



ORIGINAL RESEARCH PAPER

A Comparative study of radar and optical imagery in estimating ground displacement fields (study area: Maragheh)

L. Zamany, Y. Jamour*, A. Milan

Department of Surveying Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

ABSTRACT

Received: 13 November 2025
Reviewed: 14 February 2026
Revised: 17 April 2026
Accepted: 17 June 2026

KEYWORDS:

Interferometry
Offset Tracking
UAV Photogrammetry
Subsidence
Horizontal Displacement
Radar Imagery
Optical Imagery

* Corresponding author

✉ y_djamour@sbu.ac.ir

☎ (021)73932449

Background and Objectives: The phenomenon of ground surface displacement—particularly subsidence and horizontal movement—is one of the most significant environmental and geotechnical threats in many regions of the world, including Iran. Therefore, accurate monitoring and measurement of these displacements are of great importance. In recent years, the application of remote sensing technologies such as radar interferometry (InSAR) and offset tracking has made remarkable progress. Additionally, optical imagery and UAV (drone) data have enabled the reconstruction of 3D models and the extraction of surface deformation patterns. However, most previous studies have utilized only one of these techniques, and few have focused on integrating radar and optical data. Accordingly, the main objective of this study is to conduct a comprehensive investigation of ground displacement fields through the integration of radar and optical imagery.

Methods: Five villages—Bolbol, Joko, Tazehkand Nasirpour, Bali Qaya, and Lalehzar, located in the southeastern region of Maragheh County, were selected as study areas to allow the assessment of displacement behavior across different land types (residential/urban and flat/rural areas). Ground displacement was analyzed using two distinct approaches: vertical displacement (subsidence/uplift) and horizontal displacement. The analyses were based on average deformation values within the two major land categories. Three complementary techniques were employed: radar interferometry (InSAR), offset tracking, and optical photogrammetry using 3D model reconstruction. In the interferometry technique, seven Sentinel-1 radar images with approximately three-month intervals were collected and processed. Similarly, seven radar images were processed for offset tracking, resulting in a total of twelve radar-based analyses. Furthermore, four series of drone images (Mavic 3) were captured and processed at approximately four-month intervals.

Findings: In the vertical displacement analysis, the greatest subsidence occurred in Lalehzar Village, where ground elevation decreased by approximately 13–15 cm in residential/urban areas and 12–14 cm in flat terrains. This level of subsidence is likely related to excessive groundwater extraction and the unique geological conditions of the region. Conversely, the lowest subsidence was recorded in Bali Qaya Village, with changes of about 2–3 cm in residential areas and around 7 cm in flat regions. Regarding horizontal displacement, the highest value was observed in Bolbol Village, with movements of about 5–6 mm in flat terrains and 1.8–2.1 mm in residential areas. The lowest horizontal displacement was found in Bali Qaya Village, where horizontal shifts were less than 1.5 mm in residential areas and about 4 mm in flat terrains.

Conclusion: Overall comparison between the methods indicates that, although the displacement trends observed by both approaches are nearly identical—and both successfully identify the same regions with maximum and minimum displacement—the numerical values differ slightly in some cases. These discrepancies can be attributed to each method's sensitivity to different displacement types (vertical or horizontal), imaging conditions, and processing algorithms. In general, the combined use of radar and optical approaches provides a more comprehensive understanding of surface deformation patterns and significantly enhances the accuracy of decision-making in resource management, subsidence monitoring, and urban planning.



NUMBER OF REFERENCES

44



NUMBER OF FIGURES

11



NUMBER OF TABLES

7

مقاله پژوهشی

مطالعه تطبیقی تصاویر راداری و اپتیک در برآورد میدان جابجایی سطح زمین (منطقه مورد مطالعه: شهرستان مراغه)

لیلی زمانی، یحیی جمور*، اصغر میلان

گروه مهندسی نقشه برداری، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده

پیشینه و اهداف: پدیده ی جابجایی سطح زمین، به ویژه فرونشست و تغییرات افقی، یکی از مهم ترین تهدیدهای زیست محیطی و عمرانی در بسیاری از مناطق جهان و ایران به شمار می رود. به همین دلیل پایش و اندازه گیری دقیق آن از اهمیت بالایی برخوردار است. در سال های اخیر، استفاده از فناوری های سنجش از دور مانند تداخل سنجی راداری و ردیابی انحراف پیشرفت چشمگیری داشته است. همچنین، تصاویر اپتیک و داده های پهپادی نیز امکان بازسازی مدل های سه بعدی و استخراج تغییرات سطح زمین را فراهم کرده اند. با وجود این، اغلب مطالعات موجود تنها از یکی از این روش ها بهره گرفته اند و کمتر پژوهشی به بررسی تلفیق داده های راداری و اپتیک پرداخته است. بنابراین، هدف اصلی پژوهش حاضر بررسی جامع میدان جابجایی سطح زمین با استفاده از تلفیق تصاویر راداری و اپتیک است.

روش ها: انتخاب روستاهای بلبل، جوکو، تازه کند نصیرپور، بالی قایا و لاله زار واقع در شهرستان مراغه، به عنوان مناطق مطالعه، این امکان را فراهم می سازد که رفتار جابجایی در بافت های متفاوت (مسکونی و مسطح) مورد ارزیابی قرار گیرد. در این پژوهش، جابجایی سطح زمین با استفاده از دو رویکرد متفاوت، یعنی اندازه گیری جابجایی عمودی و اندازه گیری جابجایی مسطحانی، برای منطقه ی مورد مطالعه بررسی و مقایسه شد. تحلیل ها بر اساس میانگین تغییرات در دو نوع بافت زمین، شامل مناطق مسکونی و شهری و مناطق مسطح و هموار انجام گرفت. به این منظور از تلفیق سه روش تداخل سنجی، ردیابی انحراف و استفاده از تصاویر اپتیک فتوگرامتری و تکنیک تبدیل سه بعدی مدل تصاویر استفاده شد. در تکنیک تداخل سنجی ۷ تصویر راداری با فواصل حدوداً ۳ ماهه جمع آوری و پردازش شدند. در تکنیک ردیابی انحراف ۷ تصویر راداری جمع آوری و پردازش شدند که در مجموع ۱۲ پردازش انجام شد. ۴ سری تصویر پهپادی نیز با فواصل زمانی حدوداً ۴ ماهه از منطقه برداشت و پردازش شد.

یافته ها: در بخش جابجایی عمودی، نتایج نشان داد که بیشترین نشست در روستای لاله زار رخ داده است؛ به طوری که در مناطق مسکونی و شهری بین ۱۳ تا ۱۵ سانتی متر و در مناطق مسطح و هموار بین ۱۲ تا ۱۴ سانتی متر کاهش ارتفاع زمین مشاهده شد. این میزان نشست می تواند ناشی از برداشت بیش از حد آب های زیرزمینی و ویژگی های زمین شناسی خاص این روستا باشد. در مقابل، کمترین نشست به روستای بالی قایا مربوط است که میزان تغییرات آن در مناطق مسکونی حدود ۲ تا ۳ سانتی متر و در مناطق مسطح و هموار حدود ۷ سانتی متر بوده است. در بخش جابجایی مسطحانی، بیشترین مقدار مربوط به روستای بلبل بود که در مناطق مسطح و هموار حدود ۵ تا ۶ میلی متر و در مناطق مسکونی حدود ۱/۸ تا ۲/۱ میلی متر جابجایی افقی ثبت شد. کمترین جابجایی مسطحانی نیز در روستای بالی قلیا با مقداری کمتر از ۱/۵ میلی متر در مناطق مسکونی و حدود ۴ میلی متر در مناطق مسطح و هموار گزارش گردید.

نتیجه گیری: مقایسه ی کلی بین دو روش نشان می دهد که هرچند روند تغییرات در هر دو روش تقریباً یکسان است و هر دو روش روستاهای دارای بیشترین و کمترین جابجایی را به صورت مشابه شناسایی کرده اند، اما مقادیر عددی در برخی موارد اختلاف دارند. این اختلاف ها می تواند به دلیل حساسیت متفاوت هر روش به نوع جابجایی (افقی یا عمودی)، شرایط تصویربرداری و الگوریتم های پردازش باشد. به طور کلی، استفاده ی ترکیبی از هر دو روش می تواند دید جامع تری از وضعیت جابجایی زمین فراهم کند و دقت تصمیم گیری در مدیریت منابع، پایش فرونشست و برنامه ریزی عمرانی را تا حد زیادی بهبود بخشد.

تاریخ دریافت: ۲۲ آبان ۱۴۰۴
تاریخ داوری: ۲۵ بهمن ۱۴۰۴
تاریخ اصلاح: ۲۸ فروردین ۱۴۰۵
تاریخ پذیرش: ۲۷ خرداد ۱۴۰۵

واژگان کلیدی:

تداخل سنجی
ردیابی انحراف
فتوگرامتری پهپادی
تصاویر راداری
تصاویر اپتیک

* نویسنده مسئول

✉ y_djamour@sbu.ac.ir

① ۰۲۱-۷۳۹۳۲۴۴۹

مقدمه

مطالعه‌ی میدان جابجایی زمین در بررسی مداوم وضعیت پوسته‌ی زمین، پیش‌بینی مخاطرات و یافتن راه‌حل‌های مناسب برای کند کردن روند تغییر، در حفظ محیط‌زیست و جان بسیاری از انسان‌ها تأثیر به‌سزایی دارد. یافتن راه‌حل‌های مناسب و نوین همواره از اهداف مهم و اولیه‌ی دانشمندان در این زمینه بوده است. [۱]

امروزه، موضوع فرونشست و تأثیر آن بر مناطق از دیدگاه‌های مختلف از جمله اجتماعی-اقتصادی، زیست محیطی و مسائل حفاظتی در جهان یک موضوع نگران‌کننده بوده و نیاز به بررسی دقیق در بسیاری از کشورها دارد [۲]. فرونشست زمین اولین بار در سال ۱۹۲۱ شهر شانگهای چین مشاهده شد [۳]. بعد از جنگ جهانی دوم، روند رو به رشد برداشت آب، نفت و گاز از لایه‌ی زیرین زمین، به ویژه مواد ریزدانه‌ی پوسته زمین باعث تشدید معضل فرونشست شد [۴]. اخیراً تأثیرات زیست محیطی و اقتصادی فرونشست زمین در بسیاری از مناطق پرجمعیت (مانند مکزیکو سیتی، شانگهای و بانکوک) به‌عنوان یک مشکل تهدیدکننده‌ی زیرساخت‌های شهری مورد توجه قرار گرفته است [۵-۸]. در ایران نیز فرونشست، یکی از مشکلات جدی برای شهرها به شمار می‌رود. بیش از ۹۸ درصد زمین‌های ایران مستعد وقوع این پدیده هستند. حدود ۱۱ درصد از مساحت ایران، در زون فرونشست قرار دارند. تهران، خراسان رضوی و اصفهان، بیشتر از دیگر استان‌های ایران با خطر فرونشست زمین رو به رو هستند. با توجه به اطلاعات بدست آمده از سازمان زمین-شناسی ایران، خراسان رضوی با میانگین سالانه ۱۴ سانتی‌متر و نواحی بحرانی ۱۹ سانتی‌متر در سال، اصفهان با میانگین سالانه ۱۱ سانتی‌متر و نواحی بحرانی ۱۷ سانتی‌متر در سال و تهران با میانگین سالانه ۴ سانتی‌متر و نواحی بحرانی ۳۶ سانتی‌متر در سال به‌ترتیب شاهد بیشترین تا کمترین میزان فرونشست در ایران هستند. درحال حاضر ۳۰۰ دشت ایران دچار این بحران هستند؛ در برخی از دشت‌های ایران شرایط از فرونشست عبور کرده و زمین وارد مرحله‌ی بحرانی ایجاد فروچاله‌ها شده است، از مناطق با شرایط بحرانی می‌توان به دشت کاشمر، دشت کبو درآهنگ همدان، دشت ورامین، دشت نظرآباد، دشت تهران، دشت مشهد و نیشابور، دشت‌های استان کرمان، اصفهان و قزوین اشاره کرد. شهرستان مراغه و به‌خصوص روستاهای بلبل، جوکو، تازه‌کند نصیرپور، بالی‌قاپا و لاله‌زار، به دلیل شرایط زمین‌شناسی خاص و برداشت بیش از حد منابع آب زیرزمینی، در سال‌های اخیر با جابجایی‌های محسوس سطح زمین مواجه بوده‌اند. این مسئله ضرورت پایش دقیق، علمی و به روز این تغییرات را دوچندان می‌سازد.

مروری بر تحقیقات تلفیقی پیشین

سنجش از دور تنها ابزار موجودی است که می‌توان با استفاده از آن اقدام به تهیه‌ی اطلاعات از عوارضی نمود که هم در پهنه‌های وسیعی گسترده شده‌اند و هم در مناطق صعب‌العبور و با دسترسی سخت واقع

شده‌اند [۹]. از جمله دقیق‌ترین روش‌های استخراج داده‌های ارتفاعی و توپوگرافی به‌وسیله‌ی سنجش از دور استفاده از تکنیک‌های تداخل‌سنجی در تصاویر ماهواره‌ای راداری است [۱۰].

تداخل‌سنجی تکنیک استفاده از تداخل امواج الکترومغناطیس به منظور استخراج اطلاعات است. این روش با استفاده از اختلاف فاز زوج تصویر راداری با حد تفکیک مکانی بالا به دنبال تولید مدل رقومی ارتفاعی منطقه و برآورد میزان تغییر شکل و جابجایی پوسته‌ی زمین است [۱۱]. مقایسه‌ی میان روش‌های میدانی و سنجش از دوری به روشنی بیانگر آن است که تصاویر ماهواره‌ای با توجه به پوشش وسیع‌تر، توان تفکیک مکانی بالاتری داشته و قابلیت برداشت اطلاعات در زمان‌های مختلف را دارند و کارایی بیشتری نسبت به روش‌های میدانی در شناسایی و پایش تغییرات انواع عوارض زمینی دارند [۱۲]. در سال‌های اخیر تحقیقات وسیعی با روش‌های تلفیقی بر روی استفاده از این داده‌ها برای اندازه‌گیری حرکت و تغییرات سطح زمین با استفاده از ماهواره‌های راداری و داده‌های نوری انجام شده است [۱۳، ۱۴].

در [۱۵] به مقایسه‌ی کاربرد داده‌های SAR (Synthetic Aperture Radar) و داده‌های اپتیکی در استخراج سرعت جابجایی عوارض پویای سطح زمین با استفاده از تکنیک ردیابی عوارض (Feature Tracking) بر روی مناطق کوهستانی Tianshan در چین پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده همزمان از این دو داده به عنوان داده‌های مکمل در افزایش دقت تعیین جابجایی تأثیر بسزایی دارد. بر اساس نتایج این تحقیق، جابجایی یخچال‌ها با سرعت ۳۰ سانتی‌متر در سال بود.

در [۱۶] با هدف غلبه بر محدودیت‌های روش‌های تداخل‌سنجی راداری و GPS، یک چارچوب پیشرفته برای ادغام این داده‌ها جهت استخراج میدان تغییر شکل سه‌بعدی پوسته‌ی زمین ارائه دادند. در این تحقیق از داده‌های سه‌بعدی GPS به‌عنوان مرجعی برای استخراج مؤلفه‌های افقی و قائم استفاده شد و داده‌ها با روش کمترین مربعات ادغام شدند. این ترکیب امکان تشخیص تغییرات قائم کوچک‌تر از ۱۰ میلی‌متر را فراهم کرد و توانست جهت و شدت دقیق حرکات پوسته را در مناطق پیچیده، از جمله مناطق با فعالیت گسل‌های پنهان، استخراج کند. این مطالعه نشان داد که ادغام داده‌های InSAR و GPS ابزاری نیرومند برای درک بهتر دینامیک پوسته‌ی زمین در مناطق فعال تکتونیکی است.

در [۱۷] روشی برای ادغام داده‌های GNSS و InSAR برای استخراج میدان جابه‌جایی سه‌بعدی سطح زمین در ایالت کالیفرنیا ارائه دادند. برای این منظور، از داده‌های GNSS شبکه‌های دائمی و کمپین‌های میدانی SCEC، با نرخ نمونه برداری بالا و داده‌های InSAR تصاویر ماهواره‌ی Sentinel-۱ در بازه‌ی ۲۰۲۲-۲۰۱۵ در هر دو مسیر صعودی و نزولی استفاده کردند. بدین ترتیب، امکان شناسایی جابه‌جایی‌های قائم کوچک (کمتر از ۵ میلی‌متر) که معمولاً در GNSS قابل تشخیص نبود، فراهم شد.

