیتی قرار دارد که تغییرات سطح زمین می‌تواند تهدیدی جدی برای **مدیریت زمین** و **توسعه پایدار** محسوب شود. زیرساخت‌های مهم از جمله اسکله و باند فرودگاه که به‌طور مستقیم تحت تأثیر تغییرات ژئومورفولوژیکی قرار دارند، نیازمند پایش مستمر و مدیریت دقیق هستند.

شرایط اقلیمی منطقه نیز از نوع **گرم و خشک** بوده و میزان بارندگی سالانه بسیار اندک است. این شرایط در کنار فعالیت‌های **تکتونیکی گنبد نمکی**، می تواند موجب شود تا جزیره تنب بزرگ به یکی از مناطق حساس و پویا از نظر **تغییرات دینامیک سطح زمین** تبدیل شود. با توجه به اهمیت این تغییرات، در این تحقیق از داده‌های ماهواره‌ای **سنتینل-۱** و تکنیک پیشرفته **PSInSAR**برای بررسی و تحلیل دقیق **نرخ بالاآمدگی و نشست زمین** در بازه زمانی **۲۰۱۴ تا ۲۰۲۰** استفاده شده است. نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش می‌تواند مبنایی برای مدیریت بهینه و توسعه پایدار در جزایر مشابه خلیج فارس باشد.

[Downloaded from igapg.khu.ac.ir on 2025-02-11]

شکل شماره ۱ موقعیت تنب بزرگ در خلیج فارس

۴. تجزیه و تحلیل یافته ها:

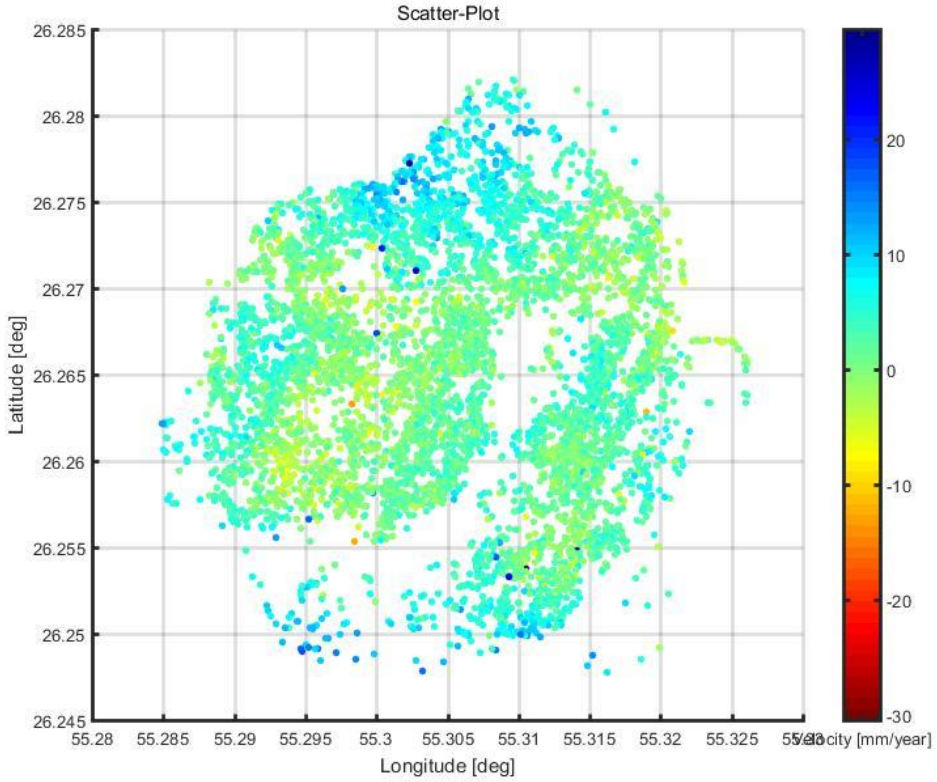
در این بخش، داده‌های به‌دست‌آمده از تحلیل تصاویر ماهواره‌ای **سنتینل-۱** با استفاده از تکنیک **PSInSAR** در بازه زمانی **۲۰۱۴ تا ۲۰۲۰** مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفته‌اند. نتایج به‌دست‌آمده در قالب نقشه‌ها و نمودارهای مختلف طبقه‌بندی و تحلیل شده که وضعیت **بالاآمدگی و نشست زمین** در جزیره تنب بزرگ را به‌طور دقیق نشان می‌دهد. این تجزیه‌وتحلیل در سه محور اصلی شامل **پراکنش نرخ تغییرات، تحلیل سری‌های زمانی ونرخ بالاآمدگی و نشست زمین، و پهنه‌بندی پایداری زمین** ارائه می‌شود.

