

بررسی تأثیر شرایط آب و هوایی مختلف بر تحرک توده‌های نمکی با استفاده از روش تداخل‌سنجی سری زمانی تصاویر ASAR (مطالعه موردی: گنبدنمکی شاه‌غیب لارستان)

علی مهرابی* - استادیار گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۶/۹

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۴/۲۰

چکیده

مطالعه رفتار ساختارهای نمکی رخنمون‌یافته در سطح زمین و ارتباط آن با عوامل محیطی می‌تواند در شناخت هرچه بیشتر این ساختارها و اثرهای زیست‌محیطی آن‌ها مؤثر باشد. گنبدنمکی جنوب ایران از جمله گنبد نمکی شاه‌غیب لارستان یکی از بزرگ‌ترین ساختارهای نمکی رخنمون‌یافته است که در راستای جنبش‌شناسی نمک و تعیین ارتباط احتمالی آن با تغییرات آب و هوایی در این پژوهش از آن استفاده شده است. تغییر شکل‌های رخ داده بر روی این گنبد نمکی، با استفاده از روش تداخل‌سنجی سری زمانی تصاویر راداری ASAR مربوط به سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۸ بررسی و اندازه‌گیری شد. نتایج به‌دست‌آمده، ضمن اینکه بیانگر فعال‌بودن این گنبد نمکی است، به‌منظور تعیین ارتباط بین جابه‌جایی‌های رخ داده با شرایط آب و هوایی متفاوت، نقشه‌های جابه‌جایی مقطعی تهیه و با داده‌های دما و بارش متناظر با دوره‌های یادشده مقایسه شد. براساس نتایج، بین میزان جابه‌جایی و دمای متوسط ارتباط مستقیمی وجود دارد؛ به‌طوری‌که با افزایش دما میزان بالآمدگی سطح نمک افزایش می‌یابد و میزان فرونشست نیز کاهش می‌یابد. بنابراین، می‌توان تا حدودی تغییرات ثانویه نمک بعد از رخنمون‌یافتن گنبد نمکی بر روی زمین را متأثر از شرایط آب و هوایی به‌ویژه دما دانست.

واژگان کلیدی: جابه‌جایی نمک، شرایط آب و هوایی، تداخل‌سنجی راداری، گنبدنمکی، لارستان.

مقدمه

لایه‌های نمکی قرارگرفته در زیر رسوبات، به‌دلیل ویسکوزیته کمتر، نسبت به سنگ‌های اطراف می‌توانند جریان یابند و به سمت بالا حرکت کنند و ساختارهای نمکی متفاوتی همچون بالشتک‌های نمکی، دیواره‌ها، و گنبدنمکی بسازند (احمدزاده هروی و همکاران، ۱۳۶۹: ۲؛ کرژویک و وینبرگر، ۲۰۰۶). مطالعه و جنبش‌شناسی ساختارهای نمکی رخنمون‌یافته اطلاعات ذی‌قیمتی در زمینه ذخایر نفت و گاز برای دانشمندان فراهم می‌کند (سشریسکی، ۲۰۰۴: ۳۱۹). بررسی رفتار توده‌های نمکی، به‌دلیل عدم ثبات و تغییرپذیری شدید آن بر روی سطح زمین، معمولاً به‌سختی امکان‌پذیر است (تالبوت و پژولا، ۲۰۰۹؛ آفتابی و همکاران، ۲۰۰۵). مطالعه تعدادی از گنبدنمکی جهان نشان می‌دهد که روند تحول و ایجاد بسیاری از ساختارهای نمکی متأثر از عوامل و رژیم‌های تکتونیکی است (مهرابی و همکاران، ۱۳۹۴: ۱۳؛ جهانی و همکاران، ۲۰۰۹: ۹۸؛ کانروت و همکاران، ۲۰۰۵). ولی پس از اینکه گنبدنمکی بر روی سطح زمین ظاهر می‌شوند شرایط آب و هوایی بیشتر کنترل‌کننده حرکت توده‌های نمکی است (تالبوت و روجرز، ۱۹۸۰؛ دسویس، ۲۰۱۰). اگرچه عمر توده‌های نمکی بر روی سطح زمین کم است، به علت اینکه نمک‌های رخنمون‌یافته تحت تأثیر فرایندهای سطح زمین قرار می‌گیرند و دچار تغییرات حرکتی و شکلی مختلفی می‌شوند، با بررسی این تغییرات، طی همین دوره کوتاه می‌توان به شواهد کلیدی و مهمی در رابطه با روند تکاملی این ساختارها دست یافت.

عمده اطلاعات ما از جنبش‌شناسی و تحرک نمک مربوط به مطالعات انجام‌گرفته بر روی گنبد‌های نمکی زاگرس و البرز در جنوب و شمال ایران است (کنت، ۱۹۷۹؛ آفتابی و همکاران، ۲۰۰۵؛ بیک‌پور و همکاران، ۲۰۱۰؛ عبدالمالکی و همکاران، ۲۰۱۴؛ ۵۶؛ هوو و همکاران، ۲۰۱۷). امروزه، می‌توان با استفاده از روش‌های نوین سنجش از دور تحرکات توده‌های نمکی را بررسی کرد. به‌طور مثال، برنارت و لهن با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری تغییرات سطحی تعدادی از گنبد‌های نمکی زاگرس را در حد میلی‌متر در سال اندازه‌گیری کرده‌اند (آفتابی و همکاران، ۲۰۱۰؛ ۱۵۵؛ برنهارت و لهن، ۲۰۱۲) یا با کمک تکنیک تداخل‌سنجی مشخص شده است که گنبد نمکی گرمسار واقع در رشته‌کوه‌های البرز غیرفعال است و تغییرات سطح آن ناشی از انحلال نمک‌هاست (کسگرو و همکاران، ۲۰۰۹؛ بیک‌پور و همکاران، ۲۰۱۰). گنبد نمکی کوه قم یکی از گنبد‌های نمکی ایران مرکزی است که فعال است و سالانه به‌طور متوسط از ۵ تا ۱۰ سانتی‌متر در بخش‌های مختلف آن دچار حرکات سازنده و مخرب است. همچنین، حرکات سطحی نمک در این گنبد نمکی متأثر از شرایط آب و هوایی است (عبدالمالکی و همکاران، ۲۰۱۴؛ ۵۶؛ هوو و همکاران، ۲۰۱۷). رفتار توده‌های نمکی نسبت به شرایط محیطی و آب و هوایی مختلف متفاوت است؛ به‌طوری‌که در دماهای بالا توده‌های نمک به‌دلیل پدیده انبساط حرارتی دچار تورم می‌شود و حجم آن‌ها بیشتر می‌شود و به‌عکس در شرایط آب و هوایی سرد نمک دچار انقباض و متراکم می‌شود. این انقباض و انبساط باعث می‌شود تا سطح ساختارهای نمکی دچار جابه‌جایی شود. در زمان بارندگی و بلافاصله بعد از آن نیز جریان حرکتی نمک‌ها سریع‌تر و بیشتر می‌شود؛ هرچند این تغییرات در حد بسیار کمی باشد. عامل خشکی باعث تورم و افزایش ارتفاع گنبد و مانع گسترش جانبی نمک‌ها می‌شود. با کاهش بار روی توده نمکی، میزان رشد گنبد‌های نمکی افزایش می‌یابد؛ درحالی‌که با افزایش بار رویی این میزان رشد کاهش می‌یابد (کولون و همکاران، ۲۰۱۶؛ ۸۳). نحوه تغییر توده‌های نمک در ارتباط با شرایط مختلف آب و هوایی در جدول ۱ مشخص شده است.

امروزه، کاربرد تصاویر راداری در مطالعه و بررسی تغییرات ارتفاعی سطح زمین بسیار شدت گرفته است (برنهارت و لهن، ۲۰۱۲؛ هوو و همکاران، ۲۰۱۷). با توجه به ماهیت تصویربرداری راداری و به‌دلیل اینکه تصاویر راداری، علاوه بر اندازه‌گیری شدت سیگنال، اطلاعات فازهای مختلف را نیز با خود همراه دارند، می‌توان با استفاده از این اطلاعات و به روش تداخل‌سنجی راداری از آن‌ها در شناسایی فاز جابه‌جایی استفاده کرد. از آنجا که سطح زمین به مرور زمان دچار تغییرات ژئومورفولوژیکی مختلفی همچون فرورانش و بالاآمدگی به‌دلیل عوامل طبیعی متفاوتی می‌شود و در اغلب روش‌های ژئودتیکی اندازه‌گیری جابه‌جایی پوسته زمین از قبیل مثلث‌بندی سه‌پهلو و سامانه موقعیت‌سنجی جهانی به ترازایی و نقشه‌برداری‌های مکرر زمینی نیاز است، روش تداخل‌سنجی راداری در ضمن پوشش‌دادن منطقه وسیعی از زمین، احتیاج به نقشه‌برداری زمینی ندارد. از طرف دیگر، در مقایسه با فونونی همچون سامانه موقعیت‌سنج جهانی و ترازایی که اندازه‌گیری نقطه‌ای به‌دست می‌دهند، این روش ضمن اینکه بیان دوبعدی از تغییرات سطح را عملی می‌کند، وسعتش نسبت به روش‌های نقطه‌ای نیز بیشتر است (رهنمون‌فر و همکاران، ۱۳۸۵؛ ۱۱۷). بنابراین، با توجه به توانایی و قابلیت تصاویر رادار در تعیین میزان تغییرات و جابه‌جایی‌های اتفاق‌افتاده 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 تداخل‌سنجی راداری امکان‌پذیر است (تایماز و همکاران، ۲۰۰۷؛ کولون و همکاران، ۲۰۱۶؛ ۹۰).