در [۱۸] به مطالعه‌ی تلفیقی تصاویر ماهواره‌های راداری Sentinel-۱ و ماهواره‌ی اپتیکی Sentinel-۲ برای بررسی تغییر شکل سطح زمین

تمرکز بر مناطق صخره‌ای ناپایدار بود. در این مطالعه از تصاویر ماهواره‌ای راداری سنجنده‌های Sentinel-1 و COSMO-SkyMed و داده‌های LiDAR زمینی ابرنقاط با وضوح بالا استفاده شد. در مرحله‌ی ترکیب داده‌ها جابجایی‌های به‌دست‌آمده از InSAR به نقاط متناظر در فضای سه‌بعدی TLS منتقل شد. بررسی‌ها نشان داد ادغام دو منبع باعث افزایش وضوح مکانی تحلیل تغییر شکل تا سانتی‌متر یا میلی‌متر شد. همچنین تلفیق داده‌ها در تشخیص دقیق شکستگی‌ها و لغزش‌های موضعی به‌ویژه در دیواره‌های سنگی و مناطق شهری، تلفیق داده‌ها موفق به شناسایی الگوهای کوچک و فعال شد.

در مطالعه‌ی [۲۱] با ترکیب داده‌های میدانی، تصاویر اپتیک و محصولات InSAR به تشخیص فرایندهای رسوبی (hillslope erosion / post-fire erosion) در ناحیه‌ای از چین پرداختند. آنها از سری زمانی InSAR برای استخراج روندهای طولانی‌مدت و از تصاویر اپتیک برای شناسایی تغییرات کاربری زمین و نواحی دگرگون‌شده استفاده کردند. تلفیق داده‌ها نشان داد که الگوهای فرسایش پس از آتش در جاهایی که InSAR تغییرات بلندمدت را نشان می‌دهد، با حذف پوشش گیاهی و تغییر ضریب بازتاب اپتیک هم‌راستا است. به عبارت دیگر اپتیک نقش تفکیکی برای منشا تغییرات ایفا کرد. برای مدیریت مخاطرات پس از آتش و حفظ خاک توصیه شد که برنامه‌ریزی‌های حفاظتی از داده‌های ترکیبی استفاده کنند. نیاز به مشاهدات اپتیک تمیز (ابری/دود کم) و هم‌زمانی مناسب با مشاهدات SAR از محدودیت‌های این پژوهش بود. در [۲۲] برای مطالعه‌ی تلفیقی تصاویر اپتیک با رزولوشن بالا، ارتفاع‌نگاری هوآبرد LiDAR برای هندسه‌ی دقیق و سری‌های زمانی InSAR برای روندهای سرعتی به تشخیص ساختارهای هندسی (نظیر لبه‌ها و چین‌ها) و مقایسه‌ی آن با الگوهای سرعت پرداختند. ترکیب سه منبع توانست مکانیزم‌های لغزش (تشکیل اسکارپ، نواحی تغییر ژئومتریک) را مشخص کرده و خطرات آتی را بهتر برآورد نماید. در دامنه‌های شیب‌دار و خطرناک، استفاده‌ی هم‌زمان LiDAR و اپتیک و InSAR توصیه شد به دلیل آن‌که هر منبع یک بعد متفاوت از پدیده را پوشش می‌دهد.

در مطالعه‌ی [۲۳] رویکردی عملی ارائه کردند که PS/SBAS-InSAR را با استخراج آفست پیکسل غیرصلب (non-rigid optical pixel offsets) /optical POT تصاویر اپتیک ترکیب می‌کند تا میدان سه‌بعدی حرکت یک لغزش پیچیده (Lanuza complex landslide, Spain) را بازیابی کند. تلفیق دو منبع داده موجب بازیابی میدان سه‌بعدی با تفکیک‌پذیری زمانی و مکانی بهتر نسبت به هر روش منفرد شد، خصوصاً در بخش‌هایی که حرکت غیرخطی و بزرگ مقیاس رخ می‌داد، آفست‌های اپتیک جزئیات افقی که InSAR به‌تنهایی قادر به آشکارسازی دقیق آن نبود، فراهم کردند. آن‌ها نشان دادند که این روش می‌تواند روندهای شتاب‌گیری پیش از شکست و تغییر در مکانیزم لغزش را با دقت بیشتری آشکار کند.

در شهر انشی (Enshi) در جنوب‌غربی چین پرداختند. آن‌ها داده‌های تفاضلی تداخل‌سنجی راداری (DInSAR) و تصاویر اپتیک را برای شناسایی و تحلیل زمین‌لغزش‌ها و نشست زمین استفاده کردند. در تصاویر اپتیک از تغییرات پیکسل‌ها و پوشش گیاهی (NDVI) به منظور شناسایی نقاط ناپایدار استفاده شد و به کمک مدل GIS، اطلاعات حاصل از هر دو منبع ترکیب شد. نویسندگان توانستند بیش از ۲۰ زمین‌لغزش فعال در حاشیه‌ی رودخانه‌ها و مناطق شهری شناسایی کنند. ترکیب داده‌های اپتیک با DInSAR باعث شد حتی حرکات آهسته‌ی زمین در پوشش‌های گیاهی متراکم قابل مشاهده شوند. در برخی مناطق، سرعت جابجایی زمین تا ۴۰ میلی‌متر در سال ثبت شد. در آخر محققین پیشنهاد کردند که ادغام داده‌های DInSAR و اپتیک، راهکاری مؤثر برای پایش زمین‌لغزش‌ها، نشست‌های شهری و مدیریت خطر در مناطق کوهستانی با شرایط آب‌وهوایی پیچیده بوده و قابل تعمیم به سایر مناطق پرریسک مشابه نیز هست.

در [۱۹] با هدف بررسی دینامیک زمین‌لغزش فعال در منطقه‌ی Lanuza واقع در پیرنه‌های اسپانیا به مطالعه‌ی تطبیقی داده‌های راداری و اپتیک پرداختند. آن‌ها با ترکیب داده‌های تداخل‌سنجی راداری و جابجایی پیکسل‌های اپتیک غیرصلب (non-rigid optical offsets) توانستند تصویر دقیق‌تری از رفتار فصلی و بلندمدت زمین‌لغزش ارائه دهند. در این مطالعه از داده‌های راداری Sentinel-1 در حالت صعودی و نزولی، دوره‌ی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۳ و داده‌های اپتیک تصاویر Sentinel-2 با وضوح ۱۰ متری استفاده شد و برای داده‌های اپتیک با اندازه‌گیری تغییر مکان پیکسل‌ها با تکنیک non-rigid offset tracking، مناسب برای حرکات غیرخطی و هم‌راستاسازی زمانی-مکانی تصاویر SAR و اپتیک، حذف نویز و تصحیح فاز به کار رفت. آنها دریافتند، برای استخراج تغییر شکل‌های بزرگ مقیاس و غیرخطی که معمولاً در InSAR قابل تشخیص نیست می‌توان از ترکیب دو نوع داده استفاده کرد. مدل ترکیبی نشان داد که InSAR در مناطق پایدار عملکرد بهتری دارد، در حالی که تحلیل اپتیک در مناطق با حرکات شدیدتر و سریع‌تر مؤثرتر است. همچنین ترکیب دو روش باعث کاهش عدم قطعیت در مرزهای زمین‌لغزش، شناسایی مناطق فعال‌تر و امکان تحلیل دقیق‌تر روندهای زمانی می‌شود. علاوه بر این ادغام داده‌های InSAR و اپتیک یک رویکرد قدرتمند برای تحلیل زمین‌لغزش‌های پیچیده و با رفتار دینامیک بالا است. این روش امکان پایش‌های بلندمدت و پرجزئیات را در مناطقی با پوشش گیاهی بالا، توپوگرافی ناملایم و حرکات غیرخطی فراهم می‌کند و می‌تواند برای پایش مخاطرات زمین‌شناختی در مقیاس منطقه‌ای و محلی مورد استفاده قرار گیرد.

در مطالعه‌ی [۲۰] به بررسی روش ادغام داده‌های تداخل‌سنجی راداری و اسکن لیزری زمینی (LiDAR یا TLS) برای پایش تغییر شکل سطح زمین در محیط‌های پیچیده مانند دامنه‌های شیب‌دار و مناطق شهری پرداختند. هدف از این مطالعه توسعه یک رویکرد چند منبعی برای افزایش دقت و وضوح مکانی در پایش تغییرات جزئی در سطح زمین، با

پایش جابجایی‌های مسطحاتی را با دقت و جامعیت بیشتری فراهم می‌کند. این امر با پوشش شکاف موجود در مطالعات پیشین، رویکردی نوین در مطالعات زمین‌شناسی، مدیریت منابع آب و برنامه‌ریزی عمرانی ارائه می‌دهد. از سوی دیگر، نتایج این تحقیق می‌تواند در مدیریت بحران‌های ناشی از فرونشست زمین، حفاظت از زیرساخت‌ها، پیشگیری از خسارات اقتصادی و برنامه‌ریزی پایدار روستایی و شهری نقش مهمی ایفا کند.

از سویی دیگر مطالعه‌ی جابجایی زمین با تصاویر اپتیک توسط نیروی انسانی انجام می‌شود، در حالی که در مطالعه‌ی تصاویر راداری از ابتدای شروع فرآیند یعنی دریافت داده تا مرحله‌ی نتیجه‌گیری آماری، نیروی انسانی دخیل نیست. بنابراین یکی از اهداف مهم این پژوهش بررسی میزان خطای ممکن در نتایج بدست‌آمده توسط نیروی انسانی و ابزارهای مورد استفاده است. انتظار می‌رود در مطالعه‌ی تصاویر اپتیک در همه‌ی مراحل از برداشت داده‌ها تا پردازش و خروجی امکان وجود خطا افزایش یابد. برای سنجش صحت این موضوع نزدیکی نتایج در پردازش هر دو تصویر مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر این، هدف این مقاله یافتن راهی نوین برای کاستن هرچه بیشتر خطا در مطالعات جابجایی زمین و بررسی تلفیق نتایج در کاهش خطاها است. همچنین، بررسی موانع و چالش‌های موجود در استفاده‌ی تلفیقی از تصاویر راداری و اپتیک و کارآمدی این روش برای استفاده‌ی گسترده در پژوهش‌های پیش رو، از دیگر اهداف این پژوهش است.

روش تحقیق

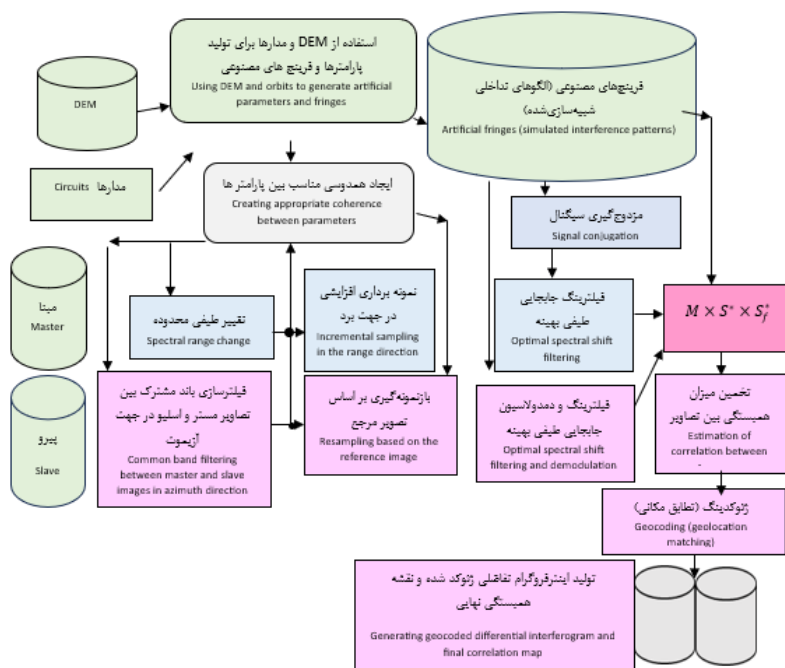
این پژوهش در سه مرحله انجام شد و نتایج نهایی طبقه‌بندی و مقایسه شدند. در این مطالعه، جابجایی سطح زمین هم در راستای قائم و اندازه‌گیری جابجایی مسطحاتی، مورد مطالعه قرار گرفت. تحلیل‌ها بر اساس میانگین تغییرات در دو نوع بافت زمین، شامل مناطق مسکونی و شهری و مناطق مسطح و هموار انجام گرفت. به این منظور از تلفیق سه روش تداخل‌سنجی، ردیابی انحراف و استفاده از تصاویر اپتیک فتوگرامتری و تکنیک تبدیل سه‌بعدی مدل تصاویر استفاده شد. در تکنیک تداخل‌سنجی، ۷ تصویر راداری با فواصل حدوداً ۳ ماهه پردازش شدند. در تکنیک ردیابی انحراف، ۷ تصویر راداری جمع‌آوری و در مجموع ۱۲ پردازش انجام شد. ۴ سری تصویر پهپادی نیز با فواصل زمانی حدوداً ۴ ماهه از منطقه برداشت و پردازش شد. میزان جابجایی محدوده‌ی مشخصی از زمین با استفاده از تلفیق نتایج تصاویر راداری و اپتیک بررسی و مقایسه شد.

در تحقیق [۲۴] نشان داده شد که ترکیب InSAR، pixel tracking از تصاویر اپتیک و ارتفاع‌نگاری (LiDAR/DEM) را می‌توان برای بازبینی لغزش بزرگ Mud Creek (California) به کار برد. تمرکز ویژه روی فاز پیش‌شتاب و انتقال به شکست ناگهانی بود. pixel tracking اپتیک برای تشخیص فاز شتاب‌گیری قبل از فروپاشی استفاده شد و سری‌های زمانی InSAR برای ثبت سرعت‌های ماهانه در نظر گرفته شد. تجزیه و تحلیل نشان داد که آفست پیکسل‌های اپتیک می‌توانند شتاب‌های پیش‌رونده را که InSAR معمولاً در بازه‌های زمانی ماهانه از دست می‌دهد، زودتر آشکار سازند. pixel tracking یک ماه قبل از شکست، افزایش شتاب را ثبت کرد پس از آن InSAR برای اندازه‌گیری میدان سرعت کلی و تغییر ساختار لغزش به کار رفت. ترکیب چند سنسوری (multi-sensor) امکان بازسازی هندسه‌ی لغزش و شناسایی سطوح لغزش نوظهور را فراهم کرد.

در سال‌های اخیر مطالعات مبتنی بر داده‌های اپتیک و تصاویر پهپادی، به ویژه در مقیاس محلی، به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. تصاویر با قدرت تفکیک بالا و امکان تولید مدل‌های سه‌بعدی (DTM و DSM) باعث شده‌اند که فتوگرامتری پهپادی به روشی کارآمد برای پایش تغییرات ارتفاعی و مسطحاتی تبدیل شود. جمع‌بندی کلی مطالعات گذشته بیانگر آن است که در اغلب پژوهش‌های تلفیقی پیشین تصاویر اپتیک استفاده شده شامل تصاویر ماهواره‌ای یا لیزر اسکن بوده که اغلب با داده‌های GPS (Global Positioning System) و تصاویر راداری ترکیب شده‌اند. اما در تکنیک فتوگرامتری امکان استخراج جابجایی از تصاویر پهپادی با استفاده از دید سه‌بعدی امکان‌پذیر است. در حالی که هر روش نقاط قوت و ضعف خاص خود را دارد و کمتر تحقیقی به تلفیق تکنیک تبدیل تصاویر پهپادی با تکنیک تداخل‌سنجی تصاویر راداری پرداخته است. این موضوع یک خلأ علمی مهم محسوب می‌شود، چراکه ترکیب داده‌های راداری و اپتیک پهپادی می‌تواند دید جامع‌تری از تغییرات قائم و افقی ارائه دهد و دقت و اعتمادپذیری نتایج را بهبود بخشد.

در این میان، بهره‌گیری از فناوری‌های سنجش از دور به عنوان ابزاری نوین و کارآمد، امکان پایش جابجایی‌های سطح زمین را با دقت بالا و در مقیاس‌های گسترده فراهم می‌کند. روش‌های تداخل‌سنجی راداری و ردیابی انحراف توانایی مناسبی در آشکارسازی تغییرات قائم و افقی زمین دارند، اما به دلیل محدودیت‌های خاص هر روش، استفاده‌ی منفرد از آن‌ها همواره با عدم قطعیت‌هایی همراه است. از سوی دیگر، تصاویر اپتیک و فتوگرامتری پهپادی با امکان تولید مدل‌های سه‌بعدی دقیق، می‌توانند ابعاد تازه‌ای از تغییرات زمین را آشکار سازند.

اهمیت این پژوهش در آن است که با ترکیب دو دسته داده‌ی مکمل، نه تنها امکان بررسی جابجایی‌های قائم (فرونشست و بالآمدگی) بلکه



شکل ۱: فلوجارت مراحل طی شده در پردازش تصاویر راداری
 Fig. 1: Flowchart of the steps taken in processing radar images

در این رابطه، 2π دوره ی تناوب ϕ ، λ طول موج و R مسافت طی شده توسط امواج است که بصورت $2R$ (مسیر رفت و برگشت) در نظر گرفته می شود [۲۶].