۴-۱. پراکنش نرخ تغییرات

شکل ۲ نرخ تغییرات سطح زمین در جزیره تنب بزرگ را با استفاده از داده‌های ماهواره سنتینل-۱ و روش PSInSAR نشان می‌دهد. پراکنش تغییرات در بازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۰ در قالب نقاطی با مقیاس رنگی از ۳۰ - میلی‌متر در سال (نشست شدید) تا ۲۰+ میلی‌متر در سال (بالاآمدگی قابل‌توجه) دسته‌بندی شده است. تحلیل این نقشه نشان می‌دهد که نرخ تغییرات در سراسر جزیره به‌طور یکنواخت نبوده و نواحی مختلف با رفتارهای متفاوت از نظر دینامیک زمین مواجه هستند.

نواحی شمالی جزیره به‌طور برجسته‌ای بالاآمدگی نشان می‌دهند که با رنگ‌های آبی مشخص شده‌اند. این بالاآمدگی‌ها در نقاط متمرکزی قرار دارند و روند تغییرات در این بخش از جزیره تقریباً پیوسته است. بیشینه نرخ بالاآمدگی در این مناطق به حدود ۲۰ میلی‌متر در سال می‌رسد. این الگوی مشخص از تغییرات، به‌وضوح نتیجه حرکات صعودی گنبد نمکی زیرسطحی است که فشار لایه‌های زیرین زمین موجب تغییر شکل عمودی شده و سطح جزیره را بالا برده است.

[Downloaded from igapg.khu.ac.ir on 2025-02-11]



شکل شماره ۲ پراکنش نرخ تغییرات در جزیره تنب بزرگ

در بخش‌های جنوب غربی و شرقی جزیره، رفتار دینامیکی سطح زمین متفاوت است. این مناطق با نشست‌های پراکنده مواجه هستند که رنگ‌های زرد و نارنجی نشانگر آن است. نشست زمین در این نواحی در برخی نقاط به ۱۰- تا ۲۰- میلی‌متر در سال رسیده و توزیع این تغییرات به‌طور موضعی و غیرخطی مشاهده می‌شود. احتمالاً این نشست‌ها ناشی از فرسایش، تخریب موضعی بستر زمین یا فعالیت‌های ساخت‌وساز در مناطق حساس مانند اسکله اس.(شکل ۲ و۳).

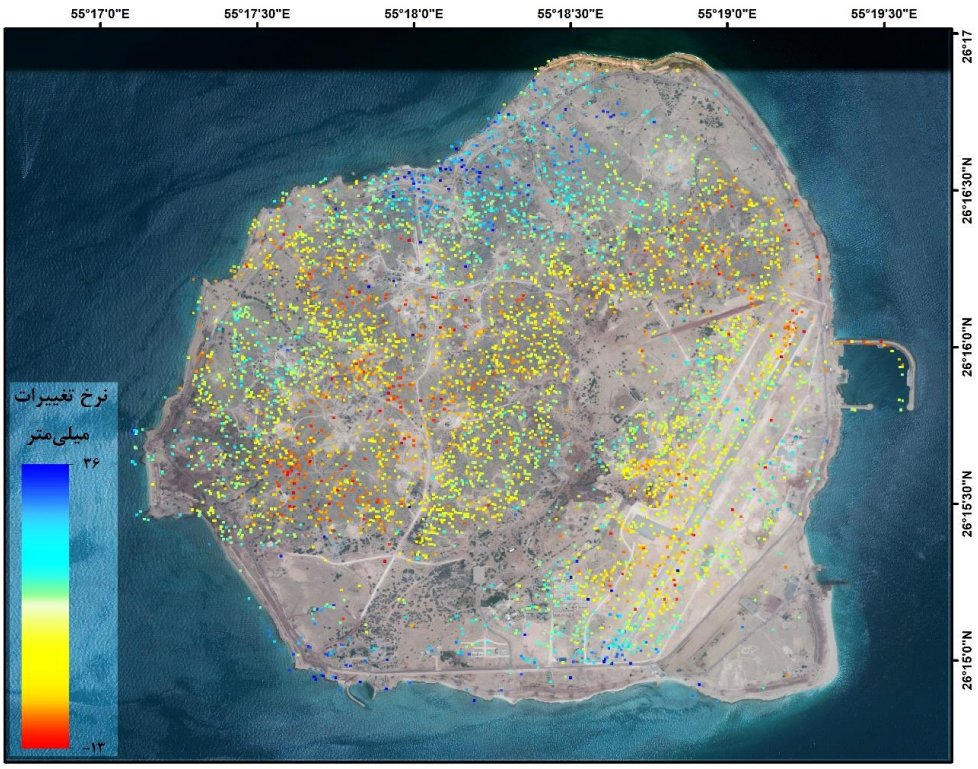
مناطق مرکزی جزیره برخلاف دیگر بخش‌ها، ثبات نسبی بیشتری دارند. نرخ تغییرات در این نواحی بسیار اندک و در محدوده ۵- تا ۵+ میلی‌متر در سال ثبت شده است که با رنگ‌های سبز روشن مشخص شده است. این ثبات می‌تواند ناشی از شرایط ژئومورفولوژیکی پایدارتر در این بخش و نبود فشارهای متمرکز تکتونیکی باشد. در این مناطق، به‌جز نقاط معدودی، رفتار سطح زمین همگن بوده و تغییرات محسوس مشاهده نمی‌شود.(شکل ۲ و۳).

