

## بررسی عملکرد تغییرشکل زمین در وقوع ترک‌های میدان نفتی آذر به کمک تکنیک تداخل سنجی

### راداری مبتنی بر پراکنش‌گرهای دائمی (PS-InSAR)

سعیده خالصی مقدم<sup>۱</sup>، علی ارومیه‌ای<sup>۲</sup>، حمیدرضا زارعی<sup>۳</sup>، محمدرضا نیکودل<sup>۴</sup>

پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۷/۰۴

دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۴/۰۴

#### چکیده

ترک‌خوردگی زمین در میدان نفتی آذر در استان ایلام که اغلب بعد از اولین بارندگی‌های شدید فصلی به وقوع می‌پیوندد، مخاطراتی را برای سازه‌های مهندسی مانند تاسیسات پالایشگاهی، خطوط لوله، سکوهای حفاری چاه و برخی جاده‌ها بوجود آورده است. از نظر زمین‌شناسی، میدان نفتی آذر بر روی یال شمالی تاقدیس چنگوله متشکل از بخش لهری سازند آغاچاری قرار گرفته است. واحدهای سنگی تشکیل دهنده زمین در این منطقه شامل تناوبی از ماسه‌سنگ‌ها، سیلت‌استون‌ها و رس‌سنگ‌ها است. واحدهای ماسه‌سنگی و سیلت‌استون‌ها بسیار سست و دارای پتانسیل رمبندگی هستند. ترک‌ها به صورت منظم با راستای تقریباً عمود بر محور تاقدیس تشکیل می‌شوند. در این مقاله به منظور ارزیابی مکانیزم تغییرشکل زمین و نقش آن در وقوع ترک‌خوردگی زمین از تلفیق مطالعات زمین‌شناسی مهندسی با تکنیک تداخل‌سنجی راداری استفاده شده است. مطالعات تداخل‌سنجی راداری با روش تحلیل سری زمانی مبتنی بر پراکنشگرهای دائم بر روی دو مجموعه داده سنجنده (*S-IA*) Sentinel-1 شامل ۶۸ تصویر از سال‌های ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۹ نشان دهنده دو عملکرد متفاوت از تغییرشکل زمین در منطقه است. تغییرشکل خطی و دائم در محدوده شمال غرب تاقدیس چنگوله که بر راستای محور تاقدیس چنگوله و جهت پلانژ آن منطبق است. تغییرشکل دیگر در جنوب شرق تاقدیس چنگوله، تغییرشکلی غیرخطی و دوره‌ای است که معمولاً در دوره‌های ۵ تا ۶ ساله شناسایی شده است. این تغییرشکل با بارندگی‌های شدید منطقه همخوانی نزدیکی دارد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که ترک‌خوردگی زمین در میدان نفتی آذر به علت تغییر شکل زمین، ناشی از رشد تاقدیس چنگوله و پدیده رمبندگی ماسه‌سنگ‌های سست در سازند آغاچاری است.

**کلید واژه‌ها:** ترک‌خوردگی زمین، *PS-InSAR*، بررسی ژئوتکنیکی، سازند لهری، تاقدیس چنگوله

۱ دانشجوی دکتری زمین‌شناسی مهندسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس

۲ استاد گروه زمین‌شناسی مهندسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس

۳ دکتری زمین‌شناسی مهندسی، شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس

۴ استاد گروه زمین‌شناسی مهندسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس

\* مسئول مکاتبات

## ۱. مقدمه

پدیده ترک خوردگی زمین یکی از مخاطرات زمین شناسی مهندسی است که در نتیجه تغییر شکل و جابه جایی سطح زمین صورت می پذیرد. بررسی این پدیده، شناسایی الگوی رفتاری آن و پی بردن به چگونگی جلوگیری از آسیب های احتمالی ناشی از آن، نقش مهم در تأمین امنیت برای سازه های مهندسی بر روی زمین دارد. آسیب رسانی به شریان های حیاتی به علت نشست های نامتقارن مانند آسیب به مسیر راه ها، خطوط انتقال آب، گاز و نفت، مسیر دکل های برق و مخبرات، کانال ها، ایجاد محدودیت هایی برای زمین های کشاورزی و کاهش کارایی آن ها و تأثیرات منفی از نظر ایمنی و اقتصادی در توسعه شهری و پایداری سازه ها از جمله پیامدهای مخرب ترک خوردگی زمین هستند.

عوامل متعددی در ایجاد ترک خوردگی زمین موثر هستند. از جمله عوامل تشکیل این ترک ها می توان به نیروها و ساختارهای تکتونیکی، خصوصیات مهندسی خاک و زمین ریخت شناسی و حرکت های افقی و عمودی ناشی از آن ها مانند فرونشست زمین اشاره نمود. تنش های تکتونیکی ناشی از گسلش، چین خوردگی، زلزله و دیابیرسیم مهم ترین عوامل تکتونیکی موثر در ترک خوردگی زمین به شمار می روند که توسط محققان مختلفی مورد مطالعه قرار گرفته است. به عنوان مثال مطالعات انجام شده در حوضه ویه (Weihe) کشور چین نشان داده است که منشا ترک خوردگی های زمین در این حوزه ناشی از گسترش شکستگی های یکی از گسل های اصلی منطقه می باشد (Peng et al., 2018).

دیگر عامل موثر بر ترک خوردگی زمین فرونشست زمین ناشی از برداشت بی رویه آب های زیرزمینی، پدیده های رمبندگی، رگاب، خشک و اشباع شدن زمین، تحکیم، واگرایی و روان گرایی است که ارتباط مستقیم با خصوصیات مهندسی مصالح زمین دارند. این پدیده ها در صورتی که باعث فرونشست نامتقارن زمین و در نتیجه توسعه تنش های کششی در بخش های سطحی زمین شوند به ترک خوردگی زمین منجر خواهد شد. اغلب ترک خوردگی های مطالعه شده در

ایران، در حاشیه دشت های آبرفتی و در اثر برداشت بی رویه آب زیرزمینی بوده است. دشت های رفسنجان، ورامین، تهران و کبودرآهنگ از موارد مشابه هستند که به علت این پدیده رخ داده اند. در اغلب این ترک خوردگی ها عامل اصلی توسعه تنش ها، فرونشست زمین ناشی از برداشت بی رویه آب زیرزمینی بوده است (کمک پناه، ۱۳۸۶). مطالعات انجام شده توسط نیکخواه و همکارانش (Nikbakhti et al., 2018) در دشت ورامین نشان می دهد که حضور لایه های لسی و شبه لسی با پتانسیل رمبندگی بالا و همچنین برداشت بی رویه آب های زیرزمینی دو عامل اصلی گسترش ترک خوردگی زمین در این منطقه می باشند.

پدیده رمبندگی لس های زرد و خاکستری بعد از بارندگی های شدید (۷۰۰ میلیمتر) در حوضه های لینفن (Linfen) و یونچنگ (Yuncheng) کشور چین که باعث بروز ترک هایی به طول چند کیلومتر شده است از دیگر موارد ترک خوردگی در ارتباط مستقیم با خصوصیات مهندسی مصالح زمین به شمار می روند (Li et al., 2000). همچنین ترک های ناشی از زمین لغزش و گسترش جانبی زمین (Lateral Spreading) از جمله ترک های زمین به شمار می روند که به محدوده لغزش محدود می شوند. شکل و توسعه این گروه از ترک ها معمولاً از هندسه توده لغزشی تبعیت می کند (Lazecy et al., 2015; Zaruma et al., 2020).

پدیده ترک خوردگی زمین در میدان نفتی آذر واقع در استان ایلام باعث بروز مخاطراتی برای سازه های مهندسی، خطوط لوله انتقال نفت، سکوهای حفاری چاه و برخی جاده ها در منطقه شده است. این ترک ها همزمان با عملیات عمرانی در سال ۱۳۹۲ در میدان نفتی آذر مورد توجه و مطالعه قرار گرفته است. بررسی های میدانی نشان می دهد که ترک خوردگی زمین در منطقه مورد مطالعه قدمتی بیش از عملیات عمرانی در منطقه دارد و همگی در شکل های ممتد و موازی به طول چند صد متر و بازشدگی چند ده سانتی متر مشاهده می شود که اغلب بعد از اولین بارندگی های شدید در منطقه به وقوع می پیوندد (خالصی مقدم و همکاران، ۱۳۹۵). از نظر

استفاده شده است ( Balz et al., 2012; Foroughnia et al., 2019; Ghazifard et al., 2016; Grzempowski et al., 2020; Heimlich et al., 2015; Hongdong et al., 2011; Jiang & Lin, 2010; Mehdi, 2018; Qu et al., 2014; Terranova et al., 2015; Zaruma et al., 2020).

