



## شناسایی شواهدی بر وجود گنبد نمکی مدفون و جدید در ناحیه زاگرس با استفاده از روش تداخل سنجی تصاویر راداری سنتینل-۱ و ایسار

علی مهربانی<sup>\*۱</sup>

۱. استادیار گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

### چکیده

گنبدهای نمکی یکی از زیباترین پدیده‌های طبیعی است. با وجود رخنمون یافتن تعداد زیادی گنبد نمکی در ناحیه زاگرس، هنوز بسیاری از آنها مدفون می‌باشند. به دلیل تکنیک فعال زاگرس، روند حرکتی و صعودی گنبدهای نمکی متوقف نشده و ادامه دارد. در این تحقیق با استفاده از روش تداخل سنجی راداری و باهدف پایش تغییرات پوسته زمین در ناحیه زاگرس، یکی از گنبدهای نمکی احتمالی در حال صعود مورد شناسایی قرار گرفت. بدین منظور از تصاویر راداری ایسار (ASAR) مربوط به سال‌های ۲۰۰۷ و ۲۰۱۲ و سنتینل-۱ (SENTINEL-1) مربوط به سال‌های ۲۰۱۴ و ۲۰۱۷ استفاده شد. جهت تعیین میزان تغییرات پوسته زمین ضمن انجام فرایند واپیچش فاز بر روی تصاویر، تداخل‌نگاشت هر یک از تصاویر استخراج شد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل تصاویر ایسار نرخ رشد گنبد نمکی مذکور بین سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۲ به میزان ۱/۶ سانتیمتر در سال بوده است. طبق تصاویر تداخل‌نگاشت به‌دست‌آمده از تصاویر سنتینل-۱ سرعت صعود این گنبد نمکی در بین سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۷ افزایش یافته و به ۲/۹ سانتیمتر در سال رسیده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که گنبد نمکی احتمالی، فعال بوده و در نتیجه به دلیل اهمیت گنبدهای نمکی در زمینه‌های مختلف منابع طبیعی به‌ویژه در تشکیل مخازن نفتی در منطقه زاگرس، و همچنین در جهت شناسایی بیشتر و دقیق‌تر موضوع، لازم است تا مطالعات ژئوفیزیکی ویژه‌ای در این محل انجام پذیرد.

### مشخصات مقاله

پیشینه مقاله:

دریافت: ۲۷ آبان ۱۳۹۷

پذیرش: ۲۷ دی ۱۳۹۷

دسترسی اینترنتی: ۳۰ بهمن ۱۳۹۷

واژه‌های کلیدی:

پردازش تصاویر راداری

تداخل‌نگاشت

توده نمکی مدفون

سجش‌ازدور

زاگرس

\* Mehrabi@uk.ac.ir: پست الکترونیکی مسئول مکاتبات

## مقدمه

گنبدهای نمکی یکی از پدیده‌های جالب ژئومورفولوژیکی در چشم‌انداز بعضی از مناطق می‌باشند. از نظر ژئومورفولوژیکی گنبدهای نمکی عوارض گنبدی شکل منظم و نامنظمی به وجود آورده‌اند که در بسیاری از نقاط ایران گسترش دارند. مهم‌ترین این گنبدها متعلق به سری هرمز واقع در جنوب ایران است (۱). در جنوب خاوری زاگرس، به‌ویژه در حدفاصل گسل کازرون در باختر و گسل میناب در خاور (حوزه فارس)، سنگ‌های پرکامبرین پسین رخساره کولابی-تبخیری دارند که نخستین بار توسط تاورنیه (۳۶) مطالعه شده است. با توجه به گستردگی پراکنش گنبدهای نمکی در ایران، و به‌خصوص در ناحیه زاگرس، مطالعه هر چه بیشتر این گنبدها اطلاعات ذی‌قیمتی را به ارمغان می‌آورد.

امروزه با پیشرفت علوم جغرافیایی و ورود هر چه بیشتر تکنولوژی‌های پیشرفته نظیر ماهواره‌ها، تصاویر ماهواره‌ای رقومی و نرم‌افزارهای تجزیه و تحلیل جغرافیایی، مطالعات ژئومورفولوژی نیز وجهه جدیدی به خود گرفته و می‌توان از این تکنولوژی‌ها در این عرصه سود جست. امروزه کاربرد تصاویر راداری در مطالعه و بررسی تغییرات ارتفاعی سطح زمین بسیار شدت گرفته است (۵، ۱۵، ۱۶ و ۲۷)، با توجه به ماهیت تصویربرداری راداری و به دلیل اینکه تصاویر راداری علاوه بر اندازه‌گیری شدت سیگنال، اطلاعات فازهای مختلف را نیز با خود همراه دارند، لذا می‌توان با استفاده از این اطلاعات و به روش تداخل سنجی (Interferometry) راداری، از آن‌ها در شناسایی فاز جابجایی استفاده کرد. از آنجائی که سطح زمین به‌مرور زمان دچار تغییرات ژئومورفولوژیکی مختلفی همچون فرورانش و بالاآمدگی به دلیل عوامل طبیعی متفاوتی می‌شود، و در اغلب روش‌های ژئودتیکی اندازه‌گیری جابجایی پوسته زمین از قبیل مثلث‌بندی سه‌پهلوی و سامانه موقعیت سنجی جهانی به ترازیبی و نقشه‌برداری‌های مکرر زمینی نیاز است، روش تداخل سنجی راداری در ضمن پوشش دادن منطقه وسیعی از زمین، احتیاج به نقشه‌برداری زمینی ندارد. از طرف دیگر در مقایسه با فنونی همچون سامانه

موقعیت سنج جهانی و ترازیبی که اندازه‌گیری نقطه‌ای به دست می‌دهند، این روش ضمن اینکه بیان دوبعدی از تغییرات سطح را عملی می‌سازد، وسعتش نسبت به روش‌های نقطه‌ای نیز بیشتر است (۴ و ۹). بنابراین با توجه به توانایی و قابلیت تصاویر رادار در تعیین میزان تغییرات و جابجایی‌های اتفاق افتاده بر روی سطح زمین در بازه زمانی خاص، می‌توان از این تصاویر در این زمینه به‌خوبی بهره برد و پایش این تغییرات با استفاده از روش تداخل سنجی راداری امکان‌پذیر است (۳، ۱۰، ۱۴، ۱۹، ۲۰ و ۳۷).

توده‌های نمکی به دلیل ویسکوزیته کمتری که نسبت به سنگ‌های اطراف خود دارند، همواره تمایل دارند تا از اعماق زمین به سمت بالا حرکت کنند. گسل‌ها و شکستگی‌های درون زمین، راه‌ها و مسیرهایی را جهت حرکت و نفوذ نمک به سمت بالا ایجاد می‌کنند (۱، ۱۸ و ۳۲). حرکت توده‌های نمکی به سمت بالا باعث ایجاد تغییر شکل در طبقات رسوبی بالای خود شده و ساختارهای ژئومورفولوژیکی زیادی از جمله ساختمان‌های گنبدی و طاقدیسی شکل، ایجاد می‌کنند. سرعت حرکت توده‌های نمکی بین ۰/۱ تا ۳ سانتیمتر در سال تخمین زده شده است (۷، ۱۷، ۳۴ و ۳۵).

