

پایش جابجایی و تغییر شکل سکوهای فراساحلی با استفاده از تداخل سنجی راداری

(مطالعه موردی: مجموعه سکوهای سلمان)

طیب علیپور فرد^{۱*}، سجاد ذاکری

^۱ دکترای تخصصی شرکت صدرا

^۲ دانشجوی دکترا، گروه مهندسی نقشه برداری، دانشکده عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان

(دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۱۶، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۲۱)

چکیده

سازه ها و سکوهای فراساحلی یکی از مهمترین تسهیلات استخراج نفت و گاز هستند که نقش مهمی را در پاسخ به تقاضای روز افزون انرژی در جهان بازی می کنند. پایش سلامت سازه ها نه تنها موجب حفظ کارایی سازه در طول عمر آن می شود بلکه با انجام اقدامات اصلاحی به موقع مانند ترمیم و مقاوم سازی، میتوان عمر سازه را افزایش داد. در این پژوهش قصد داریم که تغییر شکل های هندسی مجموعه سکوهای مستقر در میدان نفت و گاز سلمان را به کمک تداخل سنجی راداری ماهواره ای و تصاویر سنجنده ی سنتینل ۱ مورد بررسی قرار دهیم. در منطقه مورد مطالعه دو چالش اصلی وجود دارد: مدلسازی اطلاعات توپوگرافی و حذف تصحیحات اتمسفری. در این تحقیق برای غلبه بر چالش اول، به کمک تکنیک رادارگرمتری و اطلاعات برداری موجود، از سکوهای سلمان مدل ارتفاعی ساخته شد و به عنوان ورودی مرحله حذف اثرات ناخواسته بکارگیری شد. برای غلبه بر چالش تصحیحات اتمسفری، تاخیر فاز ناشی از اتمسفر به دو بخش یونسفر و تروپوسفر تقسیم بندی شد. در بخش یونسفر از محتوای کلی الکترون میزان تاخیر فاز محاسبه و از فاز اولیه کسر شد. برای تاخیر فاز ناشی از تروپوسفر از اطلاعات بخار آب رسوبی سنجنده مادیس استفاده شد و در یک چارچوب تلفیق شده و تاخیر فاز محاسبه شد. نتیجه حاصل نشان داد که مجموعه سکوهای سلمان از ۳۰ اکتبر ۲۰۱۷ تا ۲ آوریل ۲۰۲۳ حدود ۱۲ سانتی متر (میانگین ۸ سکوی این مجموعه) فرونشست را تجربه کرده است. این میزان معادل حدود ۲,۲۱ سانتی متر در سال است.

کلید واژه ها: سکوهای فراساحلی، تداخل سنجی، فرونشست، تصاویر راداری، تصحیحات ارتفاعی و اتمسفری

۱. مقدمه

بسیار حیاتی است و منابع قابل توجهی از قرارگاه صرف این امر می شود. میدان نفتی سلمان یکی از میادین مشترک بین ایران و امارات متحده عربی است. حفظ مستمر تولید نفت از این میدان جنبه ملی دارد و جز سرمایه های تمام مردم ایران است. پایداری شرایط تولید نفت به حفظ سلامت مجموعه سکوهای فراساحلی سلمان وابسته است.

علم پایش سلامت سکوهای دریایی از دهه ۷۰ میلادی، توسط واندریو پایه گذاری شد (۱). او با قرار دادن ۸ شتاب سنج

سکوهای نفتی از مهمترین سازه های عمرانی هستند که نقش بسیار مهمی در اقتصاد کشور ایفا می کنند. یکی از مهم ترین فعالیت های قرارگاه، طراحی، ساخت، نصب، راه اندازی و نگهداری سکوهای فراساحلی اعم از مسکونی، سرچاهی، بهره برداری، حفاری و مشعل است. از جمله این سکوها می توان به سکوهای رشادت، سلمان، نصر، نصرت و ایلام اشاره کرد. بازرسی های دوره - ای و نگهداری از سکوهای فراساحلی در طول دوره تضمین امری

پژوهش از تصاویر راداری TerraSAR-X استفاده شد. نتایج فرونشست سطحی اتفاق افتاده به خوبی نشان دهنده مسیر این سازه‌های زیرزمینی و موقعیت آنها بود. وینسنت و همکاران به بررسی رفتار فرونشست سطحی در یک سایت اتمی زیرزمینی در نوادای آمریکا پرداختند (۳). در این مطالعه با فناوری تداخل سنجی راداری سیگنال فرونشست را قبل، حین و بعد از ساخت و انجام آزمایشات اتمی مورد ارزیابی قرار داده و مشاهده شد در منطقه ی مورد مطالعه فرونشستی دائمی در حال اتفاق افتادن می‌باشد که علاوه بر شناسایی موقعیت سایت اتمی میتواند باعث به خطر افتادن سازه های این سایت در آینده گردد. ونگ و تیم تحقیقاتی با استفاده از تصاویر راداری COSMO-SkyMed و فناوری تداخل سنجی راداری به بررسی فرونشست حاصل از تونل متروی شهر شانگهای در چین پرداختند (۷). نتایج حاصل از تداخل سنجی نشان داد که بیشتر مسیرهای این مترو باعث ایجاد فرونشست در سطح زمین شده‌اند و در اکثر ایستگاههای مترو نرخ بالایی از نشست در سطح مشاهده شد. وینسنت و همکاران به بررسی رفتار غیر عادی بالا آمدگی سطح زمین ناشی از فعالیتهای سایت آزمایشات اتمی لوپ نور در چین با استفاده از فناوری تداخل سنجی راداری پرداختند (۹). در این مطالعه از داده های راداری ماهواره ERS بین سالهای ۱۹۹۹ تا ۱۹۹۷ استفاده شد و مشخص شد که سطح زمین در مرکز موقعیت این سایت اتمی به علت فعالیتها و انجام آزمایشهای اتمی و تشکیل جریانهای گرمایی دارای یک سیگنال بالا آمدگی پیوسته در بازه زمانی داده‌ها بوده و این مقدار را حدود ۲٫۷ سانتی متر تخمین زدند. کریم زاده، فرونشست حوضه تبریز را با ترکیب روشهای پراکنش‌کننده‌های دائمی و طول مبنای کوتاه با استفاده از ۱۷ تصویر راداری بین سالهای ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵ انجام داد. وی بیشینه ی فرونشستی به اندازه ۴۰ میلی‌متر را برآورد نمود. بابایی و همکاران با آنالیز سری زمانی تصاویر راداری با استفاده از روش‌های طول خط مبنای کوتاه و پراکنش‌کننده های دائمی نرخ فرونشست دشت قزوین را بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ برابر با ۳۰ تا ۳۵ میلی‌متر در سال محاسبه نمود. لاتیپ و همکاران در سال ۲۰۱۸ از تصاویر TerraSAR-X و با استفاده از تکنیک STAMPS به بررسی جابجایی سکویی در جنوب چین پرداختند. آنها تصاویر سالهای ۲۰۱۶ تا ۲۰۱۸ را مورد بررسی قرار دارند و جابجایی حدود ۱ سانتی متری را محاسبه نمودند (۱۳). آنها هیچ راه حلی را برای چالش‌های اتمسفری و مدل ارتفاعی ارائه ندادند. ضمناً تصاویر مورد استفاده آنها تجاری بوده و نیازمند پرداخت هزینه است. اما تصاویر مورد استفاده در این تحقیق کاملاً رایگان و به روز می باشند.

هدف این پژوهش پایش سلامت سکوهای سلمان به روشی

در سکوی فراساحلی، به اندازه‌گیری پاسخ ارتعاشی سکو در برابر تحریکات محیطی و مشاهده تغییرات فرکانس طبیعی در اثر آسیب های وارده به سکو، پرداخت. از دیگر محققانی که در راستای پایش سلامتی سکوهای دریایی فعالیت داشته‌اند و اولین کارهای دقیق و علمی را ارائه داده‌اند، می توان به مانگل و همکارانش در سال ۲۰۰۱ اشاره نمود (۲). آن‌ها به بررسی شناسایی آسیب، با تعیین پاسخ ناشی از ضربه و نیز ارتعاش آزاد سکو با ایجاد جابه‌جایی‌های عمدی پرداختند. در هردو روش قابلیت تشخیص آسیب بر پایه بردارهای مودی وجود داشت. بطور کلی روش‌های پایش سلامت سازه را علاوه بر تقسیم بندی متداول، یعنی تماسی و غیرتماسی، می‌توان به دو دسته غیرژئودتیکی و ژئودتیکی دسته‌بندی کرد. روشهای غیرژئودتیکی شامل روش های آکوستیک و اولترا سونیک، روش‌های میدان مغناطیسی، و روشهای میدان حرارتی هستند. روشهای ژئودتیکی نیز شامل استفاده از گیرنده‌های تعیین موقعیت ماهواره‌ای، دوربین‌های نقشه برداری، لیزراسکنرهای زمینی، تصاویر هوایی و ماهواره‌ای می‌شوند. نقشه برداری کلاسیک (دوربین‌های نقشه-برداری) هرچند دقت بسیار بالایی دارد، ولی زمان‌بر، دشوار و بصورت نقطه‌ای خواهد بود. استفاده از گیرنده‌های ماهواره ای گرچه بازه‌های زمانی بسیار کمی را برای پایش ممکن می‌کند ولی بازه بحث پایش نقطه‌ای و هزینه بالا از کاربردی شدن این روش کاسته است. دقت لیزراسکنر زمینی بالاتر از سایر روش‌هاست اما دسترسی و ایجاد شرایط مناسب برای برداشت و هزینه های بالای آن عملاً استفاده از این روش را با تامل مواجه کرده است. مزایای استفاده از تصاویر ماهواره‌ای راداری برای تغییر شکل عبارتند از: کم‌هزینه بودن، سریع بودن، امکان بررسی گذشته با تصاویر آرشیوی، عدم نیاز به دسترسی فیزیکی به محدوده سکو، امکان دستیابی به اطلاعات در هر شرایط آب و هوایی، قدرت تفکیک مکانی و زمانی بالا، پوشش وسیع (۸).