پراکنش تغییرات سطح زمین در شکل فوق، الگوی ترکیبی از فرآیندهای طبیعی و انسانی را نشان می‌دهد. نواحی دارای نشست شدید به‌طور عمده در اطراف زیرساخت‌های انسانی مانند اسکله و باند فرودگاه مشاهده می‌شوند که احتمال تأثیر بارگذاری سنگین سازه‌ها در این نقاط را تقویت می‌کند. از سوی دیگر، بالاآمدگی در شمال جزیره، به دلیل حرکت‌های دیاپیری گنبد نمکی، بیشتر یک روند طبیعی است که با فعالیت‌های تکتونیکی منطقه همخوانی دارد.(شکل ۲ و۳).

شکل شماره ۳ توزیع مکانی **نرخ تغییرات سطح زمین** در جزیره تنب بزرگ را نشان می‌دهد. مقیاس رنگی به‌کاررفته، تغییرات سطحی زمین را در بازه **۱۳- میلی‌متر در سال (نشست)** تا **۲۶+ میلی‌متر در سال (بالاآمدگی)** نمایش می‌دهد. در بخش **شمالی و شمال‌غربی جزیره**، رنگ‌های آبی تیره نشان‌دهنده بیشترین میزان بالاآمدگی بوده که به دلیل

[Downloaded from igapg.khu.ac.ir on 2025-02-11]

فعالیت‌های تکتونیکی گنبد نمکی زیرسطحی رخ داده است. در مقابل، در نواحی **شرقی و جنوبی جزیره**، رنگ‌های زرد و نارنجی بیانگر نرخ‌های متوسط نشست زمین هستند که در برخی نقاط مانند **اسکله** و نواحی پیرامون باند فرودگاه شدت بیشتری دارد. مناطق مرکزی جزیره، که با رنگ‌های سبز متمایز شده‌اند، **تغییرات جزئی** و نزدیک به پایداری را تجربه کرده‌اند. این الگوها نشان‌دهنده **توزیع نامتقارن تغییرات** است که ناشی از فرآیندهای طبیعی (مانند دیاپیریسم نمک) و عوامل انسانی (مانند فعالیت‌های سازه‌ای) بوده و نیاز به پایش مستمر مناطق بحرانی دارد.



شکل شماره ۳ توزیع مکانی نرخ تغییرات در جزیره تنب بزرگ

این تحلیل بیانگر آن است که تغییرات دینامیکی سطح زمین در جزیره تنب بزرگ، از نظر شدت و پراکندگی متفاوت بوده و نیازمند پایش مستمر و مدیریت هدفمند در نواحی بحرانی است. نتایج این بخش می‌تواند در شناسایی مناطق پرخطر و برنامه‌ریزی اقدامات حفاظتی برای زیرساخت‌های حساس جزیره مؤثر باشد.(شکل ۲ و۳).

۴-۲. تحلیل سری‌های زمانی و نرخ بالاآمدگی و نشست زمین

شکل ۴ تغییرات نرخ بالاآمدگی و نشست زمین در نقاط کلیدی جزیره تنب بزرگ را نشان می‌دهد. این شکل شامل نقشه نرخ تغییرات (چپ) و نمودارهای سری زمانی مربوط به سه موقعیت **شمال جزیره، اسکله، و باند فرودگاه** (راست) است که روند تغییرات طی بازه زمانی **۲۰۱۴ تا ۲۰۱۹** را تحلیل می‌کند.