در ناحیه زاگرس تعداد ۱۲۳ گنبد نمکی به سطح زمین رسیده و دیپیرهای زیبای را تشکیل داده‌اند (۳۳). ولیکن تعداد زیادی از گنبدهای نمکی به سطح زمین نرسیده‌اند ولی اکثر آن‌ها فعال بوده و روند صعودی و حرکت رو به بالا دارند (۱۲ و ۲۸). تاکنون مطالعات زیادی بر روی گنبدهای نمکی زاگرس انجام گرفته است، محمد پناه (۸) در مطالعه‌ای تحت عنوان استفاده از تداخل سنجی راداری برای بررسی جابجایی روانه‌های نمکی گرمسار-ایوانکی، میزان جابجایی توده نمکی گرمسار را با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری اندازه‌گیری کرده، ایشان نرخ جابجایی بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۷ به میزان ۵ سانتیمتر در سال اندازه‌گیری کردند. آفتابی و همکاران (۱۱) با استفاده از تصاویر راداری میزان جابجایی گنبد نمکی فعال سیاهو واقع در زاگرس را به‌طور متوسط سالی ۲/۲ سانتیمتر در سال تخمین زده‌اند. افشاری و همکاران (۲)

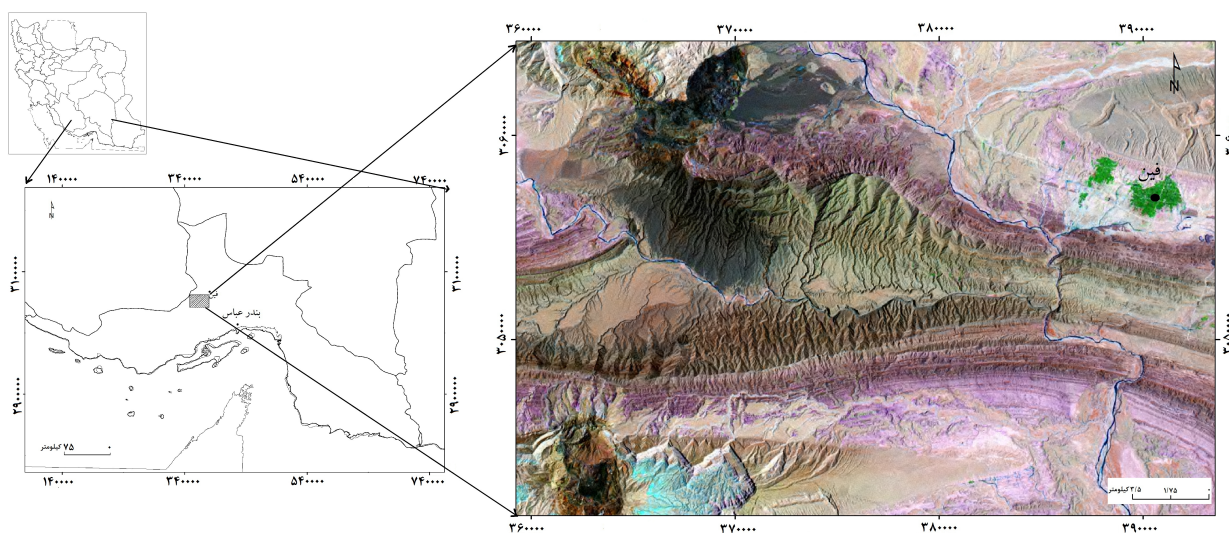
است در جهت شناسایی گنبد‌های نمکی پنهان و فعال در ناحیه زاگرس، با اعمال روش تداخل سنجی راداری بر روی تصاویر راداری ASAR و SENTINEL-1 تغییرات ارتفاعی سطح زمین، مورد پایش و تحلیل قرار گیرد.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه در پهنه ساختاری زاگرس مابین عرض جغرافیایی  $27^{\circ} 30'$  تا  $27^{\circ} 40'$  شمالی و طول جغرافیایی  $55^{\circ} 36'$  تا  $55^{\circ} 46'$  شرقی قرار دارد (شکل ۱). منطقه مورد مطالعه در استان هرمزگان واقع شده است. جاده دسترسی به این محدوده از طریق جاده بندرعباس به فین امکان‌پذیر است. از لحاظ ژئومورفولوژی این منطقه در بخش چین‌خورده زاگرس قرار داشته و پوشیده از طاق‌دیس‌ها و ناودیس‌هایی با روند تقریباً شرقی-غربی و شمال شرقی-جنوب غربی است.

در تحقیقی تحت عنوان پایش رشد و پیشروی گنبد‌های نمکی زمین‌شناسی به‌منظور تعیین شدت فعالیت آن‌ها با استفاده از تصاویر SAR (مطالعه موردی گنبد نمکی گچین)، فعالیت گنبد نمکی گچین را طی سه دوره زمانی بین سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۰ مورد بررسی قرار داده، ایشان با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی نرخ جابجایی را بین ۳ تا ۴ سانتی‌متر در سال اندازه‌گیری کرده‌اند. جهانی و همکاران (۲۸) با مطالعه گنبد‌های نمکی شرق استان فارس، آن‌ها را به لحاظ فعالیت و مراحل رشد به چندین دسته از جمله مدفون، فعال، فرسایش یافته و غیره تقسیم‌بندی کرده‌اند. کولون و همکاران (۱۹) تغییرات ارتفاعی سطح زمین ناشی از تحرک توده‌های نمکی زیرسطحی موجود در منطقه کوکا کشور چین را به کمک تکنیک تداخل‌سنجی راداری مورد بررسی قرار داده و نرخ بالآمدگی را ۵ سانتی‌متر در سال محاسبه کرده‌اند. با توجه به اینکه اکثر تحقیقات انجام‌گرفته، بر روی گنبد‌های نمکی رخنمون یافته بوده است؛ درحالی‌که بسیاری از گنبد‌های نمکی زاگرس هنوز مدفون بوده و بسیاری از آن‌ها می‌تواند در آینده بر روی زمین ظاهر شوند (۱۳، ۲۶، ۲۹ و ۳۰). در این تحقیق سعی شده