این ویژگی‌های ممتاز سبب شده که در کاربردهای گوناگون، این تصاویر مورد توجه محققان بسیاری قرار بگیرد (۴ و ۵). یکی از این کاربردهای اساسی، فرونشست و تغییر شکل در خشکی و دریا است. در چند سال اخیر محققین متعددی با استفاده از تصاویر راداری و فناوری تداخل سنجی راداری به بررسی تغییرات در سازه های زمینی و زیرزمینی پرداختند که از جمله این مطالعات می‌توان به موارد زیر اشاره نمود.

فارکو و کوکسلی در فعالیت پژوهشی خود به بررسی پتانسیل تداخل سنجی راداری در شناسایی تغییرات سطحی و فرونشست حاصل از سازه های زیرزمینی در مناطق شهری پرداختند (۲). آنها مطالعه خود را بر روی تونلسازی در شهر بیلپائو و فرونشست حاصل از متروی بارسلونا در کشور اسپانیا انجام دادند، که در این

محدوده‌های اطراف سکو که تا حد قابل قبولی از عدم تغییر شکل آن مطمئن هستیم، استخراج می‌شود. لازم به ذکر است ابتدا اثر سایر پارامترها را از سیگنال اختلاف فاز حذف می‌کنیم تا آنچه که باقی بماند فقط اثرات اتمسفر باشد. سپس این اطلاعات با روند سیگنال اختلاف فاز در محدوده سکو مقایسه می‌شود و ناهنجاری ایجاد شده ناشی از اثر اتمسفر از سیگنال اختلاف فاز محاسبه و حذف می‌شود. بدین ترتیب آنچه که باقی می‌ماند اثر خالص تغییر شکل است.

برای رفع اثر توپوگرافی نمی‌توان از مدل‌های رقومی ارتفاعی موجود استفاده کرد، چون یا اطلاعات آنها در محدوده‌های فراساحل ناقص است و یا در صورت موجود بودن محدود به اطلاعات اطراف سکو است و به دلیل رزولوشن پایین آنها ارتفاع سکو در آن لحاظ نشده است. برای حل این معضل در این تحقیق به کمک تصاویر سنتینل ۱ مربوط به یک دوره کوتاه و تکنیک رادارگرامتری و سپس به کمک نقشه‌های موجود سکو، ارتفاع سکو استخراج شد و در مدل ارتفاعی تزریق شد. در تکنیک رادارگرامتری با استفاده از میزان پارالاکس (اختلاف منظر) بین دو تصویر که در فاصله زمانی کوتاهی و از دو منظر متفاوت از یک منطقه گرفته می‌شود، قادر به تولید مدل ارتفاعی رقومی است. مدل ارتفاعی به دست آمده با این روش در فرآیند پردازش داده به عنوان ورودی مورد استفاده قرار گرفت و اثر توپوگرافی از فاز تداخل‌سنجی حذف گردید.

با توجه به مسائل مطرح شده، اهداف اصلی این پژوهش به صورت زیر تعریف می‌شود:

- تعیین یک چارچوب بهینه برای تخمین فرونشست سکوی نفتی سلمان در یک سری زمانی مشخص و ارائه رویکردی برای حذف اثرات اتمسفر با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین از روی سیگنال جابجایی.
- ارائه رویکردی جدید جهت بهبود تخمین سیگنال فرونشست به کمک مدلسازی اثر اتمسفر و هم چنین تولید مدل ارتفاعی سکو

ساختار ادامه مقاله بدین صورت است: در بخش دوم محدوده مورد مطالعه و داده‌های تحقیق معرفی می‌گردند. در بخش سوم روش تحقیق بیان شده، سپس در بخش چهارم نتایج و تحلیل آن‌ها ارائه شده و در بخش پنجم نتیجه‌گیری و پیشنهادهای کاری آتی آمده است.

۲. محدوده‌ی مطالعه و داده‌های تحقیق

محدوده مکانی این تحقیق میدان نفتی سلمان و سکوهای آن است. این میدان در استان هرمزگان در ۱۴۴ کیلومتری

نوبین و کم هزینه و تولید نقشه‌های اعلام هشدار است و نقش اساسی در استمرار تولید نفت و گاز از این میدان مشترک دارد. علاوه بر این، نتایج تحقیق می‌تواند در طراحی سکوهای جدید مورد استفاده قرار گیرد و در نتیجه طول عمر سکوها افزایش پیدا کند. اهمیت این تحقیق آن است که ابزاری را به جهت برآورد و تخمین باقیمانده‌ی عمر مفید و سلامت سکوی سلمان در طول دوره تضمین پروژه‌ها در اختیار قرارگاه قرار می‌دهد. با دانستن وضعیت تغییر شکل سکو، تصمیم مناسب در زمان مناسب در قبال سکو اخذ خواهد شد. نتایج این تحقیق به تصمیم‌سازی برای مدیران کمک می‌کند. این تصمیم می‌تواند ترمیم، مقاوم سازی، کنترل میزان استخراج و یا هر اقدام اصلاحی دیگری باشد. هم چنین روش تحقیق قابلیت تعمیم به سایر سکوهای فراساحلی را دارد.

حذف اثرات اتمسفری از روی سیگنال اختلاف فاز مسئله‌ای اساسی است (۱۲). به دلیل شرایط جوی متغیر در دریا و هم چنین وجود بخار آب موجود در جو، سیگنال اختلاف فاز، تحت تاثیر این پدیده است. روش پایه‌ای که برای غلبه بر این چالش وجود دارد، مدلسازی اتمسفری و تعیین پارامترهای فیزیکی اثرگذار و حذف آنهاست. در این استراتژی به کمک مدل‌های اتمسفری جهانی موجود و ترکیب آنها با داده‌های ماهواره‌ای که پروفیل جو را اندازه‌گیری می‌کنند میزان غلظت مواد موجود در اتمسفر تعیین می‌گردد. روشی که در این تحقیق برای اولین بار ارائه می‌شود استفاده از روش یادگیری ماشینی - تلفیقی برای تفکیک سیگنال اتمسفر از سیگنال تغییر شکل به کمک داده‌های ماهواره‌ای است. بدین منظور اثرات به دو بخش تاثیرات یونسفر و تروپوسفر تقسیم شد. برای حذف اثر یونسفر از کمیت محتوای کلی الکترونی استفاده شد. این پارامتر در واقع میزان الکترون در یک مترمربع را نشان می‌دهد. این پارامتر از ایستگاههای GNSS مطابق با تاریخ تصاویر مورد استفاده در این تحقیق به دست آمد. سپس این اطلاعات به فاز تبدیل شد. در بخش دوم برای حذف اثر تروپوسفر از میزان بخار آب رسوبی که توسط سنجنده مادیس اندازه‌گیری می‌شود، استفاده شد. پس از اعمال شرایط فیزیکی بر روی اطلاعات سنجنده مادیس و هم چنین حذف روند آن، میزان بخار آب رسوبی خالص محاسبه شد. سپس این میزان نیز تبدیل به فاز شد. فاز به دست آمده از هر دو بخش یاد شده با یکدیگر جمع شد و از فاز تداخل‌سنجی کسر گردید. با توجه به اینکه رزولوشن زمانی داده‌های سنتینل ۱ به نحوی است که حداقل در هر ماه از سال یک تصویر در اختیار داریم و گستره زمانی نیز حدود شش ساله است لذا امکان اینکه روند موجود در سیگنال را بازسازی کنیم وجود دارد. بدین ترتیب که ابتدا روند سیگنال اختلاف فاز در دوره زمانی مورد نظر، در

