



مقاله پژوهشی

امکان سنجی استفاده از تداخل سنجی راداری به منظور اندازه‌گیری فرونشست زمین در اثر استخراج مواد نفتی

زهرا علی‌زاده زکریا^{۱*}؛ حمید عبادی^۲؛ فرشید فرنود احمدی^۳

۱- دانشجوی دکتری؛ دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۲- استاد؛ دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۳- دانشیار؛ دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۱۲/۱۴ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۱۶

شناسه دیجیتال (DOI): 1022107/JPG.2023.388211.1189

واژگان کلیدی	چکیده
فرونشست زمین، استخراج نفت، سنجش از دور، تداخل سنجی راداری مبتنی بر پراکنشگرهای دائمی	<p>هر چند معمول‌ترین دلیل فرونشست زمین استخراج آب‌های زیرزمینی در نظر گرفته می‌شود، اما استخراج نفت، گاز و مواد معدنی نیز در نشست زمین موثر است. نشست سطح زمین در یک میدان نفتی، به مرور زمان به تاسیسات سطحی و زیر سطحی حساس و استراتژیک آسیب رسانده و هزینه‌های قابل ملاحظه‌ای را به بخش تولید و بازیافت نفت تحمیل می‌نماید که این امر لزوم کنترل و نظارت بر نشست زمین در میادین نفتی را نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن پیامدها و خسارت‌های جبران‌ناپذیر ناشی از این پدیده ضرورت می‌یابد مناطق مستعد این پدیده مرتب مورد بررسی و پایش قرار گیرند. در علوم نقشه‌برداری پایش فرونشست زمین با استفاده از روش‌های مختلف ژئودتیک و سنجش از دور قابل انجام است. اندازه‌گیری فرونشست توسط روش‌های ژئودتیک نظیر استفاده از مشاهدات سیستم تعیین موقعیت جهانی علی‌رغم دارا بودن دقت بالا، دارای محدودیت‌هایی نظیر نقطه‌ای بودن مشاهدات، نیاز به استقرار و حضور فیزیکی در منطقه، زمان و هزینه بالا می‌باشند. در دهه‌های اخیر استفاده از تداخل سنجی راداری امکان اندازه‌گیری تغییرات هندسی سطح زمین را در وسعت گسترده و با دقت بالا و زمان و هزینه پایینی فراهم نموده است. هدف این پژوهش نیز ارائه رویکردی نوین بر پایه روش تداخل سنجی راداری مبتنی بر پراکنشگرهای دائمی به منظور بررسی ارتباط میان فرونشست و فرایند استخراج نفت در بخش جنوب غرب ایران و در دو مقطع زمانی ۲۰۱۷/۰۴ تا ۲۰۱۷/۱۰ و ۲۰۱۹/۰۴ تا ۲۰۱۹/۱۰ که به ترتیب نشان دهنده بیشترین و کمترین میزان برداشت نفت از میادین نفت ایران هستند، می‌باشد. نتایج نشان داد فرونشست‌هایی به میزان ۱۰ تا ۳۰ سانتی‌متر در بازه زمانی ۲۰۱۷/۰۴ تا ۲۰۱۷/۱۰ و با نرخ ۲۰ تا ۵۰ سانتی‌متر در سال در جنوب غرب ایران در محدوده میادین نفتی به وقوع پیوسته که ممکن است در اثر افزایش چشم‌گیر استخراج نفت از سال ۲۰۱۶ باشد.</p>

۱. مقدمه

زمین‌لغزش، انحلال سنگ‌های سولفاته و کربناته، آب‌شدگی یخ‌ها و تراکم نهشته‌ها، حرکات آرام پوسته و خروج گدازه از پوسته جامد زمین و یا فعالیت‌های انسانی نظیر معدن‌کاری، برداشت آب‌های زیرزمینی و یا استخراج مواد نفتی و گاز ایجاد می‌شود. مهم‌ترین فعالیت‌های بشر که منجر به نشست سطح

یکی از مشکلات اساسی و روزافزون به وجود آمده در بسیاری از کشورهای جهان از جمله ایران فرونشست زمین می‌باشد. فرونشست زمین به تغییر شکل سطح زمین اشاره دارد و بر اثر پدیده‌های طبیعی زمین‌شناختی مانند زمین‌لرزه،

زمین می‌شوند شامل فعالیت‌هایی نظیر استخراج مواد معدنی، استخراج آب‌های زیرزمینی و نفت و گاز می‌باشد. چرا که اگر سنگ‌های روباره یک مخزن از مقاومت کافی برخوردار نباشند و بر اثر وزن خود در زمان حفاری یا پس از اتمام عملیات برداشت دچار تغییرشکل شوند، فرونشست زمین رخ می‌دهد. هرچند معمول‌ترین و پذیرفته‌ترین دلیل فرونشست زمین در مقیاس جهانی به‌ویژه در ایران، استخراج آب‌های زیرزمینی در نظر گرفته می‌شود، اما استخراج نفت، گاز و مواد معدنی نیز در نشست زمین مؤثر است. بر اساس تحقیقات انجام‌شده استخراج نفت و گاز باعث تخلیه حجم قابل‌توجهی از محتوای درون زمین و خروج گازهای انباشته شده در زیر زمین می‌شود. به عبارتی دیگر استخراج نفت و گاز از میادین نفتی و گازی سبب می‌شود میزان فشار مخازن کاهش پیدا کند و در اثر وزن لایه‌های بالایی فرورفتگی در سطح میدان ایجاد شود و فرونشست زمین در منطقه به وجود آید. از این رو اگر این مناطق به‌طور منظم پایش نشود و میزان فرونشست اتفاق افتاده متناسب با برداشت گاز و یا نفت نباشد، این امر سبب به وقوع پیوستن فروریزش‌های داخلی و خارجی در زمین شده و سبب می‌شود ساختارهای داخلی و بیرونی زمین دچار مشکل و بحران‌های محیطی و انسانی شود. طبق بررسی‌های انجام شده خطر ناشی از وقوع این پدیده، از زمین‌لرزه نیز بیشتر است چرا که به‌صورت خاموش و به‌تدریج اتفاق می‌افتد. پیامدهای ناشی از زلزله مخرب اما محدود به یک زمان می‌باشد. این در حالی است که مکانیسم وقوع پدیده فرونشست زمین آرام و فرسایشی است و آثار مخرب بسیار زیادی دارد که در تخریب زیرساخت‌های اساسی و حساس مانند تخریب لوله‌های آب، گاز و فاضلاب نقش دارد. همچنین نشست بخشی از زمین ممکن است باعث تخریب منازل مسکونی و اماکن‌های شهری شود [۱، ۲].