به کمک تکنیک تداخل‌سنجی راداری تفاضلی ( Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar (D-InSAR)) یک تصویر به نام تداخل‌نگار (Interferogram) ساخته می‌شود که حاوی اختلاف فاز دو تصویر راداریست که با دقت نسبت به هم ثبت هندسی شده‌اند. فاز تداخل‌نگار حاوی اثر توپوگرافی، خطاهای مداری و اثرات اتمسفر می‌باشد که برای به دست آوردن جابجایی سطح زمین در یک بازه زمانی، می‌بایست از تداخل‌نگارها حذف گردند (رابطه ۱).

$$d\phi_{int} = d\phi_{topo} + d\phi_{defo} + d\phi_{atm} + d\phi_{noise} + d\phi_{orb} \quad (1)$$

اختلاف فاز محاسبه شده در هر تداخل‌نگار،  $d\phi_{topo}$  فاز ناشی از توپوگرافی،  $d\phi_{defo}$  فاز ناشی از جابجایی،  $d\phi_{noise}$  فاز ناشی از نویز،  $d\phi_{atm}$  فاز ناشی از اتمسفر و  $d\phi_{orb}$  فاز ناشی از خطاهای مداری است. با انجام تصحیحات اثر این خطاها از بین می‌روند اما اثر مربوط به اتمسفر در فاز برآوردشده باقی می‌ماند چنانچه نرخ جابه‌جایی در منطقه کم بوده و تصاویر راداری نیز دچار عدم همبستگی زمانی شوند، نمی‌توان به‌درستی از تکنیک تداخل‌سنجی راداری تفاضلی استفاده نمود (Zebker & Villasenor, 1992).

به منظور حذف این محدودیت‌ها روش‌های آنالیز سری زمانی ابداع شدند. در این روش‌ها، پس از ایجاد یک مجموعه تداخل‌نگار فازهای مربوط به پیکسل‌های یکسان در تداخل‌نگارها با یکدیگر تجمیع می‌گردند. با میانگین‌گیری‌های موجود در الگوریتم این روش‌ها میزان مؤلفه‌های ایجادکننده نویز در تداخل‌نگار (مؤلفه اتمسفری و مداری) تا حد زیادی تعدیل می‌شود (بابایی و همکاران، ۱۳۹۵). در اواخر ۱۹۹۰ مشخص شد که برخی عوارض روی سطح زمین دارای ویژگی‌های بازپراکنشی نسبتاً پایدار در طول چندین ماه و

زمین‌شناسی، میدان نفتی آذر بر روی تاقدیس چنگوله متشکل از بخش لهری سازند آغاچاری قرار گرفته است. این منطقه برخلاف دشت‌های آبرفتی مطالعه شده در ایران که اغلب با مشکل ترک‌خوردگی زمین ناشی از برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی و فرونشست زمین همراه هستند، از واحدهای ماسه‌سنگی و گل‌سنگی تشکیل شده است و مسئله برداشت آب زیرزمینی در آن وجود ندارد. مطالعات انجام شده توسط قاسمی و نایب (Ghassemi & Nayeib, 2015)، علت وقوع ترک‌ها در میدان نفتی آذر را عوامل تکنونیک‌ی معرفی کرده است. در این مطالعات رشد و طویل‌شدگی تاقدیس چنگوله در راستای پلانژ تاقدیس و توسعه میدان تنش ناشی از آن به عنوان عامل اصلی وقوع ترک‌ها معرفی شده است. مطالعات انجام شده توسط میرزایی و همکارانش (Mirzaii et al., 2019) نیز فرونشست ناشی از برداشت نفت از چاه‌های در حال بهره‌برداری را عامل وقوع ترک‌ها در میدان نفتی آذر معرفی کرده است. در این مطالعه، تحلیل‌ها صرفاً بر اساس نتایج تکنیک تداخل‌سنجی راداری و جابجایی‌های شناسایی شده انجام شده است.

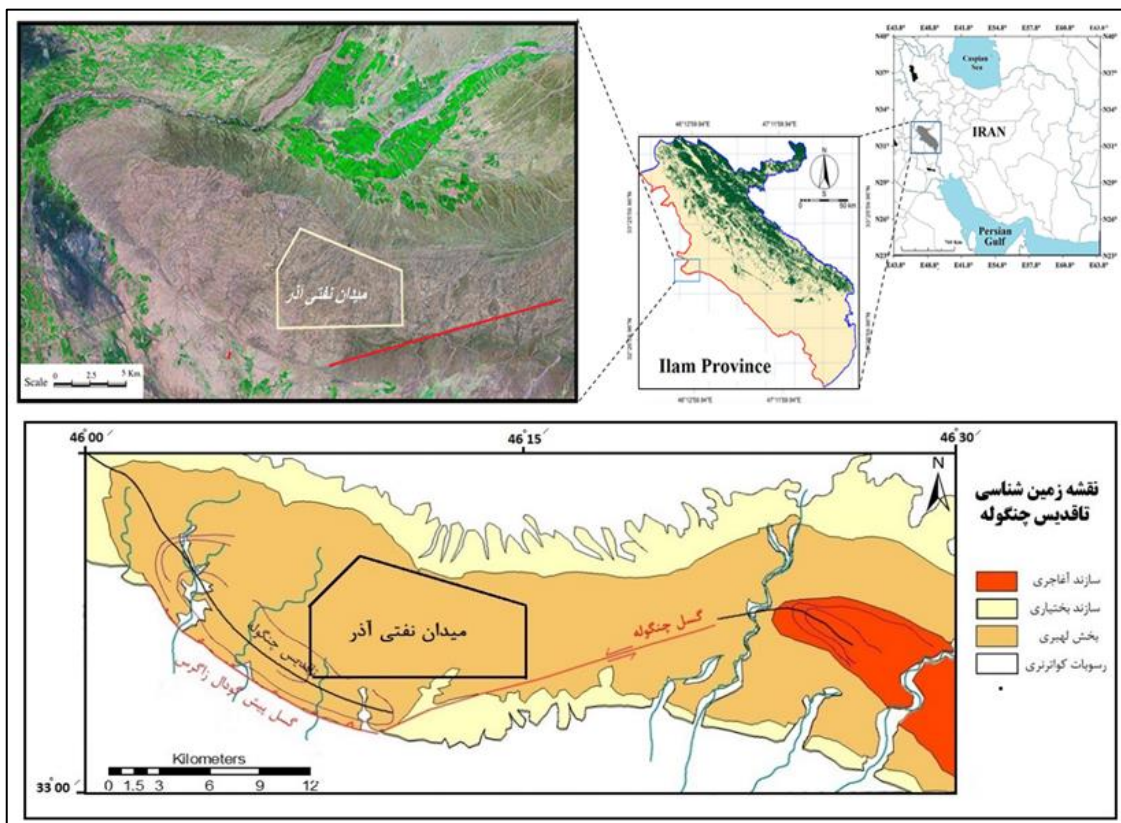
با ورود ماهواره‌های راداری ( Interferometric Synthetic Aperture Radar) در دهه ۷۰ میلادی، تکنیک تداخل‌سنجی راداری به‌عنوان ابزاری مفید برای اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های سطح زمین با دقتی قابل مقایسه با دقت اندازه‌گیری‌های ترازیبی دقیق و سامانه تعیین موقعیت جهانی در اختیار محققین قرار گرفت. به‌طور کلی خصوصیتی چون برداشت پیوسته در سطح وسیع، دقت بالا، مقرون به صرفه بودن و امکان اخذ اطلاعات تحت هرگونه شرایط آب و هوایی از دلایل عمده استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری در پایش جابه‌جایی است (فروغ‌نیا، ۱۳۹۶). این روش با مقایسه فازهای دو تصویر راداری که از یک منطقه در دو زمان مختلف اخذ شده‌اند، قادر به تعیین تغییرات سطح زمین در آن بازه‌ی زمانی می‌باشد از این تکنیک در مطالعه و اندازه‌گیری تغییرات سطح زمین به‌طور گسترده در اکثر زمینه‌ها مانند مطالعات آتشفشان، زلزله، فرونشست و پایش حرکت زمین در ایران و جهان

منطقه مورد مطالعه در غربی‌ترین بخش استان ایلام و جنوب شهر مهران واقع شده است. از نظر زمین شناسی این منطقه در زاگرس چین‌خورده و بر روی یک چین‌خوردگی ملایم به نام تاقدیس چنگوله، بالاتر از گسل پیشانی زاگرس قرار دارد. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی و نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه بر روی تاقدیس چنگوله را نشان می‌دهد. از نظر سنگ‌چینه‌شناسی واحدهای سنگی تشکیل‌دهنده میدان نفتی آذر از بخش لهری سازند آغاچاری و کنگلومراهای سازند بختیاری تشکیل شده است. بخش لهری در منطقه مورد مطالعه متشکل از واحدهای سنگ‌چینه‌شناسی شامل رس‌سنگ، لای سنگ، گل‌سنگ و ماسه‌سنگ‌های ریزدانه است. نهشته‌های عهد حاضر نیز به صورت آبرفت‌های رودخانه‌ای، خاک‌های برجا و رسوبات دشت‌های سیلابی دیده می‌شود.

حتی چندین سال می‌باشند (Usai & Hanssen, 1997). این نقاط با عنوان پراکنش‌گرهای دائمی (Persistent Scatterer) شناخته می‌شوند که منجر به ابداع روشی جدید با عنوان تکنیک تداخل‌سنجی راداری استاندارد مبتنی بر پراکنش‌گرهای دائم (PS-InSAR) شد که امکان اندازه‌گیری جابه‌جایی زمین با دقت در حد میلیمتر را دارا بود.