دیافراگم مصنوعی (SAR) است که برای نظارت بر سطح زمین با تاکید بر تجزیه و تحلیل تغییر شکل زمین طراحی شده است. این سنجنده در فرکانس C در حدود ۵,۴۰۵ گیگاهرتز کار می کند. این فرکانس تعادل خوبی بین قدرت تفکیک مکانی و نفوذ به انواع مختلف زمین و پوشش گیاهی فراهم می کند. سنتینل ۱ یک چرخه تکرار نسبتاً کوتاه (دوره بازدید مجدد) دارد که معمولاً بین ۶ تا ۱۲ روز بسته به حالت تصویربرداری و منطقه مورد نظر است. این فاصله بازبینی مکرر امکان به روزرسانی های مکرر و نظارت را فراهم می کند، که برای تجزیه و تحلیل تغییر شکل در مناطقی که به سرعت در حال تغییر هستند ضروری است. این سنسور در چندین مد و قدرت تفکیک مکانی قابلیت تصویربرداری دارد. مد Wide Swath تفکیک مکانی حدود ۵ متر را ارائه می دهد، در حالی که مدهای Extra Wide Swath و Wave WV به ترتیب تفکیک مکانی حدود ۲۰ متر و ۱۰۰ متر را ارائه می دهند. البته تفکیک مکانی در راستای رنج و آزیموت متفاوت است که عددهای یاد شده بیان کننده تفکیک مکانی در راستای رنج است. داده های این سنسور به دو حالت قطبش/پلاریزاسیون افقی-عمودی (HH, VV) و افقی-افقی (HH) مجهز است. داده های قطبش دوگانه می تواند به تمایز بین انواع مختلف زمین و تجزیه و تحلیل ویژگی های پراکندگی کمک کند، که برای تجزیه و تحلیل تغییر شکل ارزشمند است. یکی از جنبه های کلیدی برنامه کوپرنیک، سیاست داده های آزاد و باز است. این داده ها برای عموم قابل دسترسی است و به محققان، دانشمندان و ذینفعان مختلف اجازه می دهد از داده ها برای طیف گسترده ای از کاربردها، از جمله تجزیه و تحلیل تغییر شکل، استفاده کنند. این ویژگی ها، سنجنده سنتینل ۱ را به ابزاری ارزشمند برای تجزیه و تحلیل تغییر شکل و نظارت بر فرآیندهای مختلف سطح زمین تبدیل کرده است که نقش مهمی را در درک و کاهش خطرات طبیعی و پایش سلامت زیرساخت های حیاتی ایفا می کند.

علاوه بر این داده اصلی، همانطور که در بخش روش تحقیق ذکر شد داده های کمکی دیگری استفاده شد که در جدول ۱ لیست این داده ها و منبع دریافت آنها آمده است.

جدول (۱): انواع داده های استفاده شده در این تحقیق

| منبع داده | داده |
|---|--|
| https://scihub.copernicus.eu/dhus | تصاویر ماهواره ای سنتینل ۱ و ۲ |
| https://scihub.copernicus.eu/gnss | اطلاعات مداری و اطلاعات ثبت هندسی دقیق |
| https://igs.org/wg/ionosphere | داده های محتوی کلی الکترونی TEC |
| https://cddis.nasa.gov | داده های Zenith Total Delay |
| https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/ | داده های Water Vapor |

جنوب جزیره لاوان قرار گرفته است و با میدان ابوالبوخوش امارات متحده عربی دارای ذخایر مشترک می باشد. میدان نفتی سلمان از یک تاقدیس نامتقارن به ابعاد تقریبی ۱۱ کیلومتر در ۱۴ کیلومتر تشکیل شده است. این میدان از نظر زمین شناسی به سه لایه تولید نفت تحتانی و فوقانی مربوط به دوره ژوراسیک و یک لایه بوئیب مربوط به دوره کرتاسه تشکیل شده است. میدان سلمان همچنین یک لایه گازی به نام خوف نیز دارد. سازند خوف عمدتاً یک مخزن گازی است و یکی از منابع اصلی گاز طبیعی در خاورمیانه است. همچنین ممکن است شامل روزه های نفتی نیز باشد، اما اهمیت آن به خاطر منابع گازی آن است. این میدان در جریان فعالیت شرکت نفت لاوان در دهه ۱۹۶۰ میلادی کشف شد. اولین چاه اکتشافی آن در ژوئن ۱۹۶۵ حفر شده و تولید آن از سال ۱۹۶۸ آغاز گردید. میدان نفتی سلمان براساس آخرین آمارهای ارائه شده هم اکنون دارای ۴۴ حلقه چاه نفتی و ۱۰ حلقه چاه گازی است. نفت استخراج شده از میدان سلمان به وسیله یک خط لوله ۲۲ اینچی زیردریایی به جزیره لاوان منتقل می شود تا در تأسیسات خشکی فرآورش نهایی شده و برای صادرات یا تأمین خوراک مجتمع پالایشی لاوان ذخیره شود. میدان سلمان از میادین قدیمی تولید نفت ایران است که همچنان از ذخایر قابل قبولی برخوردار است. میدان سلمان در سال ۱۹۶۵ میلادی کشف شده و در سال ۱۹۶۸ به بهره برداری رسیده است. حجم نفت قابل استحصال از میدان سلمان حدود ۱,۶ میلیارد بشکه می باشد. هم اکنون نفت قابل تولید باقیمانده در این مخزن بیش از نیم میلیارد بشکه است. سه چهارم مساحت این میدان مشترک در آب های ایران و یک چهارم آن در آب های امارات متحده عربی واقع شده و سهم ایران از این مخزن حدود ۶۷/۴ درصد برآورد شده است. تصاویر زیر محدوده مورد نظر را نشان می دهند. محدوده مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل (۳): محدوده مورد مطالعه

داده های اصلی این تحقیق تصاویر راداری سنجنده سنتینل ۱ است. سنتینل ۱ یک ماموریت ماهواره ای راداری است که توسط آژانس فضایی اروپا (ESA) به عنوان بخشی از برنامه کوپرنیک توسعه یافته است. این رادار مجهز به سنسور پیشرفته رادار با

معادله زیر است:

$$\varphi_{InSAR} = \varphi_{disp} + \varphi_{orb} + \varphi_{topo} + \varphi_{ion} + \varphi_{neutral_atm} + \varphi_{noise} \quad (1)$$

اجزا این معادله به شرح زیر است:

φ_{disp} : مولفه فاز جابجایی - این جزء نشان دهنده اختلاف فاز ناشی از جابجایی سطح زمین بین دو اکتساب SAR است. این جزء اصلی مورد توجه در این تحقیق است، زیرا اطلاعاتی در مورد حرکت زمین، تغییر شکل یا جابجایی در طول زمان ارائه می‌دهد. φ_{orb} : مؤلفه فاز مداری - این مؤلفه به دلیل تفاوت در موقعیت ماهواره یا سکو در فضا در طی دو اکتساب SAR به وجود می‌آید. ماهواره به دور زمین می‌چرخد و حرکت مداری باعث ایجاد اختلاف فاز در سیگنال رادار در تعامل با سطح زمین می‌شود.

φ_{topo} : مؤلفه فاز توپوگرافی - این جزء به دلیل تغییر توپوگرافی (تفاوت ارتفاع) صحنه مشاهده شده ایجاد می‌شود. امواج رادار بسته به ارتفاع زمین مسیره‌های انتشار متفاوتی دارند که منجر به اختلاف فاز در سیگنال‌های دریافتی می‌شود.

φ_{ion} : مؤلفه فاز یونسفر - این جزء به دلیل یونسفر است، منطقه‌ای از جو فوقانی زمین که حاوی گازهای یونیزه است. یونسفر می‌تواند انتشار امواج رادار را به تأخیر بیندازد و باعث ایجاد اختلاف فاز در ارسال و دریافت سیگنال‌های SAR، به ویژه برای طول موج‌های بلندتر شود.

$\varphi_{neutral_atm}$: مؤلفه فاز اتمسفر خنثی - این جزء تفاوت فازهای ناشی از جو خنثی (گازهای غیر یونیزه) را در حین عبور امواج رادار از آن، در خود دارد. اثرات انکسار، پراکندگی و جذب در اتمسفر خنثی می‌تواند تاخیرهای فازی را ایجاد کند که باید محاسبه و کسر شوند.

φ_{noise} : این مؤلفه شامل منابع مختلفی از نویز در سیستم SAR و فرآیند اندازه‌گیری مانند نویز الکترونیکی، لکه و سایر تداخلها است. کاهش نویز برای به دست آوردن نتایج دقیق و قابل اعتماد ضروری است.

هدف ما در این تحقیق محاسبه φ_{disp} یعنی جابجایی است. فلوجارت انجام تحقیق در شکل ۲ آمده است. برای رسیدن به جابجایی باید دو اثر مهم یعنی تصحیحات اتمسفری و تصحیحات ارتفاعی را انجام داد.

از میان آرشیو این سنجنده حدود ۸۰ تصویر دانلود شد که از میان آنها ۱۸ تصویر بر اساس حداقل میزان ابرناکی در منطقه سکوی سلمان، حداقل میزان خطای نورانوار شدگی و حداقل میزان نویز بصری انتخاب شد. علاوه بر این بر اساس متادیتا برخی از داده‌ها از کیفیت کلی حداقلی برخوردار نبودند و از میان تصاویر دانلود شده حذف شدند. در نهایت ۱۸ تصویر به شرح جدول ۲ جهت انجام پردازش‌ها مورد استفاده قرار گرفتند.