شکل ۱. محدوده مورد مطالعه

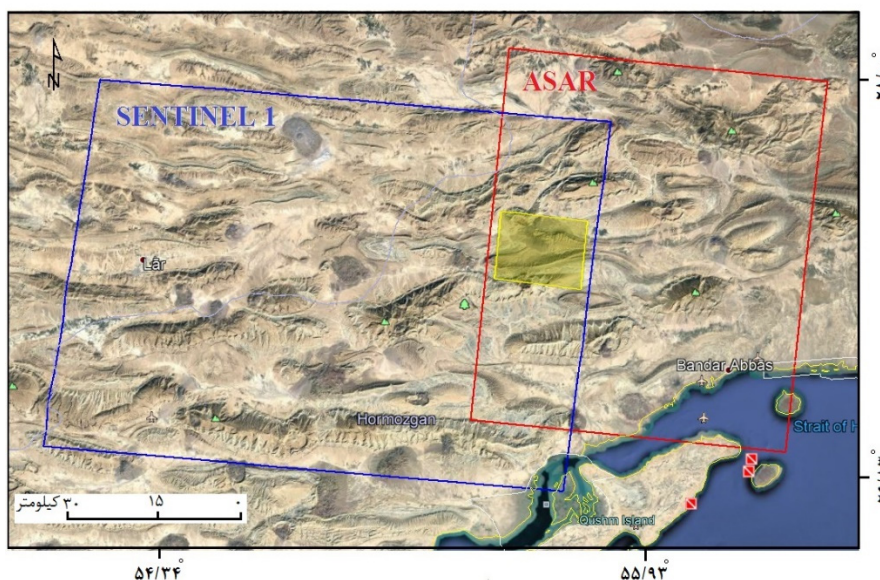
تصاویر راداری سنجنده ASAR، ماهواره Envisat سازمان فضایی اروپا با فرمت SLC تک منظر (Single looking

داده‌های مورد استفاده

در این پژوهش از دو سری داده راداری استفاده شد. یکی

تحقیق هدف پایش میزان بالآمدگی است، تنها از داده‌های نزولی استفاده شده است. دیگر داده مورد استفاده در پژوهش حاضر، تصاویر سنجنده SENTINEL-1، ماهواره Soyuz سازمان فضایی اروپا با فرمت SLC از نوع مد Image با پلاریزاسیون VV می‌باشد، که در تاریخ‌های ۲۰۱۴/۰۵/۰۳ و ۲۰۱۷/۰۹/۱۵ تصویربرداری شده و از طریق سایت داده‌های ماهواره‌ای سازمان فضایی اروپا (<https://scihub.copernicus.eu>) اخذ شده است. مدل ارتفاع رقومی ۳۰ متری SRTM برای منطقه مورد مطالعه استفاده شد. شکل ۲ موقعیت مکانی داده‌های مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد.

complex) از نوع مد Image با پلاریزاسیون VV، مربوط به تاریخ‌های ۲۰۱۲/۰۶/۲۷ و ۲۰۰۷/۰۴/۰۸ که با تنظیم و ارائه پروپوزال به سازمان فضایی اروپا (ESA) و پس از بررسی و موافقت آن‌ها، به وسیله نرم‌افزار EOLI-SA در اختیار قرار گرفت. این نوع داده‌ها داده‌های خامی هستند که تنها پردازش اولیه بر روی آن‌ها انجام گرفته و به تصاویر تک منظر تبدیل شده‌اند و اطلاعات آن‌ها به هیچ‌عنوان مخدوش نگردیده است. ترکیب داده‌های راداری از مدارهای صعودی و نزولی نیز جهت بهبود مدل‌های رقومی زمین یا به دست آوردن جابجایی‌ها در جهات مختلف با استفاده از اینترفرومتری می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به اینکه در این



شکل ۲. موقعیت فریم تصاویر ASAR و SENTINEL، منطقه مورد مطالعه در حد مشترک دو فریم

تصویر جدیدی حاصل می‌شود که تداخل سنج (Interferogram) نام دارد. تشکیل تداخل سنج یا اینترفروگرام اساس پردازش راداری است (۲۵). بدین منظور با استفاده از نرم‌افزار SARscape و SNAP، به پردازش تصاویر دو زمانه راداری مربوط به سنجنده Envisat و SENTINEL-1 با روش فوق اقدام گردید و حاصل این فرآیند با بهره‌گیری از محیط نرم‌افزاری ArcGIS® 10.3 علاوه بر استخراج نرخ و دامنه بالآمدگی، ناشی از حرکت گنبد‌های نمکی، پایگاه داده‌های

## روش تحقیق

در این تحقیق از روش تداخل سنجی راداری استفاده گردید. این روش در میان روش‌های زمینی و فضایی به‌عنوان کارآمدترین روش برای اندازه‌گیری تغییرات سطح زمین با دقت و قدرت تفکیک مکانی بسیار بالا به شمار می‌رود (۲۳). در تداخل سنجی راداری، فاز تصویر اخذ شده از موقعیت‌های تصویربرداری و یا زمان‌های تصویربرداری مختلف، پیکسل به پیکسل مقایسه می‌شود (۲۴). از تفاضل‌گیری بین این مقادیر،

سانتیمتر) و یا حذف آن به کمک تصاویر اپتیکی، اختلاف فاز دو تداخل نگار ( $\Phi\Delta D-int$ ) (تداخل نگار اصلی و مصنوعی) فقط بیان‌کننده مقادیر جابجایی سطح خواهد بود (۶). فلوجارت روش تحقیق در شکل ۳ ارائه شده است.

## نتایج

با انجام روش تداخل‌سنجی راداری بر روی تصاویر راداری مربوط به منطقه مورد مطالعه، تصاویر تداخل‌نگاشت مربوط به هر یک از تصاویر ASAR و SENTINEL تهیه شد (شکل ۴). همان‌طور که در شکل ۴ نشان می‌دهد در تصاویر تداخل‌نگاشت به‌دست‌آمده، حلقه‌هایی تشکیل شده است. از آنجایی که ماهواره‌های مورد استفاده هر دو در باند C کار می‌کنند، هر حلقه به‌دست‌آمده  $\lambda/2$  معادل  $2/8$  سانتی‌متر است، مقدار جابجایی در جهت دید ماهواره با شمردن تعداد حلقه‌ها به دست می‌آید. با توجه به نحوه قرارگیری سیکل رنگی مشاهده‌شده میزان جابجایی نیز متفاوت است، به‌طوری‌که اگر سیکل رنگی زرد-آبی-قرمز باشد، جابجایی دور از رادار و اگر سیکل رنگی زرد-قرمز-آبی باشد جابجایی به سمت رادار اتفاق افتاده است. قبل از اینکه از تداخل‌نگاشت تهیه‌شده بتوان نقشه جابجایی سطحی منطقه را تهیه کرد، باید با اعمال فیلتر Goldstein خطاهای احتمالی از جمله خطایی اسپیکل و نویز، را رفع نمود. از آنجاکه اطلاعات فاز یک تداخل‌نگاشت در مقیاس  $2\pi$  است، یک مشکل مبهم در محاسبه تعداد صحیح سیکل‌های فاز وجود دارد که جهت به دست آوردن فواصل، باید بازه مایل به مشاهدات فاز اضافه گردد. این حل ابهام به‌عنوان حل ابهام فاز (Phase unwrapping) شناخته می‌شود. به فرآیند بازیابی مقادیر فاز نامبهم و صحیح از یک مجموعه دوبعدی مقادیر فاز که در بازه  $(\pi, \pi^-)$  است، بازیابی فاز دوبعدی گفته می‌شود. و در نهایت با انجام و اعمال فیلتر و حل ابهام فاز، نقشه جابجایی رخداده در سطح زمین تهیه شد (شکل ۵). همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، مقدار بالآمدگی سطح زمین بین سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۲ در محل

مکانی ایجاد و پهنه‌بندی این پدیده در منطقه مورد مطالعه صورت گرفت.