منطقه ی تصویر شده بر هر پیکسل به شدت به توپوگرافی منطقه و شیب زمین در صفحه عمود بر مدار و همچنین شیب زمین در جهت آزیموت بستگی دارد، در نتیجه ابعاد هر پیکسل از زمین با تغییر توپوگرافی منطقه تغییر می کند. با افزایش شیب زمین نسبت به سطح افق بُعد سلول وضوح زمین در محدوده افزایش می یابد. با افزایش زیاد شیب زمین (نزدیک به زاویه ی رادار)، بُعد سلول بسیار بزرگ شده و کلیه ی جزئیات از بین می روند. زمانی که شیب زمین از زاویه ی رادار فراتر رود، عوارض بصورت معکوس تصویر شده و روی قسمت هایی از مناطق دیگر قرار می گیرند. به این پدیده، اثر وقفه یا توقف (Lay-Over) گفته می شود [۲۷]. زمانی که شیب زمین کاهش می یابد (شیب منفی)، ابعاد سلول تصویر نیز کاهش می یابد. کمترین مقدار سلول زمانی ایجاد می شود که شیب منفی زمین با راستای دید رادار برابر شود. همچنین این مقدار کمترین مقدار شیب منفی قابل تشخیص توسط یک سیستم سار است [۲۸].

شکل (۳) تاثیر پدیده ی وقفه را بر وضوح تصاویر SAR نشان می دهد. مطابق شکل با توجه به شیب زمین عوارضی که در محدوده ی شیب مثبت (افزایشی) زمین قرار دارند (مانند نقاط G و F و E و D) در سیستم سار بصورت معکوس تصویر میشوند. این نقاط در همان پیکسلی از تصویر قرار میگیرند که متعلق به نقاط C و B و مربوط به منطقه ی متفاوتی از زمین است. از طرف دیگر با توجه به زاویه ی دید رادار وجود شیب منفی زمین (کاهشی) بین نقاط G و H عوارضی که در این ناحیه

در فلوجارت شکل ۱ ضرب M در S_f یعنی ترکیب تصویر مستر (M)، مزدوج تصویر اسلیو (S^*) و مزدوج فرینج های مصنوعی (S_f^*) است.

پردازش تصاویر راداری

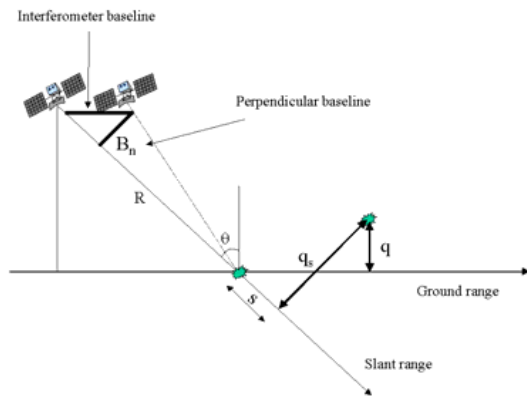
یک تصویر رقمی سار را میتوان به شکل موزائیک (یک آرایش دو بعدی متشکل از سطرها و ستونها) و مجموعه ای از پیکسل ها مشاهده کرد. هر پیکسل نشاندهنده منطقه ی کوچکی از سطح زمین است که به آن وضوح پیکسل میگویند. هر پیکسل یک عدد مختلط را نشان می دهد که حامل اطلاعات فاز و دامنه درباره محدوده ی امواج مایکروویو است. این اطلاعات توسط عوارض و بازتاب کننده ها مانند سنگ، پوشش گیاهی، ساختمان و غیره از طریق سلول های مرتبط طراحی شده بر روی زمین، ارسال شده اند. ردیف های مختلف تصویر نشاندهنده ی موقعیت آزیموت های متفاوت است، در حالی که ستون های تصویر موقعیت محدوده ی شیب های متفاوت را نمایش میدهد. یک تصویر راداری مجموعه ای از اندازه ی دامنه ی امواج بازگشتی از پراکنده کننده ها یا عوارض زمین در هر پیکسل از تصویر است. وابستگی دامنه ی این امواج بازگشتی بیشتر به سختی یا زبری عوارض روی زمین بیشتر از جنس یا ترکیبات شیمیایی آنها است.

امواج سار شده پس از طی یک مسیر رفت و برگشت از عوارض زمینی به سمت رادار بازمی گردند تا یک تصویر سار را ایجاد کنند. بازتاب کننده ها در فواصل مختلف نسبت به رادار (شیب های مختلف) یک تاخیر زمانی بین ارسال و دریافت امواج راداری ارائه می دهند. با توجه به ماهیت سینوسی امواج ارسالی تاخیر زمانی (t) برابر با تغییر فاز (ϕ) بین امواج ارسالی و دریافتی به صورت زیر است [۲۵]:

$$\phi = 2R \frac{2\pi}{\lambda} = R \frac{4\pi}{\lambda} \quad (1)$$

توسط پراکنده کننده‌های امواج ایجاد شود، بر فار اینترفروگرام تأثیری نخواهد گذاشت [۳۵].

تغییرات مسیر طی شده (Δr) که ناشی از انتقال سلول وضوح تصویر مرجع به سلول دیگر است، میتواند با فرمول زیر ارائه شود (که به چند پارامتر نشان داده شده در عکس بستگی دارد) روابط مربوط به جابجایی یک سلول سار در امتداد خط عمود بر شیب در شکل ۳ نشان داده شده است [۳۶].



شکل ۳: جابجایی سلول‌های تصویر سار در امتداد خط عمود بر شیب زمین
Fig. 3: Displacement of the Sar image cells along a line perpendicular to the slope of the earth

$$\Delta r = -2 \frac{B_n q_s}{R} \quad (2)$$

که در رابطه (۲) Δr تغییرات مسیر طی شده، B_n خط مبنای قائم، q_s جابجایی بین سلول‌های تصویر در امتداد خط عمود بر راستای شیب زمین و

R فاصله ی بین رادار و عارضه مورد نظر است. بنابراین تغییر فاز تداخل نگار ($\Delta \phi$) عبارت است از [۳۷]:

$$\Delta \phi = \frac{2\pi \Delta r}{\lambda} = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_n q_s}{R} \quad (3)$$

در رابطه‌ی (۳)، کلیه‌ی پارامترها مشابه رابطه‌ی (۲) و λ طول موج ارسالی است.

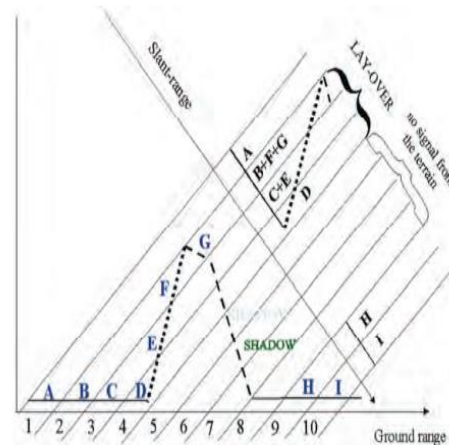
بهبود بخشی تداخل نگار

تغییرات فاز تداخل نگار یا اینترفرومتری را می‌توان به دو بخش شامل اختلاف ارتفاع (q) بین نقاط مورد نظر با توجه به صفحه ی مرجع افقی و جابجایی محدوده ی شیب (s) نقاط مورد نظر مطابق رابطه زیر تقسیم می‌شود:

$$\Delta \phi = -\frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_n q}{R \sin \theta} - \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_n s}{R \tan \theta} \quad (4)$$

که در آن، کلیه‌ی پارامترها مشابه روابط (۲) و (۳) و θ زاویه ی تابش نسبت به مرجع است. لازم به ذکر است که خط مبنای عمود با توجه به داده‌های مداری شناسایی می‌شود و فاز دوم محاسبه و از فاز تداخل سنجی کم می‌شود. به این عمل صاف کردن یا بهبود تداخل نگار (اینترفروگرام) می‌گویند. در نتیجه یک نقشه‌ی فازی متناسب با ارتفاع زمین ایجاد می‌شود [۳۸].

قرار می‌گیرند، توسط رادارشناسایی نمیشوند و در منطقه ای که به اصطلاح به آن سایه (Shadow) گفته می‌شود قرار می‌گیرند. در نتیجه سلول‌های سار از نقطه ۵ تا ۸ سیگنالی از زمین دریافت نکرده و یک شکاف تیره در تصویر نهایی ایجاد می‌شود. شکل ۲ تأثیر پدیده ی وقفه و سایه را بر وضوح تصویر نمایش می‌دهد [۲۹، ۳۰].



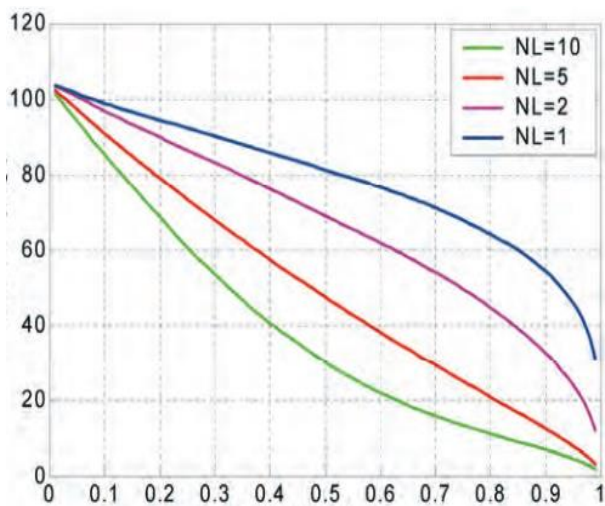
شکل ۲: تأثیر پدیده ی وقفه و سایه بر وضوح تصاویر سار
Fig. 2: The effect of Lay-Over and shadow phenomena on the clarity of Sar images

یک ماهواره‌ی سار می‌تواند یک ناحیه‌ی مشخص از زمین را بطور همزمان با دو رادار نصب شده روی یک سکو یا در زمانهای مختلف با استفاده از مدارهای مکرر مشاهده کند. در بیشتر ماهواره‌ها مانند ERS-1 و ERS-2 و Envisat فواصل زمانی بین مشاهدات از ۱ تا ۳۵ روز یا مضربی از ۳۵ روز است [۲۹-۳۱]. فاصله ی بین دو مدار یا ماهواره‌ها در صفحه‌ی عمود بر مدار خط مبنای تداخل سنجی (Interferometer baseline) نامیده می‌شود. و تصویر آن عمود بر امتداد شیب زمین خط مبنای عمود (Perpendicular baseline) نامیده می‌شود [۳۲]. اختلاف بین دو مدار خط مبنای تداخل سنجی است و تصویر آن عمود بر راستای شیب یکی از پارامترهای مهم تداخل سنجی سیستم سار است [۳۳]. هر تصویر اینترفروگرام یا تداخل نگار حاصل ضرب پیکسل به پیکسل تصویر اول سار در مشتق مختلط تصویر دوم است. و از آنجایی که اینترفروگرام حاصل شامل اطلاعات دامنه و فاز است. دامنه‌ی اینترفروگرام بدست آمده، دامنه ی تصویر اول ضرب در تصویر دوم است. درحالی‌که فاز بدست آمده، اختلاف فاز بین تصاویر خواهد بود [۳۴].

اندازه گیری ارتفاع زمین از طریق تداخل سنجی

اگر یک نقطه یا عارضه ی ثابت را در هر پیکسل از تصویر در نظر بگیریم که در طول زمان ثابت باشد، این نقطه توسط دو برداشت سار با یک تفاوت زاویه ی دید اندک مشاهده می‌شود. در اینجا فاز تداخل نگار هر پیکسل از تصویر سار تنها وابسته به اختلاف مسیر طی شده توسط دو سار در سلول تصویر در نظر گرفته شده است. هرگونه تداخل فازی که

از دید ریاضیات اگر تغییرات فاز کمتر از ۱۲۰ درجه، تعداد مشاهدات بالا و γ نزدیک به یک باشد، فرمول بالا فرمول مناسبی برای نشان دادن میزان پراکندگی فاز است. در بساری از کاربردهای تداخل سنجی برای مقادیر کوهرنسی بالای ۰/۲ و مشاهدات بیشتر از ۴ بار میتوان از رابطه (۷) استفاده کرد. این فرمول به طور خاص در کاربردهای اینترفرومتری راداری برای تحلیل کیفیت داده‌های فاز بر اساس همبستگی و تعداد نگاه‌ها استفاده می‌شود. این ابزار ساده‌سازی شده کمک می‌کند تا بدون انجام محاسبات پیچیده، تأثیر پارامترهای مختلف بر دقت فاز بررسی شود. شکل زیر نمودار تأثیر تعداد مشاهدات بر تغییرات فاز را نمایش می‌دهد. این نمودار به خوبی نشان می‌دهد که تغییرات فاز (۰-۱۲۰) برحسب درجه، تابعی از میزان انسجام تصاویر یا کوهرنسی (۰-۱) با تعداد مشاهدات مختلف است [۴۰]. شکل ۴ نشان‌دهنده ی تأثیر تعداد مشاهدات بر تغییرات فاز است.



شکل ۴: نمودار تأثیر تعداد مشاهدات بر تغییرات فاز
Fig. 4: Diagram of the effect of the number of observations on phase Variance

با توجه به شکل ۵ بیشترین میزان انحراف فاز مربوط به خط آبی و تعداد مشاهدات یک است. با تعداد مشاهدات ۲ تا ۵ پراکندگی فاز کاهش می‌یابد. و کمترین انحراف فاز مربوط به تعداد مشاهدات ۱۰ است. با افزایش مقدار کوهرنسی انحراف معیار فاز برای تمامی مقادیر NL کاهش می‌یابد. این کاهش برای مقادیر پایین کوهرنسی (۰/۱ تا ۰/۵) سریع‌تر است. با افزایش تعداد NL مقدار انحراف معیار فاز برای هر مقدار کوهرنسی کمتر می‌شود. این موضوع نشان می‌دهد که افزایش تعداد نگاه‌ها باعث بهبود کیفیت سیگنال اینترفرومتری و کاهش پراکندگی فاز می‌شود. کاهش انحراف معیار فاز با افزایش کوهرنسی و NL نشان‌دهنده ی اهمیت کیفیت داده‌ها و ترکیب چندین مشاهده برای بهبود دقت اینترفرومتری است [۴۱]. شکل ۵ تخمینی از میزان پراکندگی فاز در این پژوهش با تعداد مشاهدات ۵ را نشان می‌دهد.

باز کردن یا بسط دادن (Unwrapping) فاز و تولید DEM اینترفروگرام بهبود یافته یک اندازه‌ی تقریبی از ارتفاع نسبی زمین را با در نظر گرفتن ماهیت فاز اینترفرومتری در دوره‌ی تناوب 2π نشان می‌دهد. پس از حذف هر عدد صحیح از ارتفاع‌های ابهام (معادل عدد صحیح 2π در دوره ی تناوب فاز)، اختلاف فاز بین دو نقطه روی اینترفروگرام بهبود یافته، یک اندازه‌ی حقیقی از اختلاف ارتفاع ارائه می‌دهد. فرآیند افزودن مضرب صحیح متناسب دوره‌ی تناوب به لبه‌ها و ناپیوستگی‌های اینترفروگرام را باز کردن یا بسط دادن فاز می‌گویند.

اندازه‌گیری حرکت زمین: تداخل سنجی تفاضلی

با فرض آن که بعضی نقاط یا عوارض پراکنده کننده‌ی سطح زمین، ممکن است بین دو برداشت سار یک جابجایی اندک را نسبت به موقعیت قبلی خود تجربه کنند (مثلاً فرونشست، زلزله و...)، در این موارد افزایش فاز، با صرف نظر از خط مبنا به صورت زیر ظاهر می‌شود.

$$\Delta\phi_d = -\frac{4\pi}{\lambda} d \quad (5)$$

که در اینجا d جابجایی بین دو عارضه ی مورد نظر در راستای محدوده‌ی شیب است. بنابراین، پس از بهبود اینترفروگرام، فاز تداخل سنجی شامل ترکیبی از ارتفاع و جابجایی است. یعنی داریم:

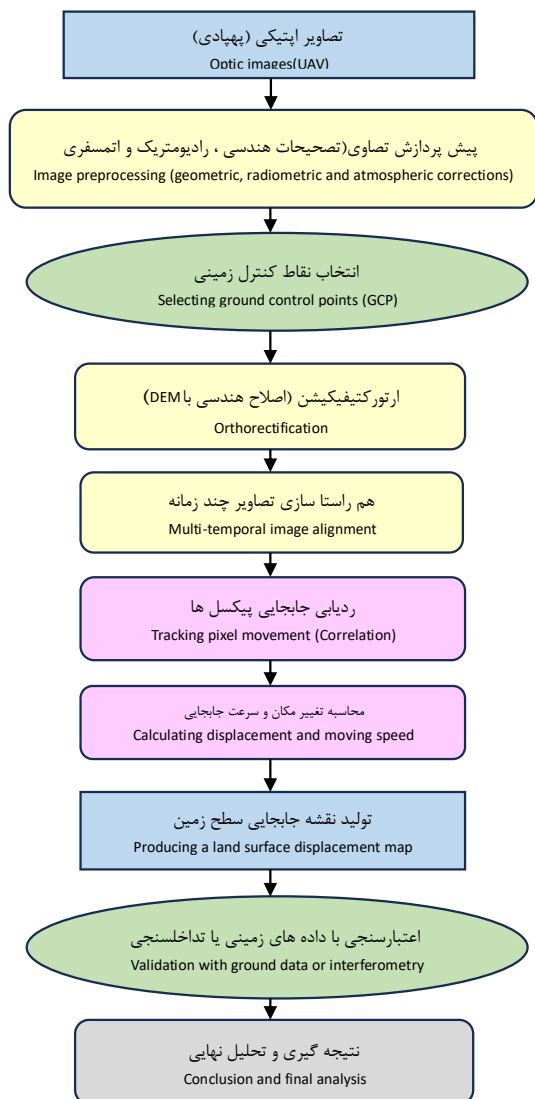
$$\Delta\phi = -\frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_n q}{R \sin \theta} + \frac{4\pi}{\lambda} d \quad (6)$$

انسجام یا همدوسی (coherence) نقشه‌ها

نویز فاز را می‌توان از یک زوج عکس سار و با استفاده از ضریب همدوسی مکانی γ تخمین زد. در واقع همدوسی مکانی همان ضریب همبستگی متقاطع بین یک جفت تصویر سار است که در یک پنجره‌ی کوچک شامل چند پیکسل در محدوده‌ی شیب و آزمون بررسی و تخمین زده می‌شود. سپس یک نقشه‌ی منسجم از منطقه با محاسبه ی قدر مطلق γ بر روی یک پنجره ی کوچک ذکر شده که بر روی کل تصویر سار حرکت میکند تشکیل می‌شود.