در بسیاری از شهرهای ساحلی جهان از جمله برخی از استان‌های ایران نظیر استان خوزستان فرونشست زمین ارتباط مستقیمی با استخراج نفت و گاز دارد. این پدیده در خطوط ساحلی که کاهش اندکی در ارتفاع ممکن است سبب وقوع سیلاب شود، بسیار قابل‌توجه می‌باشد. این فاجعه

نخستین بار در میدان نفتی *Goose Creek* در ساحل خلیج تگزاس در ایالات متحده آمریکا اتفاق افتاد و به دنبال آن جاده‌ها و خطوط ساحلی دچار نشست شدند [۳]. در نمونه‌ای دیگر فرونشست سطح زمین در میدان نفتی *Wilmington* در نزدیکی هوستون تگزاس اتفاق افتاد و بخش‌هایی از شهر و بندر لانگ بیج به علت نشست سریع زمین تا ۰٫۷۱ متر در سال تخریب شد [۴]. بنابراین با در نظر گرفتن پیامدها و خسارت‌های جبران‌ناپذیر ناشی از این پدیده ضرورت می‌یابد مناطق مستعد این پدیده مرتب مورد بررسی و پایش قرار گیرند. در علوم نقشه‌برداری پایش تغییرات هندسی سطح زمین با استفاده از روش‌های مختلف ژئودتیک و سنجش از دور قابل انجام است. روش‌های رایج ژئودتیک در این زمینه شامل استفاده از تراز یابی دقیق و سیستم تعیین موقعیت جهانی^۱ می‌باشد. روش‌های ژئودتیک علیرغم دارا بودن دقت بالا، دارای محدودیت‌هایی نظیر نیاز به استقرار و حضور فیزیکی در منطقه، زمان‌بر بودن فرایند عملیاتی و هزینه بالا می‌باشند. از طرفی با توجه به ناپیوسته و نقطه‌ای بودن مشاهدات *GNSS* و محدودیت در وجود شبکه متراکم از ایستگاه‌های دائمی ژئودینامیک استفاده از روش‌های ژئودتیک به منظور اندازه‌گیری پدیده فرونشست از نقطه نظر رزولوشن مکانی مشاهدات دچار محدودیت می‌شود [۵-۷]. این در حالی است که تداخل‌سنجی راداری با گشودگی مصنوعی^۲ یک روش رایج در علوم ژئودزی و سنجش از دور می‌باشد که با استفاده از تصویربرداری منسجم در مدارهای متوالی و تداخل‌سنجی فاز امواج ارسالی و دریافتی، امکان اندازه‌گیری تغییرات هندسی سطح زمین را در راستای خط دید ماهواره با دقت بالایی فراهم می‌آورد. بنابراین داده‌های سنجش از دور راداری به دلیل یکپارچه و وسیع بودن، تنوع طیفی، پوشش‌های تکراری از مناطق مورد پایش و ارزان بودن، در مقایسه با روش‌های ژئودتیک از قابلیت‌های ویژه‌ای در این زمینه برخوردار است که امروزه عاملی مهم در مطالعه سطح زمین و عوامل تشکیل‌دهنده آن در یک بازه مکانی نسبتاً وسیع و در هر نوع شرایط آب و هوایی محسوب می‌شود. از این‌رو در سال‌های اخیر شرکت‌های نفت و گاز در اکثر

² Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR)

¹ Global Navigation Satellite System (GNSS)

استفاده از تداخل‌سنجی راداری مبتنی بر پراکنشگرهای دائمی در محدوده میدان نفتی ام‌گودیر^۵ کویت فرونشستی به میزان ۲۹,۹ میلی‌متر در سال در بخش جنوبی میدان نفتی ام‌گودیر اندازه‌گیری شد که این اولین ارزیابی دقیق از فرونشست زمین در میادین نفتی میناگیش-ام‌گودیر بود. در یکی از تحقیقات [۱۰] انجام شده دیگر در این زمینه نیز سعی در مدل‌سازی و اندازه‌گیری فرونشست میادین نفتی استان خوزستان با استفاده از تداخل‌سنجی راداری تفاضلی و تصاویر سنجنده سنتینل-۱ در بازه زمانی ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۱ شده است. بطوریکه نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد فرونشستی حدود ۵ سانتی‌متر در میادین نفت-گاز در قسمت شمال غربی منطقه به وقوع پیوسته است، در حالیکه فرونشستی به میزان ۱۰-۱۵ سانتی‌متر در بخش‌های شرقی و جنوبی (با روند شمال غربی- جنوب شرقی) منطقه اندازه‌گیری شد. لازم به ذکر است نقطه مرتفعی از فرونشست حدود ۱۵ سانتی‌متر در نزدیکی ساحل در قسمت مرکزی منطقه مورد بررسی اتفاق افتاده بود که تصور می‌شد ناشی از استخراج نفت و گاز باشد، زیرا این منطقه به‌طور معمول مستعد بیشینه استخراج نفت و گاز می‌باشد.

طبق بررسی‌های انجام شده استفاده از تداخل‌سنجی راداری این امکان را به ما می‌دهد تا بتوان با هزینه پایین و در وسعت بالایی نسبت به روش‌های ژئودتیک میزان فرونشست ناشی از استخراج نفت و گاز در مناطق خشکی را با دقت بالایی اندازه‌گیری نمود. در تحقیق حاضر نیز طی ارائه رویکردی نوین در ابتدا با استفاده از تداخل‌سنجی راداری مبتنی بر پراکنشگرهای دائمی^۶ و تصاویر ماهواره سنتینل-۱ میزان فرونشست زمین در دو مقطع زمانی ۲۰۱۷/۰۴ تا ۲۰۱۷/۱۰ و ۲۰۱۹/۰۴ تا ۲۰۱۹/۱۰ در منطقه جنوب غرب ایران که شامل میادین نفتی فعال با بیشینه مقدار استخراج نفت و گاز می‌باشد، اندازه‌گیری شده است. سپس با استخراج میزان فرونشست در بازه‌های زمانی فوق برای تعدادی از نقاط در محدوده هدف (مناطق استخراج نفت) سعی در بررسی وجود و یا عدم وجود همبستگی مابین فرونشست‌های موجود با فرایند استخراج نفت شده است.

مناطق نفت‌خیز جهان به استفاده از روش‌های با سرعت و دقت مکانی بالاتر و هزینه عملیاتی کمتر نظیر تداخل‌سنجی راداری در بررسی و اندازه‌گیری پدیده فرونشست روی آورده‌اند.

تاکنون مطالعات مختلفی به‌منظور اندازه‌گیری فرونشست ناشی از استخراج مواد نفتی و گازی از زمین با استفاده از تداخل‌سنجی راداری در مناطق مختلف جهان انجام گرفته است که در ادامه نمونه‌ای از کارهای تحقیقاتی انجام شده در این زمینه در ایران و یا سایر مناطق جهان ارائه شده است.

در تحقیقی [۸] با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری تفاضلی^۳ فرونشست زمین در دو میدان بزرگ نفتی یکی واقع در منطقه جنوب غربی ایران (میدان نفتی مارون) و دیگری در کالیفرنیا مرکزی (Lost Hills) توسط تکنیک تداخل‌سنجی راداری مورد پایش و بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه برای اندازه‌گیری فرونشست میدان نفتی مارون از داده‌های راداری شامل ۱۰ تصویر خام سنجنده Envisat در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۶ با وضعیت تصویربرداری پایین‌گذر استفاده شده است. بطوریکه نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد همبستگی بسیار زیادی میان افزایش و کاهش تولید مواد نفتی با میزان فرونشست سطح زمین وجود دارد. همچنین نتایج این تحقیق نشان داد که فرونشستی با نرخ ۱۳,۵ میلی-متر در سال در راس و یال غربی میدان مشاهده می‌شود. در این پژوهش به منظور بررسی فرونشست در میدان نفتی Lost Hills، ۱۱ فریم از تصاویر خام سنجنده Envisat که در بازه زمانی ۲۰ دسامبر ۲۰۱۰ تا ۱۴ مارس ۲۰۱۲ با وضعیت تصویربرداری پایین‌گذر اخذ شده بودند، مورد استفاده قرار گرفت. نقشه سرعت متوسط جابجایی به دست آمده از آنالیز سری زمانی نشان داد که نرخ فرونشست از تاریخ ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۲ در راستای دید ماهواره به میزان ۵,۵ سانتی‌متر در سال می‌باشد. در تحقیقی دیگر [۱] با استفاده از فرایند تداخل‌سنجی راداری و تصاویر سنتینل-۱ الگوی فرونشست میدان نفتی پاتوس-مارینزا^۴ در آلبانی با نرخ ۱۵ میلی‌متر در سال در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۸ مدل‌سازی شده است. همچنین در تحقیقی [۹] در بازه زمانی ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۹ با