## تداخل سنجی راداری

در این روش سنجنده، تصویر نخست (Master) را در زمان  $t_0$  ثبت و مقدار فاز آن را اندازه‌گیری می‌کند ( $M\Phi$ ). برای اندازه‌گیری مقدار تغییرات ارتفاعی سطح زمین، سنجنده تصویری دومی (Slave) در زمان  $t$  و با هندسه‌ای کاملاً شبیه به تصویر نخست اخذ کرده، مقدار فاز را بر روی آن اندازه‌گیری می‌کند ( $S\Phi$ ). روش تداخل سنجی تفاضلی تفاضل فاز  $\Phi$  و  $M\Phi$  را در فرم تداخل نگار فازی نمایش می‌دهد ( $\Delta\Phi_{int}$ ). در صورت ثابت و پایدار بودن سطح، تفاضل فاز این دو تصویر ( $SP-MP$ ) ناشی از تغییر موقعیت این دو سنجنده است و مقدار آن از رابطه ۱ محاسبه گردید.

$$\Delta\Phi_{int} = 4\pi \frac{SP-MP}{\lambda} \quad [1]$$

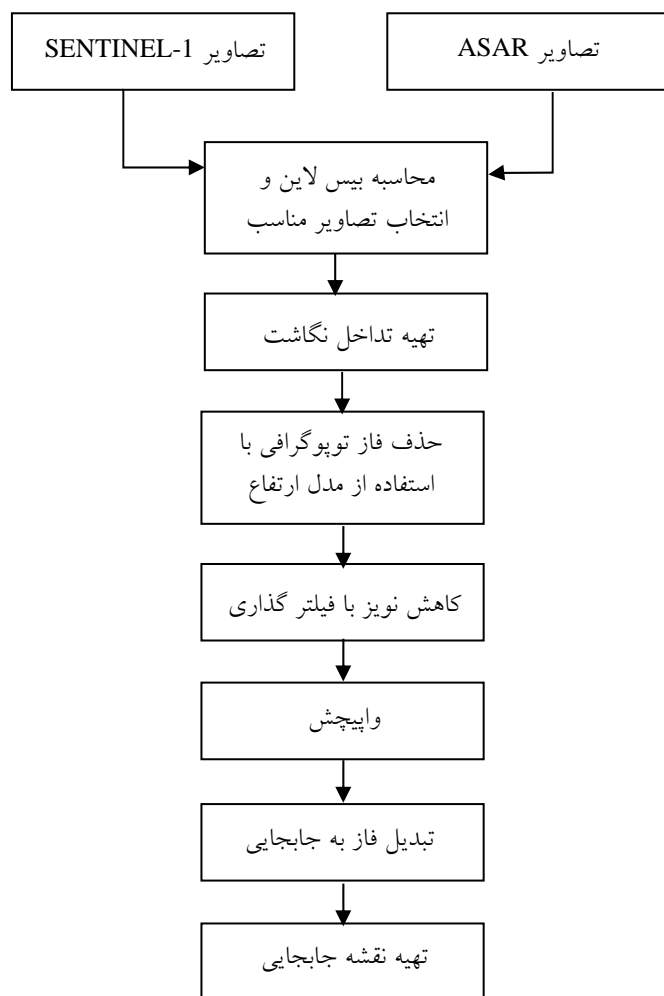
در اندازه‌گیری مقدار بالآمدگی به کمک این روش، سطح ناپایدار تصور شده، به‌طوری‌که سطح از P به P1 تنزل یافته است. تعیین مقدار جابجایی در فاصله زمانی دو تصویر ( $Dt$ ) تابع اختلاف فاز دو تصویر ( $\Delta\Phi_{int}$ ) به همراه فاز ناشی از اثر توپوگرافی ( $\Phi_{top}$ ) و فاز ناشی از جابجایی سطح ( $\Phi_{Mov}$ ) و همچنین فاز ناشی از اثر اتمسفر ( $\Phi_{Atm}$ ) خواهد بود (رابطه ۲).

$$\Delta\phi_{int} = 4\pi \frac{PS-PM}{\lambda} = \phi_{Top} + \phi_{Mov} + \phi_{Atm} \quad [2]$$

در این روش در صورت در اختیار نداشتن تصویر سوم، به کمک مدل رقومی ارتفاعی زمین و تبدیل ارتفاع به فاز، یک تداخل نگار مصنوعی تولید می‌شود و از این راه به کمک معکوس اطلاعات DEM اثر فاز ناشی از توپوگرافی محاسبه و از مقادیر اختلاف فاز حذف می‌شود. اختلاف فاز باقی‌مانده به اثر جابجایی سطح و اتمسفر تعلق دارد. در نهایت با نادیده انگاشتن اثر اتمسفر در جابه‌جایی‌های به میزان بالا (چند

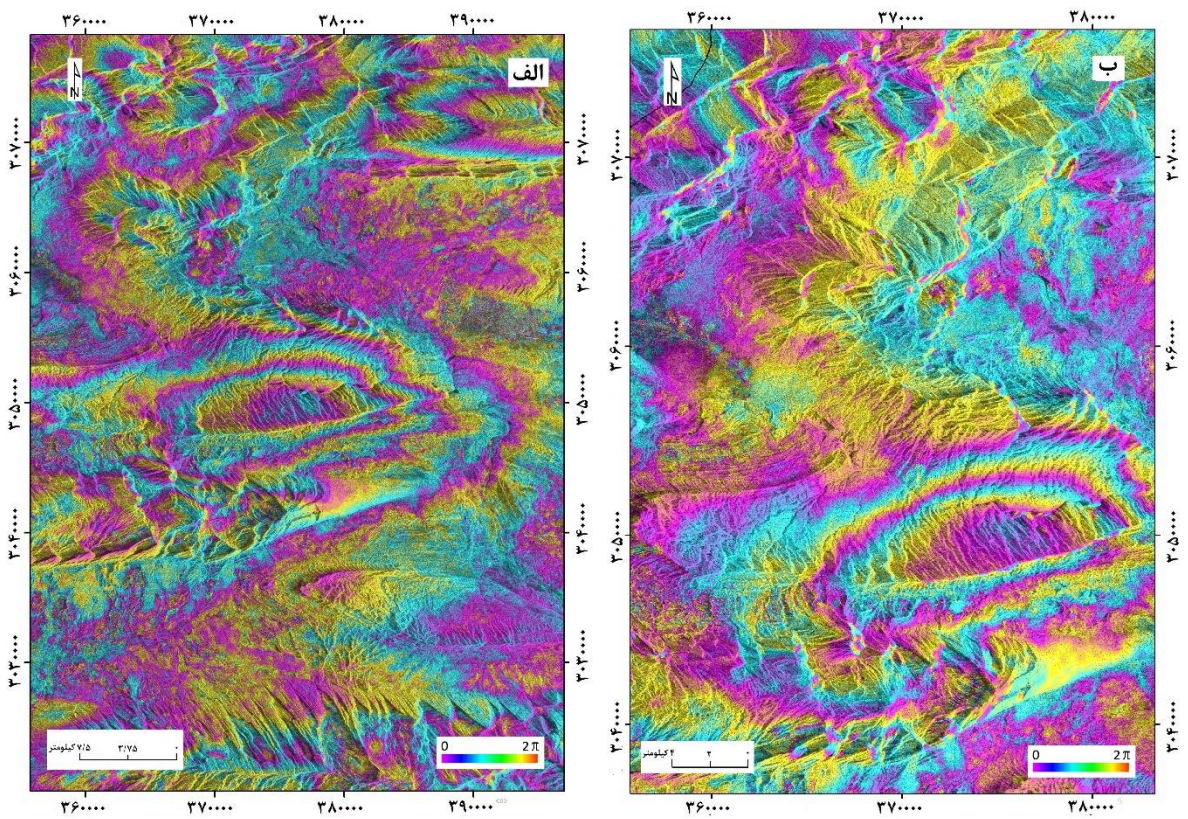
۲/۳ سانتیمتر در سال و در بخش‌های جنوب غربی منطقه، بوده است، بنابراین نرخ فرونشست نسبت به سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۲ تغییر عمده‌ای نداشته است. بر اساس شکل ۵ (الف) مساحت منطقه‌ای که دچار بالآمدگی شده در سال‌های اخیر افزایش داشته و به حدود ۲۰۰ کیلومتر مربع رسیده است. افزایش نرخ بالآمدگی پوسته در سال‌های اخیر مبین رخداد تغییراتی در اعماق ناحیه مورد مطالعه است. به منظور تحلیل نتایج به دست آمده موقعیت محدوده بالآمده بر روی نقشه گسل‌های اصلی منطقه ترسیم شد (شکل ۶). علاوه بر آن موقعیت این محدوده بر روی نقشه مراحل تکوین و رشد گنبد‌های نمکی مشخص شد که در شکل ۷ قابل مشاهده است.