در این مقاله به منظور شناخت رفتار زمین و همچنین بررسی علل و مکانیزم وقوع ترک‌ها در میدان نفتی آذر از تلفیق مطالعات زمین‌شناسی مهندسی و تحلیل نتایج بدست آمده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری مبتنی بر پراکنش‌گرهای دائم استفاده شده است. مطالعات زمین‌شناسی مهندسی با هدف ارزیابی شرایط زمین‌شناسی و خصوصیات مهندسی مصالح زمین در منطقه و تحلیل داده‌های راداری با هدف ارزیابی نرخ و محدوده‌های تغییرشکل زمین مورد استفاده قرار گرفته است.

## ۲. موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه



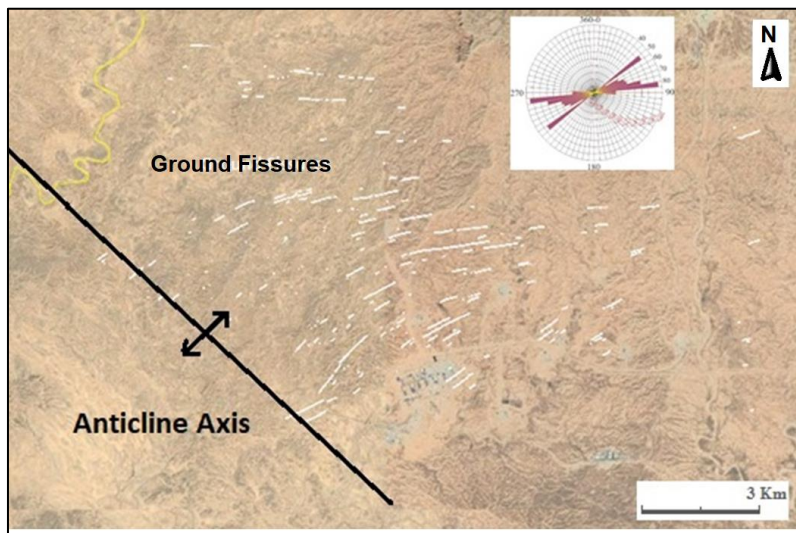
شکل ۱. موقعیت جغرافیایی و نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه بر روی تاقدیس چنگوله، استان ایلام.

### ۳. مواد و روش‌ها

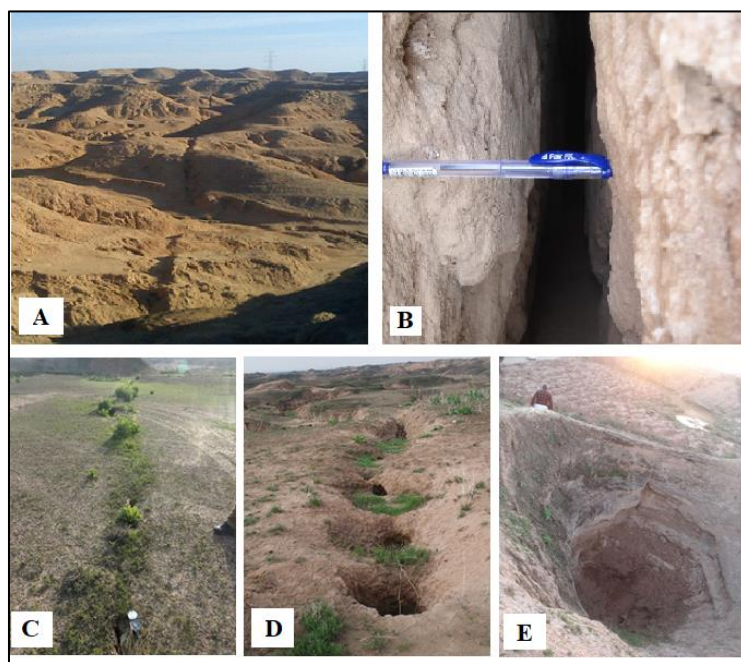
#### ۳-۱ ترک‌خوردهای زمین

در این مطالعات با استفاده از بررسی تصویرهای ماهواره‌ای و بازدیدهای میدانی، موقعیت و راستای ترک‌ها و همچنین ریخت‌شناسی بیش از ۲۵۰ ترک زمین مطالعه شده است. بر اساس این مطالعات، ترک‌های منطقه مورد مطالعه با آرایش منظم دارای راستای N45 در بخش‌های مرکزی تا N85 در بخش‌های شمالی است. این تغییر در راستای ترک‌ها به صورت تدریجی است و ترک‌های متقاطع در میدان آذر شناسایی نشده است. شکل ۳ این ترک‌ها را که بیشتر در یال شمال شرق تاقدیس چنگوله و تقریباً عمود بر راستای محور چین‌خوردگی گسترش یافته‌اند، نشان می‌دهد (ژرف‌پویا، ۱۳۹۳).

ریخت‌شناسی ترک‌خوردهای زمین شامل طول، عمق، عرض، پرتو شدگی و بازشدگی با اندازه‌گیری مستقیم و سنجش از دور مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. طول شکاف‌ها از ۱۰۰ متر تا ۲۰۰۰ متر متغیر و بازشدگی اولیه آنها حدود ۱۰ سانتی‌متر است (شکل ۳-۳A). دیواره‌های شکاف‌ها نزدیک به عمود هستند و هیچ شواهدی از عملکرد برشی در آنها دیده نمی‌شود (شکل ۳-۳B). برخی از شکاف‌ها دارای پرتو شدگی بوده و با رشد گیاهان در راستای آنها همراه هستند (شکل ۳-۳C). با گذشت زمان بازشدگی آنها تا ۱ متر افزایش یافته و در بعضی موارد گودال‌هایی در امتداد شکاف ایجاد می‌شوند (شکل ۳-۳D). همچنین برخی از شکاف‌های قدیمی با همان جهت وجود دارد که به دلیل فروپاشی دیواره و فرسایش گسترده شده و تشکیل فروچاله داده‌اند (شکل ۳-۳E) (ژرف‌پویا، ۱۳۹۳).



شکل ۲. گسترش ترک‌ها در مقایسه با محور تاقدیس

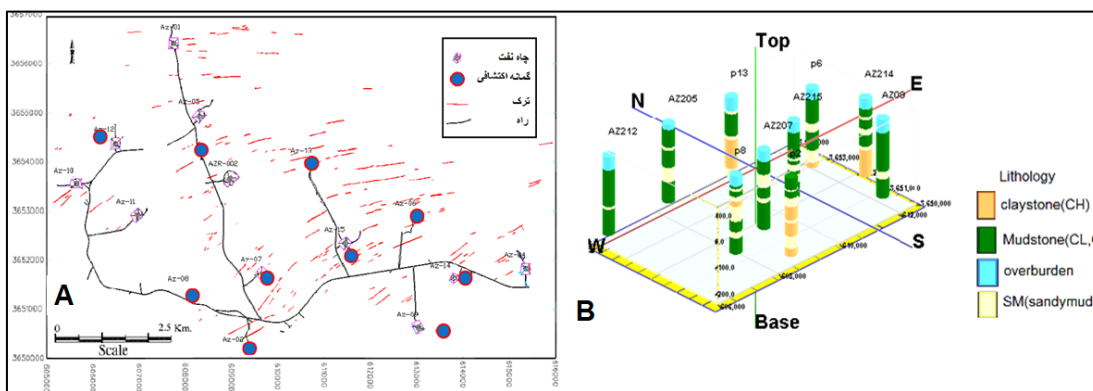


شکل ۳. ویژگی های ترک های زمین در میدان آذر (A) ترک های ممتد و بلند، (B) بازشدگی، (C) ترک های قدیمی، (D) گسترش بازشدگی، (E) تشکیل فروچاله (ژرف پویا، ۱۳۹۳)

### ۲-۳. زمین شناسی مهندسی

به منظور بررسی شرایط زمین شناسی و ویژگی های مهندسی منطقه مورد مطالعه، مطالعات جامع زمین شناسی مهندسی و ژئوتکنیک به همراه بررسی های میدانی انجام شده است. در این مطالعات ۱۰ حلقه گمانه اکتشافی با عمق ۳۰ متر برای تعیین پروفیل زمین و ارزیابی ویژگی های مهندسی مصالح حفاری شده است. بررسی مغزه های گمانه های اکتشافی، نشان دهنده وجود تناوبی از لایه های ماسه سنگ،

سیلت استون و رس سنگ در پروفیل زمین است. شکل ۴-A موقعیت این گمانه ها را نسبت به ترک خوردگی های زمین و چاه های نفت نشان می دهد. وجود لایه های سست متشکل از سیلت استون و ماسه سنگ های متخلخل در اعماق مختلف زمین از ویژگی های بارز پروفیل زمین در منطقه مورد مطالعه است (شکل ۴-B). ضخامت این لایه از ۱۰ متر در جنوب تا کمتر از ۱ متر در شمال منطقه مورد مطالعه متغیر است.