با توجه به اینکه در بیشتر مطالعات انجام‌گرفته پیشین صرفاً نحوه عملکرد و نرخ جابه‌جایی نمک مطالعه شده و کمتر به ارتباط بین شرایط آب و هوایی و تحرک نمک پرداخته شده است، در این تحقیق سعی شده است تا این ارتباط با استفاده از روش‌های نوین دورسنجی بیشتر بررسی و کنکاش شود. بدین منظور نیز گنبد نمکی شاه‌غیب لارستان یکی از بزرگ‌ترین توده‌های نمکی

بررسی تأثیر شرایط آب و هوایی مختلف بر تحرک توده‌های نمکی با استفاده از روش تداخل‌سنجی سری زمانی تصاویر ... ۵۱۵

رخنمون‌یافته در پهنه ساختاری زاگرس چین‌خورده انتخاب شد تا، ضمن پایش تغییرات و جابه‌جایی سطحی رخ داده بر روی نمک‌ها طی یک دوره چندساله، چگونگی رفتار توده نمکی در شرایط خشکی، تغییرات دمایی، و بارندگی مشخص شود.

جدول ۱. عوامل مؤثر و کنترل‌کننده حرکت توده‌های نمکی، فلش‌های سفیدرنگ نشان‌دهنده جهت جریان غالب نمک و فلش‌های سیاه‌رنگ بیانگر جهت جابه‌جایی سطحی است (کولون و همکاران، ۲۰۱۶: ۸۵)

عوامل	مدت زمان تأثیر	میزان حرکت	نحوه حرکت
گرما	ساعتی، روزانه، فصلی	در حد میلی‌متر تا سانتی‌متر	
سرما	ساعتی، روزانه، فصلی	در حد میلی‌متر تا سانتی‌متر	
رطوبت	روزانه	در حد میلی‌متر تا متر	
خشکی	فصلی	در حد میلی‌متر تا سانتی‌متر	
بار رویی سبک	فصلی، سالانه	در حد میلی‌متر تا سانتی‌متر	
بار رویی سنگین	سالانه	در حد میلی‌متر تا سانتی‌متر	

مواد و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه

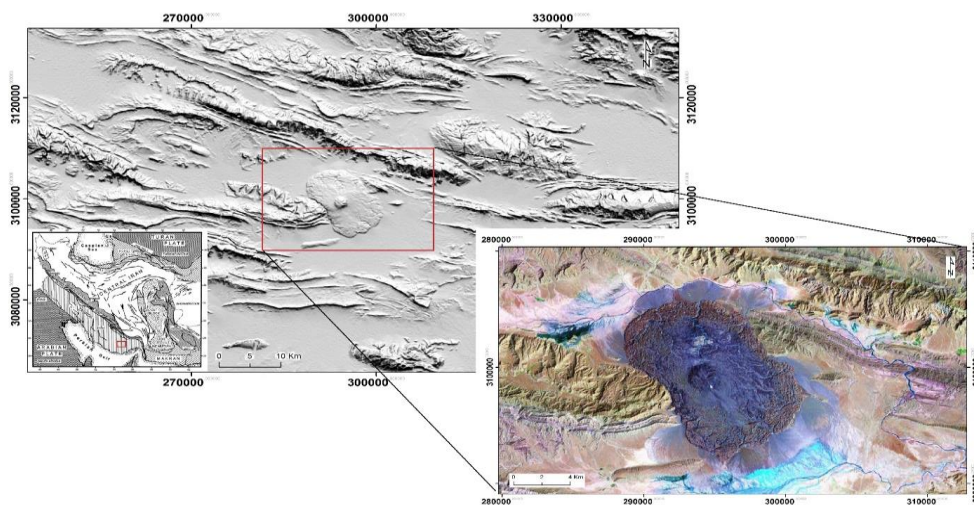
گنبد نمکی شاه‌غیب در پهنه ساختاری زاگرس ما بین عرض جغرافیایی $27^{\circ} 55' 27''$ تا $28^{\circ} 05' 05''$ شمالی و طول جغرافیایی $50^{\circ} 54' 54''$ تا $59^{\circ} 59' 59''$ شرقی قرار دارد. این گنبد نمکی در استان فارس و ۶۰ کیلومتری شمال شرق شهرستان لار واقع شده است. جاده دسترسی به این محدوده از طریق جاده لار به فدایی امکان‌پذیر است. از لحاظ ژئومورفولوژی، این منطقه در بخش چین‌خورده زاگرس قرار دارد و پوشیده از طاق‌دیس‌ها و ناودیس‌هایی با روند تقریباً شرقی-غربی و شمال شرقی-جنوب غربی است. شکل ۱ موقعیت گنبد نمکی را نشان می‌دهد.

داده‌های مورد استفاده در پژوهش

در این پژوهش از دو سری داده استفاده شد. تعداد ۲۲ تصویر راداری سنجنده ASAR، ماهواره Envisat سازمان فضایی اروپا با فرمت SLC^۱ (تک‌منظر) از نوع مد Image با پلاریزاسیون VV، که بین تاریخ ۲۰۰۳/۰۴/۰۳ تا ۲۰۰۸/۰۴/۱۴ اخذ شده است. این نوع داده‌ها داده‌های خامی هستند که تنها پردازش اولیه بر روی آن‌ها انجام گرفته و به تصاویر تک‌منظر تبدیل شده‌اند و اطلاعات آن‌ها به هیچ عنوان مخدوش نشده است. همه داده‌های راداری یادشده از نوع تصاویر بالاگذر^۲ هستند. و دیگری داده‌های هواشناسی مربوط به ایستگاه هواشناسی حاجی‌آباد شامل داده‌های بارندگی و متوسط دما است. همچنین، از مدل ارتفاع رقومی ۳۰ متری SRTM برای منطقه مورد مطالعه استفاده شد. جدول ۲ مشخصات داده‌های مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد.

1. Single looking complex

2. Ascending



شکل ۱. محدوده مورد مطالعه بر روی تصویر ماهواره‌ای و مدل ارتفاع رقومی مشخص شده است

جدول ۲. مشخصات اینترفروگرام‌های پردازش شده

شماره	تاریخ		فریم	مسیر	طول خط مبنا (متر)
	مستر	اسلیو			
۱	۲۰۰۳/۴/۸	۲۰۰۴/۴/۲۷	۳۰۵۱	۴۷۸	۱۸
۲	۲۰۰۴/۳/۱۱	۲۰۰۴/۷/۱۸	۳۰۵۱	۲۰۶	۵۲
۳	۲۰۰۴/۶/۲۳	۲۰۰۴/۸/۱۷	۳۰۵۱	۲۰۶	۱۲
۴	۲۰۰۴/۷/۱۰	۲۰۰۵/۱۰/۱۳	۳۰۵۱	۴۷۸	۱۰۲
۵	۲۰۰۵/۹/۷	۲۰۰۶/۱/۳	۳۰۵۱	۴۷۸	۵۸
۶	۲۰۰۶/۹/۲۵	۲۰۰۶/۸/۷	۳۰۵۱	۲۰۶	۲۹
۷	۲۰۰۶/۹/۲۰	۲۰۰۷/۲/۱۳	۳۰۵۱	۴۷۸	۴۴
۸	۲۰۰۷/۱/۲۵	۲۰۰۷/۴/۱۸	۳۰۵۱	۲۰۶	۹۸
۹	۲۰۰۷/۳/۲۰	۲۰۰۷/۱۲/۱۵	۳۰۵۱	۲۰۶	۳۳
۱۰	۲۰۰۷/۱۱/۱۷	۲۰۰۸/۴/۸	۳۰۵۱	۴۷۸	۱۳۱
۱۱	۲۰۰۳/۴/۳	۲۰۰۸/۴/۱۴	۳۰۵۱	۲۰۶	۱۵