مقدار همدوسی که به آن عدد کوهرنسی گفته می‌شود از ۰ (یعنی فاز تداخل سنجی فقط شامل نویز است) تا ۱ (فاز تداخل سنجی فاقد نویز است) متغیر است. بنابراین هرچه این عدد به یک نزدیکتر باشد تصاویر از انسجام بیشتری برخوردارند. رابطه ی دقیق بین پراکندگی فاز تداخل سنجی و عدد کوهرنسی را می‌توان از طریق محاسبات ریاضی پیچیده بدست آورد. به هر حال اگر تعداد مشاهدات (number of looks) (NL) بیشتر از چهار باشد، پیکسل‌های مستقل با عدد کوهرنسی یکسان میانگین گیری شده و پس از حذف خطای توپوگرافی فرمول زیر برقرار می‌شود [۳۹].

$$\sigma_\phi = \frac{1}{\sqrt{2NL}} \frac{\sqrt{1-\gamma^2}}{\gamma} \quad (7)$$



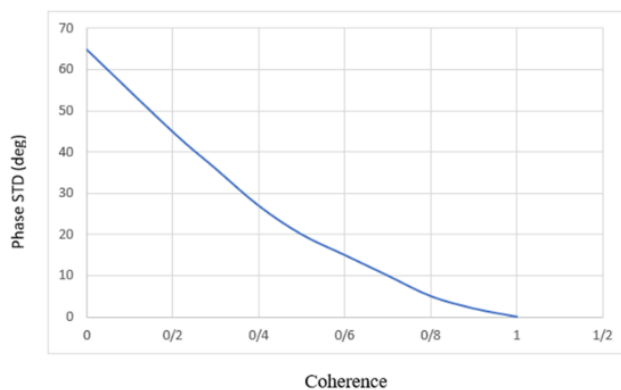
شکل ۶: فلوچارت مراحل طی شده در پردازش تصاویر اپتیک
Fig. 6: Flowchart of the steps taken in optical image processing

تصحیح رادیومتریک (Radiometric Correction)

هدف از این مرحله، یکنواخت سازی مقادیر روشنایی پیکسل‌ها برای مقایسه ی تصاویر چند زمانه با دقت بالا است. تغییرات ناشی از شرایط جوی، زاویه ی خورشید و اختلاف بین دوربین‌ها باعث می‌شود مقادیر عددی پیکسل‌ها (Digital Numbers) بیانگر واقعی تابش سطح نباشند.

تصحیح هندسی (Geometric Correction)

در این مرحله اعوجاج های ناشی از توپوگرافی، زاویه ی دید سنجنده و حرکت پهپاد حذف می‌گردند. برای این منظور، تصاویر با استفاده از مدل ارتفاعی رقومی (DEM) و داده‌های موقعیت سنجی (GNSS) به‌صورت ارتو (Orthoimage) تصحیح می‌شوند. نتیجه ی این مرحله تصویری است که هر پیکسل آن دارای مختصات جغرافیایی دقیق در سیستم WGS84 یا UTM است.



شکل ۵: میزان پراکندگی فاز با تعداد مشاهدات ۷
Fig. 5: Phase Variance with 7 observations

از پراکندگی فاز می‌توان برای تخمین پراکندگی های تقریبی ارتفاعی (در محدوده ی فرکانس هایی با بسامد بالا) DEM تولید شده از تداخل سنجی سار استفاده کرد.

$$\sigma_h = \sigma_\theta \frac{R\lambda \sin \theta}{4\pi B} \tag{۸}$$

از سویی دیگر فرکانس هایی با بسامد پایین موجود در خطای DEM تولید شده را نمی‌توان از نقشه های منسجم شده تخمین زد. اطلاعات بدست آمده از نقشه های منسجم شده برای قطعه بندی تصاویر بسیار کارآمد خواهد بود [۴۲].

پردازش تصاویر اپتیک

در پردازش تصاویر اپتیک، بعد از اخذ داده‌ها نیاز است که تصاویر هم تراز (Align) شوند. به این منظور دو مرحله مثلث بندی اولیه و ثانویه در نرم افزار agisoft صورت می‌گیرد. تصاویر هم تراز شده برای ایجاد بلوک فایل های مناسب برای ساخت مدل ها وارد نرم افزار Ips می‌شوند. مرحله ی بعد معرفی عکسها به نرم افزار Ips است. پس از انجام تنظیمات و ساخت بلوک فایل‌ها (Block file) و پیرامیدها (Pyramid)، لازم است پارامترهای توجیه داخلی به بلوک فایلها معرفی شوند. در نهایت با گرفتن خروجی و معرفی بلوک فایل‌های تهیه شده به نرم افزار inpho می‌توان با استفاده از هر زوج عکس یک مدل سه بعدی از منطقه در نرم افزار مشاهده کرد. شکل ۶ مراحل طی شده در پردازش تصاویر اپتیک را نمایش می‌دهد.

شکل (۶) فلوچارت مراحل پردازش تصاویر اپتیکی را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که تعیین موقعیت سه‌بعدی دقیق عوارض در فضای مدل، از طریق الگوریتم‌های مطابقت دهی مانند SIFT یا SURF بین تصاویر هم‌پوشانی شده انجام می‌شود. اولین گام در تحلیل داده‌های اپتیکی، آماده‌سازی تصاویر خام برای پردازش هندسی و فتوگرامتری است. در این مرحله، اصلاحات رادیومتریک و هندسی برای حذف اثرات جوی، نوسانات نور خورشید، زاویه ی تابش، و اعوجاج ناشی از توپوگرافی به ترتیب زیر اعمال می‌شود:

توجیه داخلی (Internal Orientation)

در این مرحله، هندسه‌ی تصویربرداری هر عکس بازسازی می‌شود تا ارتباط دقیق بین مختصات پیکسل‌های تصویر و سیستم مختصات دوربین برقرار گردد. پارامترهایی مانند فاصله‌ی کانونی مختصات نقطه‌ی اصلی تصویر (x_0, y_0) و اعوجاج لنز تصحیح می‌شوند. هدف از این فرآیند، حذف خطاهای ناشی از ساختار لنز و تثبیت موقعیت دقیق مرکز تصویربرداری است. توجیه داخلی معمولاً از طریق پارامترهای کالیبراسیون دوربین انجام می‌شود که در نرم‌افزارهای فتوگرامتری مانند Agisoft Metashape یا Pix4D به صورت خودکار اعمال می‌شود.

توجیه نسبی (Relative Orientation)

در توجیه نسبی، هندسه دو یا چند تصویر متوالی بازسازی می‌شود تا موقعیت نسبی دوربین‌ها و جهت‌گیری پرسپکتیو هر تصویر نسبت به دیگری مشخص گردد. در این فرآیند، از نقاط هم نام (Tie Points) بین دو تصویر استفاده می‌شود. این نقاط از طریق الگوریتم‌هایی مانند SIFT یا SURF شناسایی می‌شوند. پس از استخراج نقاط مشترک، با استفاده از معادلات کولینیر، پرتوهای عبوری از مرکز هر دوربین به نقاط متناظر زمین محاسبه و تلاقی آنها در فضای سه‌بعدی تعیین می‌گردد. نتیجه این مرحله ایجاد مدل سه‌بعدی نسبی است که ارتباط هندسی بین تصاویر را بدون مقیاس واقعی برقرار می‌سازد.

توجیه مطلق (Absolute Orientation)

در این مرحله، مدل نسبی حاصل از توجیه قبلی با استفاده از نقاط کنترل زمینی (GCPs) به سیستم مختصات واقعی زمین منتقل می‌شود. مختصات واقعی نقاط کنترل از طریق اندازه‌گیری‌های دقیق GNSS یا توتال استیشن به دست می‌آید. سپس از تبدیل مشابهت (Similarity Transformation) برای اتصال مدل به مختصات جهانی استفاده می‌شود. این تبدیل شامل سه مؤلفه‌ی دوران، سه مؤلفه‌ی انتقال و یک ضریب مقیاس است. نتیجه، مدلی است که تمام نقاط آن در سیستم مختصات واقعی زمین (UTM) تعریف شده و قابلیت مقایسه با داده‌های راداری را دارد.

تولید مدل سه بعدی و نقشه‌ی ارتوفوتو (3D Modeling & Orthophoto Generation)

پس از اتمام توجیه مطلق، با استفاده از اصل تقاطع پرتوها (Spatial Intersection) برای هر نقطه از سطح زمین مختصات سه‌بعدی محاسبه می‌شود. در این مرحله، مدل رقومی سطح (DSM) و مدل رقومی زمین (DTM) ایجاد می‌شوند. با کسر این دو مدل از یکدیگر، تغییرات ارتفاع سطح زمین (نشست یا بالآمدگی) در دوره‌های زمانی مختلف استخراج می‌شود. همچنین، با بازنمایی دوباره تصاویر در مختصات زمینی، ارتوفوتوهای دقیق تولید می‌گردند که پایه‌ی محاسبه جابجایی‌های مسطحاتی هستند.

تحلیل جابجایی مسطحاتی (Horizontal Displacement Analysis)

در این مرحله، دو تصویر از دو زمان مختلف با استفاده از روش Offset Tracking یا Pixel Matching مقایسه می‌شوند و از الگوریتم‌های همبستگی متقابل (Cross-Correlation) برای یافتن میزان جابجایی پیکسل‌ها در راستای محورهای X و Y استفاده می‌شود. اختلاف مختصات هر پیکسل در دو دوره‌ی زمانی بیانگر میزان جابجایی مسطحاتی سطح زمین است. این مقادیر معمولاً در واحد میلی‌متر محاسبه و در قالب نقشه‌های برداری و رستری نمایش داده می‌شوند. برای ارزیابی دقت مدل سه‌بعدی و نقشه‌های جابجایی، از نقاط کنترل مستقل (Check Points) استفاده می‌شود.

داده‌ها و منطقه‌ی مطالعاتی

مطالعه‌ی حرکت پوسته‌ی زمین به روش تلفیق تصاویر نیازمند تهیه داده‌هایی در یک بازه‌ی زمانی مشخص از یک منطقه است. بدین منظور باید منطقه‌ی انتخاب شود که داده‌های اپتیک از آن ناحیه در دسترس باشند. از این رو شهرستان مراغه به عنوان منطقه‌ی مورد مطالعه انتخاب شد. مراغه یکی از شهرهای استان آذربایجان شرقی، مرکز شهرستان مراغه و پس از تبریز دومین شهر بزرگ و پرجمعیت استان می‌باشد. این شهر با موقعیت جغرافیایی ۳۷ درجه و ۲۳ دقیقه و ۳۱ ثانیه‌ی شمالی و ۴۶ درجه و ۱۴ دقیقه و ۲۱ ثانیه‌ی شرقی در کنار رودخانه‌ی صوفی‌چای در دامنه‌ی جنوبی کوه سهند و در ۱۳۵ کیلومتری جنوب مرکز استان واقع شده است. شکل ۷ موقعیت دقیق منطقه‌ی مورد مطالعه را روی نقشه نشان می‌دهد. این شهرستان با وسعت ۲۱۸۶ کیلومتر مربع (معادل ۲۱۹۰۰۰ هکتار) و ارتفاع ۱۴۷۷ متر از دو ناحیه‌ی کوهستانی و جلگه‌ای تشکیل شده که از شمال به جنوب و از شرق به غرب تا سواحل دریاچه‌ی ارومیه و جلگه‌ی میاندوآب از ارتفاع کوه‌ها کاسته می‌شود. شهرستان مراغه با توجه به موقعیت جغرافیایی و توپوگرافی خود، در معرض انواع بلایای طبیعی شامل سیل، زلزله، موج سرما، تگرگ، یخبندان و خشکسالی قرار دارد. بین این بلایا، سیل محتمل ترین و خطرناک ترین حادثه‌ی طبیعی است که این منطقه را تهدید می‌کند. در این پژوهش دو منطقه از این استان با مجموع مساحت ۱۵۰۳ هکتار، شامل روستاهای بالی‌قایا، بلبل، جوکو، لاله‌زار و تازه‌کند نصیرپور مورد مطالعه قرار گرفت.

پیاده‌سازی

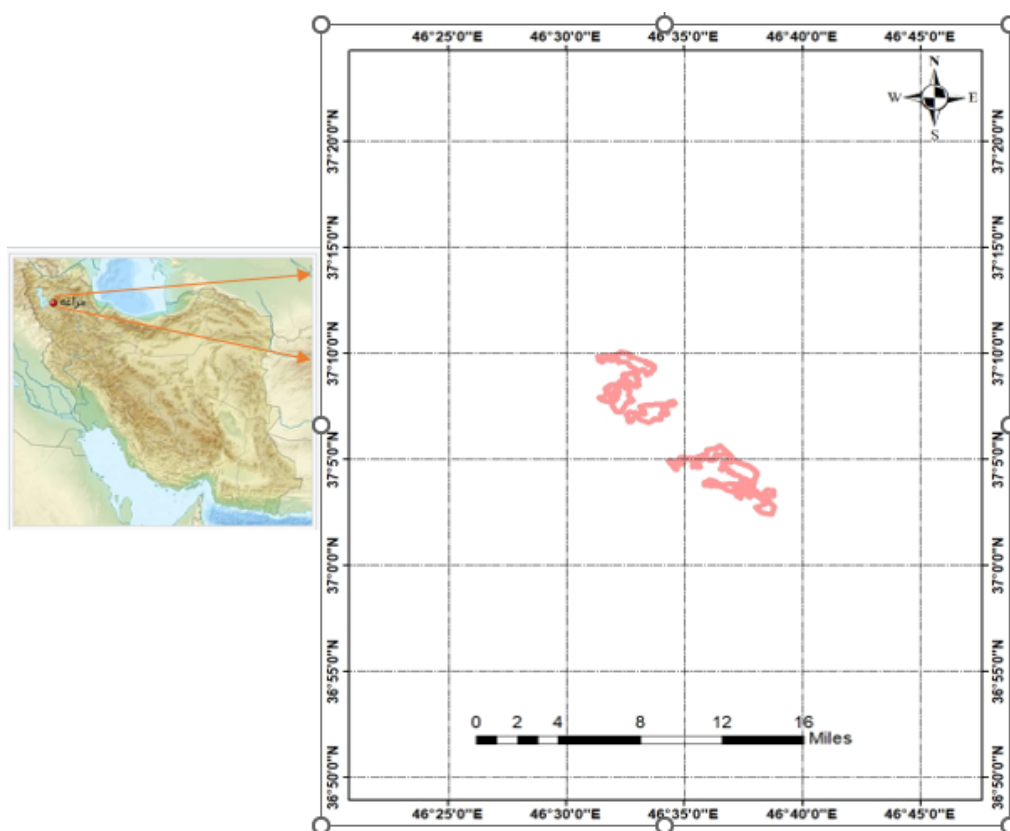
در مرحله‌ی بعد سری زمانی تصاویر راداری سنتینل ۱ با فرمت SLC از شهریور ۱۴۰۲ تا فروردین ۱۴۰۴ برای مطالعه‌ی فرونشست یا جابجایی قائم انتخاب شد و سری زمانی تصاویر راداری با فرمت GRD از ماهواره‌ی سنتینل ۱ برای مطالعه‌ی جابجایی مسطحاتی سطح زمین انتخاب و پردازش شدند. از هرسری تصاویر و هر فرمت ۷ تصویر جمع‌آوری شد یعنی در مجموع ۱۴ تصویر راداری جمع‌آوری و مجموعاً ۱۲ پردازش از تصاویر راداری انجام شد هر یک از تصاویر دو به دو با هم پردازش

داشتن زوج عکس با دقت و کیفیت بالا لازم است که تصاویر بعد از انجام تصحیحات و توجیهاات لازم با دقت حداکثر ۱۰ میلی‌متر مثلث بندی اولیه شوند، و در ادامه با دقت حداکثر ۵ میلی‌متر مثلث بندی ثانویه شوند. دید سه‌بعدی تصاویر اپتیک در نرم‌افزار اینفو یا ال پی اس ایجاد می‌شود اما فایل‌های نهایی با نتایجی که نشان دهنده اختلاف ارتفاعی و مسطحاتی است در یک فایل dgn و در نرم‌افزار میکرو استیشن به دست آمد. سپس نقاط کنترل مشخص شده روی کلیه تصاویر بررسی و نتایج لازم به‌دست آمد.