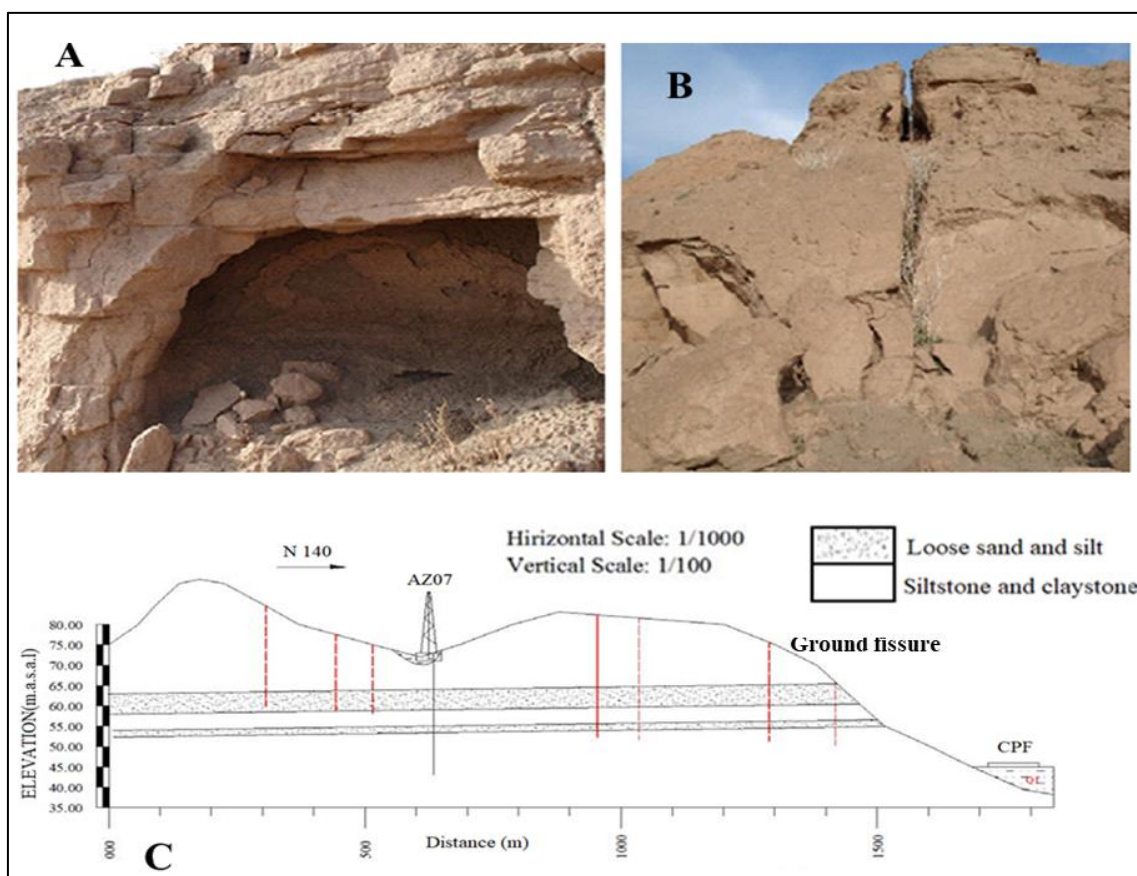


شکل ۴. موقعیت چاه ها و گمانه های اکتشافی نسبت به روند ترک ها، (B) موقعیت لایه سست نسبت به عمق در مقطع زمین شناسی و گمانه ها به صورت سه بعدی (لایه سست به رنگ زرد نمایش داده شده است)

و حد پلاستیک تعیین و سپس بر اساس سیستم طبقه‌بندی یونیفاید طبقه‌بندی شده است (جدول ۱). نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌های به دست آمده نشان می‌دهد که پروفیل زمین منطقه مورد مطالعه شامل رس‌های چاق (CH) با پتانسیل تورم بالا، رس‌های لاغر (CL) با پتانسیل تورم پایین تا متوسط و خاک‌های ماسه‌ای و سیلت‌های ماسه‌ای (SM) با خاصیت رمبندگی متوسط است. تناوب خاک‌های رسی با خاصیت تورم و خاک‌های ماسه‌ای با پتانسیل رمبندگی در پروفیل زمین در میدان آذر باعث شده است رفتار زمین در شرایط اشباع و فصول بارندگی منجر به تغییر شکل‌هایی نامتقارن در زمین شود.

نفوذ رواناب در هنگام بارندگی‌های سنگین سبب فرسایش داخلی و تشکیل دودکش‌ها در امتداد شکاف‌ها شده است. فرسایش درونی لایه سست در شکل (A و B) و یک مقطع زمین‌شناسی-ژئوتکنیکی از چاه شماره ۷ در شکل (C-5) نمایش داده شده است.

به منظور ارزیابی پارامترهای فیزیکی و مهندسی مصالح زمین آزمایش‌های آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های دست‌خورده و دست نخورده به دست‌آمده از مغزه‌های حفاری انجام شده است. نتایج این آزمایش‌ها در جدول شماره (۱) آورده شده است. خواص شاخص مصالح زمین از جمله توزیع اندازه ذرات، تخلخل، چگالی، رطوبت، حد مایع



شکل ۵. (A) فرسایش درونی لایه سست، (B) مقطع زمین‌شناسی-ژئوتکنیکی چاه شماره ۷ (برگرفته از ژرف‌پویا، ۱۳۹۳)

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی و شاخص مصالح زمین در منطقه.

Soil Classification (USCS)	CH	CL	ML	SM
Sand (%)	-	0-5.98	3.89-12.78	54.50
Silt (%)	1.74-0.87	1.98-22.27	20.36-34.68	11.19
Clay (%)	98.26-99.13	71.73-98.02	51.66-75.75	34.31
Saturated unite weight (KN/m <sup>3</sup> )	2.18-2.23 (2.2)	2.16-2.18 (2.17)	1.8-1.82 (1.81)	-
Porosity (%)	16.71-25.67 (21)	16.25-28.29 (22)	20.02-30.12 (25)	34.72-36.10 (35)
Liquid Limit (%)	21-59 (55)	26-50 (38)	22-46 (34)	Nil
Plasticity Index (%)	27-35 (31)	13-28 (21)	6-8 (7)	Nil
Shrinkage Limit (SL)	12-15 (13)	13-17 (15)	-	-
Dry unite weight (KN/m <sup>3</sup> )	1.87-2.05 (1.96)	1.88-2.06 (1.97)	1.77-1.98 (1.87)	1.67-1.71 (1.69)

هیدرومتر دوگانه و به منظور بررسی پتانسیل رهمبندگی آزمایش تحکیم مضاعف به روش ASTM 333-03 انجام شده است. نتایج به دست آمده در جدول (۲) ارائه شده است.

برای تعیین خواص مهندسی مصالح زمین آزمایش مقاومت فشاری تک محوره، برش مستقیم و رهمبندگی بر روی نمونه‌های دست‌نخورده انجام شده است. با توجه به نتایج آزمایش‌ها، مصالح زمین در منطقه مورد مطالعه را می‌توان در گروه خاک سخت تا سنگ نرم طبقه‌بندی کرد. همچنین به منظور بررسی پتانسیل واگرایی، آزمایش‌های پین هول و

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی و شاخص مصالح زمین در منطقه.

Soil Classification (USCS)	CH	CL	ML	SM
Uniaxial Compressive Strength (KPa)	0.85-1.45 (1.15)	0.99-2.97 (1.98)	0.66-0.90 (0.78)	-
Cohesion (KPa)	0.24-0.35 (0.30)	0.27-0.31 (0.29)	0.20-0.25 (0.22)	0.16-0.17 (0.165)
Friction angle (Degree)	24.5-29.2 (26.8)	24.7-31.0 (27.9)	25.3-26.6 (25.9)	26.6-27.3 (26.9)
Swelling pressure (KN/m <sup>2</sup> )	26-69 (48)	23-54 (38)	-	-
Collapsibility Index (I <sub>e</sub> )	0.16-0.75	0.26-1.09	1.33-2.98	1.20-5.61
Degree of Collapsibility	Non collapsible	Non collapsible	Low to Intermediate	Intermediate
Dispersive Index	ND1	ND1	ND2	ND3

است (Perissin et al., 2011). در این روش، تداخل‌نگارها از طریق گراف تصاویر ستاره‌ای (Star image graph) یعنی با یک تصویر پایه یکسان تولید می‌شوند؛ بهترین تصویر پایه تقریباً در اواسط بازه اخذ تصاویر انتخاب می‌شود تا بیشترین هم‌دوسی را ایجاد کند به منظور تعیین پیکسل‌های PS در مناطقی از تصویر که نسبت سیگنال به نویز بالا باشد، شاخص پایداری دامنه (Amplitude stability index) معیاری مناسب