نقطه ۱ – شمال جزیره :

این منطقه بیشترین نرخ **بالاآمدگی** را تجربه کرده که برابر با **۲۲ میلی‌متر در سال** است. نمودار سری زمانی نشان می‌دهد که این روند صعودی تقریباً **خطی و پایدار** بوده و تغییرات به‌طور مداوم از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۹ ادامه داشته است. علت

[Downloaded from igapg.khu.ac.ir on 2025-02-11]

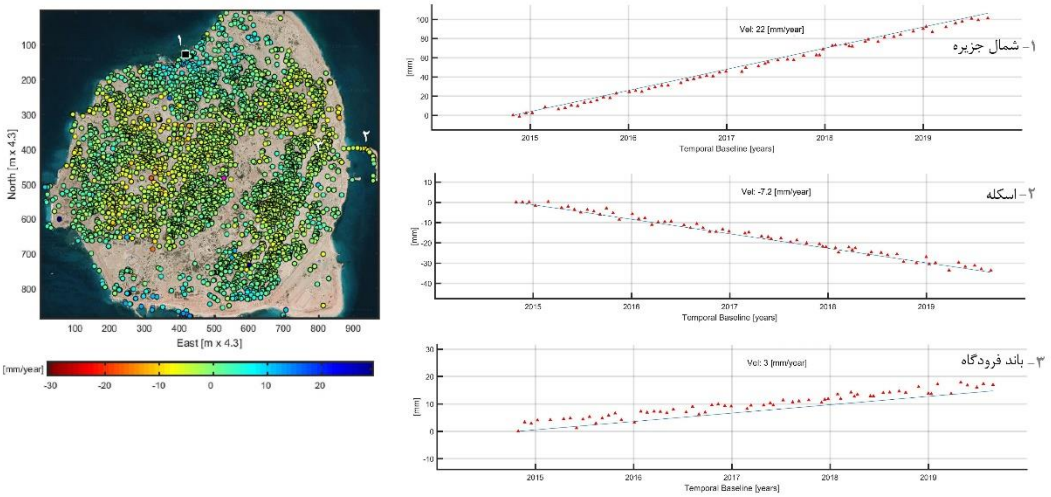
اصلی این بالاآمدگی، **حرکت صعودی گنبد نمکی زیرسطحی** در اثر فشارهای تکتونیکی است. این فرآیند، که به **دیاپیریسم نمکی** معروف است، در مناطقی مانند شمال جزیره که ساختار زمین‌شناختی گنبدی دارد، به‌شکل محسوسی رخ می‌دهد.

نقطه ۲ – اسکله :

در این منطقه، نرخ نشست زمین برابر با ۷٫۲- میلی‌متر در سال ثبت شده است. نمودار سری زمانی روند نزولی و تدریجی نشست را نشان می‌دهد که از سال ۲۰۱۴ شروع و تا ۲۰۱۹ ادامه داشته است. این نشست احتمالاً ناشی از فشارهای سازه‌ای و بارگذاری سنگین در این بخش از جزیره است. فعالیت‌های انسانی مانند ساخت اسکله، بارگذاری اضافی و عوامل فرسایشی نیز می‌توانند در تشدید این روند تأثیرگذار باشند.

نقطه ۳ – باند فرودگاه:

باند فرودگاه تغییراتی ترکیبی از بالاآمدگی جزئی و ثبات نسبی را نشان می‌دهد. بیشینه نرخ تغییرات در این ناحیه ۳ میلی‌متر در سال بالاآمدگی ثبت شده است. نمودار سری زمانی نشان می‌دهد که این روند با نوسانات خفیف اما افزایش ملایم و پایدار همراه بوده است. در بخش‌های شمالی باند فرودگاه نرخ بالاآمدگی بیشتر بوده، درحالی‌که در قسمت‌های جنوبی و میانی باند، روند تغییرات کمتر و پایدارتر است.