جدول (۲): تصاویر سنتینل ۱ مورد استفاده در این تحقیق

| No. | File Name | Acquisition Date | Track | Looking |
|-----|---|------------------|-------|---------|
| 1 | SIA_IW_SLC_ISDV_20171030T022325_20171030T022356_019036_02030F_FC99 | 30-Oct-2017 | 64 | Des. |
| 2 | SIA_IW_SLC_ISDV_20171205T022328_20171205T022355_019561_021374_F395 | 5-Dec-2017 | 64 | Des. |
| 3 | SIA_IW_SLC_ISDV_20180510T022328_20180510T022355_021836_025839_B6D0 | 10-May-2018 | 64 | Des. |
| 4 | SIA_IW_SLC_ISDV_20180919T022325_20180919T022400_023761_029760_B9C3 | 19-Sep-2018 | 64 | Des. |
| 5 | SIA_IW_SLC_ISDV_20190117T022323_20190117T022400_025511_029424_4511 | 17-Jan-2019 | 64 | Des. |
| 6 | SIA_IW_SLC_ISDV_20190318T022323_20190318T022359_026386_02F38D_25C8 | 18-Mar-2019 | 64 | Des. |
| 7 | SIA_IW_SLC_ISDV_20191207T022341_20191207T022408_030236_0374D0_8394 | 7-Dec-2019 | 64 | Des. |
| 8 | SIA_IW_SLC_ISDV_20200324T022339_20200324T022406_031811_03A8A0_B189 | 24-Mar-2020 | 64 | Des. |
| 9 | SIA_IW_SLC_ISDV_20200604T022342_20200604T022409_032861_03CE65_1C42 | 4-Jun-2020 | 64 | Des. |
| 10 | SIA_IW_SLC_ISDV_20200908T022347_20200908T022415_034261_03F84B_B202 | 8-Sep-2020 | 64 | Des. |
| 11 | SIA_IW_SLC_ISDV_20201213T022347_20201213T022414_035661_042BFD_84EE | 13-Dec-2020 | 64 | Des. |
| 12 | SIA_IW_SLC_ISDV_20210118T022345_20210118T022412_036186_043640_9136 | 18-Jan-2021 | 64 | Des. |
| 13 | SIA_IW_SLC_ISDV_20210822T022352_20210822T022420_039336_04A544_60DA | 22-Aug-2021 | 64 | Des. |
| 14 | SIA_IW_SLC_ISDV_20210903T022353_20210903T022420_039511_04A843_457D | 3-Sep-2021 | 64 | Des. |
| 15 | SIA_IW_SLC_ISDV_20220101T022352_20220101T022419_041261_046762_31C6 | 1-Jan-2022 | 64 | Des. |
| 16 | SIA_IW_SLC_ISDV_20220513T022352_20220513T022419_043186_052858_36E7 | 13-May-2022 | 64 | Des. |
| 17 | SIA_IW_SLC_ISDV_20221109T022400_20221109T022427_045811_057A6E_980A | 9-Nov-2022 | 64 | Des. |
| 18 | SIA_IW_SLC_ISDV_20230402T022356_20230402T022423_047911_057C1D7_012E | 2-Apr-2023 | 64 | Des. |

۳. روش تحقیق

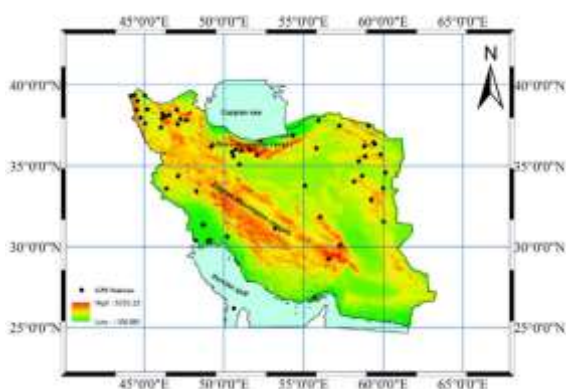
همانطور که در فصل پیشین آورده شد لازم است که برای تهیه نقشه و محاسبه جابجایی، اثرات اتمسفر، اثر ارتفاع، اثر نویز و اثر خطاهای مداری از فاز اینترفروگرام حذف گردد. در این بخش راهکارهای ارائه شده برای حذف این عوامل با توجه به منطقه مورد مطالعه و موضوع تحقیق که محاسبه جابجایی سکوهای سلمان است، پرداخته می‌شود.

علیرغم اطلاعات مفیدی که این سنجنده‌ها در اختیار قرار می‌دهند، آنالیز تغییر شکل با استفاده از این داده‌ها دارای چالشهای متعددی است. اطلاعات فاز موجود در اینترفروگرام، در ترکیبی از اطلاعات توپوگرافی، اتمسفر، تغییر شکل، خطای مداری، کرویت زمین، بازتاب‌های جانبی و نویز است. برای رسیدن به تغییر شکل موجود در فاز بایستی اثرات تک‌تک پارامترهای دیگر حذف و یا حداقل گردند، تا بتوان با قابلیت اعتماد بالایی تغییر شکل را محاسبه کرد. در منطقه مورد مطالعه دو چالش اصلی وجود دارد: مدل‌سازی اطلاعات توپوگرافی و حذف تصحیحات اتمسفری (۱۱ و ۱۲).

در بخش پیشین برخی از عوامل موثر در اختلاف فاز بین دو اپک زمانی در تصاویر راداری برشمرده شد و روشهای مواجهه با آنها به تفصیل شرح داده شد. در یک نگاه جامع، اجزای فاز اینترفروگرامی که از دو اکتساب/اپک زمانی به دست می‌آید طبق

رادار می تواند در طول زمان و مکان متفاوت باشد. لذا با توجه به موضوع این تحقیق که پایش جابجایی در طول زمان است، لازم است که تاثیر این پارامتر دیده شود.

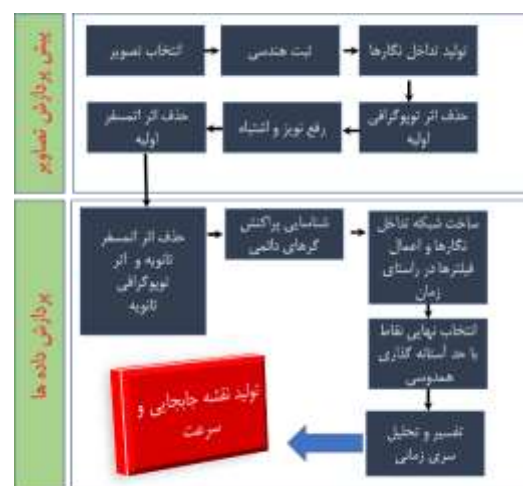
در این تحقیق از داده های یونسفر خارجی برای حذف اثر یونسفر استفاده شده است. داده های یونسفر خارجی، به ویژه داده های مربوط به محتوای کل الکترونی (TEC)، نقش مهمی در تصحیح فاز یونسفر برای محاسبه جابجایی دارند. گیرنده های ماهواره های ناوبری جهانی (GNSS)، مانند گیرنده های GPS (سیستم موقعیت یابی جهانی)، برای دریافت سیگنال از ماهواره های متعدد GNSS در فضا استفاده می کنند. این ماهواره ها سیگنالهایی را منتقل می کنند که توسط گیرنده های زمینی GNSS استفاده می شوند تا موقعیت دقیق آنها را روی سطح زمین تعیین کنند (۶). پراکندگی این گیرنده های زمینی در تصویر زیر نشان داده شده است. نزدیک ترین ایستگاه به منطقه مورد مطالعه ایستگاه بحرین (منامه) است که در این تحقیق از این ایستگاه استفاده شد (شکل ۳).



شکل (۳): پراکندگی ایستگاههای زمینی GNSS برای استفاده از اطلاعات اتمسفری

مؤلفه ی بعدی در تصحیحات اتمسفری شامل حذف اثرات تروپوسفر و بخار آب در جو است. این عامل نیز می تواند موجب تاخیر یا تعجیل فاز در سیگنال های رادار شود و بر صحت اندازه گیری های InSAR تأثیر بگذارد. برای پاسخگویی به این اثرات از بین بردن مؤلفه فاز ناشی از آن، از تکنیک های مختلفی استفاده می شود، از جمله استفاده از داده های خارجی مانند تأخیر کل زینتی (Zenith Total Delay) که یکی از محصولات GNSS است.