روش تحقیق

تحقیق حاضر با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری انجام گرفته است. این روش در میان روش‌های زمینی و فضایی کارآمدترین روش برای اندازه‌گیری تغییرات سطح زمین با دقت و قدرت تفکیک مکانی بسیار بالا به‌شمار می‌رود (فرتی و همکاران، ۲۰۰۷). در تداخل‌سنجی راداری، فاز تصویر اخذشده از موقعیت‌های تصویربرداری یا زمان‌های تصویربرداری مختلف پیکسل به پیکسل مقایسه می‌شود (فرتی و همکاران، ۲۰۱۵). از تفاضل‌گیری بین این مقادیر، تصویر جدیدی حاصل می‌شود که تداخل‌سنج^۱ نام دارد. تشکیل تداخل‌سنج یا اینترفروگرام اساس پردازش راداری است (هوپر، ۲۰۱۲). از عوامل محدودکننده روش تداخل‌سنجی راداری سنتی تفریقی^۲ نبود همبستگی زمانی و مکانی^۳ است. نبود همبستگی زمانی مربوط به تغییر سری در شکل ظاهری و ویژگی‌های پراکنشی سطح زمین در بازه زمانی میان تصویر پایه^۴ و

1. Interferogram
2. Differential interferometry
3. Temporal and Geometrical decorrelation
4. Master

تصویر پیرو^۱ و نبود همبستگی هندسی ناشی از بلندبودن طول مبنای مکانی (فاصله دو ایستگاه تصویربرداری) میان دو تصویر پایه و پیرو است. در این پژوهش برای محاسبه میزان جابه‌جایی متوسط سطحی از روش تداخل‌سنجی تفریقی و برای تحلیل سری زمانی از روش خط مبنای کوتاه استفاده شد (گائو، ۲۰۱۵). در روش خط مبنای کوتاه^۲ به‌منظور به حداقل رساندن خط مبنای زمانی- مکانی از ترکیبی از اینترفروگرام‌ها استفاده می‌شود (رسپینی، ۲۰۱۳).

روش تداخل‌سنجی تفریقی

نحوه اندازه‌گیری تغییرات سطح زمین به روش تداخل‌سنجی تفریقی در شکل ۲ نمایش داده شده است. در این شکل، P معرف فضایی مشخص در سطح است که در قالب یک پیکسل تصویر شده است. سنجنده تصویر نخست^۳ این فضا را در زمان t_0 ثبت و مقدار فاز آن را اندازه‌گیری می‌کند ($M\Phi$). مقدار نشست فاصله P تا P_1 است که طی زمان مشخصی انجام گرفته است (Dt). برای اندازه‌گیری این مقدار، سنجنده تصویری دومی^۴ در زمان t و با هندسه‌ای کاملاً شبیه به تصویر نخست اخذ می‌کند و مقدار فاز را بر روی آن اندازه‌گیری می‌کند (Φ_S). روش تداخل‌سنجی تفاضلی تفاضل فاز $M\Phi$ و Φ_S را در فرم تداخل‌نگار 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 با رابطه ۱ به‌دست می‌آید:

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

در اندازه‌گیری مقدار بالاآمدگی به کمک این روش، سطح ناپایدار تصور شده؛ به‌طوری‌که سطح از P به P_1 تنزل یافته است. تعیین مقدار جابه‌جایی در فاصله زمانی دو تصویر (Dt) تابع اختلاف فاز دو تصویر ($\Delta\Phi_{int}$) همراه فاز ناشی از اثر توپوگرافی (Φ_{top}) و فاز ناشی از جابه‌جایی سطح (Φ_{Mov}) و همچنین فاز ناشی از اثر اتمسفر (Φ_{Atm}) خواهد بود.

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

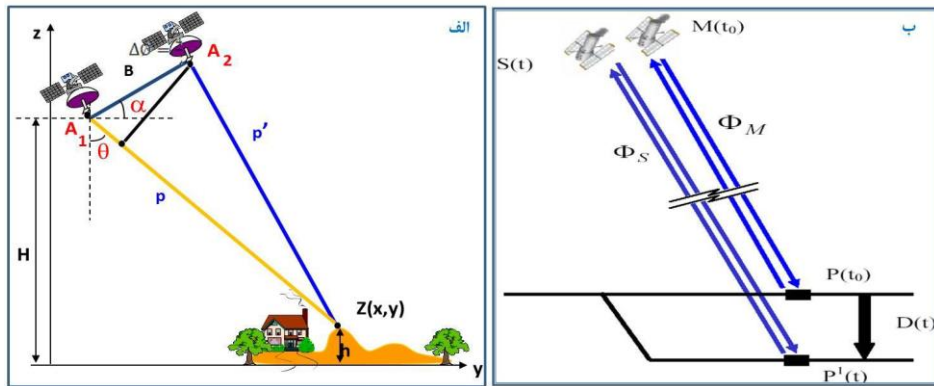
در این روش در صورت در اختیار نداشتن تصویر سوم، به کمک مدل رقومی ارتفاعی زمین و تبدیل ارتفاع به فاز یک تداخل‌نگار مصنوعی تولید می‌شود و از این راه به کمک معکوس اطلاعات DEM اثر فاز ناشی از توپوگرافی محاسبه و از مقادیر اختلاف فاز حذف می‌شود. اختلاف فاز باقی‌مانده به اثر جابه‌جایی سطح و اتمسفر تعلق دارد. در نهایت، با نادیده‌انگاشتن اثر اتمسفر در جابه‌جایی‌هایی به میزان بالا (چند سانتی‌متر) یا حذف آن به کمک تصاویر اپتیکی، اختلاف فاز دو تداخل‌نگار ($\Phi_{\Delta D-int}$) (تداخل‌نگار اصلی و مصنوعی) فقط بیان‌کننده مقادیر جابه‌جایی سطح خواهد بود (شریفی‌کیا، ۱۳۹۱). فلوجارت روش تداخل‌سنجی راداری در شکل ۳ ارائه شده است.

روش تداخل‌سنجی خط مبنای کوتاه (SBAS)

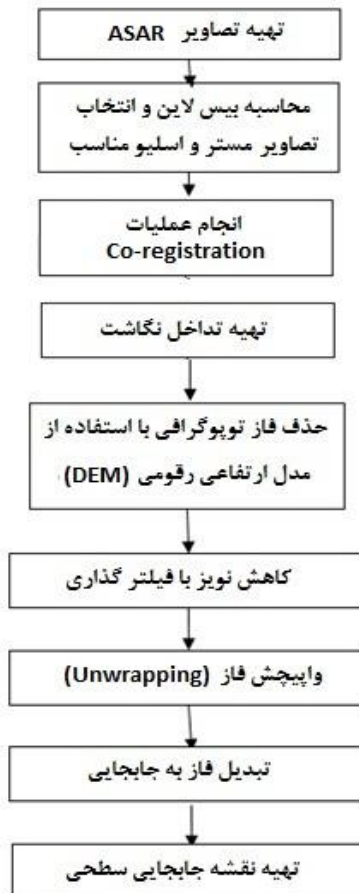
روش SBAS معمولاً در آنالیز سری زمانی استفاده می‌شود. در روش خط مبنای کوتاه، برای ایجاد اینترفروگرام‌ها از مجموعه‌ای از تصاویر استفاده می‌شود که مؤلفه خط مبنای عمودی آن‌ها کوچک باشد و شبکه به‌دست‌آمده پیوسته باشد. شبکه‌ای که به این طریق ایجاد می‌شود مشابه یک شبکه ژئودتیکی است، با این تفاوت که مشاهدات در آن اختلاف فاز

1. Slave
2. SBAS
3. Master
4. Slave

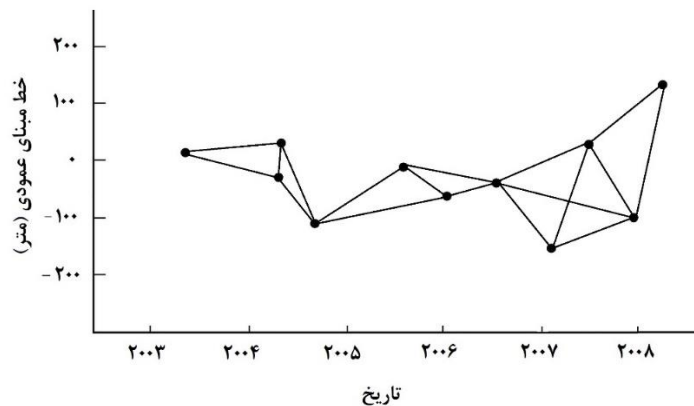
جابه‌جایی بین زوج تصاویر و مجهولات آن فاز جابه‌جایی در زمان اخذ تصاویر است. در واقع، با قراردادن حد آستانه برای طول مبنای اینترفروگرام‌های تشکیل‌شده، شبکه SBAS تشکیل می‌شود. شکل ۴ شبکه حاصل از ۱۸ اینترفروگرام را در منطقه مورد مطالعه نمایش می‌دهد. از بین ۱۸ اینترفروگرام تولیدشده از آنالیز سری زمانی، ۱۰ اینترفروگرام با توجه به دارابودن همدوسی بالا وارد مرحله تفسیر نتایج با داده‌های حاصل از تولید شدند (جدول ۲).