⁵ Umm Gudair

⁶ Persistent Scatterer InSAR (PS_InSAR)

³ Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar (D_InSAR)

⁴ Patos-Marinza

۲. روش تحقیق

معمولاً پایش تغییرات هندسی پوسته زمین در یک منطقه در وسعت گسترده و با زمان و هزینه پایین‌تر، نیازمند بررسی سری زمانی تغییرات هندسی آن منطقه توسط روش‌های تداخل‌سنجی راداری [۱۱] می‌باشد. تداخل‌سنجی راداری PS روشی برای پایش و برآورد تغییر شکل و جابجایی‌های پوسته زمین درون شبکه‌ای از پراکنش‌کننده‌ها یا بازتابنده‌های راداری است که به‌طور گسترده و در مقیاس جهانی در پایش و ارزیابی جابجایی زمین استفاده می‌شود. تصحیح خطاهای سیستماتیک مانند تأخیر جوی و حل ابهام فاز و همچنین دستیابی به دقت پایش میلی‌متری جابجایی‌ها در این روش، نیازمند ایجاد شبکه‌ای دقیق از پراکنش‌کننده‌های دائمی، منسجم و پایدار است. پراکنش‌کننده‌های دائمی که اغلب در مناطق شهری از تراکم بالایی برخوردارند، با هدف رفع محدودیت‌های روش تداخل‌سنجی معمولی از جمله عدم همبستگی مکانی-زمانی و نیز اثر اتمسفر، مورد استفاده قرار می‌گیرند. در اواخر دهه ۱۹۹۰ میلادی مشخص شد که برخی از عوارض سطح زمین ویژگی‌های بازپراکنشی نسبتاً پایداری در طول چندین ماه و حتی چندین سال دارند. عوارض موردنظر اغلب ابعادی کوچک‌تر از یک پیکسل دارند و کمتر تحت تأثیر عدم همبستگی‌های مکانی و زمانی تصاویر رادار روزانه مصنوعی قرار می‌گیرند. این عوارض که حتی در حدود بحرانی خطوط مبنای زمانی و مکانی نیز دارای هم‌دوسی بالایی هستند، پراکنش‌کننده‌های دائمی (PS) نامیده می‌شوند. پیکسل‌های حاوی پراکنش‌کننده دائمی دارای رفتار فازی یکنواخت و پایدار در طول زمان هستند. به‌عبارت‌دیگر، رفتار فازی در این پیکسل‌ها منطبق بر یک مدل فرضی از جابجایی در زمان است [۱۲]. لازم به ذکر است که ثابت بودن ویژگی بازپراکنشی یک عارضه، به معنای ثابت بودن موقعیت آن عارضه نمی‌باشد. چراکه ویژگی بازپراکنشی یک عارضه، تابعی از ضریب دی‌الکتریک آن، جهت، مقدار رطوبت موجود در آن و سایر عوامل می‌باشد. چه‌بسا عوارضی وجود دارند که ویژگی بازپراکنشی آن‌ها در طول زمان ثابت است ولی خود عارضه در حال جابجایی است و بالعکس. در

این پژوهش نیز سعی شده است از مبانی این روش در توسعه روش پیشنهادی استفاده گردد. به‌منظور پیاده‌سازی الگوریتم روش پیشنهادی در ابتدا پس از حذف خطاهای مداری با استفاده از اطلاعات دقیق مداری، تمامی تصاویر راداری اخذشده در بازه زمانی مدنظر نسبت به یک تصویر که اصطلاحاً تصویر پایه نامیده می‌شود، ثبت هندسی شده‌اند. انتخاب این تصویر مطابق معادله (۱) بر این اساس صورت می‌گیرد که تصویری انتخاب شود که دارای کمترین مقدار خط مبنای عمودی زمانی (T)، مکانی ($B\perp$) و داپلر (F_{DC}) باشد [۱۳].

$$\rho_{total} = \rho_{temporal} + \rho_{spatial} + \rho_{doppler} + \rho_{thermal} \quad (1)$$

$$\rho_{thermal} \approx [1-f(T/T_c)][1-f(B\perp/B_c\perp)][1-f(F_{DC}/F_{DC}^c)]$$

که در آن

$$f(x) = \begin{cases} x & \text{for } x < 1 \\ 1 & \text{for } x \geq 1 \end{cases}$$

و ρ نشان‌دهنده میزان همبستگی و اندیس c نشان‌دهنده مقدار بحرانی هر یک از پارامترها می‌باشد. بنابراین تصویری به‌عنوان تصویر پایه انتخاب می‌شود که مقدار $\rho_{total} = \sum_{i=1}^n \rho_{total}$ به ازای N تصویر موجود، بیشترین مقدار باشد. پس از ثبت هندسی تصاویر پیرو نسبت به تصویر پایه و حذف خطاهای مداری، شبکه‌ای از اینترفروگرام‌ها تولید گردید. در مرحله بعد در ابتدا خطای مربوط به تأثیرات انحنای و همچنین خطای توپوگرافی زمین با استفاده از مدل ارتفاعی رقومی منطقه تصحیح شده و سپس باند ارتفاعی برای اینترفروگرام‌ها افزوده شد. به‌این‌ترتیب اینترفروگرام‌ها برای پیاده‌سازی الگوریتم سری زمانی تداخل‌سنجی PS مورد ارزیابی قرار گرفتند تا نقاط پراکنش‌کننده دائمی شناسایی شوند. با اجرای الگوریتم PS بر روی سری زمانی اینترفروگرام‌های ایجادشده، انتخاب اولیه پیکسل‌های PS کاندیدا، با استفاده از مرسوم‌ترین روش انتخاب آن‌ها، یعنی استفاده از شاخص پراکنش دامنه با حد آستانه ۰.۴ صورت گرفت. پس از انتخاب PS های اولیه،

⁷ Doppler

$$\delta\varphi_{x,i} = \varphi_{x,i}(t_B) - \varphi_{x,i}(t_A) \approx \frac{4\pi}{\lambda}[d_{x,i}(t_B) - d_{x,i}(t_A)] + \frac{4\pi}{\lambda}(B_{\perp,x,i}\Delta Z) / R \sin\theta + \varphi_{atm,x,i}(t_B) - \varphi_{atm,x,i}(t) + \delta\varphi_{n,x,i} \quad (3)$$

که در آن t_A و t_B نشان‌دهنده زمان اخذ دو تصویر راداری در اینترفروگرام i ام و $d_{x,i}$ فاصله پیکسل x ام، در اینترفروگرام i ام تا سنجنده است. همچنین اولین جمله نشان‌دهنده فاز جابجایی در راستای خط دید ماهواره، جمله دوم نشان‌دهنده خطا در فاز توپوگرافی، جملات سوم و چهارم نشان‌دهنده تأخیر فاز اتمسفری و جمله آخر نویزهای موجود در سطح اینترفروگرام‌ها می‌باشد و پارامترهای λ ، R ، B_{\perp} ، ΔZ و θ به ترتیب بیانگر طول موج، رنج مایل از ماهواره تا نقطه زمینی، طول پایه عمودی، خطای مدل ارتفاع رقومی و زاویه دید می‌باشند.