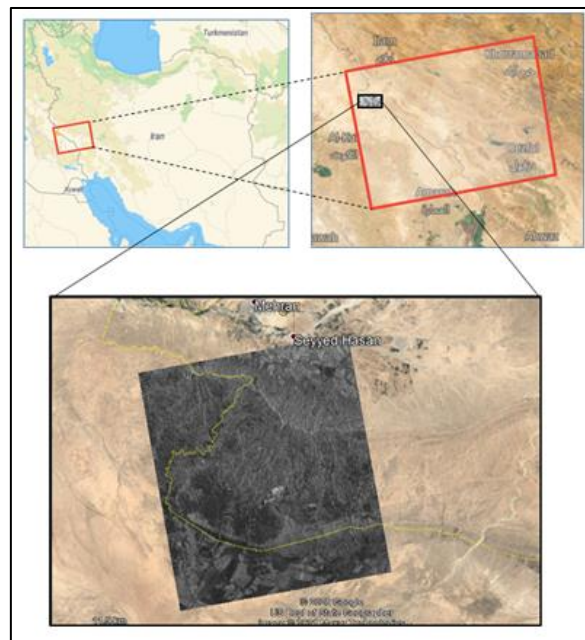
۳-۳. تکنیک تداخل‌سنجی راداری مبتنی بر پراکنشگرهای دائم (InSAR-Ps)

در این روش، با هدف غلبه بر محدودیت‌های تکنیک تداخل‌سنجی معمول، (عدم همبستگی‌های مکانی و زمانی و اثر اتمسفر)، از نقاط هم‌دوس در طول بازه زمانی تحلیل استفاده می‌شود. در این تحقیق، به منظور تحلیل مجموعه زمانی تداخل‌سنجی، از نرم افزار SARPROZ استفاده شده

جهت بیان پایایی فاز می‌باشد (Ferretti et al., 2001). سپس، طی فرآیند مثلث‌بندی دلونی (Delonay) ارتباطی برقرار خواهد شد که به علت مجاورت پیکسل‌ها و همبسته بودن اتمسفر در مکان، اختلاف فاز بین پیکسل‌های همسایه شامل فاز اتمسفری نخواهد بود و این یک مزیت عمده محسوب می‌شود. در برآورد اولیه از مجهولات، پارامترهای مجهول جابجایی و خطای DEM برای هر یال محاسبه و آنگاه با انتخاب یک نقطه مرجع خارج از محدوده فرونشست و روی سطح زمین، مقادیر پارامترهای مجهول روی یال‌ها به مقادیر مطلق روی نقاط پراکنشگر دائمی تجمیع می‌گردند (فروغ‌نیا، ۱۳۹۶). این مرحله در نرم افزار SARPROZ به نام APS (Atmospheric Phase Screen) نامیده می‌شود (Foroughnia et al., 2019). با کسر اثر توپوگرافی و جابه‌جایی زمین از فاز تداخل‌سنجی تصحیح‌شده از مرحله APS به نویز باقی‌مانده خواهیم رسید. در نرم‌افزار SARPROZ مدل رقومی SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) منطقه توسط نرم‌افزار به صورت خودکار انتخاب و وارد پردازش می‌شود. اما این مدل رقومی که دارای دقت مسطحاتی ۹۰ متر است، نسبت به مدل ALOS (Advanced Land Observing

Satellite) که دارای دقت مسطحاتی ۳۰ متر است، در زمین‌های ناهموار و کوهستانی دارای دقت کمتری است (حاجی آفاجانی و همکاران، ۱۳۹۴). در این تحقیق، از مدل رقومی ارتفاعی AW3D30 (ALOS World 3D-30m) با دقت ارتفاعی ۷ متر و دقت مسطحاتی ۳۰ متر، جهت حذف اثر توپوگرافی استفاده شده است. در نهایت با کسر نویز از نقاط PS به نقاطی می‌رسیم که نقشه تغییر شکل زمین را نشان می‌دهد.

در این مطالعه، از داده‌های مربوط به سنجنده Sentinel-1A برای بازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۰ استفاده شده است. داده‌های راداری سنجنده‌ی S-1A که منطقه تاق‌دیس چنگوله را پوشش می‌دهند شامل دو مسیر مختلف بالاگذر و پایین‌گذر در باند C با طول موج تقریبی ۵۲/۵ سانتیمتر با پلاریزاسیون VV در مد IW می‌باشند. در این تحقیق تعداد ۶۸ تصویر از مسیر بالاگذر مربوط به بازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۰ اخذ شده است. محدوده پوششی این تصاویر در شکل (۶) به نمایش درآمده است. این داده‌ها در دو مجموعه مورد مطالعه قرار گرفتند که در جدول (۳) نشان داده شده است.



شکل ۶. محدوده پوششی تصاویر Sentinel-1A در منطقه مورد مطالعه و محدوده پردازش شده.

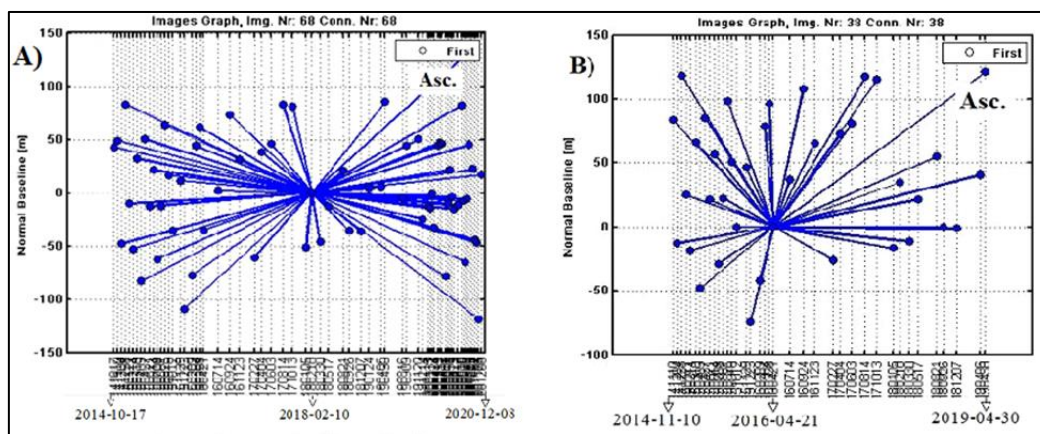
جدول ۱ - مشخصات مجموعه‌های پردازش شده

Scenes	Sensor	Pass	Polarization	Mode	Band	Date	Date of master aq.
68	S-1A	Ascending	VV	IW	C	2014-2020	2018-2-10
38	S-1A	Ascending	VV	IW	C	2014-2019	2018-4-21

## ۴. نتایج

ستاره‌ای تولید شده برای هر دو مجموعه در شکل (۷) نشان داده شده است.

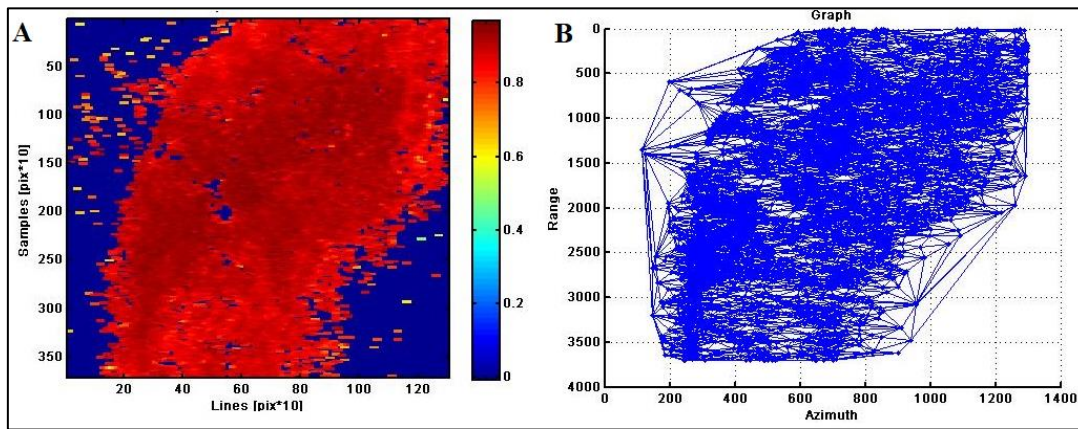
در این تحقیق پس از ورود داده‌ها به نرم افزار و پیش پردازش داده‌ها، تداخل‌نگارها از طریق گراف ستاره‌ای تصاویر یعنی با یک تصویر پایه یکسان تولید می‌شود، گراف