شکل ۲. الف) هندسه روش تداخل‌سنجی؛ ب) روش تداخل‌سنجی تفاضلی برای اندازه‌گیری تغییرات سطح زمین (برگمن و همکاران، ۲۰۰۰)



شکل ۳. فلوچارت روش تداخل‌سنجی راداری



شکل ۴. شبکهٔ اینترفروگرام‌های تولیدشده در روش SBAS

نتایج و بحث

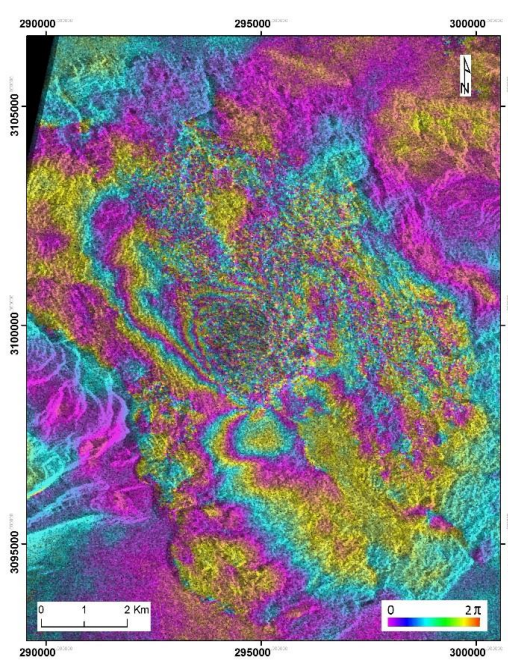
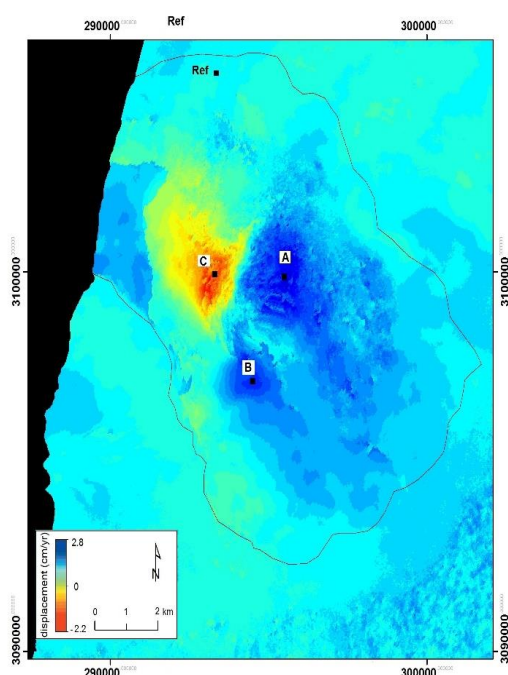
جابه‌جایی و تغییرات سطحی نمک

با اجرای روش تداخل‌سنجی راداری بر روی جفت تصاویر مربوط به سال‌های ۲۰۰۳ و ۲۰۰۸ از منطقهٔ مورد مطالعه، تصویر تداخل‌نگاشت مربوط به آن تهیه شد (شکل ۵). همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، در تصاویر تداخل‌نگاشت به‌دست‌آمده فرینج‌هایی تشکیل شده است. از آنجا که ماهوارهٔ مورد استفاده در باند C کار می‌کند، هر فرینج به‌دست‌آمده $\frac{1}{2}$ (۵۶ میلی‌متر) معادل $\frac{2}{8}$ سانتی‌متر است و مقدار جابه‌جایی در جهت دید ماهواره با شمردن تعداد فرینج‌ها به‌دست می‌آید. با توجه به نحوهٔ قرارگیری سیکل رنگی (الگوی فرینج‌ها) مکانیزم جابه‌جایی نیز متفاوت است؛ به‌طوری‌که اگر سیکل رنگی زرد-آبی-قرمز باشد، جابه‌جایی به طرف دور از رادار و اگر سیکل رنگی زرد-قرمز-آبی باشد، جابه‌جایی به سمت رادار اتفاق افتاده است. قبل از اینکه از تداخل‌نگاشت تهیه‌شده بتوان نقشهٔ جابه‌جایی سطحی منطقه را تهیه کرد، نخست باید فاز توپوگرافی را از تداخل‌نگاشت تولیدشده کسر کرد و سپس با اعمال فیلتر Goldstein خط‌های احتمالی از جمله خطای اسپکل و نویز را رفع کرد. از آنجا که اطلاعات فاز یک تداخل‌نگاشت در مقیاس 2π است، یک مشکل مبهم در محاسبهٔ تعداد صحیح سیکل‌های فاز وجود دارد که برای به‌دست‌آوردن فواصل باید بازهٔ مایل به مشاهدات فاز اضافه شود. این حل ابهام حل ابهام فاز^۱ شناخته می‌شود. به فرایند بازیابی مقادیر فاز نامبهم و صحیح از یک مجموعهٔ دو بُعدی مقادیر فاز، که در بازه $(\pi, \pi-)$ است، بازیابی فاز دو بُعدی گفته می‌شود. و در نهایت با اجرا و اعمال فیلتر و حل ابهام فاز، نقشهٔ جابه‌جایی متوسط رخ داده بر روی سطح گنبد نمکی تهیه شد (شکل ۶). همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، مقدار تغییرات سطحی گنبد نمکی شاه‌غیب بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۸ در محل فرینج‌های به‌دست‌آمده از تصاویر ASAR بین -2.2 تا 2.8 سانتی‌متر در سال و در راستای دید ماهواره است. دو منطقه از سطح گنبد نمکی دچار بالا آمدگی و یک محدوده در بخش شمال غربی گنبد دچار فرونشست شده است.

به‌منظور بررسی نحوهٔ تغییرات رخ دادهٔ تودهٔ نمکی در طول پنج سال و ارتباط بین این تغییرات با شرایط آب و هوایی متفاوت، از بیست تصویر مربوط به ده دورهٔ مختلف زمانی استفاده شد و سپس نقشه‌های جابه‌جایی مربوط به دوره‌های مختلف تهیه شد (شکل‌های ۸، ۹، و ۱۰). هر یک از نقشه‌ها چگونگی تغییر شکل تودهٔ گنبد نمکی را در دورهٔ مربوطه نشان می‌دهد. نمودار آنالیز سری زمانی مربوط به نقاطی که طی پنج سال دچار بالا آمدگی و فرونشست شده‌اند از روی

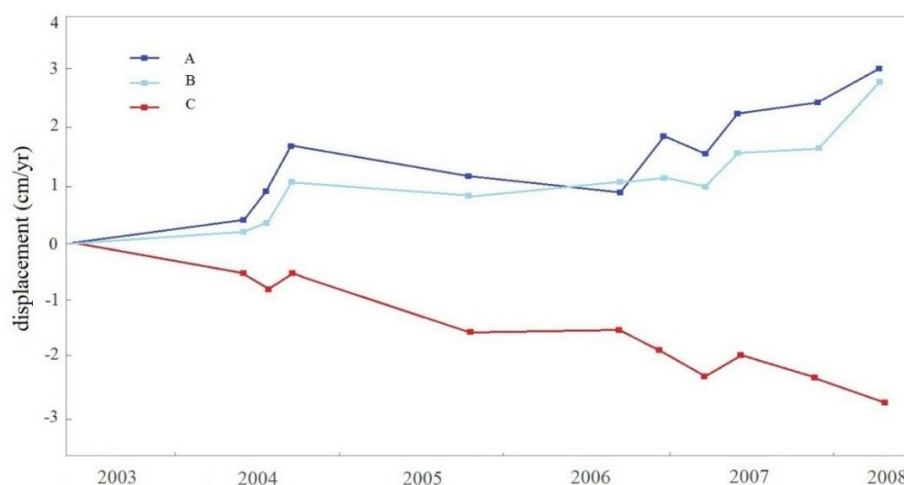
1. Phase Unwrapping

نقشه‌های جابه‌جایی مقطعی ترسیم شد (شکل ۷). همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، نقاط A و B برافراشته و نقطه C نشست کرده است. نقطه مبنا برای ترسیم نمودار آنالیز زمانی نقطه‌ای به نام Ref در بخش شمالی گنبد نمکی در نظر گرفته شده است و تمام جابه‌جایی‌ها نسبت به این نقطه مبنای محلی محاسبه شده است. براساس نمودار به‌دست‌آمده، بخش شرقی و غربی گنبد نمکی رفتاری کاملاً عکس دارند؛ به‌طوری‌که روند بالآمدگی در نقاط A و B تقریباً یکنواخت در طول دوره زمانی مورد مطالعه با نرخ ۲/۳ سانتی‌متر در سال افزایش یافته است. همچنین، روند فرورانش در نقطه C نیز با نرخ ۲/۲- سانتی‌متر در سال و نسبتاً یکنواخت افزایش می‌یابد.