با توجه به اینکه بعد از حذف پارامتر مرتبط با اثرات اتمسفر، توپوگرافی و نویز از اینترفروگرام‌ها می‌توان پارامتر مرتبط با فاز جابجایی را به صورت زیر بسط داد، مقادیر جابجایی سالیانه برای هر یک از نقاط PS شناسایی شده مطابق معادله (۴) برآورد گردید:

$$\delta\varphi_{def} = \frac{4\pi}{\lambda}[d_{x,i}(t_B) - d_{x,i}(t_A)] = \frac{4\pi}{\lambda} \sum_{t_A}^{t_B-1} v_{k,k+1}(t_{k+1} - t_k) \quad (4)$$

که در آن $v_{k,k+1}$ نرخ جابجایی بین دو تصویر راداری تشکیل دهنده اینترفروگرام i ام می‌باشد. نهایتاً با حل معادله فوق به روش کمترین مربعات^{۱۰} [۱۵] سری زمانی تغییر شکل برای هر کدام از نقاط PS در تمامی اینترفروگرام‌ها با فاز بازیابی شده به دست آمد.

اگرچه ارائه روش PS گامی مؤثر در کاهش محدودیت‌های روش تداخل‌سنجی راداری متداول بوده است، ولی روش تداخل‌سنجی مبتنی بر پراکنش‌کننده‌های دائمی نیز معایبی دارد که استفاده بهینه از آن را در شرایط مختلف با مشکل روبه‌رو می‌سازد. لازم به ذکر است در روش PS - $InSAR$ دقت اندازه‌گیری تغییر شکل پوسته توسط عوامل متعددی مانند تعداد تصاویر مورد استفاده جهت پایش تغییر شکل پوسته، نحوه تراکم پراکنشگرهای دائمی، شرایط جوی در زمان ثبت

به کمک فرایند تحلیل فاز، PS های نهایی تعیین شدند. لازم به ذکر است در مرحله تحلیل فاز سعی بر این است که طی یک فرایند تکراری مؤلفه‌های مختلفی از فاز که در مکان همبسته می‌باشند، از اینترفروگرام‌ها حذف گردند. در نتیجه یک کمیت همبسته زمانی (γ_X) مطابق با معادله (۲) از تغییرات فاز باقی می‌ماند که معیاری برای PS بودن می‌باشد [۱۴].

$$\gamma_X = 1/N \sum_{i=1}^n \exp\{(\varnothing_{int,x,i} - \varnothing_{int,x,i} - \Delta\varnothing_{e,x,i})\} \quad (2)$$

که در آن $\varnothing_{int,x,i}$ فاز بازیابی نشده پیکسل x ام در اینترفروگرام i ام، $\varnothing_{int,x,i}$ برآوردی از فاز بازیابی نشده پیکسل x ام که در یک شعاع معینی از پیکسل‌های مجاور تعیین شده، $\Delta\varnothing_{e,x,i}$ برآوردی از مؤلفه ناهمبسته در مکان (فاز باقیمانده از توپوگرافی) و N تعداد کل اینترفروگرام‌ها می‌باشد. بعد از هر تکرار تغییرات $RMSE^8$ در γ محاسبه گردید و زمانی که این مقدار از حد آستانه انتخاب شده کمتر شد، الگوریتم همگرا شده و تکرار خاتمه یافت. در نهایت PS ها بر اساس شاخص پراکنندگی دامنه و کوهرنس زمانی محاسبه و انتخاب شدند. بعد از انتخاب PS های نهایی، مؤلفه فاز آن‌ها نسبت به خطای دید مربوط به ناهمبستگی مکانی یا به عبارتی خطای ناشی از مدل ارتفاعی رقومی با کم کردن مقادیر تخمین زده شده، تصحیح گردیده و همچنین بخشی از فاز تصویر که مربوط به ناهمبستگی مکانی تصویر اول بود، نیز محاسبه و حذف گردید. در مرحله بعد نویز مربوط به سری زمانی اختلاف فاز پیکسل‌های همسایه با استفاده از فیلتر پایین‌گذر قبل از عملیات بازیابی فاز حذف شد. سپس عملیات بازیابی فاز در دو مرحله تحت عنوان بازیابی فاز زمانی و مکانی با در نظر گرفتن فرض نمونه‌برداری نایکوویست^۹ در زمان صورت پذیرفت. در مرحله آخر نیز حذف مؤلفه‌های همبسته و نیز ناهمبسته در مکان و زمان از جمله خطای زاویه دید و اتمسفر یک‌بار دیگر تکرار شد تا عملیات بازیابی فاز مطابق با معادله (۳) با دقت بیشتری صورت پذیرد:

¹⁰ Least squares

⁸ Root Mean Square Error

⁹ Nyquist-Shannon sampling theorem

$$Z(x,y) = \frac{\sum_{i=1}^n \left[\frac{Z_i}{d_i^p} \right]}{\sum_{i=1}^n \left[\frac{1}{d_i^p} \right]} \quad (5)$$

که در آن x, y بیانگر مختصات طولی و عرضی نقاط نمونه، Z_i مقادیر نمونه، d_i فاصله اقلیدسی هر مکان تا محل نمونه، p عامل توان اصطکاک فاصله و n تعداد نقاط نمونه و $Z(x, y)$ مقدار برآورد شده است. لازم به ذکر است به منظور تقریب سطح یکپارچه از مقادیر جابجایی پوسته در منطقه از سه روش درون‌یابی تحت عنوان روش میانگین متحرک، روش میانگین‌گیری وزن‌دار بر اساس معکوس فاصله و روش برازش منحنی درجه دوم استفاده گردید تا از طریق ارزیابی دقت نتایج هر کدام از روش‌های مورد استفاده، روشی که دارای دقت بالایی در برآورد و تخمین میزان جابجایی پوسته می‌باشد، انتخاب گردد. نتایج نشان داد روش میانگین‌گیری وزن‌دار بر اساس معکوس فاصله دارای دقت بهتری نسبت به سایر روش‌های درون‌یابی مورد استفاده می‌باشد. پس از تقریب یک سطح پیوسته از میزان جابجایی سطح در منطقه با استفاده از روش پیشنهادی، به محاسبه میزان فرونشست زمین در تعدادی از نقاط در محدوده هدف (محل استخراج نفت) از روی نرخ جابجایی‌های محاسبه شده پرداخته شد. نهایتاً همبستگی میزان فرونشست اتفاق افتاده در نقاط هدف در مقاطع زمانی مورد مطالعه با فرایند استخراج مواد نفتی مورد بررسی قرار گرفت. لازم به ذکر است مراحل مورد استفاده در این تحقیق در روندنمای شکل ۱ ارائه شده است.

۳. معرفی منطقه مورد مطالعه و داده‌های مورد استفاده

میادین نفت و گاز ایران در بخش جنوب، جنوب-غرب و غرب کشور و در قلمروهای آبی و خاکی مستقر هستند. با توجه به اینکه هدف این پژوهش استفاده از تداخل‌سنجی راداری به منظور پایش فرونشست در اثر استخراج مواد نفتی می‌باشد، لذا میادین نفتی واقع در قلمرو خشکی منطقه جنوب غرب کشور که بیشینه مقدار استخراج نفت و گاز در سال را دارند،

تصاویر، عدم کاربرد در مناطق دارای پوشش گیاهی منسجم، عدم کاربرد در مناطق پیوسته که عاری از وجود نقاط PS می‌باشند و محدودیت زمان ناشی از فواصل مداری ماهواره‌ها تعیین می‌شود.