در اولین مورد لازم است تروپوسفر بررسی گردد. تروپوسفر پایین ترین لایه جو زمین است که از سطح تا چند کیلومتر در ارتفاع امتداد دارد. این ماده حاوی بخار آب و گازهای دیگر است و ضریب شکست آن با شرایط جوی مانند دما، فشار و رطوبت متفاوت است. امواج رادار که از تروپوسفر عبور می کنند، به دلیل



شکل (۲): فلوچارت روش تحقیق

۳-۱. تصحیحات اتمسفری

مؤلفه فاز یونسفر در InSAR به دلیل وجود یونسفر، منطقه ای از جو فوقانی زمین حاوی گازهای یونیزه شده بوجود می آید. یونسفر بسته به چگالی الکترونی و فرکانس رادار، می تواند بر انتشار امواج رادار تأثیر بگذارد و باعث تاخیر یا تعجیل فاز شود. این اثرات یونسفر می تواند تفاوت فاز در سیگنال های رادار دریافت شده را در طی دو اکتساب SAR ایجاد کند، که می تواند بر صحت اندازه گیری های InSAR تأثیر بگذارد. رابطه ریاضی برای مؤلفه فاز یونسفر را می توان به شرح زیر بیان کرد:

$$\varphi_{ion} = \frac{2\pi}{\lambda} * f * TEC \quad (2)$$

که در آن:

f فرکانس رادار است و TEC محتوای کل الکترون در طول مسیر سیگنال رادار است. λ طول موج رادار است. مقدار کل الکترون (TEC) تعداد کل الکترون های آزاد موجود در یک ستون از یونسفر را در طول مسیر سیگنال رادار نشان می دهد. TEC به طور معمول در واحدهای (TECU) اندازه گیری می شود، که در آن یک TECU برابر با 10^{16} الکترون در هر متر مربع است. مؤلفه فاز یونسفر به طور مستقیم با TEC متناسب است و با فرکانس رادار و طول مسیر سیگنال رادار از طریق یونسفر متفاوت است (۶).

تأخیر فاز یونسفر می تواند باعث ایجاد خطاهای قابل توجهی در اندازه گیری InSAR، به ویژه برای سیگنال های رادار با طول موج طولانی (به عنوان مثال، L-Band SAR) شود که بیشتر تحت تأثیر اثرات انتشار یونسفر قرار می گیرند. از آنجا که یونسفر یک محیط پویا و متغیر است، تأثیر آن بر روی سیگنال های

ZWD: تأخیر مرطوب در میلی متر (میلی متر) است. K: ثابت است که به شرایط جوی مانند دما، فشار و رطوبت بستگی دارد.

K به طور معمول در حدود ۲,۳ است، اما بسته به شرایط جوی و محل خاص ممکن است کمی متفاوت باشد. مقدار K از مدل سازی جوی و مشاهدات حاصل می شود. در پردازش InSAR، از داده های GNSS برای برآورد میزان بخار آب در منطقه مورد مطالعه استفاده می شود. با استفاده از K، (ZWD) به بخار آب رسوبی (PWV) تبدیل می شود و اطلاعات ارزشمندی در مورد محتوای بخار آب در ستون جوی ارائه می دهد.

رابطه بین ZWD و PWV برای تصحیح تأخیر فاز جوی ناشی از بخار آب پردازش InSAR بسیار مهم است. با تخمین بخار آب رسوبی (PWV) با استفاده از داده های ZWD، تأثیر بخار آب بر روی سیگنال های رادار به محاسبه می شود.

توجه به این نکته حائز اهمیت است که رابطه بین ZWD و PWV فرض می کند که توزیع بخار آب در جو به صورت عمودی یکپارچه و در طول مسیر سیگنال رادار سازگار است. در واقعیت، توزیع بخار آب می تواند پیچیده و با ارتفاع و مکان متفاوت باشد. با این وجود، این رابطه اطلاعاتی ارزشمند برای برآورد محتوای بخار آب از داده های GNSS و بهبود کیفیت نتایج InSAR با از بین بردن دخالت های جوی مربوط به بخار آب فراهم می کند.

یکی دیگر از داده هایی که در تصحیح اثر بخار آب استفاده می شود محصول بخار آب رسوبی سنجنده مادیس است. مادیس اطلاعات ارزشمندی را در مورد میزان بخار آب در جو ارائه می دهد، که می تواند برای تخمین تأخیر مرطوب زینتی (ZWD) و متعاقباً تصحیح مؤلفه فاز ناشی از آن مورد استفاده قرار گیرد. این داده ها به طور معمول به شکل نقشه های شبکه ای (Gridded Data) با قدرت تفکیک مکانی یک کیلومتری و قدرت تفکیک زمانی روزانه در دسترس هستند. برای به دست آوردن PWV در مکان های دقیق و زمان اخذ تصویر SAR، درون یابی مکانی و زمانی انجام می شود. مراحل اعمال این اثر با داده های مادیس که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته به شرح زیر است.

با برآورد تأخیر فاز تروپوسفر (ϕ_{tropo}) و تأخیر فاز بخار آب (ϕ_{WV})، می توان کل تأخیر فاز جوی خنثی ($\phi_{neutral_atm}$) را به عنوان مجموع از تروپوسفر و فاز آب بخاری آب محاسبه کرد.

$$\phi_{neutral_atm} = \phi_{tropo} + \phi_{WV} \quad (۶)$$

در شکل ۴ نمونه ای از داده های دانلود شده ملاحظه می گردد.

تغییر در ضریب شکست، تأخیر می کنند. این تأخیرها می تواند باعث ایجاد خطاهای فاز قابل توجهی در اینترفروگرام بویژه برای سیگنال های راداری با طول موج بلند شود. طبق رابطه زیر تأخیر فاز تروپوسفر ϕ_{tropo} با تأخیر کل زینتی (ZTD) مرتبط است:

$$\phi_{tropo} = \frac{2\pi}{\lambda} * f * ZTD \quad (۳)$$

ZTD نشان دهنده تأخیر کل زینتی است، که اندازه گیری تأخیر در کل توسط سیگنال رادار که از طریق تروپوسفر در طول مسیر عمودی (جهت Zenith) عبور می کند، است. ZTD را می توان با استفاده از تکنیک های مختلف از جمله GNSS (سیستم های ماهواره ای ناوبری جهانی) تخمین زد. گیرنده های GNSS تأخیر تجربه شده توسط سیگنال های GNSS را که از طریق تروپوسفر عبور می کنند، اندازه گیری می کنند و از این اندازه گیری ها می توان ZTD را محاسبه کرد.

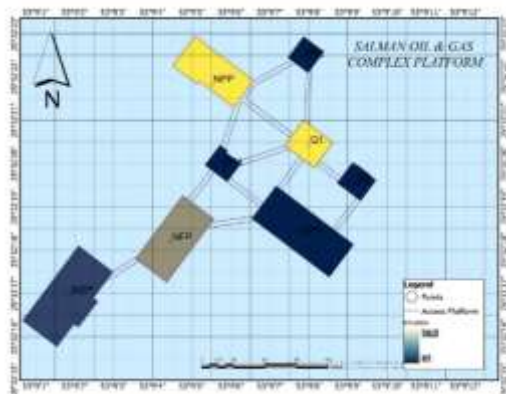
مورد بعدی تصحیح مربوط به بخار آب است. بخار آب در جو همانند تروپوسفر موجب تأخیرهای فاز در سیگنال های رادار، که به اثرات بخار آب حساس هستند می شود. مقدار بخار آب در جو با ارتفاع و مکان می تواند متفاوت باشد و منجر به تغییر در تأخیر فاز بخار آب در سیگنال رادار شود. تأخیر فاز بخار آب ϕ_{WV} با استفاده از فرمول زیر به تأخیر مرطوب زینتی (Zenith Wet Delay) مربوط می شود:

$$\phi_{WV} = \frac{2\pi}{\lambda} * f * ZWD \quad (۴)$$

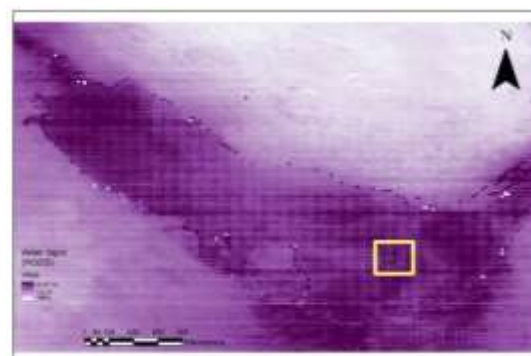
ZWD نشان دهنده تأخیر مرطوب زینتی است، که اندازه گیری تأخیر به دلیل بخار آب در طول مسیر عمودی (جهت Zenith) است. مشابه ZTD، ZWD را می توان با استفاده از داده های GNSS تخمین زد. گیرنده های GNSS اندازه گیری تأخیر ناشی از بخار آب را ارائه می دهند که برای محاسبه ZWD استفاده می شود. در واقع، بخار آب (WV) مقدار کل بخار آب موجود در ستون جوی بالای یک پیکسل خاص را نشان می دهد، که به طور معمول در میلی متر یا گاهی در اینچ اندازه گیری می شود. به عبارت دیگر به عنوان مثال ۱۳ سانتی متر بخار آب بدان معنی است که اگر کل بخار آب در آن ستون، مایع گردد، ارتفاع آب ناشی آن، ۱۳ سانتی متر خواهد بود. WV یک پارامتر اساسی برای درک میزان رطوبت در جو و تأثیر آن بر فرآیندهای مختلف آب و هوا است. رابطه بین ZWD و بخار آب رسوبی (PWV) به شرح زیر بیان شده است:

$$PWV = ZWD * k \quad (۵)$$

PWV: بخار آب رسوبی در میلی متر (میلی متر) است.