شکل ۵. تداخل‌نگاشت منطقه مورد مطالعه

شکل ۶. میزان جابه‌جایی متوسط سطحی



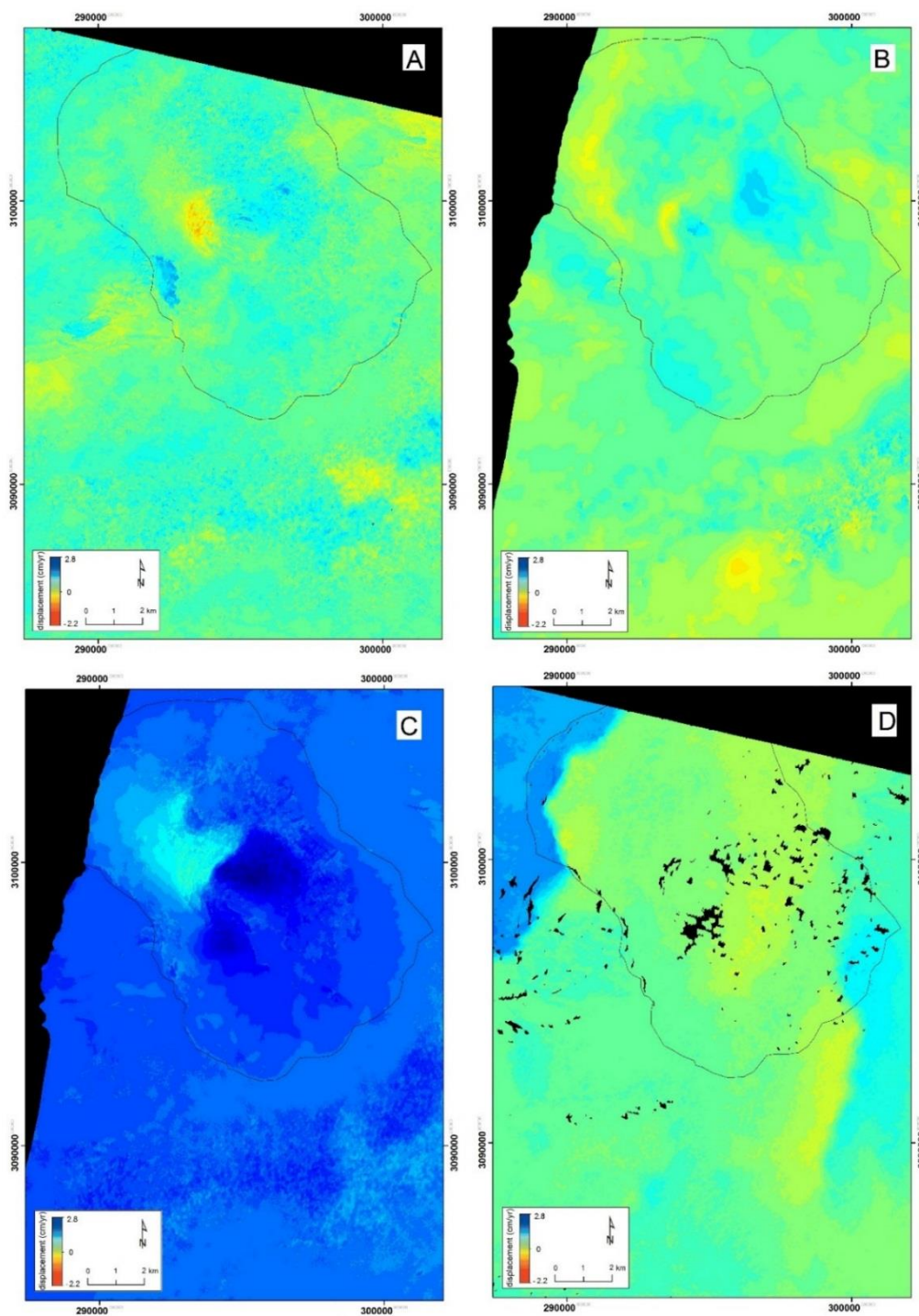
شکل ۷. نمودار آنالیز سری زمانی نقاط A، B، و C