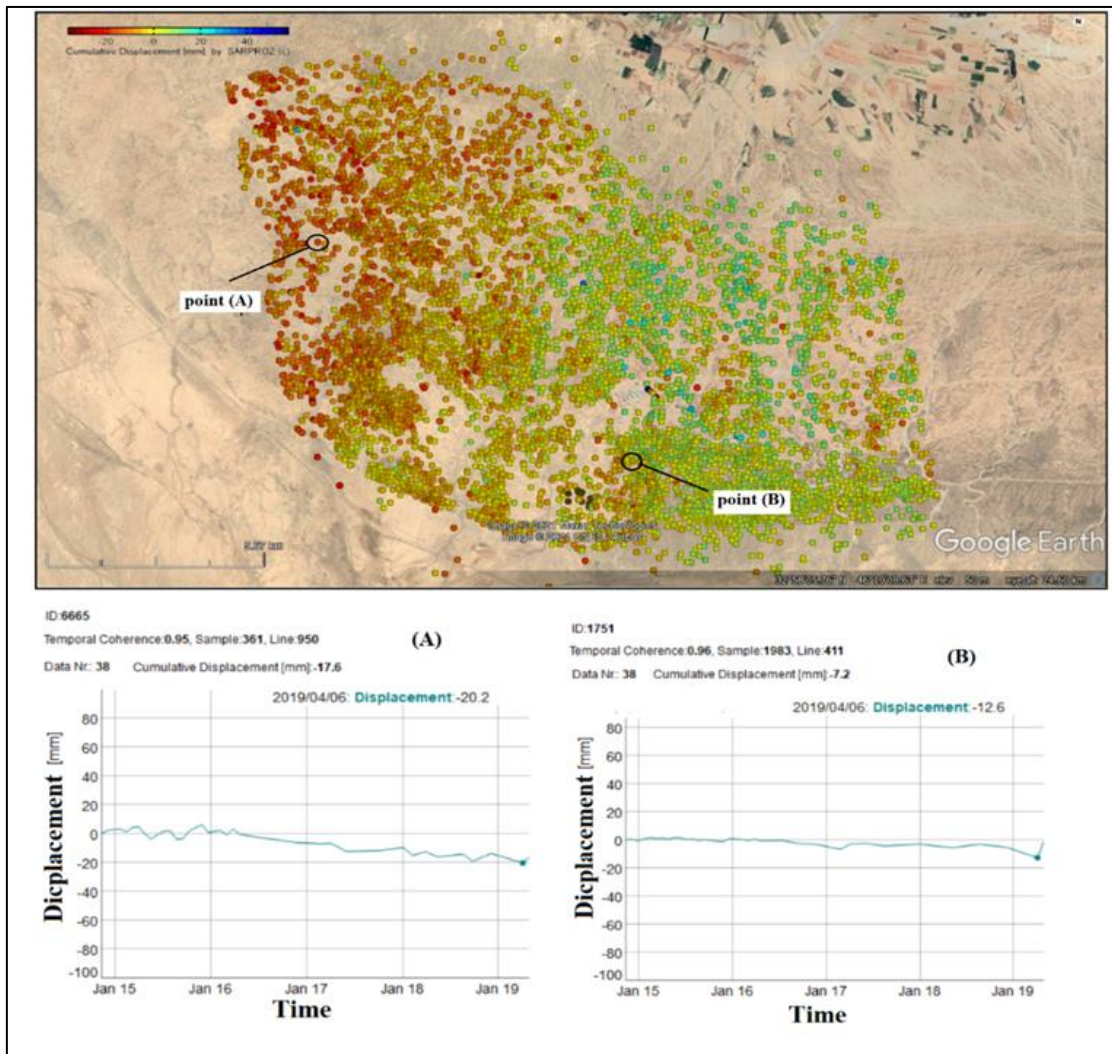
شکل ۷. گراف ستاره‌ای برای: (A) ۶۸ داده بالاگذر از تاریخ ۲۰۱۴-۲۰۲۰، (B) ۳۸ داده بالاگذر از تاریخ ۲۰۱۴-۲۰۱۹

پراکندگی دامنه اعمال گردید تا نقاط بیشتری با استفاده از نتایج مراحل قبلی انتخاب و پردازش شوند. در نهایت تنها نقاط با هم‌دوسی زمانی بالاتر از مقدار ۰/۸ برای تهیه نقشه فرونشست منطقه استفاده شد. در نرم افزار SARPROZ نتایج به صورت فایل KML و به شکل نقطه‌ای (Scatter plot) ارائه می‌شود. در این تحقیق از خروجی به صورت KML با هدف مشاهده تاق‌دیس چنگوله در هنگام سری زمانی نقاط استفاده شده است. تمام مراحل بالا برای هر دو مجموعه اعمال شد. به دلیل استفاده از روش غیر خطی در آنالیز سری زمانی، نقشه ارائه شده در مرحله سری زمانی، نشان‌دهنده جابجایی تجمعی زمین در واحد میلیمتر و در راستای خط دید ماهواره ((Line Of Sight (LOS) است.

در ادامه، با بکارگیری شاخص پراکندگی دامنه ۰/۷۵ برای هر دو مجموعه، نقاط PS انتخاب شدند که به عنوان نمونه تعداد ۸۱۵۵ نقطه در مجموعه ۳۸ داده‌ای توسط نرم‌افزار انتخاب شده است. شکل (۸-۸) مثلث‌بندی مربوط به این نقاط و شکل (۸-۸) هم‌دوسی زمانی بالا پس از حذف اثر اتمسفر در مجموعه ۳۸ داده‌ای را نشان می‌دهد. تعداد یال‌های تشکیل شده در پردازش این مجموعه داده ۲۴۴۳۶ عدد یال است. در این تحقیق به دلیل نرخ تغییرات متغیر نسبت به زمان (ترک خوردگی هرچند سال یکبار مشاهده می‌شود)، مدل جابه‌جایی غیر خطی در نظر گرفته شده است. در مرحله بعد، به منظور تخمین آثار اتمسفری، با به کارگیری فیلتر APS (Atmospheric Phase Screen)، آثار نویز از سیگنال اتمسفر جدا شد. سپس حد آستانه بالاتری، همچون ۰/۸ روی شاخص



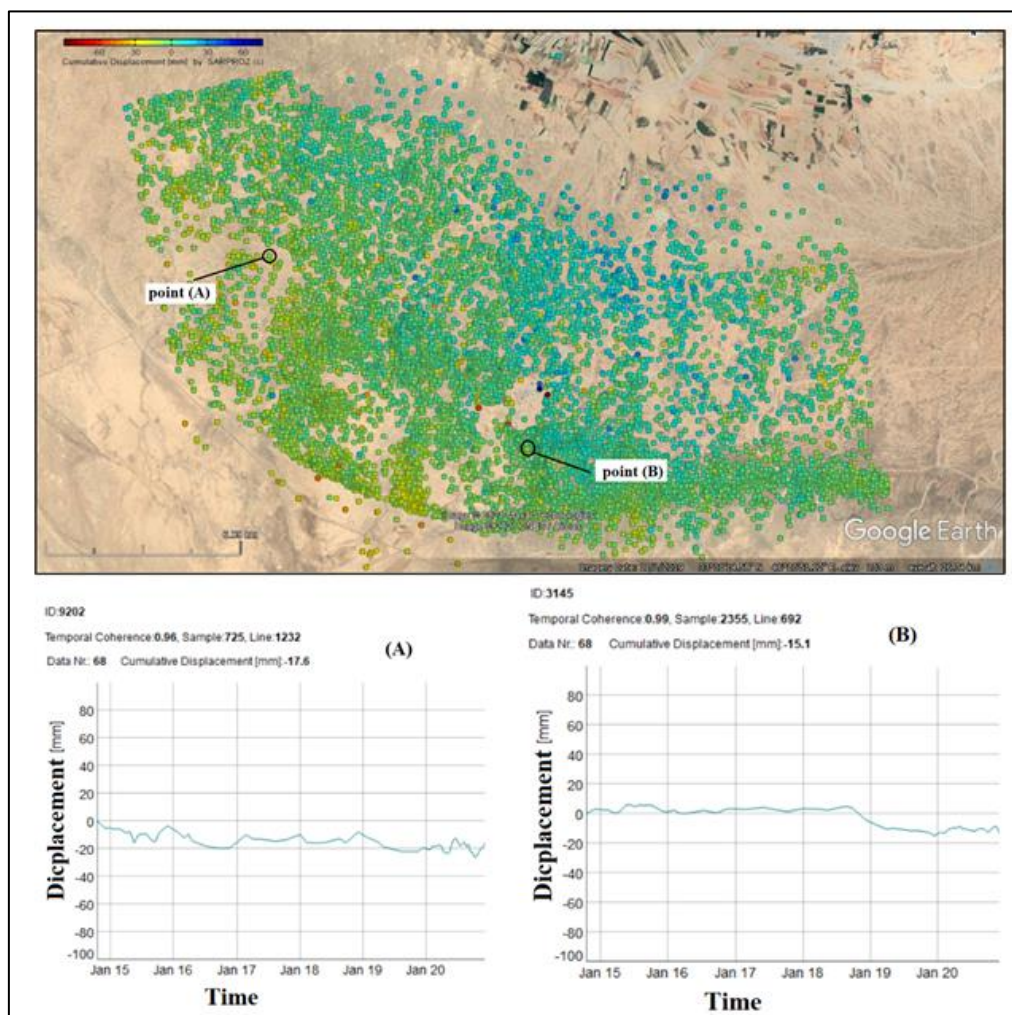
شکل ۸. A) مثلث بندی دلونی مجموعه داده‌ای، B) هم‌دوسی زمانی بالا پس از حذف اثر اتمسفر در مجموعه ۳۸ داده‌ای.



شکل ۹. نتایج مجموعه ۳۸ داده‌ای، A) جابجایی نقطه‌ای در غرب منطقه، B) جابجایی نقطه‌ای در جنوب شرق منطقه

در این نقطه از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۹ کاملاً قابل مشاهده است. در شکل (B-۱۰) نمودار نشست برای یک نقطه در جنوب شرق چین نشان داده شده است. در این نقطه جابجایی سطح زمین از ۲۰۱۹ آغاز شده است و در طول زمان مورد بررسی در این آنالیز، زمین در حالت تقریباً با ثباتی قرار داشته است. به منظور تخمین دقیق‌تر جابجایی زمین منطقه، بازه زمانی وسیع‌تر (۲۰۱۴-۲۰۲۰) و داده‌های بیشتر نیز مورد بررسی قرار گرفت (مجموعه ۶۸ داده‌ای).