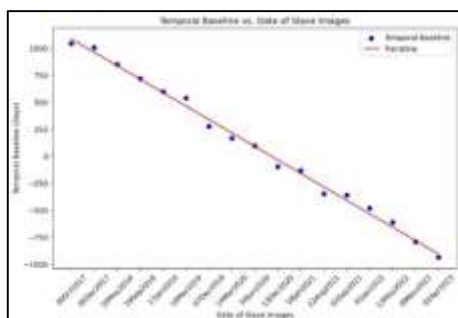
شکل (۵): مدل ارتفاعی رقومی مجموعه سکوه‌های سلمان



شکل (۴): نمونه ای از داده های بخار آب ستونی از سنجنده مادیس

۴. نتایج و بحث

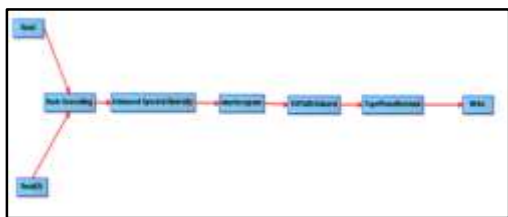
همانطور که در شکل ۲ آمده است، مراحل انجام تحقیق به دو مرحله پیش پردازش و پردازش تقسیم می‌گردد. در مرحله پیش پردازش نیازمند فرآیندی هستیم که در طی آن باید یک تصویر به عنوان مرجع اصلی یا پایه (Master) قرار گیرد و تصاویر دیگر به عنوان تصاویر پیرو (Slave) در نظر گرفته شوند. تصویر پایه به عنوان تصویر مرجع برای کل تجزیه و تحلیل سری زمانی عمل می‌کند. این فرآیند پشت‌پشته سازی اینترفروگرام (Interferogram Stacking) نام دارد. اطلاعات مربوط به تاریخ اخذ تصاویر، سنسور، حالت تصویربرداری و همچنین اطلاعات مربوط به خطوط پایه عمودی و زمانی در انتخاب تصویر پایه مشارکت دارند (شکل ۶). بدین منظور تخمینی از همدوسی/انسجام مدل محاسبه می‌شود و در انتخاب تصویر پایه ی بهینه نقش اصلی را بر عهده دارد. تصویر اصلی به گونه‌ای انتخاب می‌شود که پراکندگی خط پایه عمود کمترین میزان ممکن باشد. یعنی با انتخاب تصویر پایه، واریانس خط پایه عمود نسبت به سایر انتخابهای ممکن، حداقل باشد. در مورد خط پایه زمانی نیز همین موضوع صادق است. بر اساس رابطه پیشنهادی سازمان فضایی اروپا در مجموعه داده‌های این تحقیق تصویر شماره ۱۰ در جدول ۴-۳ که مربوط به تاریخ ۸ سپتامبر ۲۰۲۰ است به عنوان تصویر پایه انتخاب شد.



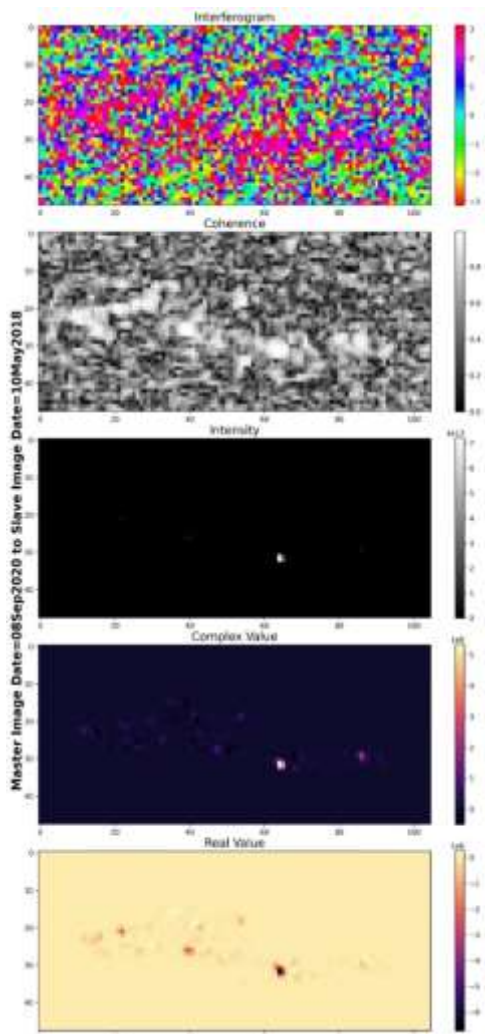
۳-۲. تصحیحات ارتفاعی

مدل های ارتفاعی مانند SRTM, GDEM, ASTER و GMTED عمدتاً برای ارائه داده های ارتفاعی برای سطوح خشکی طراحی شده اند. آنها اطلاعات ارتفاع دقیقی را برای توده‌های آبی بزرگ مانند خلیج فارس ارائه نمی‌دهند. استفاده از این مدل‌های ارتفاعی برای تخمین فاز توپوگرافی روی بدنه‌های آبی ممکن است به نتایج نادرستی منجر شود. به همین دلیل در منطقه مورد مطالعه ما یعنی سکوه‌های سلمان امکان استفاده از این داده‌ها وجود ندارد. لذا باید مدل ارتفاعی ساخته شده و در فرآیند گردش کار و پردازش داده های InSAR تزییق شود.

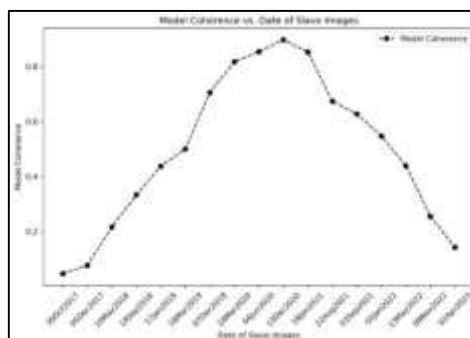
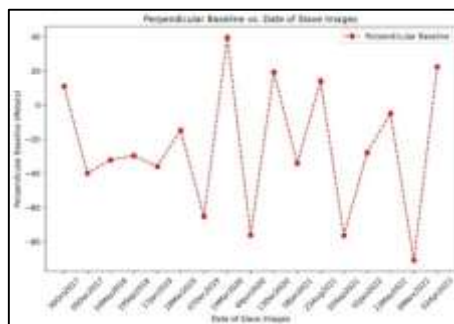
جهت تولید این مدل ارتفاعی از چندین منبع مختلف اقدام به جمع آوری داده کردیم. اطلاعات موجود از این منطقه دریافت شد و مدل‌سازی در نرم افزار NAVIS انجام شد. علاوه بر آن از تکنیک رادارگرامتری نیز برای تخمین ارتفاع بهره گرفته شد. بدین منظور دو زوج تصویر که اختلاف زمانی حداقل داشتند، انتخاب شدند و مبنای استخراج اطلاعات از رادارگرامتری قرار گرفت. این دو تصویر مربوط به زمانهای ۱۳ دسامبر ۲۰۲۰ و ۱۸ ژانویه ۲۰۲۱ بودند (اختلاف زمانی دو عبور متوالی از یک منطقه). با تلفیق اطلاعات بدست آمده از رادارگرامتری، نقشه های برداری، مدل‌سازی های شماتیک و بررسی تصاویر هوایی و ماهواره ای، مدل نهایی جهت استفاده در فرآیند حذف اثر توپوگرافی از فاز اینترفروگرام به دست آمد.



شکل (۷): مراحل تولید اینترفروگرام



شکل (۸): خروجی مرحله تولید اینترفروگرام (از بالا به پایین شامل: اینترفروگرام، همدوسی، شدت، مقادیر مختلط و مقادیر حقیقی است)



شکل (۶): تخمین پارامترها برای انتخاب تصویر پایه (از بالا با پایین: خط پایه زمانی، خط پایه مکانی، داپلر شیفت و میزان همدوسی)

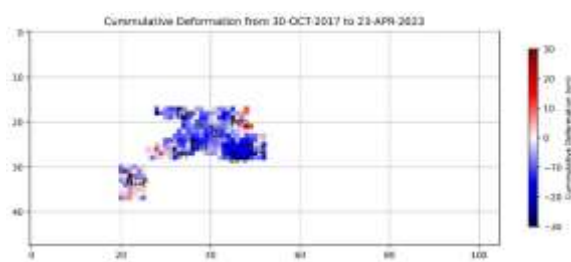
۴-۱. تولید اینترفروگرام

بعد از انتخاب تصویر پایه، برای تولید اینترفروگرام مراحل مطابق شکل ۷ انجام شد. این مراحل در نرم افزار SNAP انجام شد. پس از این مرحله مجموعه‌ای از خروجی‌ها و نتایج تولید شد که ۱۷ زوج اینترفروگرام است که یک نمونه از آنها در شکل ۸ نشان داده شده است.