ارتباط بین شرایط آب و هوایی مختلف و تحرک نمک

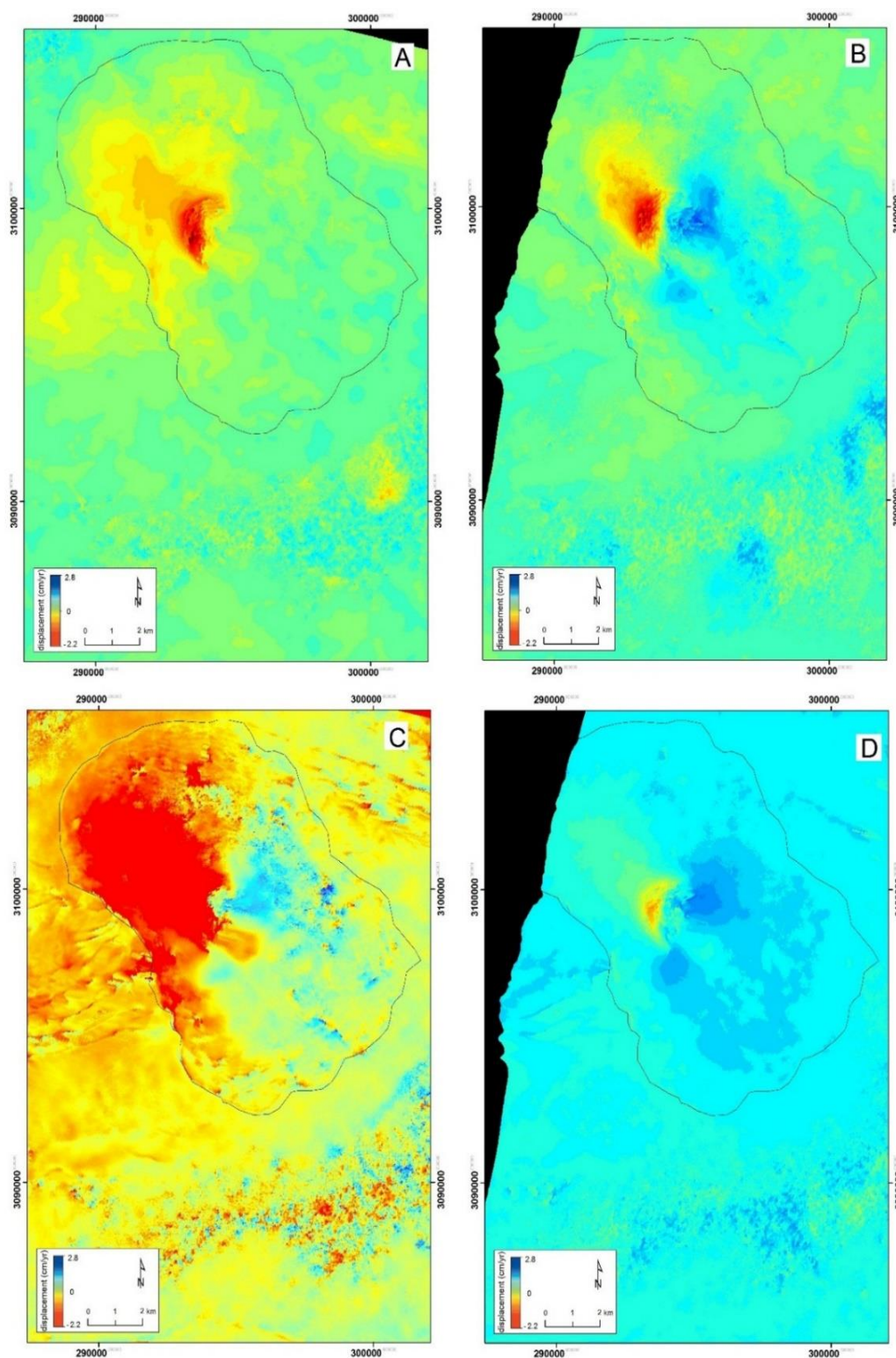
بر اساس نقشه‌های جابه‌جایی مقطعی که در شکل‌های ۸، ۹، و ۱۰ آمده است، ارتباط ظاهری بین نقشه‌های مربوط به ماه‌های گرم و سرد سال با میزان جابه‌جایی سطحی نمک‌ها دیده می‌شود. در شکل ۸C که مربوط به دو ماه گرم سال است، میزان بالآمدگی خیلی بیشتر از فرونشست اتفاق افتاده است. و یا آن‌طور که در شکل ۹A مشاهده می‌شود، نرخ فرورانش بیشتر از بالآمدگی بوده و این تصویر مربوط به سه ماه زمستان است. نحوه جابه‌جایی در شکل ۹B شامل ترکیبی از بالآمدگی و فرورانش است و با توجه به اینکه در بازه زمانی طولانی‌تر و شامل تقریباً ماه‌هایی از زمستان و تابستان بوده هر دو الگو قابل پیش‌بینی است. در تصاویر دیگر نیز این ارتباط بین دمای محیط و رفتار توده‌های نمک وجود دارد، پس در زمان‌هایی که دما بالاست توده نمک دچار بالآمدگی سطحی بیشتر و در زمان‌هایی که دما پایین است سطح گنبد نمکی بیشتر دچار فرونشست شده است. ضمناً، به‌منظور بررسی بیشتر ارتباط شرایط آب و هوایی مختلف بر نحوه تحرک توده‌های نمکی، نمودار همبستگی بین میزان جابه‌جایی مقطعی مربوط به نقاط A، B، و C با دمای متوسط و بارش تجمعی مربوط به همان مقطع زمانی ترسیم شد (شکل‌های ۱۲ و ۱۳). همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، بر اساس ضرایب همبستگی به‌دست‌آمده، بین میزان جابه‌جایی و دمای متوسط ارتباط مستقیمی وجود دارد؛ به‌طوری‌که با افزایش دما میزان بالآمدگی نمک افزایش می‌یابد و میزان فرونشست نیز کاهش می‌یابد، یا، به تعبیر دیگر، افزایش دما باعث انبساط و متورم‌شدن نمک و کاهش دما باعث موجب انقباض و متراکم‌شدن آن می‌شود. بر اساس شکل ۱۳، ضریب همبستگی بین میزان جابه‌جایی‌های رخ داده با مقدار بارش تجمعی نزدیک به صفر به‌دست آمده است. بنابراین، هیچ‌گونه ارتباط معنی‌داری بین میزان بارش و تغییرات سطحی نمک‌ها مشاهده نمی‌شود. و این موضوع نیز شاید به‌دلیل تأثیرات کوتاه‌مدت بارندگی بر تحرک نمک است. همان‌طور که در جدول ۱ نیز مشاهده می‌شود، تأثیر عامل رطوبت روزانه است؛ درحالی‌که سری‌های زمانی تصاویر استفاده‌شده در این تحقیق بیشتر ماهیانه یا فصلی‌اند. تصویر همدوسی منطقه مورد مطالعه در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود. مقادیر همدوسی بین ۰ و ۱ متغیر است. هر چه مقدار همدوسی به عدد ۱ نزدیک‌تر باشد بدین معنی است که تغییرات فاز رخ داده در دو زمان تصویربرداری کمترین میزان است و شرایط محیطی کمترین تغییرات را داشته و یکسان بوده است. بنابراین، اندازه‌گیری فاز جابه‌جایی بهتر انجام می‌گیرد. ولیکن، هر چه این مقدار به عدد صفر نزدیک شود تصاویر ناهمدوس‌تر است و اطلاعات مناسبی نمی‌توان از آن استخراج کرد. در منطقه مورد مطالعه محدوده‌هایی که دچار جابه‌جایی شده‌اند دارای میزان همدوسی بین ۰/۵ تا ۰/۸۵ می‌باشند. قابل ذکر است که معمولاً محدوده‌هایی با میزان همدوسی زیر ۰/۲ از پروسه تعیین میزان جابه‌جایی حذف می‌شوند.

همان‌طور که از نیم‌رخ گنبد نمکی شاه‌غیب قابل برداشت است (شکل ۱۴)، الگوی جابه‌جایی سطح نمک در این گنبد به‌صورت نامتقارن عمل کرده است و این گونه تحرک نمک با شکلی نامتقارن با الگوی جریان شعاعی قابل انتظار از توده‌های نمکی اصلاً همخوانی ندارد؛ این نوع رفتار می‌تواند به‌دلیل تأثیر عوامل مختلفی همچون زمین ساخت منطقه، توپوگرافی اطراف گنبد نمکی، و مورفولوژی زیرین منبع تغذیه ایجاد شده باشد. از آنجا که همواره افزایش ارتفاع در بالای محل تغذیه گنبد نمکی مورد انتظار است، می‌توان این‌گونه برداشت کرد که محدوده‌ای که دچار بالآمدگی شده بیانگر موقعیت و مکان منبع تغذیه باشد. همچنین، میزان متوسط بالآمدگی مبین این موضوع است که میزان تغذیه نمک از میزان فرسایش و انحلال بیشتر است. وجود محدوده فرونشست در بخش غربی گنبد نمکی می‌تواند بیانگر این باشد که جهت جریان عمده کنونی نمک در این گنبد به سمت غرب است. با توجه به اینکه همبستگی آماری نسبتاً متوسطی بین شرایط آب و هوایی با جابه‌جایی‌های رخ داده بر روی گنبد نمکی مشاهده شد، می‌توان دما و تغییرات آن را یکی از عوامل تأثیرگذار بر تحرک نمک در نظر گرفت (تالبوت و روجرز، ۱۹۸۰؛ دسویس و همکاران، ۲۰۱۰؛ لی و همکاران، ۲۰۱۴).

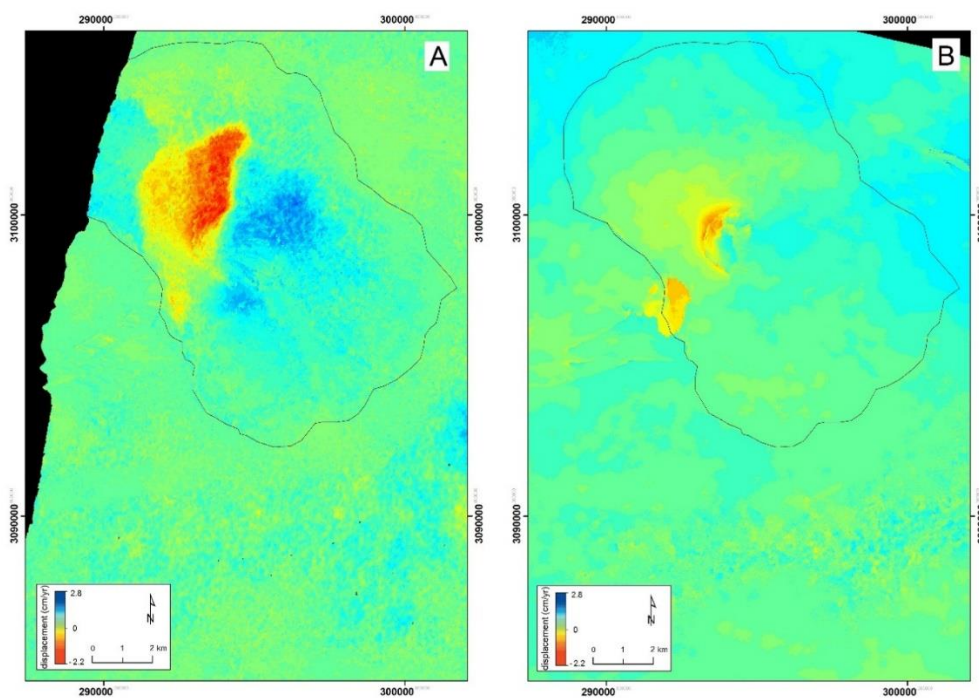
بنابراین، نتایج به‌دست‌آمده در این تحقیق با مطالعات عبدالمالکی و همکاران (۲۰۱۴) و کولون و همکاران (۲۰۱۶) همخوانی دارد. ضمن اینکه با توجه به این نتایج، نباید از تأثیر عوامل غیر آب و هوایی دیگر نظیر زمین ساخت و نیروهای تکتونیکی بر تحرک نمک غافل شد.