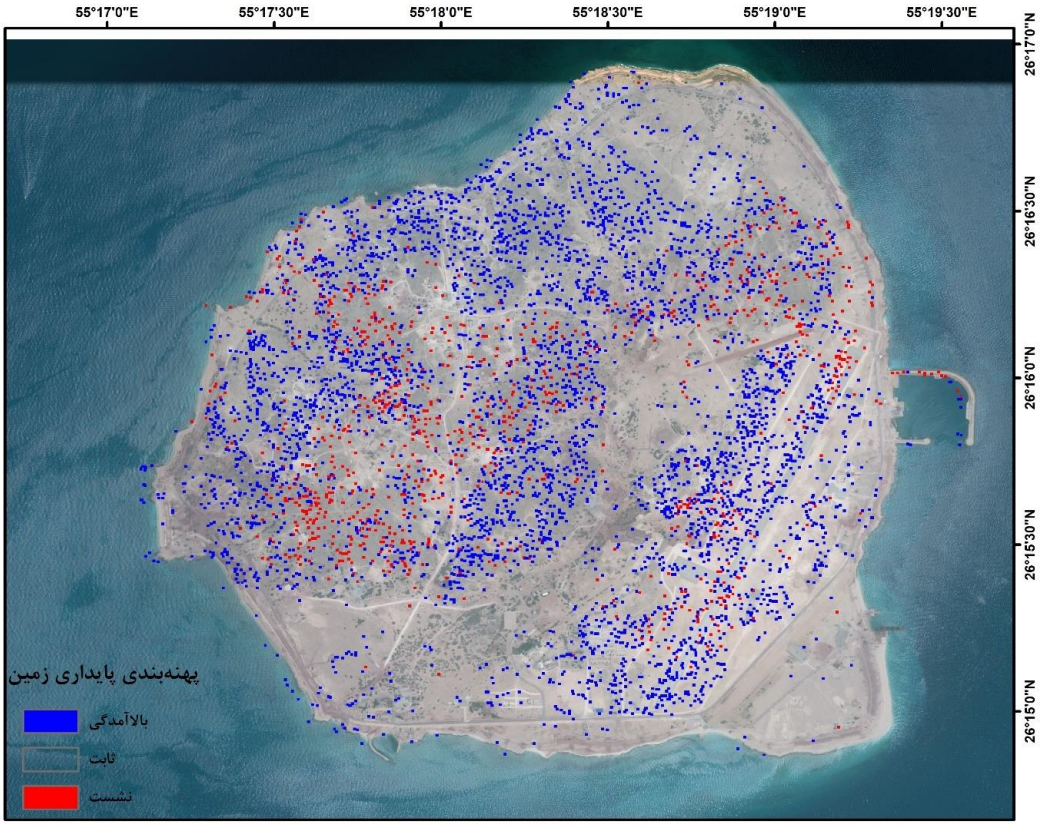
شکل شماره ۴ توزیع مکانی نرخ تغییرات در جزیره تنب بزرگ

نتایج حاصل از شکل ۴ نشان می‌دهد که بالاآمدگی در بخش شمال جزیره یک روند طبیعی مرتبط با حرکات تکتونیکی گنبد نمکی است. در مقابل، نشست در اسکله ارتباط مستقیم با عوامل انسانی و فشار سازه‌ای دارد. باند فرودگاه نیز، به‌عنوان زیرساختی حساس، تغییرات ترکیبی را تجربه می‌کند که نیازمند پایش مستمر و اقدامات مدیریتی برای جلوگیری از ناپایداری‌های آتی است. این تحلیل تأکید می‌کند که مناطق بحرانی مانند اسکله و باند فرودگاه باید به‌طور ویژه در اولویت اقدامات تثبیت و نظارت قرار گیرند.

۴-۳. پهنه‌بندی پایداری زمین

[Downloaded from igapg.khu.ac.ir on 2025-02-11]

در **شکل ۵ و شکل ۶**، پهنه‌بندی پایداری زمین در جزیره تنب بزرگ بر اساس تحلیل داده‌های تداخل‌سنجی راداری (InSAR)طی بازه زمانی **۲۰۱۴ تا ۲۰۲۰** ارائه شده است. این پهنه‌بندی به‌صورت سه طبقه **بالاآمدگی (آبی)، نشست (قرمز) و پایدار (خاکستری بدون رنگ)** نمایش داده شده و توزیع تغییرات مکانی در کل جزیره را نشان می‌دهد.



شمل شماره ۵ پهنه‌بندی پایداری زمین در جزیره تنب بزرگ

۱- مناطق دارای بالاآمدگی (نقاط آبی)

بر اساس شکل ۵، بیشترین پراکندگی نقاط بالاآمدگی در مناطق شمالی و شمال‌غربی جزیره مشاهده می‌شود. این مناطق به دلیل فعالیت تکتونیکی گنبد نمکی از پویایی بیشتری برخوردار هستند. در برخی نواحی، بالاآمدگی به‌طور متمرکز و همگن رخ داده است و در نقشه با رنگ آبی مشخص شده است. این وضعیت نیازمند پایش دقیق است زیرا بالاآمدگی‌های طولانی‌مدت می‌تواند بر روی شیب طبیعی زمین و جابجایی‌های سازه‌ای اثرگذار باشد.