۴-۲. پردازش

بعد از تولید اینترفروگرام‌ها نوبت به مرحله پردازش اصلی می‌رسد. در این مرحله ما فاز خام را که اثرات مختلفی در آن وجود دارد در اختیار داریم. البته برخی از اصلاحات فاز مانند تصحیح کروییت زمین و تصحیح ارتفاعی و اتمسفری اولیه در

پراکنده‌های پایدار بالقوه در نظر گرفته می‌شوند. در این تحقیق به دلیل وجود ناپایداری‌های فراوان مقدار آستانه ۰٫۹۵ در نظر گرفته شده است. آستانه همدوسی روی نقشه همدوسی اعمال شد. پیکسل‌هایی با مقادیر همدوسی بالاتر از آستانه، نامزدهای بالقوه‌ای برای پراکنده‌های پایدار هستند. برای حذف نقاط کاذب و بهبود قابلیت اطمینان فرآیند، از رویکرد خوشه بندی در یادگیری ماشین استفاده شد. ایده این است که پیکسل‌های همسایه با همدوسی بالا را در خوشه‌های یکسان گروه‌بندی کنیم. و در نهایت فیلتر چگالی و فیلتر پایداری/همبستگی زمانی (این که آیا نقاط کاندید مقادیر همدوسی یکسانی را در چندین دوره از خود نشان می‌دهند یا خیر) جهت انتخاب نهایی اعمال شد. تمهیدات در نظر گرفته شده با استفاده از یادگیری ماشین برای اولین بار استفاده شده است و یکی از جنبه‌های نوآوری تحقیق است. نتیجه این فرآیند، انتخاب ۸ نقطه بود که در شکل ۱۰ محل آنها بر روی نقشه‌ی میزان جابجایی در هر دوره زمانی نشان داده شده‌اند.



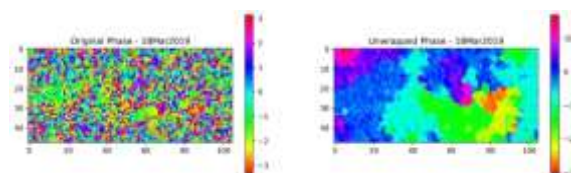
شکل (۱۰): نقشه جابجایی تجمعی سکوی سلمان از تاریخ ۳۰ اکتبر ۲۰۱۷ تا ۲۳ آوریل ۲۰۲۳



شکل (۱۱): موقعیت هشت نقطه پایدار بر روی عکس هوایی از مجموعه سکوهای سلمان

میزان جابجایی تجمعی در هشت نقطه یاد شده در شکل ۱۲ نمایش داده شده است.

مرحله پیش پردازش اعمال شد. اما با توجه به اینکه هر کدام از اجزا فاز در این تحقیق به شدت غیرخطی و پیچیده هستند لذا یکی از چالش‌ها رسیدن به راه حلی است که تا حد قابل قبولی باقیمانده نویز و باقیمانده اجزا ناخواسته را به حداقل برساند. راهکارهای در نظر گرفته شده در بخش روش پیشنهادی به تفصیل بیان گردید. در اینجا نتایج حاصل از تمهیدات به کار گرفته شده نمایش داده می‌شود. به طور خلاصه اثرات فاز توپوگرافی، یونسفر، اتمسفر و نویز به صورت پی‌درپی محاسبه و از اینترفروگرام اولیه کسر شد. سپس مرحله بازگشایی فاز اعمال شد و فاز خالص تجمعی به دست آمد. در هریک از تصاویری که در ادامه آمده است در سمت چپ فاز خام یا اولیه (پس از کسر اثرات مختلف) قرار دارد و در سمت راست فاز بازگشایی شده (با روش SNAPHU قابل مشاهده است (شکل ۹).



شکل (۹): اینترفروگرام خام (سمت راست) و فاز باریابی شده (سمت چپ)

۳-۴. محاسبه میزان جابجایی

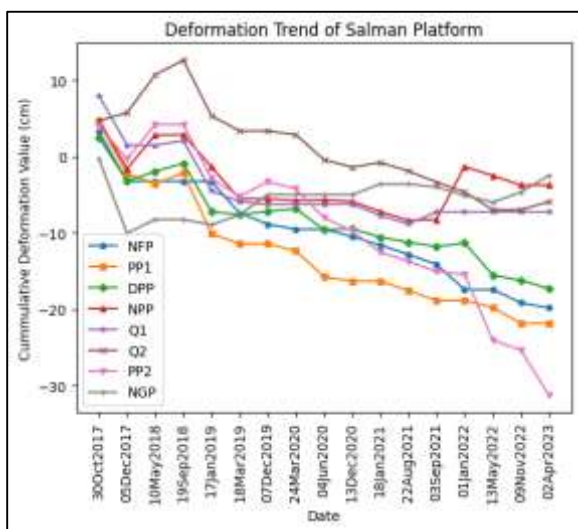
بعد از به دست آمدن فاز بازگشایی شده در مرحله قبل، اکنون می‌توان میزان جابجایی را در محدوده سکوی سلمان با رابطه ۷ به دست آورد.

$$d = \frac{4\pi * \lambda}{\Delta\phi} \quad (7)$$

که در این رابطه λ طول موج و $\Delta\phi$ میزان فازبازگشایی شده و d میزان جابجایی است. رابطه فوق در هر پیکسل محاسبه می‌شود. قبل از نشان دادن نتایج در میان پیکسل‌هایی که میزان جابجایی آنها محاسبه می‌شود باید اصلی‌ترین و پایاترین نقاط را بر اساس روش Persistent Scatterer انتخاب کنیم. برای این کار نیازمند نقشه همدوسی هستیم که دیدیم در مراحل قبل تولید شد. معیار اصلی برای انتخاب این نقاط آستانه همدوسی است. این ویژگی پایداری و پراکنده‌گی را در طول زمان مشخص می‌کند. مقادیر همدوسی بالا (نزدیک به ۱) نشان دهنده پراکنده‌گی پایدار، در حالی که مقادیر همدوسی پایین (نزدیک به ۰) ناپایداری را نشان می‌دهد. مقدار آستانه به منطقه مورد مطالعه، کیفیت داده‌های SAR و کاربرد خاص بستگی دارد. یک آستانه رایج بین ۰٫۲ و ۰٫۳ قرار می‌گیرد. این بدان معناست که پیکسل‌هایی با مقادیر انسجام بالاتر از آستانه،

وجود ندارد (مانند نوسان در تاریخ ۱ ژانویه ۲۰۲۲ در سکوهای Q1، NPP، Q1 و PP2) احتمالاً به دلیل تغییر و تحول در بنای سازه بوده است که نسبت به دوره های پیشین شاهد تغییر ارتفاع هستیم. برای ارزیابی و مقایسه نتایج از قطبش VH استفاده شد که نتیجه جابجایی تجمعی و آنالیز سری زمانی ۸ نقطه پایدار در تصاویر زیر نشان داده شده است.

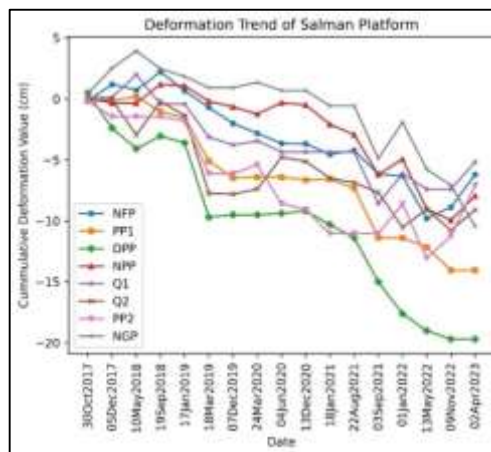
نتایج حاصل از قطبش VH نیز حاکی از وجود روند فرونشست در مجموعه سکوی سلمان است و نتایج به دست آمده را تایید می کند (شکل ۱۳). تفاوتی که وجود دارد این است که در قطبش VV شیب بیشتری را ملاحظه می کنیم که اعتبار حساسیت قطبش VV در محاسبه جابجایی های ارتفاعی در راستای دید سنجنده را تایید می کند. هرچند که قطبش VH وجود روند در فرونشست را تایید می کند اما اعداد مطلق آن قابل استناد نیستند و فقط درک شهودی از وضعیت را برای محقق ایجاد می کند.



شکل (۱۳): جابجایی تجمعی هر یک از سکوهای مجموعه ی سلمان در سری زمانی-قطبش VH

۵. نتیجه گیری

هدف این تحقیق ارائه روشی برای پایش میزان جابجایی مجموعه سکوهای سلمان بود. برای دستیابی به این هدف امکان استفاده از روش های رایج آنالیز سری زمانی نبود. چون در مرحله اول برخلاف پایش فرونشست و بالآمدگی در خشکی ها هیچ مدل بین المللی ارتفاعی که بتواند سهم ناشی از فاز ارتفاعی را کسر کند موجود نبود. لذا در این تحقیق با بهره گیری از منابع مختلف، مدل ارتفاعی این مجموعه ساخته شد. در مرحله دوم محاسبه فاز ناشی از اتمسفر است. با توجه به اینکه منطقه مورد



شکل (۱۲): جابجایی تجمعی هر یک از سکوهای مجموعه ی سلمان در سری زمانی-قطبش VV

۴-۴. تحلیل نتایج

بر اساس نمودار نشان داده شده در شکل ۱۲ روند افزایشی میزان فرونشست در کلیه ی سکوها کاملاً مشاهده می شود. می توان به عنوان یک عدد کلی این گزاره را با تقریب بیان کرد که از سال ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۳ مجموعه ی سکوها حدود ۱۲ سانتی متر فرونشست را در راستای دید سنجنده تجربه کرده اند. کمترین میزان فرونشست در این مدت مربوط به سکوی NGP با حدود ۶ سانتی متر و بیشترین فرونشست مربوط به سکوی DPP با حدود ۲۰ سانتی متر است. دوره زمانی مطالعه ۱۹۸۱ روز (حدود ۵,۴۳ سال) یعنی از تاریخ ۳۰ اکتبر ۲۰۱۷ تا ۲ آوریل ۲۰۲۳ است.