داده‌های راداری

تصاویر راداری را می‌توان به دو روش جمع‌آوری کرد. روش اول که بطور مستقیم در دسترس است، استفاده از سایت‌هایی مانند dataspace.copernicus.eu و یا asf.alaska.edu است که با مشخص کردن ناحیه مورد نظر می‌توان تصاویر را دانلود کرد. در روش دوم با استفاده از کد نویسی در [google earth engine](http://googleearthengine.com) می‌توان تصاویر مورد نظر را فراخوانی و دانلود کرد. در این پروژه بدلیل وجود اختلال و محدودیت دسترسی به سایت اصلی، تصاویر راداری از طریق کدنویسی در [google earth engine](http://googleearthengine.com) جمع‌آوری شدند. جداول ۱ و ۲ شامل اطلاعات مربوط به تصاویر راداری جمع‌آوری شده، می‌باشند.

شدند یعنی تصویر پیرو یا اسلیو در پردازش اول به عنوان تصویر مینا یا مستر در پردازش دوم معرفی شد. در پردازش هفت تصویر اول با فرمت SLC از تکنیک (Interferometric synthetic-aperture radar) InSAR یا تداخل‌سنجی برای به‌دست آوردن جابجایی قائم زمین استفاده شد که در نهایت مجموع جابجایی‌ها در شش پردازش انجام شده میزان جابجایی نهایی در نظر گرفته شد. به این منظور حدود ۱۰۰ نقطه در هر روستا به عنوان نقاط کنترل در تصاویر و نقشه‌های زمین مرجع شده مشخص شد که مبنای سنجش مشاهدات قرار گرفت. در پردازش ۷ تصویر راداری دوم با فرمت GRD از تکنیک ردیابی انحراف (Offset_tracking) برای به دست آوردن میزان جابجایی مسطحاتی زمین استفاده شد که در شش پردازش انجام شده مجموع جابجایی نقاط کنترل در نظر گرفته شده میزان جابجایی مسطحاتی نهایی خواهد بود. هرچه تعداد مشاهدات بیشتر از ۴ باشد واریانس فاز کمتر و میزان دقت نتایج بیشتر خواهد بود. بنابراین، از هفت تصویر راداری استفاده شد. برای جمع‌آوری تصاویر اپتیک ۴ مرحله‌ی تصویربرداری با پهپاد در چهار زمان متفاوت در بازه‌ی ۱۸ ماهه از ناحیه‌ی مورد نظر انجام شد که در مجموع ۱۰۰۰۰ تعداد تصویر با فرمت tiff از ناحیه جمع‌آوری شد. تصاویر و رن‌های پرواز به نرم‌افزار inpho و lps معرفی و پردازش شدند بلوک فایل‌های نهایی برای ایجاد امکان دید سه‌بعدی برای هر زوج عکس تهیه شدند برای ایجاد یک فضای سه بعدی از تصاویر و



شکل ۷: موقعیت دقیق منطقه‌ی مورد مطالعه روی نقشه
Fig. 7: The exact location of the study area on the map

جدول ۱: اطلاعات تصاویر راداری جمع آوری شده برای تکنیک تداخل سنجی

Table 1: Radar image data collected for interferometry technique

شماره مدار Orbit number	جهت مسیر Direction of path	پلاریزاسیون Polarization	مد Mode	فرمت Format	تاریخ Date	شماره تصویر Image number
79	Descending	VV	IW-1	SLC	1402/07/08	1
79	Descending	VV	IW-1	SLC	1402/10/02	2
79	Descending	VV	IW-1	SLC	1402/12/26	3
79	Descending	VV	IW-1	SLC	1403/03/31	4
79	Descending	VV	IW-1	SLC	1403/06/22	5
79	Descending	VV	IW-1	SLC	1403/10/09	6
79	Descending	VV	IW-1	SLC	1404/01/15	7

جدول ۲: اطلاعات تصاویر راداری جمع آوری شده برای تکنیک ردیابی انحراف

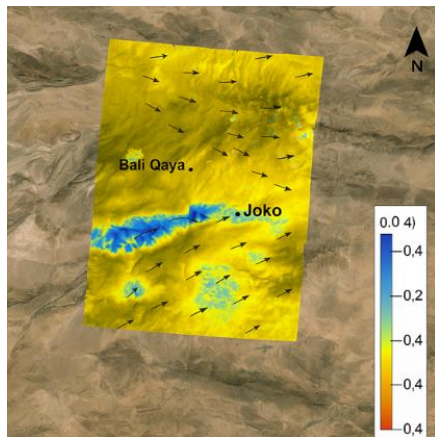
Table 2: Radar image data collected for the deviation tracking technique

شماره مدار Orbit number	جهت مسیر Direction of path	پلاریزاسیون Polarization	مد Mode	فرمت Format	تاریخ Date	شماره تصویر Image number
79	Descending	HH	IW-1	GRD	1402/06/27	1
79	Descending	HH	IW-1	GRD	1402/09/30	2
79	Descending	HH	IW-1	GRD	1403/01/05	3
79	Descending	HH	IW-1	GRD	1403/04/11	4
79	Descending	HH	IW-1	GRD	1403/07/19	5
79	Descending	HH	IW-1	GRD	1403/10/25	6
79	Descending	HH	IW-1	GRD	1404/01/15	7

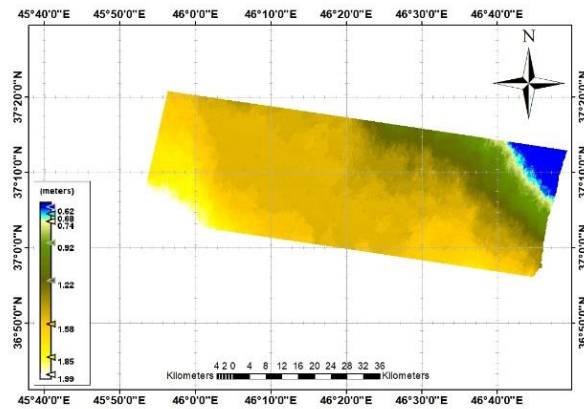
به فاز تبدیل کرده که به آن فاز توپوگرافی گفته می شود. سپس این فاز از فاز تداخل نگار کم می شود تا فقط تغییرات حاصل از فرونشست باقی بماند.

در تمامی تصاویر راداری تداخل امواج و همچنین عامل توپوگرافی سطح زمین اثر نامطلوبی در تصاویر ایجاد میکند که به نویز اسپکل (speckle) معروف است. فرآیند کاهش نویز تصویر را دچار تغییراتی میکند که نیاز است فیلتری اعمال شود تا تخریب تصویر را به حداقل برساند که در اینجا از فیلتر گلدشتاین (Goldstein) استفاده شده است. در مرحله بازیابی فاز داده ها بصورت منظم یا نامنظم در تداخل نما پراکنده می شوند یکی از راهکارهای بازیابی فاز در فضای نامنظم تبدیل این فضا به یک فضای منظم با استفاده از درون یابی نزدیکترین همسایگی است. مرحله آخر تبدیل فاز بدست آمده حاصل از اعمال فیلترها به میزان جابجایی است به بیان ساده تر این مرحله، کمی سازی فازهای بدست آمده است. و پس از آن نیاز است که تصویر بدست آمده زمین مرجع شده تا مقدار کمی و دقیق جابجایی استخراج شود. در این پژوهش از مدل رقومی SRTM برای زمین مرجع کردن تصاویر استفاده شده است. در آخر برای دید بهتر و تشخیص دقیق میزان جابجایی لازم است که تصویر در سامانه گوگل ارث بارگزاری شود تا بتوانیم مقدار تخریب را برآورد کنیم. شکل ۸ نمونه ای از نقشه های زمین مرجع شده و نقشه ی جابجایی مسطحاتی است.

اولین مرحله در پردازش تصاویر راداری بدست آوردن اینترفروگرام تصاویر است. اینترفروگرام یا تداخل نما حاصل نمایش اختلاف فاز ناشی از تغییر فاصله ی بین پدیده ی زمینی و سنجنده در دو عبور متوالی است. این مرحله به زبان ساده برای بدست آوردن اختلاف فاز بین دو تصویر در عبورهای متوالی انجام می شود [۴۳]. با تصویر خروجی از اینترفروگرام یک تصویر متشکل از یک فاز و یک کوهرنسی خواهد بود. ماهواره ها در هر مسیر عبوری خود بصورت نواری فاصله های موازی بین باندها ایجاد میکنند که در تصاویر راداری به شکل خطهای موازی نمایش داده می شوند. بنابراین لازم است در مراحل پردازش این خطوط نیز حفظ شوند که بتوان نتایج با دقت و صحت بیشتر استخراج کرد. اصطلاحاً به این عمل دیربست (deburst) کردن تصاویر گفته می شود [۴۴]. بعد از این مرحله تصاویر یکپارچه و سبک تر شده و آماده ی فیلترهای بعدی خواهد بود. در تصویر اینترفروگرام مقدار هر پیکسل اختلاف فاز بین تصویر اول و دوم خواهد بود. فازی که ی در این مرحله ی دریافت می کنیم تحت تاثیر عوامل مختلفی مانند نویزها اطلاعات مداری و بیس لاینها و اثرات توپوگرافی و اتمسفری دیگر است. از این رو برای بدست آوردن میزان دقیق جابجایی لازم است که تا حد امکان اثرات خطاهای دیگر در تصاویر را از بین ببریم. خطاهای توپوگرافی به خطاهایی که ناشی از جو یا سطح زمین به مقدار فاز ما در تصویر وارد شده، گفته می شود. بنابراین نرم افزار مدل ارتفاعی رقومی انتخابی را



(ب)



(الف)

شکل ۸: الف: نمونه ای از تصویر زمین مرجع شده ی نقشه ی جابجایی بدست آمده (پردازش اول). ب: نمونه ای از تصویر جابجایی مسطحاتی بدست آمده با فرمت tiff (یک پردازش، دو روستای بالی قایا و جوکو)

Fig. 8: A: Obtained displacement map (First Process). B: An example of a planar displacement image obtained in tiff format (one process, two villages of Bali Qaya and Joko)

نمایش میدهد، بدست می‌آید. در این فایل ۴ لایه، ترسیمات مختص هر سری پرواز با نقاط کنترل ثابت ایجاد شد. تثبیت نقاط کنترل در راستای محور X,Y با صفر کردن ارتفاع در نرم افزار MicroStation و در جهت محور Z در نرم افزار Civil3D امکان پذیر است. پس از ترسیم لایه های مورد نیاز می‌توان مقدار هر نقطه ی دلخواه را در راستای مسطحاتی و ارتفاعی استخراج نمود.

در ادامه با در نظر گرفتن حداقل ۱۰۰ نقطه‌ی کنترل در هر منطقه، بررسی مختصات آنها و زمین‌مرجع کردن نقاط بر روی نقشه‌های جابجایی بدست آمده از پردازش تصاویر راداری و بررسی اعداد و ارقام بدست آمده، میزان نزدیکی نتایج به یکدیگر در پردازش هر دو تصویر را سنجیده و تاثیر تلفیق نتایج هر دو روش را مورد مطالعه قرار دادیم که تحلیل ها و نتایج این پژوهش را در ادامه ارائه خواهیم کرد.

داده‌های اپتیک

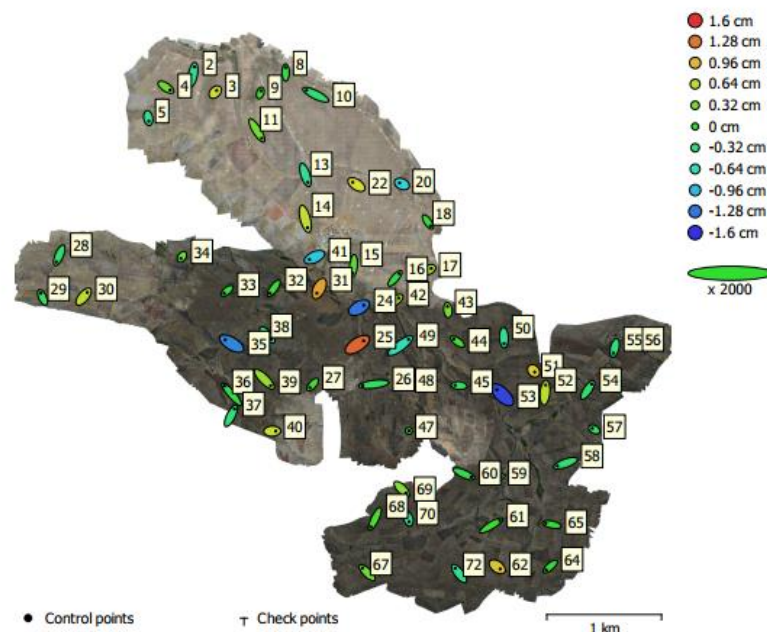
برای جمع‌آوری داده های اپتیک می‌توان از هر روشی که قابلیت استخراج تصاویر نوری را دارد شامل پهپاد، ماهواره و هواپیما استفاده کرد. در این پژوهش به منظور سهولت در دسترسی داده‌ها و بالا بودن میزان دقت تصاویر از روش جمع‌آوری داده‌های اپتیک به وسیله ی پهپاد mavic-3-enterprise استفاده شد. برای این منظور چهار پرواز در تاریخ‌های ۲۵ / ۱۰ / ۱۴۰۲، ۱۳ / ۱۲ / ۱۴۰۳، ۱۴۰۳ / ۳ / ۹ / ۲۰ و ۱۴۰۴ / ۴ / ۱۹ انجام شد. اطلاعات پرواز اول در جدول (۳) ذکر شده است. شکل ۹ نیز نمونه‌ای از موقعیت و تراکم نقاط کنترل زمینی را نمایش می‌دهد.

پس از انجام ترسیمات عوارض در ارتفاع منحصر به فرد خود در منطقه و ایجاد یک فایل dgn که مختصات عوارض را در سه محور X, Y, Z

جدول ۳: اطلاعات پرواز در تاریخ ۱۴۰۲/۱۰

Table 3: Flight information in 1402/10

مقدار quantity	مورد Case
9,802 Images	تعداد تصاویر Number of images
119 m	ارتفاع پرواز Flight altitude
3.45 cm/pixel	قدرت تفکیک زمینی (GSD) Ground resolution
12.6 km	مساحت تحت پوشش Covered area
3,790 stations	تعداد ایستگاه‌های دوربین Camera stations
12,879,018 Points	نقاط ارتباطی Tie Points
40,293,082	تعداد تصاویر پردازش شده processed images
1.18 pixel	خطای بازپردازش Reprojection Error
Test Pro (10.26mm)	مدل دوربین Camera model
5472 × 3648 Pixels	وضوح تصویر دوربین Camera resolution
10.26 mm	فاصله ی کانونی دوربین Camera focal length
2.41 × 2.41Micrometre	اندازه ی پیکسل سنسور دوربین Camera sensor pixel size
Total: 7.22 m	خطای موقعیت‌یابی دوربین Camera positioning error
61 Points	تعداد نقاط کنترل زمینی ground control points
Total: 5.53 cm	خطای نقاط کنترل میانگین (RMSE) Average control point error



شکل ۹: نمونه‌ای از موقعیت و تراکم نقاط کنترل زمینی
 Fig. 9: Example of location and density of ground control points

بحث

بررسی میزان جابجایی قائم و مسطحانی به روش راداری

پس از بررسی مقادیر نقاط کنترل بصورت مجموعه‌ای از نقاط متراکم در هر منطقه نتایج را میانگین گیری کرده و داده‌های هر منطقه به طور جداگانه مورد ارزیابی قرار گرفت. مجموعه‌ی نقاط متراکم انتخاب شده به عنوان نقاط کنترل با مختصات ثابت در هر منطقه، امکان ارزیابی میزان تغییرات را برای هر محدوده فراهم می‌سازد. نقاط در نرم افزار MicroStation انتخاب و علامت‌گذاری شده و سپس در نرم‌افزار GIS به فرمت KML تبدیل شدند تا امکان زمین مرجع کردن آن‌ها با نقشه‌های جابجایی در نرم‌افزار google earth، فراهم شود.