حلقه‌های به دست آمده از تصاویر ASAR به میزان ۸/۴۸ سانتیمتر و در راستای دید ماهواره است. در حالی که میزان فرونشست به میزان ۱۲/۶ سانتیمتر و در بخش‌های شمالی محدوده مورد مطالعه اتفاق افتاده است. پس بر این اساس سالانه ۱/۶ سانتیمتر سطح زمین مرتفع شده است. طبق محاسبات انجام گرفته بر روی نقشه تغییرات ارتفاعی به دست آمده، منطقه‌ای در حدود مساحت ۱۰۰ کیلومتر مربع دچار بالآمدگی شده است. بر اساس تداخل نگاشت به دست آمده از تصاویر SENTINEL-1 بالآمدگی سطح زمین بین سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۷، ۹/۸۶ سانتیمتر بوده است. یعنی به طور متوسط سالی ۲/۹ سانتیمتر به ارتفاع محدوده مورد نظر اضافه شده است، در حالی که میزان فرونشست به طور متوسط

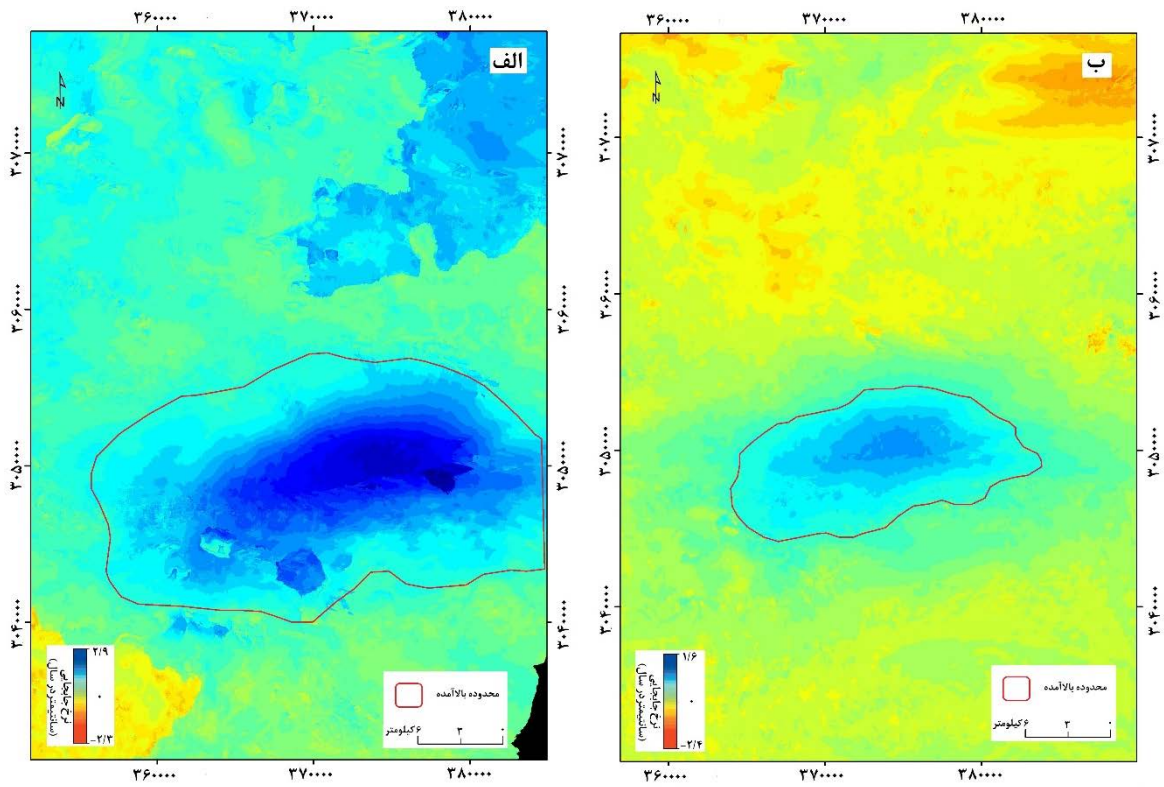


شکل ۳. چارت مراحل انجام تحقیق (۱۰)