شکل (۹) نقشه جابجایی تجمعی زمین به دست آمده از تحلیل سری زمانی مجموعه ۳۸ داده‌ای از تاریخ ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۹ را نشان می‌دهد. روند جابجایی در این نقشه در اکثر نقاط بررسی شده است. دو روند کلی جابجایی در زمان، در شرق و غرب تاقدیس چنگوله مشاهده شد که دو نقطه A و B این موضوع را نشان می‌دهند (شکل ۹-A و B-۹). در شکل (A-۹) نمودار حرکت یک نقطه در غرب تاقدیس چنگوله نشان داده شده است. جابجایی تقریباً یکنواخت زمین



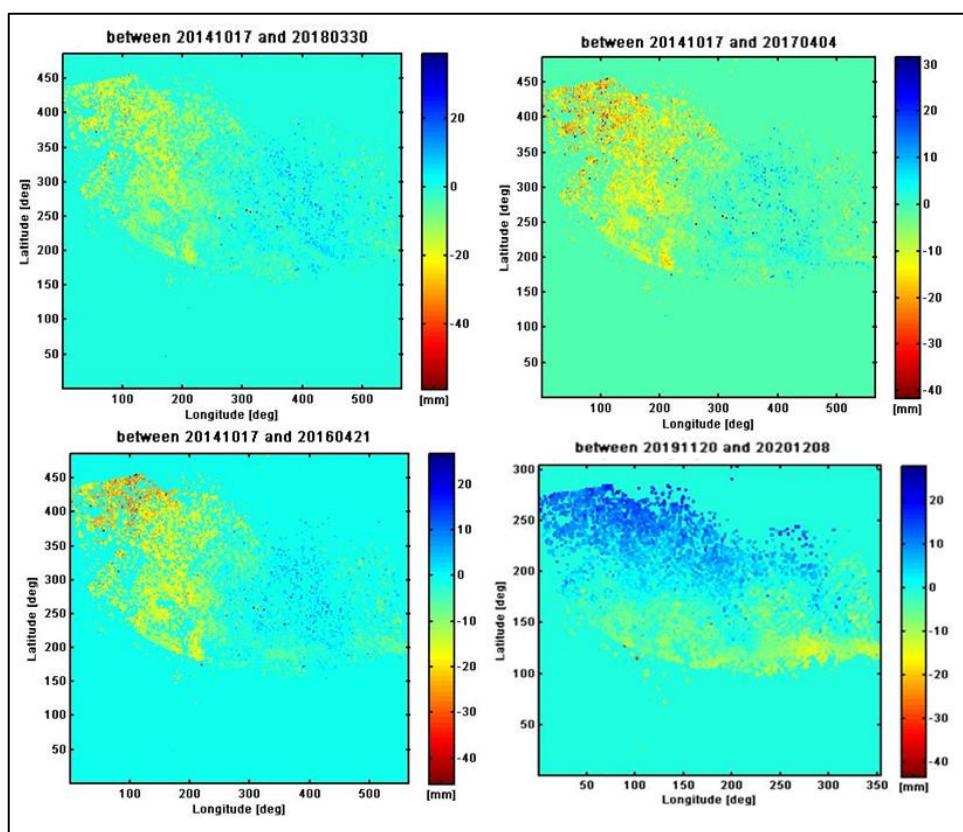
شکل ۱۰. نتایج مجموعه ۶۸ داده‌ای، (A) جابجایی نقطه‌ای در غرب منطقه، (B) جابجایی نقطه‌ای در جنوب شرق منطقه

جابجایی تجمعی در واحد زمان را برای دو نقطه نزدیک به نقاط قبلی (نقاط A و B در شکل ۹) نشان می‌دهند. همانطور که مشاهده می‌شود نمودار تغییرات زمین در این دو نقطه تا

نتایج مربوط به مجموعه ۶۸ داده‌ای در شکل (۱۰) نشان‌دهنده جابجایی‌های خاصی در شرق تاقدیس از سال ۲۰۱۹ تا پایان سال ۲۰۲۰ است. شکل‌های (A-۱۰) و (B-۱۰) نمودارهای

می‌دهد. در همین زمان‌ها جنوب شرق تاقدیس با رنگ سبزآبی تغییر شکل نزدیک به صفر را نشان می‌دهد. ولی از سال ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۰ تغییر مشخصی در الگوی تغییر شکل زمین، در منطقه جنوب شرق تاقدیس، رخ داده است. به اینصورت که مکان مناطقی در جنوب شرق منطقه از سنجنده دور شده است. در شکل (D-۱۱) تفاوت الگو کاملاً واضح قابل مشاهده است.

سال ۲۰۱۹ منطبق بر یافته‌های به دست آمده از تحلیل مجموعه ۳۸ داده‌ای و مؤید آن است. اما از اواخر ۲۰۱۹ تا اوایل ۲۰۲۰ جابجایی ناگهانی در جنوب شرق تاقدیس دیده می‌شود. به منظور بررسی بیشتر، تغییرات زمین در هر سال (ماه‌های بارش) نیز، پایش شد. همانطور که در شکل (A-۱۱) و (B و C) مشخص است، از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۹ الگوی تغییر شکل زمین، تغییرات دائم و خطی در غرب تاقدیس را نشان



شکل ۱۱. تغییرات الگوی جابجایی زمین از ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۰.

تجزیه و تحلیل داده‌ها بین بازه زمانی ۲۰۱۴ و ۲۰۲۰ نشان می‌دهد که قسمت شمال غربی تاقدیس با سرعت نسبتاً ثابت حدود ۴-۵ میلی‌متر در سال در جهت با پلانژ تاقدیس به سمت شمال غربی حرکت کرده و بر اساس اینکه نتایج از ماهواره‌ای با مسیر حرکتی اسندینگ به دست آمده است، زمین در این منطقه در حال دور شدن از ماهواره است. بردار این حرکت می‌تواند افقی، عمودی یا ترکیبی از این دو باشد. در مقابل، بخش جنوب شرقی تاقدیس با نرخ متغییر در طول زمان تغییر شکل دارد. قسمت جنوب شرقی تاقدیس در دسامبر ۲۰۱۹ پس از ۵ سال ثبات، جابجایی ناگهانی حدود ۲۰ میلی‌متر را تجربه کرده است. در این زمان این منطقه بارندگی‌های سنگین بیش از ۴۰ میلی‌متر در روز را نیز تجربه کرده است.

## ۵. بحث و نتیجه‌گیری

میدان نفتی آذر از لحاظ زمین‌شناسی بر روی یک چین‌خوردگی ملایم و نامتقارن به نام تاقدیس چنگوله واقع شده است که محور آن به سمت جنوب‌گرایش دارد. شیب یال شمالی ۵-۱۰ درجه است در حالی که یال جنوبی ۴۰ تا ۵۰ درجه به سمت جنوب متمایل است. جهت محور تاقدیس چنگوله در منطقه مورد مطالعه شمال غربی جنوب شرقی با پلانژ به سمت شمال غربی است. لایه‌های زمین از توالی ماسه‌سنگ، سیلت‌استون، گل‌سنگ متعلق به بخش لهری سازند آغاجاری تشکیل شده است، که از نظر زمین‌شناسی مهندسی به عنوان سنگ‌های ضعیف طبقه‌بندی می‌شوند. بررسی مطالعات زیرسطحی شامل نتایج گمانه‌های اکتشافی حاکی از وجود لایه‌های سست ماسه‌سنگ و سیلت‌استون با ضخامت ۱ تا ۱۰ متر به ترتیب در بخش‌های شمالی و جنوبی منطقه است که دارای بتانسیل رمبندگی متوسط هستند.

مطالعه ترک‌های منطقه با روش برداشت‌های میدانی و بررسی تصویرهای ماهواره‌ای نشان دهنده آن است که ترک‌ها به صورت منظم و بیشتر در یال شمال شرق تاقدیس چنگوله و تقریباً عمود بر راستای محور چین‌خوردگی توسعه یافته‌اند و دارای راستای N45 در بخش‌های مرکزی تا N85 در بخش‌های شمالی هستند. این تغییر در راستای ترک‌ها به صورت تدریجی است و ترک‌های متقاطع شناسایی نشده است. وجود ترک‌های زمین با قدمت مختلف که دارای پرشدگی‌ها و رشد گیاهان در راستای آن‌ها است نشان می‌دهد که ترک‌خوردگی در میدان نفتی آذر قدمتی بیشتر از عملیات عمرانی در منطقه دارد.

ترک‌خوردگی زمین در میدان نفتی آذر، به صورت دوره‌ای و اغلب بعد از بارندگی‌های شدید اتفاق می‌افتد. تمرکز این ترک‌ها در مناطق جنوبی منطقه مورد مطالعه که لایه‌های ضخیم‌تری از سنگ‌های سست وجود دارد، بیشتر است. پتانسیل رمبندگی در این لایه‌های سست ماسه‌سنگ و

سیلت‌استون و وقوع ترک‌ها بعد از بارندگی‌های شدید حکایت از نقش این لایه‌های سست در وقوع و توسعه ترک‌خوردگی زمین دارد.