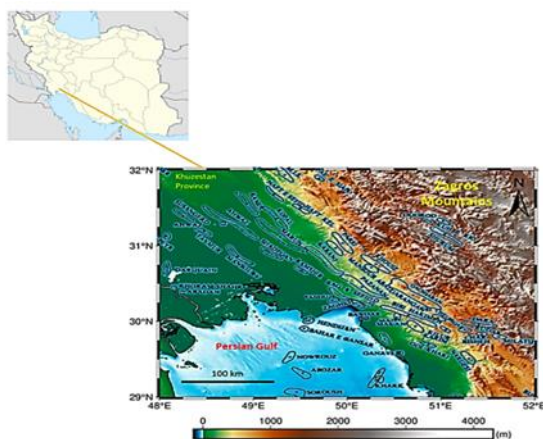
از طرفی یکی از مهم‌ترین معایب روش PS عدم تمرکز بر برآورد جابجایی‌های سطحی در نقطه هدف می‌باشد. به عبارتی دیگر استفاده از روش‌های PS در رابطه با مطالعاتی که جابجایی نقاط خاصی از آن‌ها مدنظر می‌باشد، با این محدودیت مواجه است که میزان جابجایی‌ها فقط در نقاط PS قابل اندازه‌گیری می‌باشد که این نقاط ممکن است انطباقی با نقاط هدف نداشته باشند. این در حالی است که در استفاده از روش تداخل‌سنجی تفاضلی^{۱۱} انتخاب نقاط هدف به راحتی توسط کاربر قابل انجام است، ولی با توجه به محدودیت‌های اصلی تداخل‌سنجی راداری تفاضلی برای بیشتر سنجنده‌های راداری، از قبیل فاز نویز ناشی از تغییرات در خصوصیات پراکنشی عوارض سطح ناشی از حرکت نسبی پراکنشگرها، چرخش سنجنده و یا تغییر در زاویه دید سنجنده، همچنین محدودیت تأخیر در سیگنال در حین انتشار در اتمسفر ناشی از تغییر در توزیع بخار آب در اتمسفر و غیره، روش تداخل‌سنجی تفاضلی [۱۶] از دقت آنالیز کمتری نسبت به روش PS برخوردار است.

با توجه محدودیت ذکرشده، برای روش PS مبنی بر عدم تمرکز این روش بر روی مقادیر جابجایی سطحی در یک نقطه با مختصات جغرافیایی خاص، در این تحقیق با پیشنهاد روش PS توسعه یافته مشکل مربوط به تعیین میزان جابجایی‌های سطحی در نقاط خاص با استفاده از روش‌های درون‌یابی محلی و زمانی از روی مقادیر جابجایی‌های محاسبه شده برای نقاط PS حل گردیده است. به این صورت که پس از برآورد میزان جابجایی‌ها در نقاط PS منطقه با استفاده از روش درون‌یابی میانگین‌گیری وزن‌دار [۱۷] بر اساس معکوس فاصله (معادله ۵) یک سطح پیوسته حاوی مقادیر جابجایی در راستای خط دید ماهواره برای تک تک پیکسل‌های منطقه تقریب زده شد.

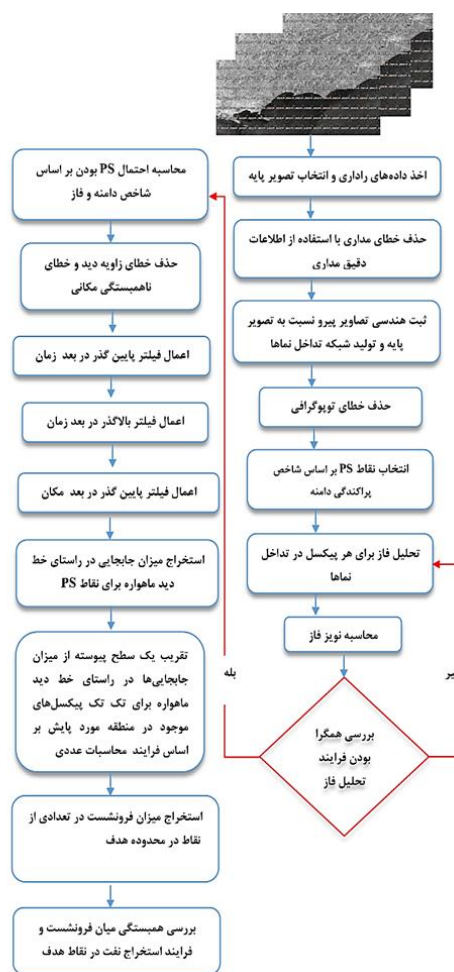
¹¹ Differential InSAR (D_InSAR)

به عنوان منطقه هدف و مورد مطالعه انتخاب شده است. لازم به ذکر است اکثر میادین فعال نفتی و گازی کشور در بخش جنوب-غرب آن مستقر هستند که در ادامه به معرفی برخی از این میادین نفتی و داده‌های مورد استفاده برای پایش فرونشست در محدوده انتخابی پرداخته شده است. محدوده مورد مطالعه که در برگیرنده میادین‌های نفتی فعال جنوب غرب کشور می‌باشد، در شکل ۲ ارائه شده است.

بورقان، سومین میدان بزرگ نفتی جهان محسوب می‌شود. این میدان در سال ۱۳۳۷ با حفر چاه اهواز-۶ توسط شرکت نفت ایران و انگلیس کشف شد و تاسیسات بهره‌برداری آن نیز در فاصله سال‌های ۱۳۴۱ تا ۱۳۵۷ احداث و راه‌اندازی گردید. تاکنون بالغ بر ۵۰۰ حلقه چاه در مخازن میدان اهواز حفاری و تکمیل شده است. این میدان دارای ۵ مجتمع بهره‌برداری در مدار تولید می‌باشد. ظرفیت تولید نفت خام میدان اهواز به‌طور میانگین معادل ۸۰۰ هزار بشکه در روز و میزان تولید گاز آن (گاز همراه نفت) بیش از ۱۳ میلیون مترمکعب در روز است. حجم ذخیره درجای نفت خام این میدان بیش از ۶۵ میلیارد بشکه برآورد می‌شود، که به‌طور میانگین، در حدود ۳۷ میلیارد بشکه از آن قابل برداشت می‌باشد. طول این میدان ۶۷ کیلومتر و عرض آن در حدود ۶ کیلومتر است که از شمال با میدان رامین، از جنوب با میدان‌های شادگان و منصور، از شرق با میدان مارون و از غرب با میدان‌های آبتیمور و سوسنگرد هم‌جوار است. میدان نفتی اهواز از میدان‌های تحت مدیریت شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب است، که عملیات تولید از آن توسط شرکت بهره‌برداری نفت و گاز کارون انجام می‌گیرد [۱۸].



شکل ۲. نقشه توپوگرافی محدوده مورد مطالعه به همراه موقعیت میدان‌های نفتی موجود در منطقه



شکل ۱. مراحل انجام تحقیق

۱.۳. میدان نفتی اهواز

میدان نفتی اهواز بزرگترین میدان نفتی ایران است که در محدوده شهر اهواز در جنوب غربی ایران مستقر می‌باشد. میدان اهواز پس از میدان نفتی غوار و میدان نفتی

۲.۳. میدان نفتی آغاچاری

میدان نفتی آغاچاری از میادین نفتی ایران است، که در محدوده شهرستان آغاچاری در استان خوزستان و در جنوب غربی ایران قرار دارد. میدان آغاچاری در سال ۱۳۱۵

فرونشست به‌گونه‌ای می‌باشد که به‌تدریج و در گذر زمان اتفاق می‌افتد. بنابراین با فرض اینکه بیشینه برداشت مواد نفتی در سال ۲۰۱۶ موجب نشست تدریجی زمین شده و این فرورفتگی در سال‌های ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸ ادامه یافته است. بازه زمانی ۲۰۱۷/۰۴ تا ۲۰۱۷/۱۰ به‌عنوان بازه زمانی منتخب اول جهت انجام پایش‌ها در این پژوهش انتخاب شده است. از طرفی با توجه به اینکه هدف از اندازه‌گیری فرونشست ناشی از استخراج نفت در این پژوهش بررسی همبستگی میان فرونشست زمین با فرایند استخراج مواد نفتی می‌باشد، بازه زمانی منتخب دوم از تاریخ ۲۰۱۹/۰۴ تا ۲۰۱۹/۱۰ که کمترین میزان برداشت نفت از میداین نفتی صورت گرفته است، در نظر گرفته شده است. از این‌رو در این پژوهش از تصاویر راداری سنجنده سنتینل-۱ در دو مقطع زمانی ۲۰۱۷/۰۴ تا ۲۰۱۷/۱۰ و ۲۰۱۹/۰۴ تا ۲۰۱۹/۱۰ استفاده شده است. به این صورت که رویکرد پیشنهادی یک‌بار در یک مقطع زمانی با بیشینه میزان استخراج نفت و یک‌بار در یک مقطع زمانی با کمترین میزان استخراج نفت پیاده‌سازی شده است تا از طریق مقایسه نتایج حاصل بتوان همبستگی میان پدیده فرونشست و فرایند استخراج نفت را بررسی نمود.