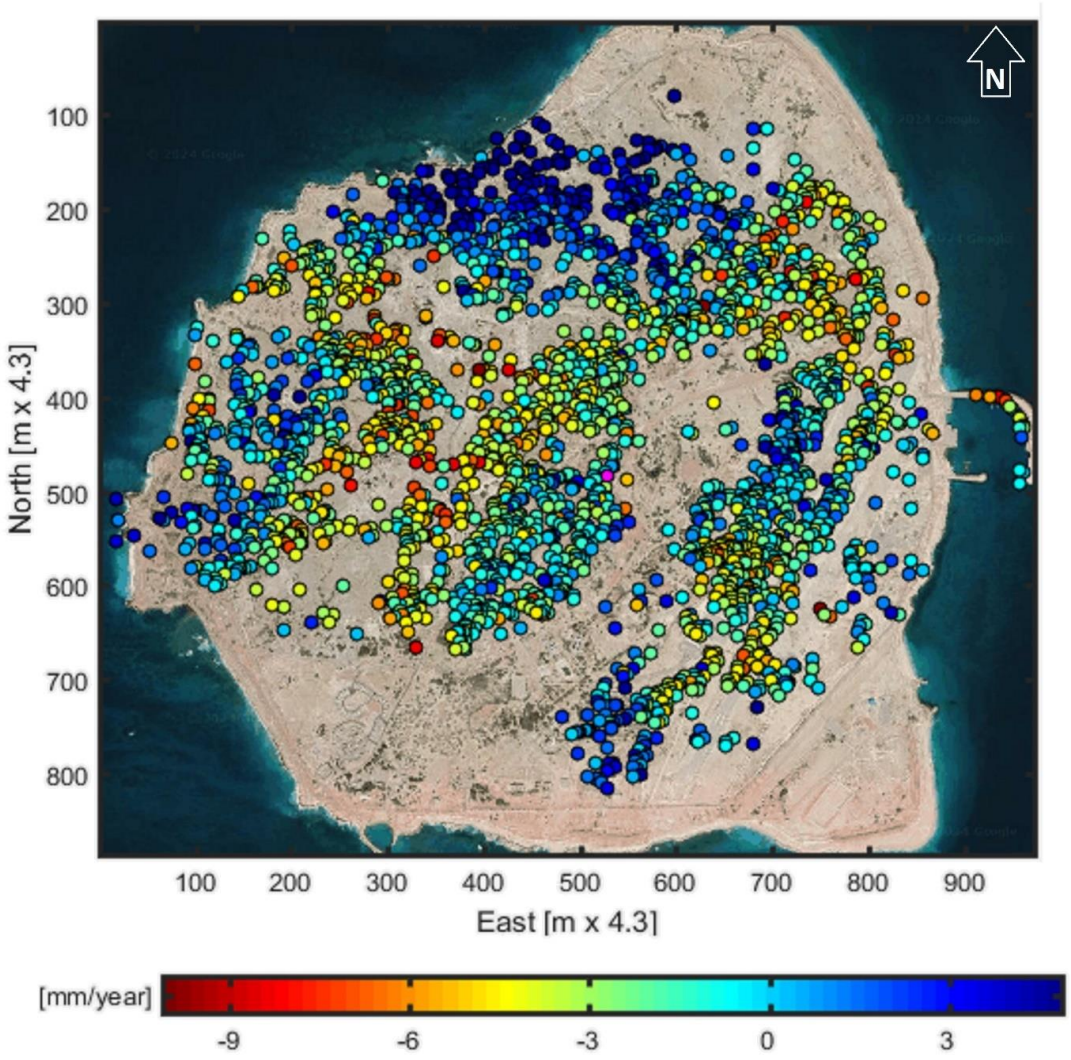
۲- مناطق دارای نشست (نقاط قرمز)

در شکل ۶، نشست زمین به‌طور مشخص در نواحی جنوب و جنوب‌شرقی جزیره، به‌ویژه در حوالی اسکله و بخش‌هایی از باند فرودگاه قابل‌مشاهده است. این نشست‌ها با رنگ قرمز نمایش داده شده و دارای الگوی پراکنده با نرخ‌های متفاوت هستند. نشست در این مناطق ممکن است تحت تأثیر بارگذاری سازه‌ای، تغییرات سطح آب زیرزمینی و فعالیت‌های انسانی رخ داده باشد. مناطق مذکور به دلیل آسیب‌پذیری زیرساخت‌ها در برابر نشست نیاز به اقدامات مدیریتی فوری دارند.

۳- مناطق پایدار (نقاط خاکستری)

[Downloaded from igapg.khu.ac.ir on 2025-02-11]

بخش‌های میانی جزیره و برخی مناطق محدود در شرق جزیره در نقشه با رنگ خاکستری مشخص شده‌اند که نشان‌دهنده ثبات نسبی سطح زمین در این نواحی است. در این مناطق، نرخ تغییرات در محدوده‌ای نزدیک به صفر قرار دارد و پایداری ژئومورفولوژیکی بیشتری در مقایسه با سایر بخش‌های جزیره دارند. این نقاط پایدار می‌توانند به‌عنوان پهنه‌های مناسب برای توسعه زیرساخت‌ها در نظر گرفته شوند.