بررسی تغییر شکل زمین با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری مبتنی بر پراکنش‌گرهای دائم بر روی دو مجموعه داده نشان دهنده یک تغییر شکل دائم و خطی موازی با محور چین‌خوردگی است. این تغییر شکل می‌تواند در اثر برداشت نفت و یا ناشی از رشد تاقدیس چنگوله در جهت پلانژ تاقدیس به سمت شمال غرب باشد. با توجه به اینکه داده‌های مورد استفاده در این تحقیق با شروع برداشت نفت از سمت کشور عراق، از مخزن مشترک چنگوله بوده است، بنابراین برای اظهار نظر در مورد حرکات مشاهده شده در غرب تاقدیس چنگوله نیاز به بررسی داده‌هایی در بازه زمانی قبل از برداشت نفت در منطقه است. از طرف دیگر، در بخش جنوب شرقی تاقدیس چنگوله تغییر شکل‌های غیرخطی و دوره‌ای شناسایی شده است که همزمانی این تغییر شکل‌ها با بارندگی‌ها و ترک‌خوردگی‌ها و توافق روند گسل چنگوله با ترک‌خوردگی‌ها نشان‌دهنده نقش تاثیرگذار گسل چنگوله و همچنین رمبندگی لایه‌های سست زمین در وقوع ترک‌ها در منطقه مورد مطالعه است.

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که ترک‌خوردگی زمین در میدان نفتی آذر ناشی از تغییر شکل زمین به علت عملکرد متقابل پدیده تکتونیک (به ویژه گسل چنگوله) و ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی مصالح زمین است. تکنیک تداخل‌سنجی راداری یک ابزار مفید در شناسایی تغییر شکل‌های زمین به شمار می‌رود. اما تحلیل صحیح از نتایج این تکنیک مستلزم داشتن درک صحیح از شرایط زمین‌شناسی و ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی منطقه است. بنابراین، تلفیق دانش زمین‌شناسی مهندسی و تکنیک تداخل‌سنجی راداری برای ارزیابی رفتار زمین در تغییر شکل‌ها و جابجایی‌های زمین ضروری است.

## منابع

- بابایی، س.، موسوی، ز. و روستایی، م. (۱۳۹۵). آنالیز سری زمانی تصاویر راداری با استفاده از روش‌های طول خط مبنای کوتاه (SBAS) و پراکنش‌کننده‌های دائمی (PS) در تعیین نرخ فرونشست دشت قزوین. نشریه علمی- پژوهشی علوم و فنون نقشه‌برداری، ۴.
- حاجی آقاجانی، س.، وثوقی، ب. و موسوی، ز. (۱۳۹۴). اهمیت مدل‌های ارتفاعی رقومی در دقت میدان‌های سرعت جابجایی InSAR. علوم و فنون نقشه‌برداری، ۴(۴)، ۱۲۳-۱۳۷.
- خالصی مقدم، س.، ارومیه‌ای، ع.، زارعی، ح. و نیکودل، م. (۱۳۹۵). بررسی علل وقوع ترک‌های زمین در میدان نفتی آذر. نهمین همایش زمین‌شناسی مهندسی و محیط زیست ایران.
- فروغ‌نیا، ف. (۱۳۹۶). آنالیز سری زمانی تداخل‌سنجی راداری مبتنی بر پراکنش‌گرهای دائمی با استفاده از داده‌های ENVISAT-ASAR و Sentinel-1 جهت پایش پدیده فرونشست در منطقه شهری تهران. دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.
- کمک‌پناه، ی. (۱۳۸۶). مطالعه علل پدیده گسیختگی زمین در جاده‌های دشت یزد-اردکان. پژوهشنامه حمل و نقل، ۴.
- ژرف‌پویا، گزارش مطالعات جامع سطح الارضی طرح توسعه میدان نفتی آذر، ۱۳۹۳.
- Balz, T., Wei, L., Jendryke, M., Perissin, D., & Liao, M. (2012). TOMOSAR AND PS-INSAR ANALYSIS OF HIGH-RISE BUILDINGS IN BERLIN State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan, China; balz@whu.edu.cn; Institute of Space and Earth Information, Chin. 447-450.
- Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1), 8-20.
- Foroughnia, F., Nemati, S., Maghsoudi, Y., & Perissin, D. (2019). An iterative PS-InSAR method for the analysis of large spatio-temporal baseline data stacks for land subsidence estimation. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 74(September 2018), 248-258. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.09.018>
- Ghassemi, M. R., & Nayeb, S. (2015). Active surface cracking in Aghajari Formation of the Azar oil field, Zagros, western Iran. *Marine and Petroleum Geology*, 68, 498-508. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2015.09.011>
- Ghazifard, A., Moslehi, A., Safaei, H., & Roostaei, M. (2016). Effects of groundwater withdrawal on land subsidence in Kashan Plain, Iran. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 75(3), 1157-1168. <https://doi.org/10.1007/s10064-016-0885-3>
- Grzempowski, P., Badura, J., Milczarek, W., Blachowski, J., Głowacki, T., & Zajac, M. (2020). Determination of the Long-Term Ground Surface Displacements Using a PSI Technique—Case Study on Wrocław (Poland). *Applied Sciences*, 10(10), 1-18. <https://doi.org/10.3390/app10103343>
- Heimlich, C., Gourmelen, N., Masson, F., Schmittbuhl, J., Kim, S. W., & Azzola, J. (2015). Uplift around the geothermal power plant of Landau (Germany) as observed by InSAR monitoring. *Geothermal Energy*, 3(1), 1-12. <https://doi.org/10.1186/s40517-014-0024-y>
- Hongdong, F., Kazhong, D., Chengyu, J., Chuanguang, Z., & Jiqun, X. (2011). Land subsidence monitoring by D-InSAR technique. *Mining Science and Technology*, 21(6), 869-872. <https://doi.org/10.1016/j.mstc.2011.05.030>
- Jiang, L., & Lin, H. (2010). Integrated analysis of SAR interferometric and geological data for investigating long-term reclamation settlement of Chek Lap Kok Airport, Hong Kong. *Engineering Geology*, 110(3-4), 77-92. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.11.005>
- Lazecský, M., Çomut, F. C., Hlaváčová, I., & Gürboğa, Ş. (2015). Practical Application of Satellite-Based SAR Interferometry for the Detection of Landslide Activity. *Procedia Earth and Planetary Science*, 15, 613-618. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2015.08.113>
- Li, Y., Yang, J., & Hu, X. (2000). Origin of ground fissures in the Shanxi Graben System, Northern China. *Engineering Geology*, 55(4), 267-275. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(99\)00082-4](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(99)00082-4)
- Mehdi, M. (2018). MEASURING SURFACE SUBSIDENCE IN WUHAN, CHINA WITH SENTINEL-1 DATA USING PSINSAR. *XLII(October 2017)*, 7-10.

- Mirzaii, Z., Hasanlou, M., Samieie-Esfahany, S., Rojhani, M., & Ajourlou, P. (2019). Land subsidence monitoring in azar oil field based on time series analysis. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings*, 18(1), 2.
- Nikbakhti, O., Hashemi, M., Banikheir, M., & Basmenj, A. K. (2018). Geoenvironmental assessment of the formation and expansion of earth fissures as geological hazards along the route of the Haram-to-Haram Highway, Iran. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 77(4), 1421–1438.
- Peng, J., Wang, F., Cheng, Y., & Lu, Q. (2018). Characteristics and mechanism of Sanyuan ground fissures in the Weihe. *Engineering Geology*, 247(October 2017), 48–57. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.10.024>
- Perissin, D., Wang, Z., & Wang, T. (2011). The SARPROZ InSAR tool for urban subsidence/manmade structure stability monitoring in China. *Proceedings of the ISRSE, Sidney, Australia*, 1015.
- Qu, F., Zhang, Q., Lu, Z., Zhao, C., Yang, C., & Zhang, J. (2014). Land subsidence and ground fissures in Xi'an, China 2005-2012 revealed by multi-band InSAR time-series analysis. *Remote Sensing of Environment*, 155, 366–376. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.09.008>
- Terranova, C., Ventura, G., & Vilardo, G. (2015). Multiple causes of ground deformation in the Napoli metropolitan area (Italy) from integrated Persistent Scatterers DinSAR, geological, hydrological, and urban infrastructure data. *Earth-Science Reviews*, 146, 105–119.
- Usai, S., & Hanssen, R. (1997). Long time scale INSAR by means of high coherence features. *European Space Agency-Publications-Esa Sp*, 414, 225–228.
- Wang, G. Y., You, G., Shi, B., Qiu, Z. L., Li, H. Y., & Tuck, M. (2010). Earth fissures in Jiangsu Province, China and geological investigation of Hetang earth fissure. *Environmental Earth Sciences*, 60(1), 35–43. <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0167-5>
- Zaruma, S. C. De, Cando, M., & Vald, V. (2020). Detection of Terrain Deformations Using InSAR Techniques in Relation to Results on Terrain.
- Zebker, H. A., & Villasenor, J. (1992). Decorrelation in interferometric radar echoes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(5), 950–959.