با توجه به اینکه شهرستان مراغه همواره تحت تاثیر بلایای طبیعی بوده و زمین‌های زراعی یک تا دو بار در سال به‌طور عمیق و سطحی شخم زده می‌شوند، انتظار می‌رود که شاهد جابجایی‌های بیشتری در مناطق زراعی و مسطح می‌رود. در نقشه‌های جابجایی فرونشست با تصاویر راداری، رنگ‌های سفید، زرد، سبز و آبی به ترتیب کمترین تا بیشترین میزان فرونشست را در مناطق نشان می‌دهند. تراکم نقاط و مشاهدات نشان داد که روستای جوکو با ۵ تا ۷ سانتی‌متر جابه‌جایی قائم دارای کمترین و روستای لاله زار با ۱۲ تا ۱۴ سانتی‌متر جابه‌جایی قائم دارای بیشترین میزان فرونشست در مناطق مسطح و هموار هستند. روستاهای بلبل و بالای‌قایا با میانگین ۷ تا ۹ سانتی‌متر بعد از جوکو قرار می‌گیرند و روستای تازه‌کند نصیرپور با میانگین فرونشست ۹ تا ۱۱ سانتی‌متر پیش از لاله زار دارای بیشترین میزان فرونشست است. اما رفتار فرونشست در مناطق شهری و مسکونی متفاوت است. روستای بلبل با ۱ تا ۳ سانتی‌متر و روستای لاله زار با ۴ تا ۶ سانتی‌متر به ترتیب دارای کمترین و بیشترین

میزان فرونشست در مناطق با بافت مسکونی و شهری هستند. روستای جوکو با میانگین ۲ تا ۴ سانتی‌متر بعد از روستای بلبل دارای کمترین میزان فرونشست و روستاهای تازه‌کند نصیرپور و بالای‌قایا با میانگین فرونشست ۳ تا ۵ سانتی‌متر بین روستاهای بلبل و لاله زار قرار می‌گیرند. همانطور که انتظار می‌رفت میزان جابجایی در مناطق مسطح و زراعی بطور چشمگیری بیشتر از مناطق مسکونی بود. جدول (۴) میانگین فرونشست منطقه را در مناطق هموار و مسکونی با استفاده از روش تداخل‌سنجی نشان می‌دهد.

در تغییرات مسطحانی مربوط به سطح زمین مناطقی که از ثبات و سختی بیشتری برخوردارند کمتر تحت تاثیر جابجایی افقی پوسته‌ی زمین قرار می‌گیرند. بیشترین تخریب و جابجایی در پوسته‌ی زمین هنگام وقوع سیل و زلزله اتفاق افتاده و میزان تخریب مناطق با اندازه‌ی سختی آن منطقه رابطه‌ی عکس دارد. نتایج، جابجایی مسطحانی ۳/۶ تا ۶/۱ میلی‌متر را در روستای جوکو نشان داد، که کمترین میزان جابجایی مسطحانی بین روستاهای دیگر بود. روستاهای تازه‌کند نصیرپور با ۳/۸ تا ۶/۵ میلی‌متر بلبل با ۴/۱ تا ۶/۳ میلی‌متر و بالای‌قایا با ۴/۷ تا ۶/۷ میلی‌متر در جایگاه‌های بعدی از نظر جابجایی مسطحانی قرار می‌گیرند و روستای لاله زار با ۴/۹ تا ۷/۲ میلی‌متر دارای بیشترین میزان جابجایی مسطحانی در مناطق زراعی و هموار است. تراکم نقاط در مناطق شهری و مسکونی و قرار گرفتن نقاط در طیف‌های رنگی مشخص شده برای اختلافات سطحی، نشان داد که در مناطق مسکونی نیز روستای جوکو کمترین میزان جابجایی را تجربه کرده و روستاهای تازه‌کند نصیرپور، بلبل و بالای‌قایا و لاله زار به ترتیب در مراتب بعدی قرار می‌گیرند. روستای لاله‌زار در مناطق مسکونی نیز بیشترین میزان

ندارد (تا ۲ دسی‌متر در ستون زرد). اما در مقابل، در روند تغییرات قائم در مناطق هموار اختلاف قابل توجهی مشاهده می‌شود (تا ۵ سانتی‌متر در ستون آبی). اما رفتار جابجایی قائم زمین در مناطق شهری و مسکونی و جابجایی مسطحاتی در مناطق هموار بصورت نوسانی است (ستون طوسی و نارنجی). این نوسانات از ۰/۵ تا ۳ سانتی‌متر در ستون نارنجی و از ۱ تا ۲ میلی‌متر در ستون طوسی قابل مشاهده است. به این ترتیب می‌توان دید که در همه روستاها، مقادیر جابجایی در روش تداخل‌سنجی به‌ویژه در مناطق مسطح بیشتر از مقادیر به‌دست‌آمده با ردیابی انحراف است، ولی روند تغییرات مشابه است. نمودار زیر مقایسه تغییرات سطح زمین با هر دو روش برحسب سانتی‌متر را نمایش می‌دهد. ستون آبی تغییرات عمودی در مناطق مسطح و هموار، ستون نارنجی تغییرات عمودی در مناطق مسکونی، ستون طوسی تغییرات مسطحاتی در مناطق هموار و ستون زرد تغییرات مسطحاتی در مناطق شهری و مسکونی را نشان می‌دهد.

جابجایی مسطحاتی داشته است. لازم به ذکر است که جابجایی‌های مسطحاتی مشاهده شده در روستاها در جهت شرق و شمال شرقی بوده که جهت وقوع وقایعی مانند سیل را مشخص می‌کند. نکته‌ی قابل توجه این است که لاله زار با حدود ۳۸۱ هکتار زمین کشت و کشاورزی، وسیع‌ترین منطقه‌ی زراعی را بین روستاها دارد. پس از لاله‌زار، بلبل، جوکو، تازه‌کند نصیرپور و بالی‌قایا نیز به ترتیب بیشترین تا کمترین وسعت زمین‌های کشاورزی را به خود اختصاص داده‌اند. جدول ۵ جابجایی مسطحاتی منطقه در بافت‌های مسطح و شهری با روش ردیابی انحراف را نشان می‌دهد.

شکل (۱۰) نموداری است که روند تغییرات به دست آمده را در کنار یکدیگر نمایش می‌دهد. در این نمودار برای هر روستا ۴ ستون در نظر گرفته شده که دو ستون سمت چپ نتایج روش تداخل‌سنجی راداری (تغییرات ارتفاعی) و دو ستون سمت راست نتایج روش ردیابی انحراف (تغییرات مسطحاتی) را نشان می‌دهد. طبق شکل (۱۰) که در روند تغییرات مسطحاتی در نواحی شهری اختلاف چندانی بین روستاها وجود

جدول ۴: میانگین فرونشست منطقه در بافت‌های مسطح و شهری باتکنیک تداخل‌سنجی راداری

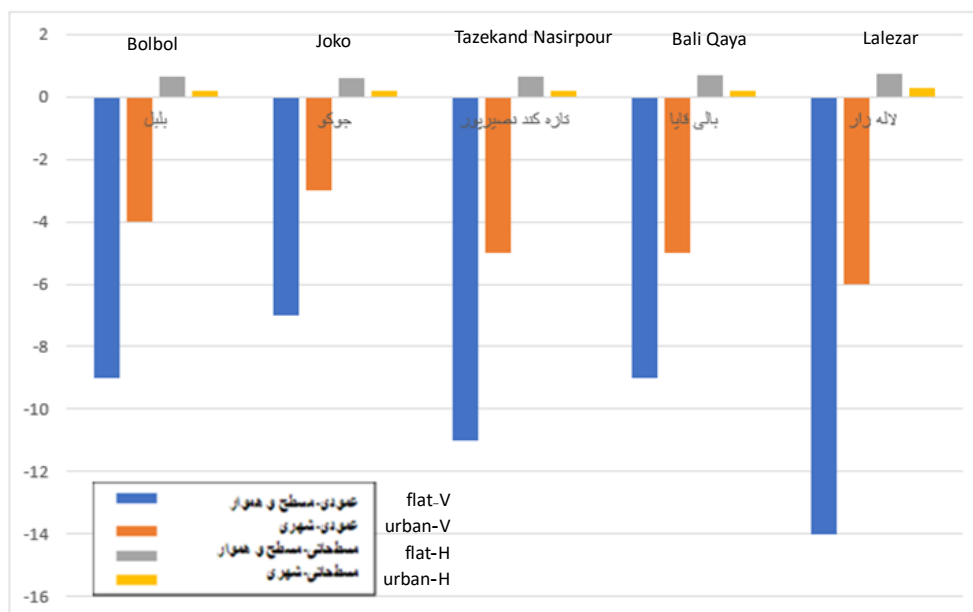
Table 3: Average regional subsidence in flat and urban areas using radar interferometry techniques

میانگین مقدار جابجایی عمودی در مناطق مسکونی و شهری Average vertical displacement in residential and urban areas	میانگین مقدار جابجایی عمودی در مناطق مسطح و هموار Average vertical displacement value in flat and level areas	نام روستا Area name
(-4 _ -2) (cm)	(-9 _ -7) (cm)	بلبل Bolbol
(-3 _ -1) (cm)	(-7 _ -5) (cm)	جوکو Joko
(-5 _ -3) (cm)	(-11 _ -9) (cm)	تازه کند نصیرپور Tazekand nasirpo
(-5 _ -3) (cm)	(-9 _ -7) (cm)	بالی قایا Baliqaya
(-6 _ -4) (cm)	(-14 _ -12) (cm)	لاله زار Lalezar

جدول ۵: میانگین جابجایی مسطحاتی منطقه در بافت‌های مسطح و شهری با روش ردیابی انحراف

Table 3: Average area Horizontal displacement in flat and urban textures using the Offset tracking method

میانگین مقدار جابجایی مسطحاتی در مناطق مسکونی و شهری Average amount of Horizontal displacement in residential and urban areas	میانگین مقدار جابجایی مسطحاتی در مناطق مسطح و هموار Average amount of Horizontal displacement in flat and level areas	نام روستا Area name
(2.1 – 1.18) (mm)	(6.3 – 4.1) (mm)	بلبل Bolbol
(1.7 – 0.92) (mm)	(6.1 – 3.6) (mm)	جوکو Joko
(1.9 – 1.03) (mm)	(6.5 – 3.8) (mm)	تازه کند نصیرپور Tazekand nasirpo
(2.1 – 1.25) (mm)	(6.7 – 4.7) (mm)	بالی قایا Baliqaya
(2.61 – 1.47) (mm)	(7.2 – 4.9) (mm)	لاله زار Lalezar



شکل ۱۰: نمودار مقایسه‌ی تغییرات سطح زمین با هر دو روش برحسب سانتی‌متر
 Fig. 10: Chart comparing changes in land surface with both methods in centimeters

جابجایی مسطحاتی در زمین‌های مسطح و هموار لازم است که عوارضی ثابت که همواره در حال تغییر نیستند مورد بررسی قرار گیرد، مانند: لبه ی جاده‌ها، صخره‌ها و سنگ‌های ثابت، لبه ی ترانه‌ها، پل‌ها جوی‌ها و جدول‌ها و تمام عوارضی که کمترین میزان تغییرات روزمره را تجربه کنند. با توجه به میزان بارش و عوامل محیطی مشاهده شده در این شهرستان و در نظر گرفتن اینکه عوامل محیطی مانند سیل، نگرگ و عواملی از این قبیل نمی‌تواند تاثیر چندانی بر روی بافت شهری، ساختمان‌های بتنی و عوارض سخت و غیر قابل جابجایی داشته باشند، انتظار می‌رود که تغییرات مسطحاتی اتفاق افتاده در مناطق مسطح و هموار در این شهرستان نسبت به جابجایی مسطحاتی اتفاق افتاده در مناطق مسکونی و شهری در این شهرستان بیشتر باشد چرا که با توجه به ساختار شهری و روستایی این منطقه امکان جابجایی مسطحاتی بیش از ارقام پیش بینی شده انتظار نمی‌رود.

مشاهدات مسطحاتی در این روش نشان داد که روستاهای تازه‌کند نصیرپور و بالی قایا با ۷/۱ میلی‌متر جابجایی مسطحاتی در مناطق هموار دارای بیشترین جابجایی در بین روستاها بودند و پس از آنها به ترتیب بلبل لاله زار و جوکو با ۹/۵ میلی‌متر و ۷/۴ میلی‌متر و ۱/۴ میلی‌متر به ترتیب دارای بیشترین تا کمترین میزان جابجایی مسطحاتی در مناطق مسطح و هموار بودند. اما در مناطق شهری و مسکونی روستای بلبل با ۵/۲ میلی‌متر جابجایی مسطحاتی دارای بیشترین جابجایی است و پس از آن روستای تازه‌کند نصیرپور، لاله زار، بالی قایا و جوکو با ۴/۲ و ۲/۳ و ۶/۱ و ۳/۱ میلی‌متر دارای بیشترین تا کمترین میزان جابجایی مسطحاتی در مناطق شهری و مسکونی هستند. جدول ۷ میزان جابجایی مسطحاتی منطقه در بافت‌های مسطح و شهری با استفاده از تصاویر اپتیک و تکنیک تبدیل سه‌بعدی را نمایش می‌دهد.

بررسی میزان جابجایی قائم و مسطحاتی با داده‌های اپتیک

از آنجایی که ترسیم عوارض در لایه‌های مشخص شده برای هر روستا با دقت بالا و توسط کارشناسان ماهر انجام شده و از این لحاظ خطای ترسیم کمتر از ۵ میلی‌متر و قابل صرف‌نظر کردن می‌باشد. علاوه بر این، به دلیل آن‌که در تصاویر و ساخت مدل‌ها و بلوک فایل‌ها برای قرار دادن تارگت روی نقاط کنترل از دقت بالایی (زیر ۳ میلی‌متر) بین دو مثلث بندی اولیه و ثانویه استفاده شده، می‌توان با اطمینان گفت که میزان خطای موجود در تشخیص ارتفاع عوارض در بالاترین میزان خود به حداکثر ۷ میلی‌متر می‌رسد.

مشاهدات نشان داد که روستای لاله‌زار با ۱۵ سانتی‌متر فرونشست بیشترین میزان حرکت قائم را بین روستاها تجربه کرده و پس از آن تازه‌کند نصیرپور با ۱۱/۷ سانتی‌متر فرونشست در رتبه دوم قرار دارد. پس از آن نیز بالی قایا، بلبل و جوکو به ترتیب با ۱۰/۲ سانتی‌متر ۳/۹ سانتی‌متر و ۶/۸ سانتی‌متر بیشترین تا کمترین میزان فرونشست را تجربه کردند. این ارقام مربوط به مشاهدات مناطق مسطح و هموار است. اما در مناطق شهری روستای بلبل با ۳/۵ سانتی‌متر بیشترین حرکت قائم را تجربه کرده و پس از آن بالی قایا با ۲/۳ سانتی‌متر لاله زار با ۹/۲ سانتی‌متر تازه‌کند نصیرپور با ۲/۴ سانتی‌متر و جوکو با ۱/۴ سانتی‌متر بیشترین تا کمترین جابجایی قائم را در مناطق شهری و مسکونی تجربه کردند. جدول ۶ میزان فرونشست منطقه در بافت‌های مسطح و شهری با استفاده از تصاویر اپتیک و تکنیک تبدیل سه‌بعدی را نشان می‌دهد.