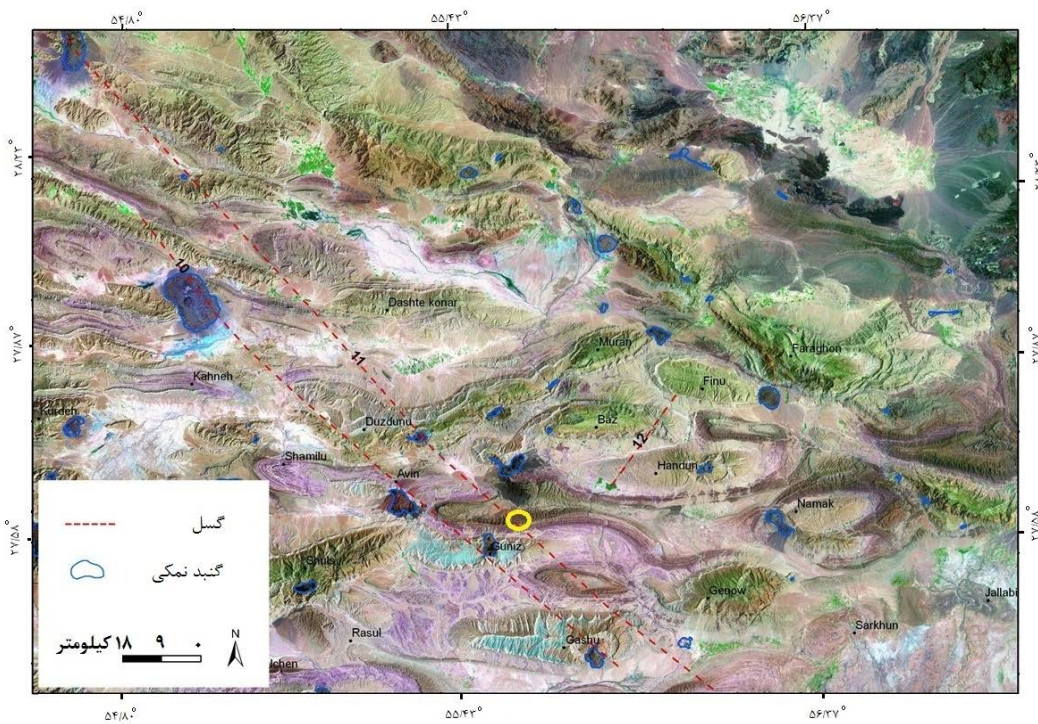


شکل ۴. تداخل نگاشت‌های منطقه مورد مطالعه؛ (الف) تصویر تداخل نگاشت SENTINEL، (ب) تصویر تداخل نگاشت ASAR

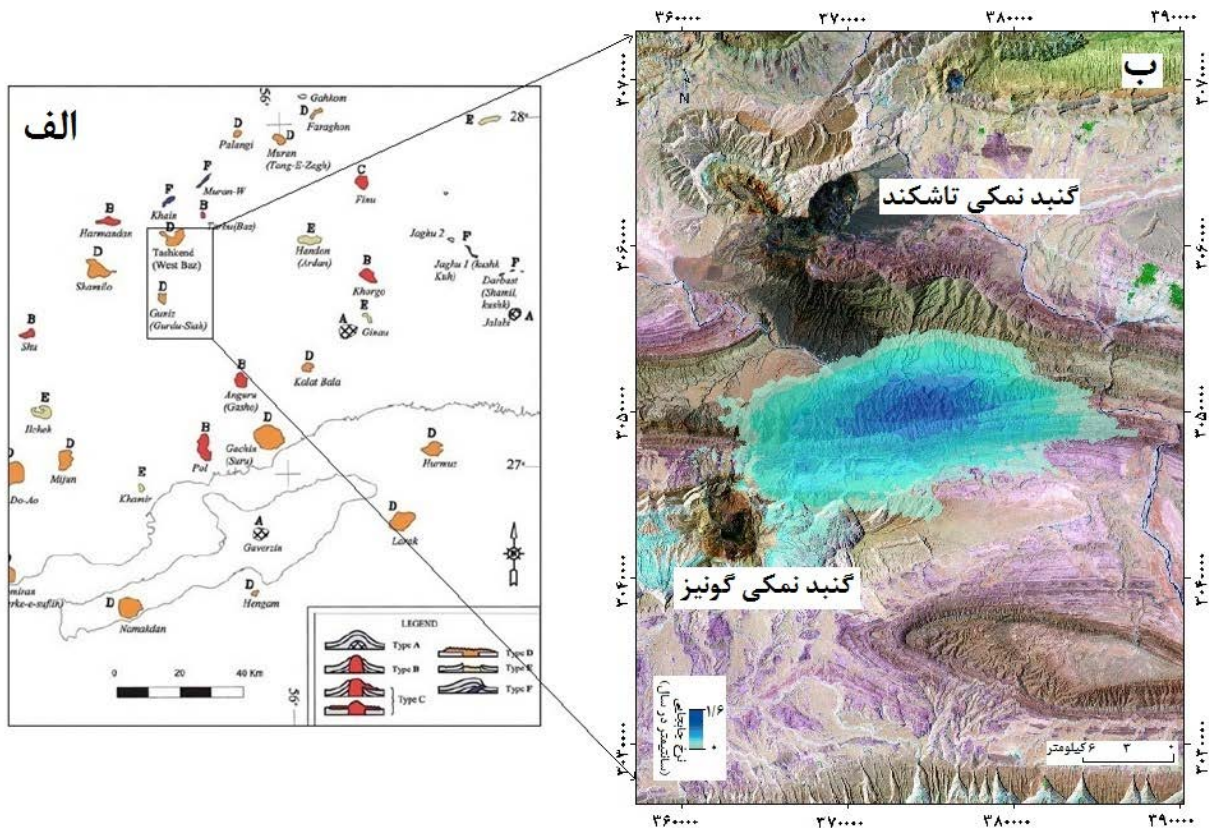


شکل ۵. نقشه تغییرات ارتفاعی سطح زمین؛ (الف) نقشه جابجایی به دست آمده از سنجنده SENTINEL-1، (ب) نقشه جابجایی به دست آمده از سنجنده ASAR





شکل ۶. نقشه گسل‌های اصلی منطقه، دایره زرد رنگ موقعیت گنبد نمکی جدید را نشان می‌دهد (۸). گسل‌ها با خط چین قرمز و گنبد‌های نمکی رخنمون یافته آبی رنگ مشخص می‌باشند.



شکل ۷. مراحل رشد گنبد‌های نمکی (الف) (۲۸) و موقعیت گنبد نمکی پنهان جدید بین دو گنبد نمکی تاشکند و گونیز (ب)



## بحث و نتیجه گیری

از آنجایی که منطقه مورد مطالعه در ناحیه زاگرس چین خورده واقع شده و حوزه رسوبی نمک‌های هرمز نیز که عامل اصلی تشکیل گنبد‌های نمکی می‌باشند در این ناحیه قرار دارد (۲۱ و ۳۰)، می‌توان چنین استدلال کرد که یکی از دلیل اصلی این‌گونه ناهنجاری‌ها و تغییر و جابجایی‌های رخ داده در یک نقطه خاص در منطقه مورد مطالعه، وجود یک گنبد نمکی فعال در اعماق زمین باشد، علاوه بر آن نرخ رشد و سرعت بالآمدگی گنبد‌های نمکی بین ۰/۱ تا ۳ سانتیمتر در سال برآورد شده است (۲۲، ۳۲، ۳۴ و ۳۵) و این نرخ رشد با نرخ بالآمدگی و افزایش ارتفاع سطح زمین در محل مذکور تقریباً همخوانی دارد. همچنین پژوهش‌های زیادی مؤید این موضوع بوده که بسیاری از گنبد‌های نمکی زاگرس هنوز رخنمون نیافته‌اند و به‌صورت پنهان می‌باشند (۱۳، ۲۶، ۲۹ و ۳۰). از شواهد دیگر بر احتمال وجود یک گنبد نمکی به‌عنوان عامل اصلی خیزش و مرتفع شدن سطح زمین در منطقه مورد مطالعه، توجه به نقش گسل‌ها در ایجاد مسیرهایی برای صعود توده‌های نمکی (۲۲، ۳۰، ۳۱ و ۳۳) است، به‌طوری‌که در شکل ۶ نیز مشاهده می‌شود محدوده مذکور بر روی یکی از گسل‌های اصلی منطقه قرار دارد.