۴. تفسیر نتایج

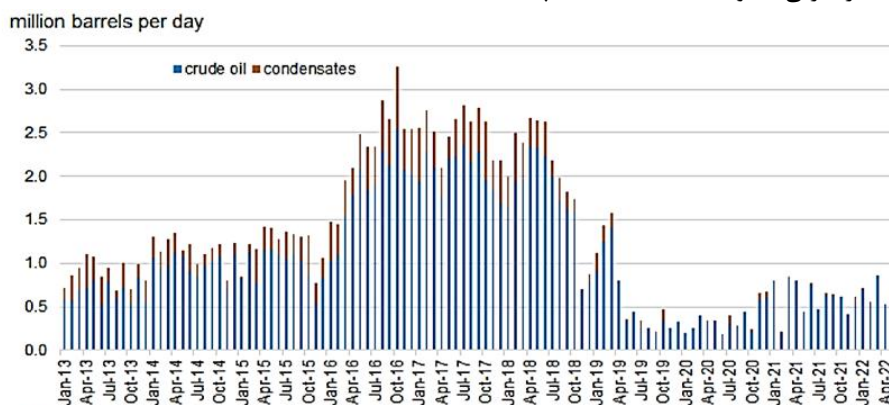
در این پژوهش هدف بررسی امکان استفاده از تداخل‌سنجی راداری به‌منظور اندازه‌گیری فرونشست زمین در اثر استخراج مواد نفتی در محدوده میداین نفتی فعال بخش جنوب-غرب کشور می‌باشد. برای این منظور سعی شده است با ارائه رویکردی مبتنی بر روش تداخل‌سنجی PS به استخراج میزان

توسط شرکت نفت ایران و انگلیس کشف شد و از سال ۱۳۱۷ بهره‌برداری از آن آغاز گردید. میدان آجاجاری از شمال با میدان کرنج، از جنوب با میدان رامشیر، از شرق با میدان پازنان و از غرب با میدان مارون همجوار است. حجم ذخیره در جای نفت خام این میدان در حدود ۲۸ میلیارد بشکه برآورد می‌شود. هم‌اکنون ظرفیت تولید نفت خام میدان آجاجاری به‌طور متوسط ۱۷۰ هزار بشکه در روز و میزان تولید گازهای همراه این میدان ۹۵ میلیون فوت مکعب (معادل ۲/۷ میلیون مترمکعب) در روز می‌باشد. حداکثر ظرفیت تزریق گاز به این میدان نیز روزانه ۲ میلیارد فوت مکعب است که گاز مورد نیاز آن، از طریق خطوط لوله از میدان پارس جنوبی تأمین می‌شود. میدان نفتی آجاجاری از میداین تحت مدیریت شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب است که عملیات تولید و تزریق گاز در مخزن آسماری آن توسط شرکت بهره‌برداری نفت و گاز آجاجاری انجام می‌گیرد [۱۹].

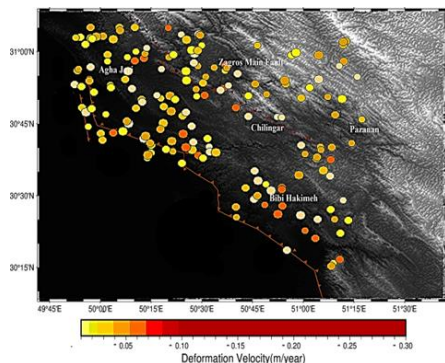
۳.۳. داده‌های مورد استفاده

در تحقیق انجام شده توسط محققین در تاریخ ۱۷ نوامبر ۲۰۲۲ میزان استخراج ماهانه نفت خام و میعانات گازی میداین نفت و گاز فعال ایران مطابق با نمودار ارائه شده در شکل ۳ برآورد شده است.

مطابق با نمودار فوق بیشترین میزان استخراج نفت و میعانات گازی از میداین نفتی و گازی فعال ایران از ابتدای سال ۲۰۱۶ شروع شده و تا اوایل سال ۲۰۱۸ ادامه یافته است. این در حالیست که مطابق با آمار ارائه شده در تحقیق فوق کمترین میزان استخراج مواد نفتی و میعانات گازی در سال ۲۰۱۹ انجام گرفته است. از طرفی با توجه به اینکه ماهیت پدیده

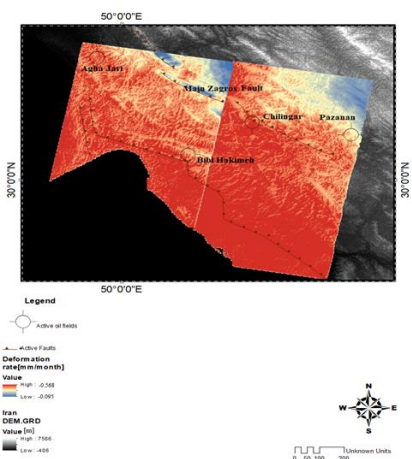


شکل ۳. نمودار میزان استخراج نفت خام و میعانات میداین نفتی ایران [۲۰]

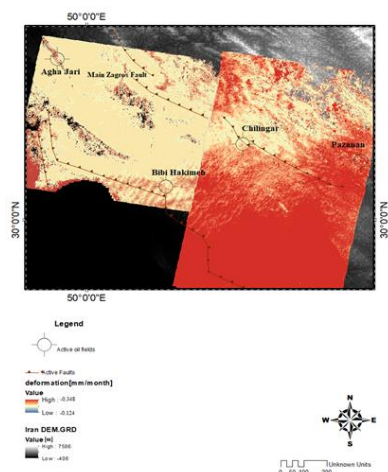


نرخ فرونشست زمین در دو بازه زمانی منتخب و در تعدادی از نقاط کلیدی در محدوده میداین نفتی پرداخته شود. بطوریکه پس از انجام فرایند پیشنهادی تحقیق مطابق با مراحل ارائه شده در روندنمای شکل ۱ در ابتدا نقشه حاوی نرخ جابجایی سطح زمین در نقاط *PS* یکبار در بازه زمانی ۲۰۱۷/۰۴ تا ۲۰۱۷/۱۰ و بار دیگر در بازه زمانی ۲۰۱۹/۰۴ تا ۲۰۱۹/۱۰ به ترتیب مطابق با شکل ۴ و شکل ۵ استخراج شده است. سپس با توجه به اینکه یکی از محدودیت‌های روش *PS* عدم انطباق نقاط *PS* شناسایی شده بر روی مناطق هدف می‌باشد، سعی شده است با استفاده از محاسبات عددی و تقریب یک سطح پیوسته از مقادیر جابجایی بر اساس نتایج *PS* اولیه، به استخراج میزان جابجایی‌های سطح زمین در تعدادی از نقاط کلیدی (محدوده میداین فعال در منطقه مطالعاتی) پرداخته شود. برای این منظور در ابتدا با استفاده از فرایند محاسبات عددی به تقریب سطح پیوسته از میزان جابجایی‌های اتفاق افتاده در منطقه پرداخته شده است. شکل ۶ و شکل ۷ به ترتیب نشان‌دهنده سطوح تقریب زده شده در مقاطع زمانی مورد مطالعه می‌باشد. نهایتاً مقادیر جابجایی برای نقاط هدف یکبار در بازه زمانی ۲۰۱۷/۰۴ تا ۲۰۱۷/۱۰ (شکل ۸) و بار دیگر در بازه زمانی ۲۰۱۹/۰۴ تا ۲۰۱۹/۱۰ (شکل ۹) استخراج شده است.