بررسی میزان جابجایی مسطحاتی

در شهرستان مراغه بیشترین وسعت زمین‌های مسطح و هموار را زمین‌های زراعی و کشتی تشکیل می‌دهند از این‌رو در بررسی میزان

جدول ۶: میزان فرونشست منطقه در بافت‌های مسطح و شهری با استفاده از تصاویر اپتیک و تکنیک تبدیل سه‌بعدی
Table 6: Subsidence rate in flat and urban textures using optical images and 3D transformation techniques

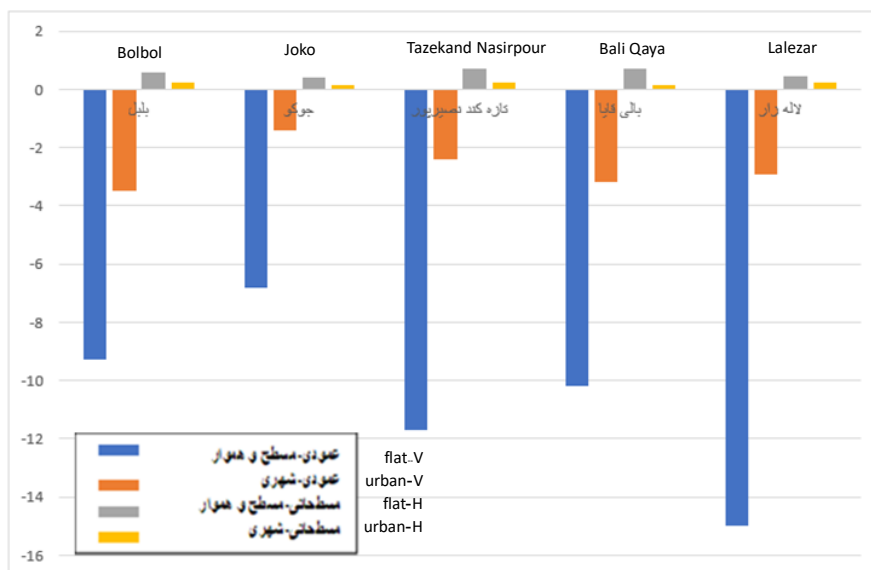
میانگین مقدار جابجایی عمودی در مناطق مسکونی و شهری Average vertical displacement in residential and urban areas	میانگین مقدار جابجایی عمودی در مناطق مسطح و هموار Average vertical displacement value in flat and level areas	نام روستا Area name
(-3.5 _ -3) (cm)	(-9.3 _ -7) (cm)	بلبل Bolbol
(-1.4 _ -0.5) (cm)	(-6.8 _ -4.5) (cm)	جوکو Joko
(-2.4 _ -1) (cm)	(-11.7 _ -9) (cm)	تازه کند نصیرپور Tazekand nasirpo
(-3.2 _ -3) (cm)	(-10.2 _ -7.7) (cm)	بالی قایا Baliqaya
(-2.9 _ -2) (cm)	(-15 _ -13) (cm)	لاله زار Lalezar

جدول ۷: میزان جابجایی مسطحاتی منطقه در بافت‌های مسطح و شهری با استفاده از تصاویر اپتیک و تکنیک تبدیل سه‌بعدی
Table 7: The amount of regional horizontal displacement in flat and urban textures using optical images and 3D transformation techniques

میانگین مقدار جابجایی مسطحاتی در مناطق مسکونی و شهری Average amount of Horizontal displacement in residential and urban areas	میانگین مقدار جابجایی مسطحاتی در مناطق مسطح و هموار Average amount of Horizontal displacement in flat and level areas	نام روستا Area name
(2.5 - 2) (mm)	(5.9 - 3.2) (mm)	بلبل Bolbol
(1.3 - 0.92) (mm)	(4.1 - 3.5)(mm)	جوکو Joko
(2.4 - 1.2) (mm)	(7.1 - 4.1) (mm)	تازه کند نصیرپور Tazekand nasirpo
(1.6 - 1.2) (mm)	(7.1 - 4) (mm)	بالی قایا Baliqaya
(2.3 - 1.4) (mm)	(4.7 - 1.5) (mm)	لاله زار Lalezar

مقایسه‌ی داده‌ها نشان می‌دهد که دامنه مقادیر جابجایی در روش تداخل سنجی معمولاً بزرگ‌تر از مقادیر به‌دست‌آمده از روش ردیابی انحراف است. این موضوع به ویژه در مناطق مسطح و هموار به وضوح مشاهده می‌شود. دلیل اصلی این اختلاف، ماهیت روش‌هاست؛ به طوری که تداخل سنجی عمدتاً برای اندازه‌گیری جابجایی‌های عمودی با دقت سانتی متر تا متر طراحی شده است، در حالی که ردیابی انحراف به تغییرات و جابجایی‌های افقی که معمولاً با میلی‌متر و سانتی‌متر سنجیده می‌شود، حساسیت بیشتری دارد. در هر دو روش، میزان جابجایی در مناطق مسکونی و شهری نسبت به مناطق مسطح و هموار کمتر است. این پدیده را می‌توان به پایداری نسبی زیرساخت‌های شهری، سطوح آسفالتی و سازه‌ها نسبت داد که در برابر تغییر شکل‌های زمین مقاومت بیشتری دارند. برعکس، مناطق مسطح و کشاورزی که عمدتاً دارای خاک نرم و نفوذپذیر هستند، بیشتر مستعد نشست یا تغییر مکان می‌باشند.

شکل ۱۱ روند تغییرات مسطحاتی و ارتفاعی با توجه به نتایج روش اپتیک و فتوگرامتری پهبادی را نمایش می‌دهد. ستون آبی تغییرات قائم در مناطق مسطح و هموار، ستون نارنجی تغییرات قائم در مناطق مسکونی، ستون طوسی تغییرات مسطحاتی در مناطق هموار و ستون زرد تغییرات مسطحاتی در مناطق شهری و مسکونی را نشان می‌دهد. طبق شکل ۱۱، در مناطق هموار بین روستای لاله زار (بیشترین فرونشست) و جوکو (کمترین فرونشست)، تا حدود ۹ سانتی‌متر اختلاف فرونشست قابل مشاهده است. اما این رقم در مناطق مسکونی بین جوکو (کمترین فرونشست) و بلبل (بیشترین فرونشست)، تا حداکثر ۲ سانتی‌متر کاهش می‌یابد. اما اختلافات در جابجایی‌های مسطحاتی به‌دست آمده در مناطق هموار بسیار ناچیز و مقادیر به یکدیگر بسیار نزدیک هستند. این الگو در جابجایی مسطحاتی مناطق مسکونی نیز تکرار شده است و اختلاف اعداد به‌دست آمده کمتر از ۳ میلی‌متر می‌باشد.



شکل ۱۱: نمودار مقایسه‌ی تغییرات سطح زمین با تصاویر اپتیک و تکنیک تبدیل (فتوگرامتری پهپادی) بر حسب سانتی‌متر
 Fig. 11: Chart comparing changes in land surface with optical images and conversion techniques (UAV photogrammetry) in centimeters

مقادیر فرونشست گزارش شده توسط تداخل‌سنجی و فتوگرامتری پهپادی برای هر روستا و هر نوع منطقه، بسیار به هم نزدیک هستند. در برخی موارد در روش اپتیک مقادیر مطلق کمی بزرگتر است. این اختلافات عموماً در محدوده‌ی زیر یک سانتی‌متر تا حداکثر یک و نیم سانتی‌متر هستند. این اختلافات به عوامل زیر وابسته است: تفاوت در بازه‌ی زمانی تداخل‌سنجی و اپتیک، تفاوت در هندسه دید که تصاویر راداری به صورت مایل و تصاویر اپتیک نزدیک به قائم هستند، خطاهای اتمسفری در تداخل‌سنجی وابستگی روش اپتیک به دقت مدل ارتفاعی و این موضوع که نقاط کنترل زمینی استفاده شده در فتوگرامتری اپتیک ممکن است دقیقاً همان نقاطی نباشند که در پردازش تداخل‌سنجی استفاده شده‌اند یا از نظر توزیع مکانی متفاوت باشند.

نتایج در روش فتوگرامتری اپتیک اعتبارسنجی مستقیم و مستقلی برای نتایج حاصل از تداخل‌سنجی ارائه می‌دهد و نشان می‌دهد که تداخل‌سنجی برای پایش فرونشست قائم در این منطقه از دقت قابل قبولی برخوردار است. در جابجایی مسطحاتی که با دو روش ردیابی انحراف روی داده‌های راداری و روش فتوگرامتری اپتیک انجام شد هر دو روش وجود جابجایی مسطحاتی قابل اندازه‌گیری را در تمام روستاها و در هر دو نوع منطقه (هموار و مسکونی)، هر چند با مقادیر کمتر در مناطق شهری تایید می‌کنند. مقادیر جابجایی مسطحاتی (در حد چند میلی‌متر) بطور کلی بسیار کمتر از مقادیر فرونشست قائم (در حد ده‌ها سانتی‌متر) است. اختلاف مقادیر مطلق (معمولاً در محدوده‌ی ۰/۵ تا ۲ میلی‌متر) می‌تواند ناشی از تفاوت ذاتی روش‌ها باشد.

روش ردیابی انحراف جابجایی را در راستای خط دید ماهواره اندازه‌گیری می‌کند. برای تبدیل به جابجایی افقی واقعی، معمولاً نیاز به فرضیات (مثلاً غالب بودن حرکت افقی) یا ترکیب با داده‌های دیگر (مثلاً از زوایای دید مختلف) است. در دسترس نبودن ایستگاه‌های جی‌پی‌اس در منطقه‌ی مورد مطالعه، به عنوان نقاط اطمینان از خطاهای مربوط به

یکی از ویژگی‌های بارز داده‌های تداخل‌سنجی، غالب بودن مقادیر منفی جابجایی عمودی است که نشان‌دهنده‌ی فرونشست زمین در اکثر نقاط مطالعه شده می‌باشد. این روند در روستاهای تازه‌کند نصیرپور و لاله زار در مناطق مسطح و هموار شدت بیشتری دارد و به بیش از ۹ سانتی‌متر در سال می‌رسد. در مقابل، مقادیر جابجایی به‌دست‌آمده از ردیابی انحراف اغلب مثبت بوده و به‌طور میانگین بین ۲ تا ۶ میلی‌متر تغییر مکان افقی را نشان می‌دهد. بیشترین مقدار جابجایی مسطحاتی در این روش مربوط به روستای تازه‌کند نصیرپور و بالی‌قایا در مناطق مسطح و هموار با ۷/۱ میلی‌متر است.

با توجه به اینکه هر روش مزایا و محدودیت‌های خاص خود را دارد، استفاده‌ی همزمان از تداخل‌سنجی و ردیابی انحراف می‌تواند دید جامع‌تری از فرآیند تغییر شکل زمین ارائه دهد. تداخل‌سنجی توانایی بسیار بالایی در تشخیص فرونشست‌های تدریجی و جابجایی‌های عمودی کوچک دارد، در حالی که ردیابی انحراف برای شناسایی تغییرشکل‌های بزرگ‌تر و جابجایی‌های افقی مناسب‌تر است. بنابراین، ادغام نتایج این دو روش، امکان پایش دقیق‌تر و تفسیر بهتر تغییرات زمین در مناطق مختلف را فراهم می‌کند.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش به‌طور همزمان از دو فناوری سنجش‌از‌دور راداری و اپتیک و سه تکنیک پردازشی تداخل‌سنجی راداری، ردیابی انحراف، فتوگرامتری پهپادی برای پایش فرونشست قائم و جابجایی مسطحاتی در ۵ روستای شهرستان مراغه استفاده شد. هر سه روش الگوی مشابه‌ای از فرونشست را در مناطق مسطح و هموار (عمدتاً کشاورزی) و مناطق شهری و مسکونی نشان می‌دهند. روستای لاله‌زار به‌طور سیستماتیک بیشترین فرونشست قائم را در هر دو نوع منطقه تجربه کرده است. پس از آن به ترتیب تازه‌کند نصیرپور، بالی‌قایا، بلبل و جوکو قرار دارند.

جابجایی‌های قائم و افقی فراهم کرده و نتایج آن تا حد زیادی قابل استناد است. لازم به ذکر است که این روش به ویژه برای مناطق کوچک، پروژه‌های خاص و همراه با اعتبارسنجی داده‌های ماهواره‌ای بسیار ارزشمند خواهد بود. مقادیر جابجایی مسطحاتی با وجود آن که کمتر از فرونشست قائم است، اندازه‌گیری دقیق آن چالش‌برانگیزتر می‌باشد. نتایج روش‌های ردیابی انحراف و فتوگرامتری به دلیل تفاوت ذاتی در روش اندازه‌گیری و دشواری شناسایی عوارض کاملاً ثابت، ممکن است اختلافاتی در مقادیر مطلق نشان دهند، اما در مورد وجود اختلافات منطقی در مقادیر مطلق و الگوی کلی آن توافق دارند.

طبق نتایج، روستای لاله‌زار بحرانی‌ترین وضعیت را از نظر میزان فرونشست قائم دارد و روستاهای تازه کند نصیرپور و بالی قایا بیشترین جابجایی مسطحاتی را در مناطق هموار تجربه کرده‌اند. مناطق شهری و مسکونی به‌طور کلی کمتر از مناطق هموار (کشاورزی) تحت تأثیر هر دو نوع جابجایی قرار دارند. روش تداخل‌سنجی با تصاویر راداری برای پایش جابجایی قائم در مناطق وسیع و با فواصل زمانی طولانی بسیار کارآمد است و می‌تواند تغییرات میلی‌متری را در طول زمان تشخیص دهد. روش ردیابی انحراف با تصاویر راداری برای جابجایی‌های مسطحاتی بزرگتر و در مناطق با تغییرات شدید مناسب‌تر است. روش تبدیل تصاویر اپتیک (فتوگرامتری پهنپای) به دلیل دقت مکانی بسیار بالا و توانایی ترسیم دقیق عوارض، برای مطالعات محلی و دقیق در مقیاس کوچک و پایش جابجایی‌های مسطحاتی و قائم در بازه‌های زمانی کوتاه‌تر ایده‌آل است. همچنین، نتایج این روش به صورت بصری قابل تفسیر و درک هستند.

در این جا با تأکید بر استفاده تلفیقی از هر دو روش پیشنهاداتی را برای بهبود هرچه بیشتر نتایج ارائه شده است:

- استفاده از الگوریتم‌های تلفیق داده یا محصول برای تولید نقشه‌های جابجایی یکپارچه‌تر و دقیق‌تر که مزایای هر دو منبع داده را به‌طور بهینه ترکیب کند. مثلاً استفاده از جابجایی افقی دقیق فتوگرامتری برای بهبود تبدیل خط دید ماهواره در روش ردیابی انحراف مسطحاتی.

- انجام پروازهای پهنپای در بازه‌های زمانی کوتاه‌تر (مثلاً ماهانه) و همزمان با گذر ماهواره‌های راداری، برای اعتبارسنجی دقیق‌تر و ردیابی تغییرات کوتاه مدت.

- استفاده از نقاط کنترل دائمی و نصب رفلکتورهای ثابت در منطقه به‌عنوان نقاط کنترل بسیار دقیق و پایدار برای بهبود دقت پردازش تداخل‌سنجی و ردیابی انحراف و فتوگرامتری، به‌ویژه در مناطق با تغییرات پوشش زمین.

- تلفیق با داده‌های ژئودتیک و استفاده ی همزمان از اندازه‌گیری‌های GNSS دقیق در نقاط کلیدی برای کالیبراسیون مستقیم و اعتبارسنجی نهایی داده‌های سنجش‌از‌دور.

- بررسی علل فرونشست و انجام مطالعات هیدروژئولوژیکی و ژئوتکنیکی دقیق‌تر (مانند تحلیل داده‌های چاه‌های پی‌زومتری و نمونه‌برداری خاک) در روستاهای بحرانی (لاله‌زار، تازه‌کند نصیرپور، بالی قایا) برای شناسایی

این روش است. اما روش اپتیک با فرض دقت کافی در ترسیم عوارض ثابت، جابجایی افقی را مستقیماً در صفحه ی افق اندازه‌گیری می‌کند. خطای اصلی در اینجا مربوط به دقت شناسایی و ترسیم همان عوارض ثابت در مدل‌های زمانی مختلف است. از سوی دیگر ممکن است روش‌ها بر روی عوارض زمینی کمی متفاوت (هرچند از نظر تئوری ثابت) متمرکز شده باشند. جابجایی مسطحاتی در این مقیاس (میلی‌متر) بسیار حساس به خطاهای اندازه‌گیری و تغییرات موضعی کوچک مثلاً ناشی از فعالیت کشاورزی جزئی حتی در کنار جاده‌ها است.

در روش اپتیک پهنپای پژوهش‌ها به‌طور قاطع نشان داد که فتوگرامتری پهنپای با پردازش دقیق و استفاده از نقاط کنترل با دقت بالا، مثلث‌بندی دقیق، انتخاب بکارشناسان با تجربه برای تبدیل، قابلیت استناد بسیار بالایی برای اندازه‌گیری هم‌زمان جابجایی‌های قائم و افقی در حد سانتی‌متر و حتی میلی‌متر را دارد. البته لازم به ذکر است که این ادعا با تأکید بر خطای ترسیم کمتر از ۵ میلی‌متر و اختلاف مثلث بندی زیر ۳ میلی‌متر، صحیح و قابل استناد است. این دقت برای مطالعات فرونشست در مقیاس روستایی و حتی شهری با در نظر گرفتن شروط بالا تا حد زیادی کافی و قابل استناد است.

از مزیت‌های حاصل از تلفیق دو روش می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: -تداخل‌سنجی با استفاده از تصاویر راداری پوشش مکانی وسیع‌تر و قابلیت نفوذ به ابرها و پوشش گیاهی جزئی را دارند و نرخ تغییرات را در بازه‌های زمانی منظم ارائه می‌دهند. تصاویر اپتیک پهنپای دقت فضایی بسیار بالا (سانتی‌متر و میلی‌متر)، قابلیت اندازه‌گیری هم‌زمان قائم و افقی با دقت بالا، و دید سه‌بعدی و تفسیرپذیری عینی را فراهم می‌کنند.

- مهم‌ترین مزیت تلفیق روش‌ها در این پژوهش، اعتبارسنجی متقابل نتایج بود. همخوانی بسیار خوب نتایج فرونشست قائم بین تداخل‌سنجی و فتوگرامتری اپتیک پهنپای، دقت هر دو روش را تأیید می‌کند و اطمینان به نتایج را به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهد.