مراحل تکوین و رشد گنبد‌های نمکی در شکل ۷ مشخص شده است (۲۸) بر اساس میزان پیشرفت یک گنبد نمکی از لحظه خیزش نمک در زیر سطح زمین تا خروج آن از زمین و قرار گرفتن در معرض هوازدگی و فرسایش، شش مرحله برای آن متصور می‌شوند. همان‌طور که در شکل نیز مشخص است نوع A به گنبد‌های نمکی پنهان اشاره دارد، درحالی‌که هیچ‌گونه اشاره‌ای به موقعیت گنبد نمکی احتمالی تشخیصی در این تحقیق نشده است. در نتیجه می‌توان این گنبد نمکی را به‌عنوان یک گنبد نمکی احتمالی پنهان معرفی کرد که برای اولین بار با استفاده از روش‌های نوین سنجش‌از‌دور مشخص و تعیین موقعیت می‌شود. موقعیت گنبد نمکی جدید بر روی یال شمالی طاقدیس گونیز می‌باشد و در صورت خروج از زمین و آشکار شدن، در زمره گنبد‌های نمکی تیپ B

قرار می‌گیرد.

بنابراین با توجه به شواهد و قرائن ذکر شده، و با نظر به نتایج به‌دست‌آمده از روش تداخل‌سنجی راداری، محتمل‌ترین عامل ایجاد این ناهنجاری ارتفاعی در منطقه مورد مطالعه، می‌تواند وجود یک گنبد نمکی پنهان در زیر سطح زمین باشد. البته در این زمینه نمی‌توان تنها به مطالعات دورسنجی اکتفا کرد بلکه مطمئناً نیاز به انجام مطالعات بیشتر در زمینه ژئوفیزیک لرزه‌ای و ثقل سنجی بر روی منطقه مورد مطالعه احساس می‌شود، بنابراین پیشنهاد می‌شود به دلیل اهمیت گنبد‌های نمکی در زمینه‌های مختلف منابع طبیعی به‌ویژه در تشکیل مخازن نفتی، مطالعات مذکور بر روی محدوده شناسایی شده در این تحقیق انجام گیرد.

## منابع مورد استفاده

۱. احمدزاده هروی، م.، ع. هوشمندزاده و م. ح. نبوی. ۱۳۶۹. مفاهیم جدیدی از چینه‌شناسی سازند هرمز و مسئله دیاپیریزم در گنبد‌های نمکی جنوب ایران. مجموعه مقالات سمپوزیوم دیاپیریزم با نگرش ویژه به ایران، وزارت معادن و فلزات، ۱: ۱-۲۲.
۲. افشاری، س.، ح. آقا محمدی و م. نوری. ۱۳۹۵. پایش رشد و پیشروی گنبد‌های نمکی زمین‌شناسی به‌منظور تعیین شدت فعالیت آن‌ها با استفاده از تصاویر SAR (مطالعه موردی گنبد نمکی گچین). ماهنامه اکتشاف و تولید نفت و گاز، ۱۳۸: ۴۶-۵۲.
۳. المدرسی، س.، ع. ج. حاتمی و ع. سرکارگر. ۱۳۹۵. محاسبه خصوصیات فیزیکی برف با استفاده از تکنیک تداخل سنجی تفاضلی راداری و تصاویر سنجنده ترا سارایکس باند (TerraSAR-X) و مودیس (MODIS). سنجش‌از‌دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۷(۲): ۷۵-۵۹.
۴. رهنمون فر، م.، ر. حیدری و م. ر. قیطانچی. ۱۳۸۵. تعیین جابه‌جایی و بزرگی زلزله سال ۱۳۸۲ بم در جنوب شرقی ایران با استفاده از داده‌های ماهواره با روش تداخل سنجی راداری. مجله فیزیک زمین و فضا، ۳۲(۲): ۱۲۴-۱۱۷.
۵. زارع کمالی، م.، س. ع. المدرسی و ک. نقدی. ۱۳۹۶. مقایسه