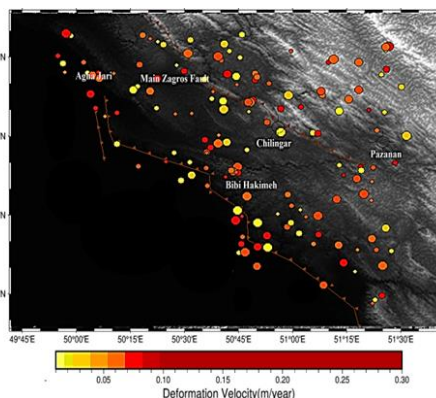
شکل ۵. میزان جابجایی زمین در نقاط *PS* در محدوده میداین نفتی جنوب غرب ایران از تاریخ ۲۰۱۹/۰۴ تا ۲۰۱۹/۱۰



شکل ۶. میزان فرونشست زمین در محدوده میداین نفتی جنوب غرب ایران از تاریخ ۲۰۱۷/۰۴ تا ۲۰۱۷/۱۰



شکل ۷. میزان فرونشست زمین در محدوده میداین نفتی جنوب غرب ایران از تاریخ ۲۰۱۹/۰۴ تا ۲۰۱۹/۱۰

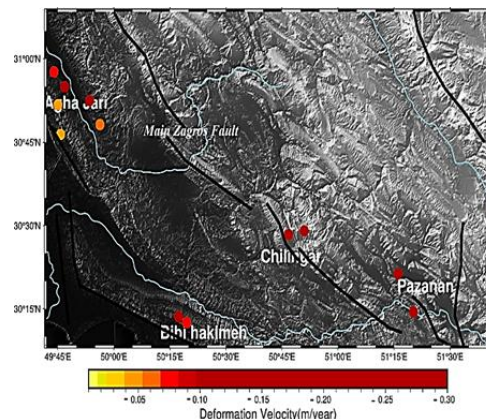


شکل ۴. میزان جابجایی زمین در نقاط *PS* در محدوده میداین نفتی جنوب غرب ایران از تاریخ ۲۰۱۷/۰۴ تا ۲۰۱۷/۱۰

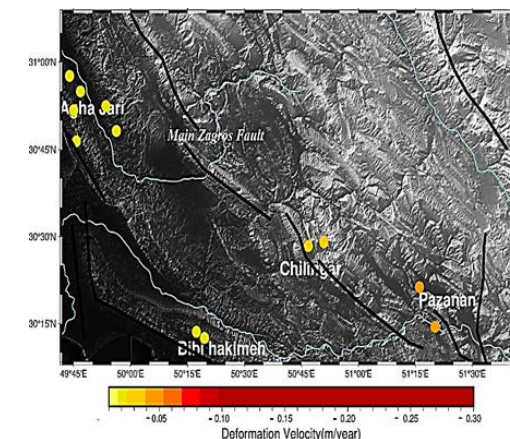
۹) در محدوده میادین نفتی از جمله میدان نفتی آغاچاری در حد چند میلی‌متر و حتی نزدیک به صفر اندازه‌گیری شده است. بنابراین با استناد به نتایج حاصله می‌توان ادعا نمود افزایش و یا کاهش میزان استخراج و حتی تولید مواد نفتی تأثیر مستقیم در تغییر هندسی پوسته زمین دارد. لذا مطابق با رویکرد پیشنهادی و انجام پایش‌های پیوسته و مرتب با استفاده از داده‌های سنجش از دور راداری با رزولوشن زمانی و مکانی متوسط به بالا منجر به مدیریت و کنترل وقوع پدیده فرونشست ناشی از استخراج مواد نفتی و یا گازی می‌گردد. لازم به ذکر است گاهی نمی‌توان دلیل عدم وجود فروریزش و یا فرونشست در اثر برداشت سیالات درون زمین را ناشی از کاهش فرایند برداشت این مواد دانست. چراکه از دیدگاه ژئودینامیکی زمانی که بخش از پوسته زمین دچار فروریزش و یا فرونشست می‌شود، در گذر زمان از نرخ فرونشست ایجاد شده کاسته شده و پوسته زمین در آن محدوده به حالت ثبات با کمترین میزان فرونشست می‌رسد. بنابراین مطابق با نتایج حاصل در این پژوهش هم می‌توان چنین تصور نمود که پس از وقوع فرونشست‌های قابل توجهی در سال ۲۰۱۷ و قبل از سال ۲۰۱۹ نهایتاً پوسته زمین در سال ۲۰۱۹ در برخی از محدوده‌های هدف به حالت ثبات و با فرونشست نزدیک به صفر رسیده است. شایان ذکر است منطقه مورد مطالعه در این پژوهش که در جنوب غرب ایران واقع شده است، از نقطه‌نظر لرزه‌زمین‌ساخت در مجاورت گسل اصلی زاگرس قرار می‌گیرد. در نتیجه فعالیت‌های گسل اصلی زاگرس در این منطقه و یا فعالیت سایر قطعات گسلی ایالت زاگرس ممکن است سبب ایجاد فرونشست‌هایی در این منطقه شود.

۵. نتیجه‌گیری

همان‌طور که در بخش‌های قبلی بیان شده است هدف این مقاله ارائه رویکردی نوین جهت پایش و اندازه‌گیری میزان فرونشست زمین در بخش جنوب غرب ایران که بستر میادین نفتی فعال از جمله میدان نفتی اهواز، پازان و آغاچاری می‌باشد، تعیین شده است. بطوریکه در ابتدا رویکرد پیشنهادی بر روی مناطق منتخب در بازه زمانی ۲۰۱۷/۰۴ تا ۲۰۱۷/۱۰ که بیشترین برداشت مواد نفتی از میادین نفتی ایران صورت گرفته پیاده‌سازی شده است. نتایج اولیه حاصل برای این بازه زمانی نشان داد که فرونشست‌هایی با میانگین



شکل ۸. میزان فرونشست زمین در تعدادی از نقاط کلیدی در محدوده میادین نفتی جنوب غرب ایران از تاریخ ۲۰۱۷/۰۴ تا ۲۰۱۷/۱۰



شکل ۹. میزان فرونشست زمین در تعدادی از نقاط کلیدی در محدوده میادین نفتی جنوب غرب ایران از تاریخ ۲۰۱۹/۰۴ تا ۲۰۱۹/۱۰