شکل شماره ۶ پهنه‌های ناپایداری زمین در جزیره تنب بزرگ

الگوی کلی پهنه‌بندی پایداری زمین

نتایج نشان می‌دهد که تغییرات پایداری زمین در جزیره تنب بزرگ دارای الگوی غیرمتقارن است:

- بالاآمدگی در شمال و شمال‌غربی جزیره به‌صورت متمرکز و پایدار رخ می‌دهد.
- نشست در مناطق جنوب‌شرقی و اسکله به‌طور محلی و پراکنده مشاهده می‌شود.
- پایداری در نواحی مرکزی و میانی جزیره غالب است.

[Downloaded from igapg.khu.ac.ir on 2025-02-11]

این پهنه‌بندی به‌عنوان ابزاری برای شناسایی مناطق پرخطر و مناطق مناسب برای توسعه پایدار عمل می‌کند. مدیریت کاربری اراضی و نظارت مستمر در مناطق بحرانی (نواحی دارای نشست) و توجه به مناطق دارای بالاآمدگی شدید برای جلوگیری از تغییرات مخرب ضروری است. این تحلیل می‌تواند به برنامه‌ریزی بهینه برای پایداری زیرساخت‌ها و توسعه هماهنگ جزیره کمک کند.

۵. نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه که با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری (InSAR) و الگوریتم PSInSARبر مبنای داده‌های ماهواره‌ای سنتینل-۱ طی بازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۰ انجام شده است، نشان‌دهنده تغییرات ژئومورفولوژیکی و دینامیک زمین در جزیره تنب بزرگ می‌باشد. این تغییرات به‌طور مشخص در قالب بالاآمدگی‌های قابل‌توجه و نشست‌های موضعی قابل‌تفکیک است که عوامل طبیعی و انسانی در شکل‌گیری آن‌ها نقش مؤثری دارند.

۱. الگوی بالاآمدگی زمین:

بیشترین نرخ بالاآمدگی در شمال و شمال‌غرب جزیره مشاهده شد که به‌طور متمرکز و پایدار در طول دوره مطالعه ادامه داشته است. این بالاآمدگی‌ها که به حداکثر ۲۲ تا ۲۶ میلی‌متر در سال رسیده‌اند، به دلیل حرکات تکتونیکی گنبد نمکی زیرسطحی و فشارهای دیاپیری رخ داده است. این پدیده، ویژگی ژئومورفولوژیکی اصلی جزیره را تحت تأثیر قرار داده و به‌عنوان عامل طبیعی غالب در تغییرات سطح زمین شناسایی شد.

۲. الگوی نشست زمین:

نواحی جنوب شرقی، به‌ویژه اسکله و بخش‌هایی از باند فرودگاه، بیشترین میزان نشست را با نرخ ۷٫۲- میلی‌متر در سال تجربه کرده‌اند. نشست‌های موضعی این نواحی احتمالاً ناشی از فشارهای سازه‌ای، بارگذاری سنگین و تغییرات احتمالی در سطح آب زیرزمینی بوده که می‌تواند منجر به ناپایداری محلی زیرساخت‌ها شود. این مناطق به دلیل حساسیت بالا و نقش مهم زیرساختی، نیازمند پایش مستمر و مدیریت دقیق هستند.

۳. **پهنه‌بندی پایداری زمین:**

تحلیل پهنه‌بندی نشان داد که جزیره از نظر پایداری زمین به سه طبقه بالاآمدگی، نشست و پایدار تقسیم می‌شود.

- مناطق شمالی به‌عنوان نواحی بحرانی بالاآمدگی معرفی شدند.
- نواحی جنوبی و شرقی، به‌ویژه در اسکله و محدوده فرودگاه، به‌عنوان پهنه‌های دارای نشست موضعی شناسایی شدند.
- بخش‌های مرکزی جزیره به‌طور نسبی پایدار بوده و تغییرات قابل‌توجهی نداشتند که می‌تواند برای توسعه زیرساخت‌های پایدار مناسب باشد.

۴. تأثیر تغییرات بر توسعه پایدار:

این تغییرات ژئومورفولوژیکی تأثیرات بالقوه‌ای بر پایداری زیرساخت‌های موجود در جزیره دارند. بالاآمدگی‌ها می‌توانند موجب تغییرات شیب طبیعی زمین و ایجاد فشار در لایه‌های سطحی شوند، درحالی‌که نشست‌های موضعی ممکن است به تخریب زیرساخت‌ها و کاهش پایداری سازه‌ها منجر شوند. در این راستا، مدیریت کاربری اراضی و اقدامات تثبیت سازه‌ای برای نواحی حساس الزامی است.