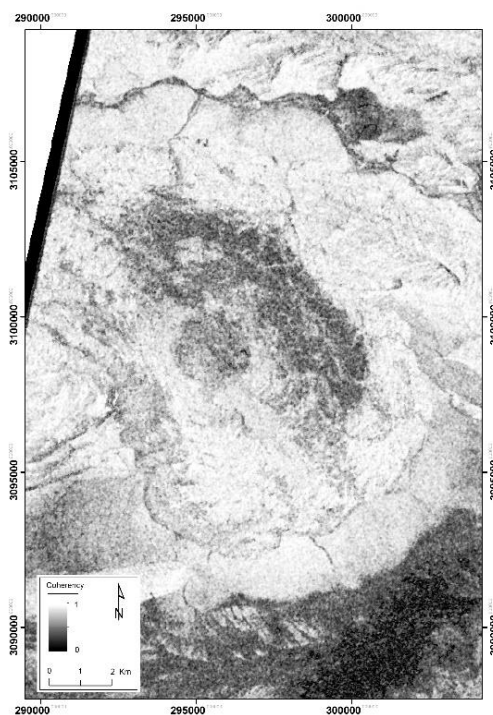
شکل ۸. نقشه جابه‌جایی مقطعی، A: بین تاریخ ۲۰۰۳/۴/۸-۲۰۰۴/۴/۲۷؛ B: بین تاریخ ۲۰۰۴/۳/۱۱-۲۰۰۴/۷/۱۸؛ C: بین تاریخ ۲۰۰۴/۶/۲۳-۲۰۰۴/۸/۱۷؛ D: بین تاریخ ۲۰۰۴/۷/۱۰-۲۰۰۵/۱۰/۱۳. همه تصاویر به صورت بالاگردند



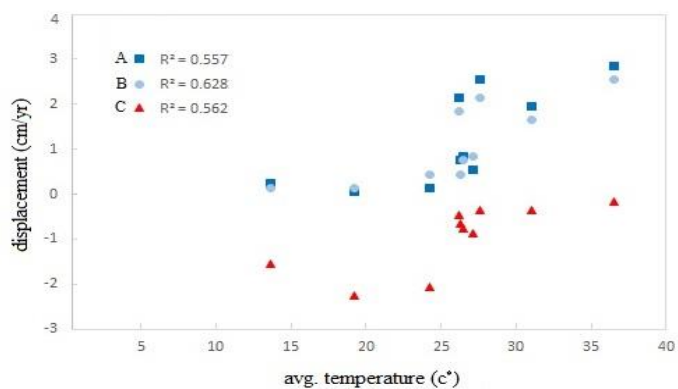
شکل ۹. نقشه جابه‌جایی مقطعی، A: بین تاریخ ۲۰۰۵/۹/۷-۲۰۰۶/۱/۳؛ B: بین تاریخ ۲۰۰۶/۱/۲۵-۲۰۰۶/۸/۷؛ C: بین تاریخ ۲۰۰۶/۹/۲۰-۲۰۰۷/۲/۱۳؛ D: بین تاریخ ۲۰۰۷/۱/۲۵-۲۰۰۷/۴/۱۸. همه تصاویر به صورت بالاگردند



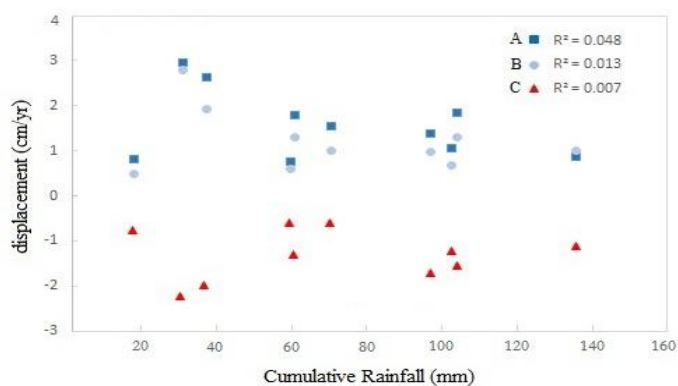
شکل ۱۰. نقشه جابه‌جایی مقطعی، A: بین تاریخ ۲۰۰۷/۳/۲۰-۲۰۰۷/۱۲/۱۵؛ B: بین تاریخ ۲۰۰۷/۱۱/۱۷-۲۰۰۸/۴/۸. همه تصاویر به صورت بالاگذرند



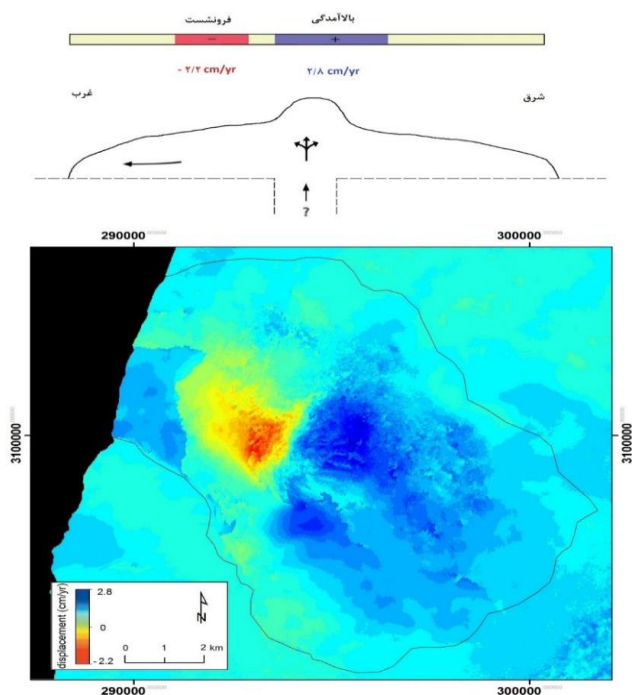
شکل ۱۱. تصویر همدوسی از منطقه مورد مطالعه



شکل ۱۲. ارتباط بین جابه‌جایی و تحرک نمک با دمای متوسط



شکل ۱۳. ارتباط بین جابه‌جایی و تحرک نمک با میزان بارش تجمعی



شکل ۱۴. نیمرخ و الگوی جابه‌جایی سطحی گنبد نمکی شاه‌غیب

نتیجه‌گیری

در این مطالعه با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری، میزان جابه‌جایی رخ داده بر روی گنبد نمکی شاه‌غیب لارستان واقع در ناحیه زاگرس چین‌خورده محاسبه شد. در این راستا، با استفاده از روش تداخل‌سنجی تفریقی و اعمال این روش بر روی دو تصویر سال ۲۰۰۳ و ۲۰۰۸، میزان جابه‌جایی رخ داده در سطح نمک به دست آمد که بر این اساس سرعت متوسط بالآآمدگی توده نمکی ۲٫۸ سانتی‌متر در سال و سرعت متوسط فرونشست ۲٫۲ سانتی‌متر در سال برآورد شد. به‌منظور بررسی تأثیر شرایط مختلف آب و هوایی به‌ویژه عامل رطوبت و دما بر روی جنبش‌شناسی نمک و نحوه رفتار نمک، از بیست تصویر مختلف استفاده شد. با استفاده از روش تداخل‌سنجی خط مبنای کوتاه، میزان تغییرات و مکانیزم جابه‌جایی توده‌های نمکی طی ده مقطع زمانی بین سال‌های ۲۰۰۳ و ۲۰۰۸ اندازه‌گیری و محاسبه شد. این میزان تغییرات در مقاطع زمانی مختلف بر حسب شرایط دمایی منطقه تغییر داشته است؛ به‌طوری‌که با توجه و عنایت به این موضوع که ضریب تعیین یا همان R^2 به‌طور ذاتی بیانگر میزان وابستگی دو متغیر است و مقدار به‌دست‌آمده برای این ضریب در ۳ نقطه از گنبد نمکی، که دارای رفتار جابه‌جایی مشخصی بوده‌اند (شکل‌های ۱۲ و ۱۳)، بین متغیر جابه‌جایی و آمار دما و رطوبت بیانگر وابستگی نسبی و ارتباط بین تغییرات دمایی و تحرک نمک است؛ به‌طوری‌که با افزایش دما میزان بالآآمدگی نمک افزایش می‌یابد و میزان فرونشست نیز کاهش می‌یابد. با توجه به پایین بودن ضریب تعیین بین دو متغیر جابه‌جایی و بارش، وجود ارتباط بین این دو عامل در این تحقیق به‌خوبی مشخص نمی‌شود، که این نیز می‌تواند به این دلیل باشد که معمولاً تأثیر عامل رطوبت روزانه است؛ درحالی‌که سری‌های زمانی تصاویر استفاده‌شده در این تحقیق بیشتر ماهیانه یا فصلی است (جدول ۱). در نهایت، نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که از بین عوامل آب و هوایی فقط عامل دما تا حدودی رفتار حرکتی نمک‌های رخنمون‌یافته گنبد نمکی شاه‌غیب لارستان را کنترل می‌کند. آنچه تحقیقات مشابه نیز به این نتایج رسیده‌اند (عبدالمالکی و همکاران، ۲۰۱۴: ۵۶؛ روستا و همکاران، ۲۰۱۹: ۴۶). همچنین، آنالیز سری زمانی از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۸ بیانگر این است که اختلاف بین بالآآمدگی و فرونشست رخ داده بر روی گنبد نمکی پیوسته افزایش یافته است.