- pre-existing diapirs in fold and thrust belt development. In: Thrust belts and foreland basins. Springer, pp 309-325.
18. Callot J-P, Trocmé V, Letouzey J, Albouy E, Jahani S, Sherkati S. 2012. Pre-existing salt structures and the folding of the Zagros mountains. Geological Society, London, Special Publications, 363(1): 545-561.
  19. Colón C, Webb AAG, Lasserre C, Doin M-P, Renard F, Lohman R, Li J, Baudoin PF. 2016. The variety of subaerial active salt deformations in the Kuqa fold-thrust belt (China) constrained by InSAR. Earth and Planetary Science Letters, 450: 83-95.
  20. Du Z, Ge L, Ng AH-M, Li X, Li L. 2018. Monitoring of ground deformation in Liulin district, China using InSAR approaches. International Journal of Digital Earth, 11(3): 264-283.
  21. Edgell H. 1991. Proterozoic salt basins of the Persian Gulf area and their role in hydrocarbon generation. Precambrian Research, 54(1): 1-14.
  22. El Rabia A, Inoubli MH, Ouaja M, Abidi O, Sebei K, Jlaïlia A. 2018. Salt tectonics and its effect on the structural and sedimentary evolution of the Jeffara Basin, Southern Tunisia. Tectonophysics, 744: 350-372.
  23. Ferretti A, Savio G, Barzaghi R, Borghi A, Musazzi S, Novali F, Prati C, Rocca F. 2007. Submillimeter accuracy of InSAR time series: Experimental validation. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 45(5): 1142-1153.
  24. Ferretti A, Colombo D, Fumagalli A, Novali F, Rucci A. 2015. InSAR data for monitoring land subsidence: time to think big. Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences, 372: 331-334.
  25. Hooper A, Bekaert D, Spaans K, Arkan M. 2012. Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation. Tectonophysics, 514: 1-13.
  26. Hudec MR, Jackson MP. 2007. Terra infirma: Understanding salt tectonics. Earth-Science Reviews, 82(1-2): 1-28.
  27. Hu J, Ding X-L, Zhang L, Sun Q, Li Z-W, Zhu J-J, Lu Z. 2017. Estimation of 3-D surface displacement based on InSAR and deformation modeling. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 55(4): 2007-2016.
  28. Jahani S, Callot J-P, de Lamotte DF, Letouzey J, Letourmy P. 2007. The salt diapirs of the eastern Fars Province (Zagros, Iran): A brief outline of their past and present. In: Thrust Belts and Foreland Basins. Springer, pp 289-308.
  29. Jahani S, de Lamotte DF, Letouzey J. 2009. Salt Activity and Halokinesis in the Zagros Fold-thrust Belt and Persian Gulf (Iran). In: Shiraz 2009-1st EAGE International Petroleum Conference and Exhibition, 98-107.
  30. Jahani S, Hassanpour J, Mohammadi-Firouz S, میزان جابجایی عمودی زمین با استفاده از الگوریتم SBAS باندهای راداری X و C (مطالعه موردی: اراضی تهران). سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۸(۳): ۱۰۴-۱۲۰.
  ۶. شریفی کیا، م. ۱۳۹۱. تعیین میزان و دامنه فرونشست زمین به کمک روش تداخل سنجی راداری در دشت نوق- بهرمان. مجله برنامه‌ریزی و آمایش فضا، ۱۶(۳): ۴۲-۳۴.
  ۷. صمدیان، م. ر. ۱۳۶۹. جنبش‌های گنبد‌های نمکی زاگرس در سنوزوئیک پایین، مجموعه مقالات سمپوزیوم دیابیرسم با نگرش ویژه به ایران. وزارت معادن و فلزات، ۱: ۲۵۹-۳۲۶.
  ۸. محمدپناه، ع. ۱۳۹۱. استفاده از تداخل سنجی راداری برای بررسی جابجایی روانه‌های نمکی گرمسار-ایوانکی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه تهران. ۱۲۳ صفحه.
  ۹. ملکی، م، س. م. توکلی صبور، پ. ضیائیان فیروزآبادی و م. رئیس. ۱۳۹۷. مقایسه داده‌های اپتیک و رادار در استخراج عوارض و پدیده‌های زمینی. سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۹(۲): ۹۳-۱۰۷.
  ۱۰. مهرابی، ع. و م. پورخسروانی. ۱۳۹۷. اندازه‌گیری میزان جابجایی سطح زمین ناشی از زلزله ۱۳۸۳ داهوئیه زرنده استان کرمان و شناسایی گسله عامل آن با استفاده از روش تداخل سنجی راداری. فصلنامه ژئومورفولوژی کمی، ۷(۱): ۷۳-۶۱.
  11. Aftabi P, Rostaie M, Alsop GI, Talbot CJ. 2010. InSAR mapping and modelling of an active Iranian salt extrusion. Journal of the Geological Society, 167(1): 155-170.
  12. Aftabi P, Talbot CJ, Fielding E. 2005. Salt Kinematics and InSAR, Radar Investigations of Planetary and Terrestrial Environments. LPI, 6012.
  13. Ala M. 1974. Salt diapirism in southern Iran. AAPG Bulletin, 58(9): 1758-1770.
  14. Amarjargal S, Kato T, Furuya M. 2013. Surface deformations from moderate-sized earthquakes in Mongolia observed by InSAR. Earth, Planets and Space, 65(7): 713-723.
  15. Barnhart WD, Lohman RB. 2012. Regional trends in active diapirism revealed by mountain range-scale InSAR time series. Geophysical Research Letters, 39(8): 1-5.
  16. Bürgmann R, Rosen PA, Fielding EJ. 2000. Synthetic aperture radar interferometry to measure Earth's surface topography and its deformation. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 28(1): 169-209.
  17. Callot JP, Jahani S, Letouzey J. 2007. The role of

- Letouzey J, de Lamotte DF, Alavi SA, Soleimany B. 2017. Salt tectonics and tear faulting in the central part of the Zagros Fold-Thrust Belt, Iran. *Marine and Petroleum Geology*, 86: 426-446.
31. Kent P. 1987. Island salt plugs in the Middle East and their tectonic implications. In: *Dynamical geology of salt and related structures*. Elsevier, pp 3-37.
32. Letouzey J, Sherkati S. 2004. Salt movement, tectonic events, and structural style in the central Zagros fold and thrust belt (Iran). In: *Salt-sediment interactions and hydrocarbon prospectivity: 24th Annual Research Conference, Gulf Coast Section, SEPM Foundation*. pp 444-463.
33. Mehrabi A, Dastanpour M, Radfar S, Vaziri M, Derakhshani R. 2015. Detection of fault lineaments of the Zagros fold-thrust belt based on Landsat imagery interpretation and their spatial relationship with Hormoz Series salt dome locations using GIS analysis. *Geosciences*, 24(96): 17-32.
34. Motamedi H, Sepehr M, Sherkati S, Pourkermani M. 2011. Multi-phase Hormuz salt diapirism in the southern Zagros, SW Iran. *Journal of Petroleum Geology*, 34(1): 29-43.
35. Talbot C, Jarvis R. 1984. Age, budget and dynamics of an active salt extrusion in Iran. *Journal of Structural Geology*, 6(5): 521-533.
36. Tavernier J-B. 1718. *Les six voyages de Jean Baptiste Tavernier:... en Turquie, en Perse et aux Indes*. H. Scheurleer. 782 pp.
37. Taymaz T, Wright T, Yolsal S, Tan O, Fielding E, Seyitoğlu G. 2007. Source characteristics of the 6 June 2000 Orta-Cankırı (central Turkey) earthquake: a synthesis of seismological, geological and geodetic (InSAR) observations, and internal deformation of the Anatolian plate. *Geological Society, London, Special Publications*, 291(1): 259-290.





## Identification of the new and active buried salt dome evidences in the Zagros region using interferometry method of SENTINEL-1 and ASAR radar images

A. Mehrabi<sup>1\*</sup>

1. Assist. Prof. College of Geography and Urban Planning, Department of Lit. & Humanities, Shahid Bahonar University of Kerman

### ARTICLE INFO

#### *Article history:*

Received 18 November 2018

Accepted 17 January 2019

Available online 19 February 2019

#### *Keywords:*

Radar image processing

Interferogram

Buried salt mass

Remote sensing

Zagros

### ABSTRACT

Salt domes are one of the most beautiful natural phenomena. Despite the outcrops of many salt domes in the Zagros region, but many of them are still buried and hidden. Due to active Zagros tectonics, the movement and ascending trend of salt domes do not stop. In this research, with the aim of the changes monitoring in the Earth's crust in the Zagros area, one of the new, hidden and ascending probabilistic salt domes, was identified using a radar interferometry method. For this purpose, ASAR radar images for the years 2007 and 2012 and SENTINEL-1 for the years 2014 and 2017 were used. In order to determine the amount of changes in the earth's crust, during the process of unwrapping on the images, the interference of each of the images was extracted. According to the results of the analysis of ASAR images, the growth rate of the salt dome was 1.6 centimeters per year between 2007 and 2012. While according to the interferometry images that obtained from SENTINEL-1 the rising speed of this salt dome increased between 2014 and 2017, reaching 2.9 centimeters per year. The result of this study shows that the probabilistic salt dome is active. Consequently, due to the importance of salt domes in various fields of natural resources, especially in the formation of oil reservoirs in the Zagros region, as well as more accurate identification of the subject, it is necessary to carry out special geophysical studies in this area.

\* Corresponding author e-mail address: Mehrabi@uk.ac.ir