مطابق با نتایج به‌دست‌آمده در بازه زمانی ۲۰۱۷/۰۴ تا ۲۰۱۷/۱۰ در محدوده میادین نفتی منطقه مورد مطالعه (شکل ۸) فرونشست‌هایی با میانگین ۱۰ تا ۳۰ سانتی‌متر در بازه زمانی ۷ ماه و با نرخ سالانه ۲۰ تا ۵۰ سانتی‌متر در سال. بطوریکه مطابق با نتایج بدست آمده در این بازه، بیشترین مقدار فرونشست در حدود ۳۰ سانتی‌متر در قسمت شمال غرب و جنوب غرب میدان نفتی پازان و در قسمت شمال شمال شرق میدان آغاچاری برآورد شده است. این در حالی است که در بازه زمانی ۲۰۱۹/۰۴ تا ۲۰۱۹/۱۰ میزان فرونشست سطح زمین در برخی از این نقاط کلیدی (شکل

- [4] M. Mayuga, "Geology and development of California's giant--Wilmington oil field," 1970.
- [5] G. Blewitt, "GPS and space-based geodetic methods," *Geodesy*, vol. 3, pp. 351-390, 2007.
- [6] E. Calais *et al.*, "GPS measurements of crustal deformation in the Baikal-Mongolia area (1994–2002): Implications for current kinematics of Asia," *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 108, no. B10, 2003.
- [7] H. Yue and T. Lay, "Inversion of high-rate (1 sps) GPS data for rupture process of the 11 March 2011 Tohoku earthquake (Mw 9.1)," *Geophysical Research Letters*, vol. 38, no. 7, 2011.
- [۸] ن. ف. ا. م. آ. ه. و. ع. بحرودی، "بررسی فرونشست زمین در اثر استخراج مواد نفتی با استفاده از روش تداخل سنجی راداری،" *اطلاعات جغرافیایی*، vol. 27, pp. 105–1397, 2011.
- [9] K. S. Rao, H. K. Al-Jassar, N. J. Kodiyani, and V. P. Daniel, "Study on spatial variation of land subsidence over Minagish-Umm Gudair oil fields of Kuwait using synthetic aperture radar interferometry technique," *Journal of Applied Remote Sensing*, vol. 10, no. 1, p. 016026, 2016.
- [10] H. Rajaoalison, D. Knez, and M. A. M. Zamani, "A Multidisciplinary Approach to Evaluate the Environmental Impacts of Hydrocarbon Production in Khuzestan Province, Iran," *Energies*, vol. 15, no. 22, p. 865, 2022.
- [11] J. J. Sousa *et al.*, "PS-InSAR processing methodologies in the detection of field surface deformation—Study of the Granada basin (Central Betic Cordilleras, southern Spain)," *Journal of Geodynamics*, vol. 49, no. 3-4, pp. 181-189, 2010.
- [12] Z. Jianjun, L. Zhiwei, and H. Jun, "Research progress and methods of InSAR for deformation monitoring," *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, vol. 46, no. 10, p. 1717, 2017.
- [13] D. R. Welikanna and S. Jin, "Investigating ground deformation due to a series of collapse earthquakes by means of the PS-InSAR technique and Sentinel 1 data in Kandy, Sri Lanka," *Journal of Applied Remote Sensing*, vol. 17, no. 1, p. 014507, 2023.
- [14] K. Malik, D. Kumar, D. Perissin, and B. Pradhan, "Estimation of ground subsidence of New Delhi, India using PS-InSAR technique and Multi-sensor Radar data," *Advances in Space Research*, vol. 69, no. 4, pp. 1863-1882, 2022.
- [15] Y. Jia, M. Xu, Y. Lin, and D. Jiang, "An efficient technique based on least-squares method for fractional integro-differential equations," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 64, pp. 97-105, 2023.
- [16] Y. Rahmani and F. Farnood Ahmadi, "Application of InSAR in measuring Earth's surface deformation caused by groundwater extraction and modeling its behavior using time series analysis by artificial

۱۰ تا ۳۰ سانتی‌متر در بازه زمانی ۷ ماه و با نرخ سالانه ۲۰ تا ۵۰ سانتی‌متر در سال در این منطقه اتفاق افتاده است. بطوریکه در قسمت شمال غرب و جنوب غرب میدان نفتی پازنان و قسمت شمال و شمال شرق میدان آغاچاری بیشترین مقدار فرونشست در حدود ۳۰ سانتی‌متر در بازه زمانی مورد مطالعه برآورد شده است. این در حالی است که در بازه زمانی ۲۰۱۹/۰۴ تا ۲۰۱۹/۱۰ که کمترین میزان استخراج مواد نفتی از میداین نفتی ایران صورت گرفته است، میزان فرونشست سطح زمین در برخی از این نقاط کلیدی در محدوده میداین نفتی از جمله میدان نفتی آغاچاری در حد چند میلی‌متر و حتی نزدیک به صفر اندازه‌گیری شده است. بنابراین با استناد به نتایج حاصله می‌توان ادعا نمود افزایش و یا کاهش میزان استخراج و حتی تولید مواد نفتی تأثیر مستقیم در تغییر هندسی پوسته زمین دارد که از طریق پایش‌های منظم و طولانی مدت مبتنی بر رویکرد پیشنهادی می‌توان به نتایج با قابلیت اعتمادپذیری بالاتری در این زمینه دست یافت. اما با در نظر گرفتن اینکه علاوه بر فرایند استخراج نفت و گاز عوامل متعدد دیگری نظیر وقوع پدیده زمین‌لرزه، برداشت آب‌های زیرزمینی و منابع معدنی در ایجاد فرونشست زمین نقش دارند، برقراری تناظر یک به یک مابین فرونشست‌های به وقوع پیوسته در محدوده میداین نفتی با فرایند استخراج مواد نفتی و گازی با محدودیت و چالش مواجه می‌گردد. لذا پیشنهاد می‌شود در پایش و بررسی فرونشست ناشی از استخراج مواد نفتی و یا گازی، تغییرات هندسی پوسته زمین ناشی از فعالیت‌های تکتونیکی بطور همزمان پایش و اندازه‌گیری شود تا از این طریق بتوان به نتایج با قابلیت اعتمادپذیری بالاتری دست یافت.

۶. مراجع

- [1] M. Métois *et al.*, "Subsidence associated with oil extraction, measured from time series analysis of Sentinel-1 data: case study of the Patos-Marinza oil field, Albania," *Solid Earth*, vol. 11, no. 2, pp. 363-378, 2020.
- [2] J. P. Green, "An approach to analyzing multiple causes of subsidence," in *Fall Meeting of the Society of Petroleum Engineers of AIME*, 1972: OnePetro.
- [3] W. E. Pratt and D. W. Johnson, "Local subsidence of the Goose Creek oil field," *The Journal of Geology*, vol. 34, no. 7, Part 1, pp. ۹۲۶-۹۵۷, 1926.

- neural networks," *Acta Geophysica*, vol. 66, no. 5, pp. 1171-1184, 2018.
- [17] P. L. Ohlert, M. Bach, and L. Breuer, "Accuracy assessment of inverse distance weighting interpolation of groundwater nitrate concentrations in Bavaria (Germany)," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 30, no. 4, pp. 9445-9455, 2023.
- [۱۸] ص. م. و. ع. پ. م. و. ح. ف. محمدحسین، "صافی، منا و علی پوراصل، مسعود و حیدری فرد، محمدحسین، "زمین شیمی عناصر کمیاب در سنگ های منشا میدان نفتی اهواز، استان خوزستان" دهمین همایش انجمن زمین شناسی اقتصادی ایران، اصفهان، ۱۳۹۷.
- [۱۹] ا. بختیار، م. ر، کمالی، س، عبدل زاده، م، شایسته، م ح، موسوی "ارزیابی پتانسیل هیدروکربورزائی سنگهای منشاء احتمالی در میدان نفتی آغاچاری" پژوهش های چینه نگاری و رسوب شناسی، ۱۳۸۹.
- [20] U. EIA, "Country Analysis Executive Summary: Iran," ed: US Energy Information Administration New York, NY, 2019.