-استفاده از روش ردیابی انحراف و تبدیل فتوگرامتری، هرچند با وجود شروط ذکر شده با چالش‌هایی مواجه است اما تصویر کامل‌تری از میدان جابجایی زمین (هم قائم و هم افقی) ارائه می‌دهد که تنها با یک روش به‌دست آوردن آن دشوار است.

براساس نتایج این مقاله، تلفیق تصاویر راداری و اپتیک و استفاده از روش‌های تداخل‌سنجی، ردیابی انحراف و تبدیل، یک راهبرد عملی و بسیار موثر برای پایش دقیق و جامع جابجایی‌های قائم و افقی سطح زمین در مقیاس محلی (روستاها) است، علاوه بر این، تداخل‌سنجی راداری روشی قابل اطمینان و دقیق برای پایش فرونشست قائم در منطقه ی مراغه است، اعتبارسنجی آن با نتایج مستقل و دقیق فتوگرامتری پهنپای نشان داد که اختلافات جزئی موجود طبیعی و در محدوده ی خطاهای متداول این تکنیک‌ها هستند. این پژوهش نشان داد که تلفیق روش اپتیک و فتوگرامتری پهنپای با پردازش دقیق، دقت کافی (در حد میلی‌متر تا سانتی‌متر) را برای اندازه‌گیری هم‌زمان

منابع و مأخذ

- [1] Li S, Yang X. Sentinel-1 InSAR-derived land subsidence assessment along the Texas Gulf Coast. *Geomat Nat Hazards Risk*. 2023;14(1):1245-63. doi: 10.1016/j.jngse.2023.105209
- [2] Crosetto M, Monserrat O, Cuevas-González M, Devanthery N, Crippa B. Interferometric SAR monitoring of land subsidence: Persistent scatterer vs distributed scatterer techniques. *Remote Sens*. 2016;8(6):1-22. doi: 10.5194/isprsarchives-XLI-B7-835-2016
- [3] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*. 2001;39(1):8-20. doi: 10.1109/36.898661
- [4] Li Z, Elliott JR, Hooper A. Integration of GPS and InSAR data for resolving 3D crustal deformation. *Earth Space Sci*. 2019;6(5):856-75. doi: 10.1029/2019EA001036
- [5] Wang HM, Wang Y, Jiao X, Qian GR. Risk management of land subsidence in Shanghai. *Desalination Water Treat*. 2014;52(4-6):1122-9. doi: 10.1080/19443994.2013.826337
- [6] Bamler R, Hartl P. Synthetic aperture radar interferometry. *Inverse Probl*. 1998;14(4):R1-54. doi: 10.1088/0266-5611/14/4/001
- [7] Liu Y, Ma T, Du Y. Compaction of muddy sediment and its significance to groundwater chemistry. *Procedia Earth Planet Sci*. 2017;17:392-5. doi: 10.1016/j.proeps.2016.12.099
- [8] Gambolati G, Teatini P. Geomechanics of subsurface water withdrawal and injection. *Water Resour Res*. 2015;51(6):3922-55. doi: 10.1002/2014WR016841
- [9] Solari L, Rosi A, Bianchini S, Casagli N, Raspini F. SAR interferometry for monitoring ground displacements in mountain regions. *Earth Surf Process Landf*. 2019;44(1):58-76. doi: 10.1002/esp.4470
- [10] Jin YF, Yin ZY, Wu ZX, Zhou WH. Identifying parameters of easily crushable sand and application to offshore pile driving. *Ocean Eng*. 2018;154:416-29. doi: 10.1016/j.oceaneng.2018.01.023
- [11] Jin YF, Yin ZY, Shen SL, Hicher PY. Selection of sand models and identification of parameters using an enhanced genetic algorithm. *Int J Numer Anal Methods Geomech*. 2016;40(8):1219-40. doi: 10.1002/nag.2487
- [12] Bendarzszevszkij A, Eszterhai V, Gere L, Klemensits P, Polyák E. *World Economic Forum. Environ Sci Pollut Res*. 2017. doi: 10.1007/s11356-024-32075-w
- [13] Goudarzi M, Farahpour M, Mousavi SA. Use of Landsat TM digital data in land cover mapping and rangeland condition classification: A case study of Namrood watershed. *Iran J Range Desert Res*. 2006;13(3):265-77. [In Persian]
- [14] Hooper A, Bekaert D, Spaans K, Arikan M. Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation. *Tectonophysics*. 2012;514-517:1-13.

دقیق دلایل فرونشست (عمدتاً افت سطح آب زیرزمینی) و مدلسازی پیش‌بینی.

- پایش مستمر و ایجاد یک سامانه ی پایش مستمر فرونشست برای شهرستان مراغه یا مناطق مورد مطالعه با استفاده ترکیبی از داده‌های راداری ماهواره‌ای (برای پوشش وسیع و منظم) و دوره‌ای از پروازهای پهپادی (برای دقت بالا و مناطق خاص).

- آگاه‌سازی و مدیریت و ارائه ی نتایج به‌طور شفاف به سازمان‌های مربوط (استانداری، منابع آب، جهاد کشاورزی، شهرداری‌ها) و جوامع محلی برای برنامه‌ریزی در جهت مدیریت منابع آب، بازنگری در الگوی کشت، مقاوم‌سازی سازه‌ها در مناطق پرخطر و اتخاذ سیاست‌های پیشگیرانه.

- با توجه به اینکه جابجایی‌های زمین ممکن است در فصول مختلف سال به دلیل تغییرات رطوبت خاک، بارش و برداشت آب زیرزمینی متفاوت باشند، انجام تحلیل‌های فصلی می‌تواند اطلاعات ارزشمندی ارائه دهد.

- استفاده و توسعه مدل‌های تلفیقی پیشرفته، با توسعه ی این مدل‌ها می‌توان از الگوریتم‌های پیشرفته‌تر مانند یادگیری ماشین برای تلفیق خودکار داده‌های راداری و اپتیکال استفاده کرد تا دقت و کارایی نتایج بهبود یابد.

مشارکت نویسندگان

میزان مشارکت نویسندگان در نگارش این مقاله به شرح زیر است: نویسنده اول مسئولیت گردآوری و آماده سازی داده‌ها، انجام محاسبات، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج و تهیه پیش نویس مقاله را بر عهده داشته است. نویسنده دوم به عنوان استاد راهنمای پژوهش، در طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش و کنترل کیفیت داده ها، اصلاح، بازبینی و نهایی سازی مقاله نقش داشته است. نویسنده سوم نیز در طراحی پژوهش، بررسی کنترل نتایج، مطالعه، اصلاح، بازبینی اولیه ی مقاله همکاری کرده است.

تشکر و قدردانی

این پژوهش حاصل بخشی از پایان نامه کارشناسی ارشد نویسنده اول با عنوان: مطالعه تطبیقی تصاویر راداری و اپتیک در برآورد میدان جابجایی سطح زمین، است که در دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست دانشگاه شهید بهشتی با راهنمایی آقایان دکتر یحیی جمور و دکتر اصغر میلان انجام شده است. نویسنده اول نهایت تشکر و قدردانی خود را از ایشان ابراز می نماید.

تعارض منافع

«هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.»

- [27] Liu Y, Ma T, Du Y. Compaction of muddy sediment and its significance to groundwater chemistry. *Procedia Earth Planet Sci.* 2017; 17:392-5. doi: 10.1016/j.proeps.2016.12.099
- [28] Mousavi Z, Dehghani M, Sahebi MR. Monitoring land subsidence in the arid region of Mashhad, northeast Iran, using SBAS InSAR technique. *J Arid Environ.* 2020; 174:104045. [In Persian] doi: 10.1016/j.jaridenv.2019.104045
- [29] Karimi N, Namdari S. Estimation of severity and extent of desertification in Iran using Landsat satellite images and spectral mixture analyses methods during 1984 and 2015. *Iran J Range Desert Res.* 2019;26(2):500-15. [In Persian] doi: 10.22092/ijrdr.2019.119369
- [30] Raspini F, Bianchini S, Moretti S. Exploitation of satellite SAR data for the detection and monitoring of slow-moving landslides. *Remote Sens.* 2018;10(7):1121. doi: 10.3390/rs10071121
- [31] Wang H, Li T, Chen Q, Zhao Z. Monitoring land subsidence in the Yangtze River Delta using Sentinel-1 data: Implications for urban infrastructure. *GISci Remote Sens.* 2025;62(1):101-19. doi: 10.1080/15481603.2025.2465349
- [32] Ye S, Xue Y, Wu J, Yan X, Yu J. Progression and mitigation of land subsidence in China. *Hydrogeol J.* 2016;24(3):685-93. doi: 10.1007/s10040-015-1356-9
- [33] Jin YF, Yin ZY, Wu ZX, Zhou WH. Identifying parameters of easily crushable sand and application to offshore pile driving. *Ocean Eng.* 2018; 154:416-29. doi: 10.1016/j.oceaneng.2018.01.023
- [34] Pereira MA, Silva J, Santos FD. Integration of optical and SAR data for burned area mapping in Portugal. *Remote Sens.* 2015;7(2):1320-42. doi: 10.3390/rs70210320
- [35] Massonnet D, Feigl KL. Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. *Rev Geophys.* 1998;36(4):441-500. doi: 10.1029/97RG03139
- [36] Zhang L, Wang S, Wei Y. Integration of differential InSAR and optical data for land surface deformation analysis in Enshi City, China. *Front Earth Sci.* 2023; 11:1101848. doi: 10.3389/feart.2023.1101848
- [37] Schmidt DA, Bürgmann R. Time-dependent land subsidence and uplift near the California-Nevada border observed by GPS and InSAR. *J Geophys Res Solid Earth.* 2019;124(8):8707-23. doi: 10.1029/2019JB017354
- [38] Shirzaei M, et al. Land subsidence risk to infrastructure in US metropolises. *Nat Cities.* 2025. [In Persian] doi: 10.1038/s44284-025-00240-y
- [39] Figueroa-Miranda S, Tuxpan-Vargas J, Ramos-Leal JA, Hernández-Madrugal VM, Villaseñor-Reyes CI. Land subsidence by groundwater over-exploitation from aquifers in tectonic valleys of Central Mexico: A review. *Eng Geol.* 2018;246:91-106. doi: 10.1016/j.enggeo.2018.09.023
- doi: 10.1016/j.tecto.2011.10.013
- [15] Raspini F, Bianchini S, Moretti S. Exploitation of satellite SAR data for the detection and monitoring of slow-moving landslides. *Remote Sens.* 2018;10(7):1121. doi: 10.3390/rs10071121
- [16] Zhang L, Wang S, Wei Y. Integration of differential InSAR and optical data for land surface deformation analysis in Enshi City, China. *Front Earth Sci.* 2023; 11:1101848. doi: 10.3389/feart.2023.1101848
- [17] Bonforte A, et al. Present-day surface deformation of Sicily derived from Sentinel-1 InSAR time-series. *arXiv.* 2022. doi: 10.48550/arXiv.2208.08183
- [18] Chen C, et al. Deep learning framework for detecting ground deformation in the built environment using satellite InSAR data. *arXiv.* 2020. doi: 10.48550/arXiv.2005.03221
- [19] Cao X, He K, Hu X, Luo G, Zhou Y, Zhou R, et al. Combined InSAR and optical dataset unravelling the characteristics of hillslope erosion in burned areas in Xichang, China. *Catena.* 2024; 244:108123. doi: 10.1016/j.catena.2024.108123
- [20] Yu W, Li W, Wu Z, Lu H, Xu Z, Wang D, et al. Integrated remote sensing investigation of suspected landslides: A case study of the Genie Slope on the Tibetan Plateau, China. *Remote Sens.* 2024;16(13):2412. doi: 10.3390/rs16132412
- [21] Chen H, Zhao C, Tomás R, Reyes-Carmona C, Kang Y. Integrating InSAR and non-rigid optical pixel offsets to explore the kinematic behaviors of the Lanuza complex landslide. *Remote Sens Environ.* 2025; 320:114651. doi: 10.1016/j.rse.2025.114651
- [22] Handwerker AL, Lacroix P, Bell AF, Booth AM, Huang MH, Mudd SM, et al. Multi-sensor remote sensing captures geometry and slow-to-fast sliding transition of the 2017 Mud Creek landslide. *Sci Rep.* 2025; 15:29831. doi: 10.1038/s41598-025-11399-8
- [23] Hanssen RF. Radar interferometry: Data interpretation and error analysis. Dordrecht: Springer; 2001. doi: 10.1007/0-306-47633-9
- [24] Liang D, Guo H, Zhang L, Cheng Y, Zhu Q, Liu XT. Time-series snowmelt detection over the Antarctic using Sentinel-1 SAR images on Google Earth Engine. *Remote Sens Environ.* 2021; 264:112318. doi: 10.1016/j.rse.2021.112318
- [25] Li J, Li ZW, Ding XL, Wang QJ, Zhu JJ, Wang CC. Investigating mountain glacier motion with the method of SAR intensity-tracking: Removal of topographic effects and analysis of the dynamic patterns. *Earth-Sci Rev.* 2014;138(1):179-95. doi: 10.1016/j.earscirev.2014.08.016
- [26] Zhang Y, Handwerker AL, Fielding EJ, Huang M. Integrating InSAR and non-rigid optical pixel offsets to explore the Lanuza landslide. *Remote Sens Environ.* 2025; 305:113689. doi: 10.1016/j.rse.2024.113689

Zamany, L., M.Sc. Student in Photogrammetry, Faculty of Civil, Water, and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

 l.zamany@Mail.sbu.ac.ir



یحیی جمور دانشیار گروه مهندسی نقشه برداری در دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست دانشگاه شهید بهشتی، دارای مدرک دکتری از مونپلیه در کشور فرانسه در رشته مهندسی نقشه برداری- ژئودزی می باشد. ایشان تا کنون موفق به چاپ ۵ جلد کتاب و بیش از ۶۰ مقاله در نشریات

SI و پژوهشی و دهها مقاله ی دیگر در کنفرانس های داخلی و بین المللی معتبر شده اند. زمینه های تخصصی ایشان عبارتند از: تعیین موقعیت ماهواره ای و مطالعات تغییر شکل با مشاهدات ماهواره ای.

Jamour, Y. Associate Professor, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

 y_djamour@sbu.ac.ir



اصغر میلان استادیار گروه مهندسی نقشه برداری در دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست دانشگاه شهید بهشتی، دارای مدرک دکتری از دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی در رشته مهندسی نقشه برداری- فتوگرامتری می باشد. ایشان تاکنون موفق به چاپ مقالات متعدد در مجلات و کنفرانس های داخلی و بین المللی

معتبر شده اند. زمینه های تخصصی ایشان عبارتند از: فتوگرامتری، سنجش از دور، کاداستر و پردازش تصاویر می باشد.

Milan, A. Assistant Professor, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

 a_milan@sbu.ac.ir

[40] Duo L, Hu Z. Soil quality change after reclaiming subsidence land with Yellow River sediments. Sustainability. 2018;10(11):4310. doi: 10.3390/su10114310

[41] Wang Y, Zhang H, Wang Z. Integration of optical, SAR and DEM data for automated detection of debris-covered glaciers. ISPRS J Photogramm Remote Sens. 2021; 180:149-62. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2021.08.005

[42] Ganas A, Elias P, Bozionelos G, Papathanassiou G, Avallone A, Papastergios A, et al. Sentinel-1 reveals ground deformation patterns associated with the August 2016 earthquake sequence in Central Italy. Remote Sens. 2018;10(6):894. doi: 10.3390/app12052630

[43] Hooper A, Bekaert D, Spaans K, Arikan M. Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation. Tectonophysics. 2012;514-517:1-13. doi: 10.1016/j.tecto.2011.10.013

[44] Zhao P, Lu D, Wang G, Wu C, Huang Y, Yu S. Examining spectral reflectance saturation in Landsat imagery and corresponding solutions to improve forest aboveground biomass estimation. Remote Sens. 2016;8(6):469. doi: 10.3390/rs8060469a

معرفی نویسندگان

AUTHOR(S) BIOSKETCHES



لیلی زمانی دانشجوی ورودی ۱۴۰۱ کارشناسی ارشد فتوگرامتری دانشگاه شهید بهشتی می باشد. ایشان تاکنون موفق به چاپ مقالات متعدد در مجلات و کنفرانس های داخلی در زمینه های تداخل سنجی، سنجش از دور و مدل سازی سه بعدی آثار باستانی در حوزه ی فتوگرامتری و سنجش از دور شده اند.

Citation (Vancouver): Zamany L, Jamour Y, Milan A. [A Comparative study of radar and optical imagery in estimating ground displacement fields (study area: Maraghe)]. *J. RS. GEOINF. RES.* 2026; 4(1): 17-38

 <https://doi.org/10.22061/jrsg.2026.12701.1117>



COPYRIGHTS

© 2026 The Author(s). This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)

(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)