با توجه به این موضوع میتوان سرعت متوسط فرونشست مجموعه سکوهای سلمان را ۲,۲۱ سانتی متر در سال اعلام کرد. از دیگر نتایج مهمی که می توان از شکل ۱۲ دریافت کرد ماهیت نوسانی فرونشست و برآمدگی است. این موضوع به دلایل مختلفی صورت می گیرد. از جمله حرکت سیال ها جهت پرکردن حفره های به وجود آمده ناشی از برداشت نفت و گاز و یا تزریق آب. این حرکت نوسانی، خطر بیشتری را نسبت به حالتی که فرونشست به صورت تقریباً خطی رخ دهد، دارد. چرا که موجب خستگی مضاعف سازه و استهلاک سریع تر آن می گردد. همانطور که ملاحظه می گردد بین سالهای ۲۰۱۸ تا سال ۲۰۲۰ بیشترین شیب فرونشست را شاهد هستیم.

این نکته لازم به ذکر است که فرونشست با تاخیر زمانی نسبت به دوره های ازدیاد برداشت خود را نشان می دهد که میزان آن بستگی به سازند خوف و ویژگی های کشسانی آن دارد. اما می توان وجود دوره های با ازدیاد برداشت را قبل از تاریخ یاد شده، نتیجه گرفت. برخی از نوسانیهایی که توجیه خاصی برای آن

در این تحقیق از سازمانهای بین المللی دریافت شده، مستقل خواهد شد. این موضوع چندین مزیت مختلف دارد از جمله اینکه قدرت تفکیک مکانی و زمانی بسیار بالاتر و انعطاف پذیرتر خواهد بود. همچنین از این طریق امکان ارائه خدمات پایش سلامت سکوها به کشورهای منطقه و صدور خدمات فنی و مهندسی فراهم می آید و مزایای اقتصادی هم در پی دارد.

۶. تقدیر و تشکر

این مقاله از تحقیقات انجام شده در دوره طرح جایگزین خدمت (طرح شهید صیاد شیرازی) استخراج شده است، نویسندگان بر خود لازم می دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از حمایت های مادی و معنوی قرارگاه سازندگی خاتم الانبیا(ص) اعلام کنند.

۷. مراجع

- [1] van Leijen, Freek and Hanssen, Ramon. Deformation monitoring using radar interferometric time series: a review of methodologies. *GPS Nieuwsbrief*, 19(1):33-39, 2004.
- [2] Farr, Tom G, Rosen, Paul A, Caro, Edward, Crippen, Robert, Duren, Riley, Hensley, Scott, Kobrick, Michael, Paller, Mimi, Rodriguez, Ernesto, Roth, Ladislav, Seal, David, Shaffer, Scott, Shimada, Joanne, Umland, Jeffrey, Werner, Marian, Oskin, Michael, Burbank, Douglas, and Alsdorf, Douglas. The shuttle radar topography mission. *Rev. Geophys.*, 45:33, May 2007.
- [3] Vasile, G., Trouvé, E., Ciuc, M., and Buzuloiu, V. General adaptive neighborhood technique for improving synthetic aperture radar interferometric coherence estimation. *Journal of Optical Society of America*, 21(8):1455-1464, Aug 2004.
- [4] Karimi, M., Arab, M. R., Eslami, M., & Roshani, O. (2021). Interaction of cavities and underground structures on subsidence. *Construction science and technology*, 1(4), 27-33.
- [5] Estimating the Vulnerability Index of Buildings in Relation to the Excavation of Urban Tunnels. *Construction science and technology*, 2(2), 21-32.2021
- [6] A. Sam-Khaniani and S. Farzaneh, "Tropospheric delay efficiency from CSRS PPP online service for meteorologists in Iran," March 2021. *Numerical Methods in Civil Engineering*.
- [7] van Leijen, Freek. Persistent Scatterer Interferometry based on geodetic estimation theory. PhD thesis, Delft University of Technology, Delft, the Netherlands, April 2014.
- [8] Morishita, Yu and Hanssen, Ramon F. Temporal decorrelation in L-, C-, and X-band satellite radar interferometry for pasture on drained peat soils. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(02):1096-1104, 2015.
- [9] Costantini, M., Malvarosa, F., and Minati, F. A general formulation for redundant integration of finite differences and phase unwrapping on a sparse multidimensional domain. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 50(3):758-768, March 2012.
- [10] Samiei-Esfahany, Sami. Improving persistent scatterer interferometry for deformation monitoring; (case study on the Gardanne mining site). Master's thesis, Delft University of Technology, July 2018.
- [11] Hanssen, Ramon F and Klees, Roland. Applications of SAR interferometry in terrestrial and atmospheric mapping. In Ligthart, L P, editor, Workshop proceedings European Microwave

نظر در موقعیتی قرار دارد که وضعیت اتمسفر به شدت متغیر است، لذا بایستی سهم ناشی از اتمسفر بطور دقیق محاسبه و در آنالیز و مدلسازی استفاده گردد. برای این منظور از منابع مختلف ماهواره ای، عوامل تاثیرگذار بر تاخیر فاز ناشی از اتمسفر دریافت شد و تحت یک چارچوب مشخص تلفیق و از فاز اولیه کسر شد. چالش بعدی بازگشایی فاز بود.

به دلیل احاطه مجموعه سکوه های سلمان با آب، بازگشایی فاز دچار ناپیوستگی ها و نویزهای متعددی بود که نیازمند ارزیابی گسترده فاز بازیابی شده بود. در این تحقیق توصیفگرهای آماری متعددی جهت اطمینان از درستی فاز بازیابی شده که نقش تعیین کننده ای در صحت نتایج دارد به کار گرفته شد. در نهایت روشی مبتنی بر همدوسی برای انتخاب نقاط پایدار ارائه شد و در ۸ نقطه میزان جابجایی محاسبه و ارائه شد.

به عنوان جمع بندی می توان گفت، تداخل سنجی راداری با داشتن هزینه اندک، سرعت و دقت بالا، عدم تماس مستقیم با سکو، نامحدود بودن نقاط انتخابی برای رفتارسنجی، امکان استفاده در مناطق پرخطر و با ریسک بالا، آن را به رقیبی بلامنازع و جایگزین مناسب برای روشهای سنتی در زمینه جابجایی سنجی سکوها تبدیل کرده است. همچنین با توجه به قدرت تفکیک مکانی سنجنده سنتینل ۱، نقاط منتخب از تراکم و توزیع مناسبی در سطح سکو برخوردار بودند و رفتارسنجی، تغییر شکل و جابجایی سکوی مورد نظر را امکان پذیر کردند.

بر اساس نتایج و یافته های اصلی تحقیق پیشنهادهایی در بندهای زیر برای کارهای آینده و به کارگیری این نتایج در صنعت نفت، گاز و پتروشیمی کشور ارائه می گردد.

- تولید مدلهای ارتفاعی به روز و دقیق از کلیه مجموعه های فراساحلی یکی از راهکارهایی است که هم عملی است و هم اثرات مهمی دارد. این مدلها در صورت موجود بودن امکان مطالعه یکپارچه کلیه سکوه های فراساحلی خلیج فارس را فراهم می کند.
- تولید مدلهای ملی آنالیز اتمسفر از دیگر مواردی است که اگر فرض کنیم انشالله در آینده سامانه پایش یکپارچه سکوها رونمایی شود، ورودی مهم و تاثیرگزار خواهد بود.

هم چنین در چندسال اخیر تولید سنجنده های راداری زمینی توجه بسیاری از محققان را برانگیخته است. اگر صنعت نفت و گاز کشور در یک همکاری مشترک با دانشگاه به سمت تولید اینگونه سنجنده ها حرکت کند، در زمینه ورودی داده ها که

Conference, Amsterdam, 9 October, pages 43–50. European Microwave Conference, Miller Freeman, 1998.

[12] C. W. Chen and H. A. Zebker, “Network approaches to two-dimensional phase unwrapping intractability and two new algorithm,” *The Optical Society of America A*, vol. 18, no. 3, pp. 401-414, 2020.

[13] A. S. Ab Latip, A. Matori, A. Aobpaet, and A. H. M. Din, Monitoring of offshore platform deformation with stanford method of persistent scatterer (stamps), in 2015 International Conference on Space Science and Communication (IconSpace), 2015, pp. 79–83.