۵. **پیشنهادات:**

- اجرای پایش بلندمدت با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای SAR مانند سنتینل-۱ و سایر منابع برای ارزیابی تغییرات آتی.

[Downloaded from igapg.khu.ac.ir on 2025-02-11]

- انجام مطالعات تکمیلی با استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی مانند لرزه‌نگاری و گرانی‌سنجی جهت بررسی تغییرات عمقی گنبد نمکی.
- اتخاذ اقدامات مدیریتی و تثبیت زیرساخت‌ها در مناطق دارای نرخ نشست بالا مانند اسکله و باند فرودگاه.
- برنامه‌ریزی توسعه پایدار بر اساس پهنه‌بندی زمین و در نظر گرفتن پایداری در مناطق دارای تغییرات کمتر.

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که جزیره تنب بزرگ به دلیل ساختار زمین‌شناختی ویژه خود و تأثیرات فعالیت‌های انسانی، نیازمند پایش مداوم و مدیریت علمی و هدفمند است تا بتوان از مخاطرات ناشی از تغییرات دینامیکی سطح زمین جلوگیری کرده و زمینه‌های توسعه پایدار این منطقه را فراهم کرد.

منابع و ماخذ:

- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., & Sansosti, E. (2002). A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(11).
- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., & Sansosti, E. (2002). A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(11).
- Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1).
- Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1).
- Goorabi, A., Karimi, M., Yamani, M., & Perissin, D. (2020). Land subsidence in Isfahan metropolitan and its relationship with geological and geomorphological settings revealed by Sentinel-1A InSAR observations. *Journal of Arid Environments*, 181, 104238. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104238
- Goorabi, A., Maghsoudi, Y., & Perissin, D. (2020). Monitoring of the ground displacement in the Isfahan, Iran, metropolitan area using persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar technique. *Journal of Applied Remote Sensing, 14*(4). https://doi.org/10.1117/1.JRS.14.044509
- Jackson, M. P. A., & Hudec, M. R. (2017). Salt Tectonics: Principles and Practice. Cambridge University Press.
- Jackson, M. P. A., & Talbot, C. J. (1991). A glossary of salt tectonics. *Geological Society of America Bulletin*, 103(10).
- Jackson, M. P. A., & Talbot, C. J. (1991). A glossary of salt tectonics. *Geological Society of America Bulletin*, 103(10).

[Downloaded from igapg.khu.ac.ir on 2025-02-11]

Analysis of Geomorphological Changes and Ground Dynamics in Greater Tunb Island Based on InSAR Data: An Approach Towards Sustainable Development

Abolghasem Goorabi

Address: Faculty of Geography, University of Tehran, Enqlab Avenue, P.O. Box: 1417853933, Tehran, Iran

goorabi@ut.ac.ir

Greater Tunb Island, as one of the active salt domes in the Persian Gulf, undergoes significant geomorphological changes that impact its ground stability and sustainable infrastructure development. In this study, the dynamics of ground deformation, including uplift and subsidence, were analyzed using **Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR)** and Sentinel-1 satellite data processing during the period **2014 to 2020**. The **PSInSAR algorithm** was applied to process the data and extract stable scatterer points, offering high precision in detecting subtle surface changes. The results revealed that the **northern parts** of the island experienced the highest rate of **uplift**, with a maximum value of **35.83 mm/year**, attributed to **salt tectonic activities** of the subsurface salt dome. In contrast, **land subsidence** was observed in areas such as the **port**, with a rate of **-7.2 mm/year**, likely caused by human activities and structural loading. Furthermore, deformation at the **airport runway** exhibited a combination of uplift and subsidence, indicating the necessity for precise monitoring and stabilization measures.Analysis of deformation maps showed that, while the overall rate of changes remained stable, certain areas experienced **sudden variations**. These changes pose a serious threat to the island's critical infrastructure and highlight the need for **sustainable development planning** and **land-use management** aligned with deformation rates. Finally, this study underscores the importance of continuous monitoring and the use of **long-term InSAR data** to predict the behavior of salt domes and manage unstable areas in similar islands across the Persian Gulf. The findings of this research can serve as a critical reference for planning sustainable development in islands with comparable geological structures.

Keywords: Radar Interferometry, PSInSAR, Geomorphological Changes, Salt Dome, Sustainable Development, Greater Tunb Island

[Downloaded from igapg.khu.ac.ir on 2025-02-11]