منابع

- احمدزاده هروی، م.؛ هوشمندزاده، ع. و نبوی، م.ح. (۱۳۶۹). مفاهیم جدیدی از چینه‌شناسی سازند هرمز و مسئله دیاپیریسم در گنبد‌های نمکی جنوب ایران، مجموعه مقالات سمپوزیوم دیاپیریسم با نگرش ویژه به ایران، وزارت معادن و فلزات، ج ۱، ص ۱-۲۲.
- رهنمون‌فر، م.؛ حیدری، ر. و قیطانچی، م.ر. (۱۳۸۵). تعیین جابه‌جایی و بزرگی زلزله سال ۱۳۸۲ بم در جنوب شرقی ایران با استفاده از داده‌های ماهواره با روش تداخل‌سنجی راداری، مجله فیزیک زمین و فضا، ۳۲(۲): ۱۱۷-۱۲۴.
- شریفی‌کیا، م. (۱۳۹۱). تعیین میزان و دامنه فرونشست زمین به کمک روش تداخل‌سنجی راداری در دشت نوق- بهرمان، مجله مدرس علوم انسانی- برنامه‌ریزی و آمایش فضا، ۱۶(۳): ۳۴-۴۲.
- مهرابی، ع.؛ داستان‌پور، م.؛ رادفر، ش.؛ وزیر، م.ر. و درخشانی، ر. (۱۳۹۴). شناسایی خطواره‌های گسلی کمر بند چین‌خورده- تراستی زاگرس براساس تفسیر تصاویر ماهواره‌ای و تعیین ارتباط آن‌ها با موقعیت گنبد‌های نمکی رخنمون‌یافته سری هرمز با استفاده از تحلیل‌های GIS، مجله علوم زمین، ۲۴(۹۶): ۱۳-۳۱.
- Abdolmaleki, N.; Motagh, M.; Bahroudi, A.; Sharifi, M.A. and Haghshenas, M. (2014). Using Envisat InSAR time-series to investigate the surface kinematics of an active salt extrusion near Qum, Iran, *Journal of Geodynamics*, 81: 56-66.
- Aftabi, P.; Roustae, M.; Alsop, G. and Talbot, C. (2010). InSAR mapping and modelling of an active Iranian salt extrusion, *Journal of the Geological Society*, 167: 155-170.
- Aftabi, P.; Talbot, C.J. and Fielding, E. (2005). Salt Kinematics and InSAR, Radar Investigations of Planetary and Terrestrial Environments, LPI, 6012.
- Ahmadzadeh Heravi, M.; Hoshmandazdeh, M.A. and Nabavi, M.H. (1990). New concept of Hormoz formation's stratigraphy and the problem of salt diapirism in south Iran, *Proc. Symp. on Diapirism with Special Reference to Iran*, 1, 21. *Geol. Surv. Iran. Tehran*, 1-22.
- Baikpour, S.; Zulauf, G.; Dehghani, M. and Bahroudi, A. (2010). InSAR maps and time series observations of surface displacements of rock salt extruded near Garmsar, northern Iran, *J. Geol. Soc.*, 167: 171-181.
- Barnhart, W.D. and Lohman, R.B. (2012). Regional trends in active diapirism revealed by mountain range-scale InSAR time series, *Geophys. Res. Lett.*, 39: 1-5.
- Burgmann, R.; Rosen, P. and Fielding, E. (2000). Synthetic Aperture Radar interferometry to measure Earth's surface topography and its deformation, *Annu. Rev. Earth. Planet. Sci.*, 28: 169-209.
- Canerot, J.; Hudec, M.R. and Rockenbauch, K. (2005). Mesozoic diapirism in the Pyrenean orogen: salt tectonics on a transform plate boundary, *AAPG Bull.*, 89(2): 211-229.
- Colon, C.; Web, A. and Lassere, C. (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.
- Cosgrove, J.; Talbot, C. and Aftabi, P. (2009). A train of kink folds in the surficial salt of Qom Kuh, Central Iran, *J. Struct. Geol.*, 31: 1212-1222.
- Desbois, G.; Závada, P.; Schléder, Z. and Urai, J.L. (2010). Deformation and recrystallization mechanisms in actively extruding salt fountain: microstructural evidence for a switch in deformation mechanisms with increased availability of meteoric water and decreased grain size (Qum Kuh, central Iran), *J. Struct. Geol.*, 32.
- Ferretti, A.; Savio, G.; Barzaghi, R.; Borghi, A.; Musazzi, S.; Novali, F.; Prati, C. and Rocca, F. (2007). Submillimeter Accuracy of InSAR Time Series: Experimental Validation, *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions*, 45: 1142-1153.

- Ferretti, D.; Colombo, A.; Fumagalli, F.; Novali, F. and Rucci, A. (2015). InSAR data for monitoring land subsidence: time to think big-proc-iahs.net.
- Gao, M.L. (2015). Mapping and characterization of land subsidence in Beijing Plain caused by groundwater pumping using the Small Baseline Subset (SBAS) InSAR technique. doi: 10.5194/piahs-372-347.
- Hooper, A.; Bekaert, D.; Spaans, K. and Arikan, M. (2012). Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation, *Tectonophysics*, 514- 517.
- Hu, J.; Ding, X.; Zhang, L.; Sun, Q.; Li, Z.; Zhu, J. and Lu, Z. (2017). Estimation of 3-D surface displacement based on inSAR and deformation modeling, *IEEE Transaction on Geoscience and Remote sensing*, 55(4): 2007-2016.
- Jahani, S.; Callot, J.P.; Lamotte, D.; Letouzey J. and Leturmy, P. (2009). Salt Activity and Halokinesis in the Zagros Fold-thrust Belt and Persian Gulf (Iran), 1st International Petroleum Conference & Exhibition, EAGE, 98-107.
- Kent, P.E. (1979). The emergent Hormuz salt plugs of southern Iran, *J. Pet. Geol.*, 2: 117-144.
- Krzywiec, P. and Weinberger, R. (2006). Role of basement tectonics in evolution of salt diapirs: the Mid-Polish trough versus the Dead Sea basin, *Geolines*, 20, 82.
- Szczerbowski, Z. (2004). Preliminary results of geodetic measurements in the Inowroclaw salt dome area, central Poland, *Ann. Soc. Geol. Pol.*, 74: 319-324.
- Li, J.; Webb, A.A.G.; Mao, X.; Eckhoff, I.; Colón, C.; Zhang, K.; Wang, H.; Li, A. and He, D. (2014). Active surface salt structures of the western Kuqa fold-thrust belt, North-western China, *Geosphere*, 10(6).
- Mehrabi, A.; Dastanpour, M.; Radfar, Sh.; Vaziri, M.R. and 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(95): 17-32.
- Raspini, F. (2013). Advanced interpretation of land subsidence by validati multi-interferometric SAR data: the case study of the Anthemountas basin (Northern Greece), *Natural Hazards and Earth System Sciences*, (23): 24-45.
- Roosta, H.; Jalalifar, H.; Karimi Nasab, S. and Ranjbar, M. (2019). Surface deformation over the buried Nasr Abad salt diapir, Central Iran using interferometric synthetic aperture radar data, *International Journal of Remote Sensing*, 95(24): 46-57.
- Sharifikia, M. (2012). Determination of the rate and extent of earth subsidence using the radar interferometry method in Noogk-Bahreman plain, *Quarterly Journal of Humanities (Space Planning)*, 16(3): 34-42.
- Talbot, C.J. and Pohjola, V. (2009). Subaerial salt extrusions in Iran as analogues of ice sheets, streams and glaciers, *Earth-Sci. Rev.*, 97(1-4): 155-183.
- Talbot, C.J. and Rogers, E.A. (1980). Seasonal movements in a salt glacier in Iran, *Science*, 208(4442): 395-397.
- Taymaz, T.; Wright, T.J.; Yolsal, S.; Tan, O.; Fielding, E. and Seyitoglu, G. (2007). Source characteristics of the 6 June 2000 OrtaeÇankırı (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.
- Weinberger, R.; Lyakhovsky, V.; Baer, G. and Begin, Z.B. (2006). Mechanical modeling and InSAR measurements of Mount Sedom uplift, Dead Sea basin: implications for effective viscosity of rock salt, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 7(5).