پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمّی، سال سیزدهم، شماره ۳، زمستان ۱۴۰۳
صص. ۱۵۸-۱۴۱

بررسی مخاطرات ناشی از فرونشست زمین و تأثیر آن بر محوطه‌های تاریخی با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی تفاضلی راداری، مطالعه موردی: دشت اردبیل

موسی عابدینی*- استاد گروه جغرافیای طبیعی (ژئومورفولوژی)، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی .
لیلا متکلم - دانشجوی کارشناسی ارشد ژئومورفولوژی و مهندسی محیط، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی.
هوشنگ سیفی - کارشناسی ارشد سنجش از دور - گرایش مطالعات آب و خاک، گروه سنجش از دور و GIS، دانشگاه تبریز .

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۰۴ تائید نهایی: ۱۴۰۳/۰۷/۲۹

چکیده

پایش تغییرات در محوطه‌های باستانی و تاریخی با استفاده از روش‌های سنجش از دوری یکی از مباحث روز در بحث حفاظت و مرمت آثار تاریخی در جهان است. بدین منظور تکنیک تداخل‌سنجی راداری با برخورداری از پوشش زمینی وسیع و نیز قدرت تفکیک زمانی و مکانی زیاد، یکی از دقیق-ترین و کم‌هزینه‌ترین روش‌ها برای شناسایی و پایش مناطق درگیر فرونشست زمین در محدوده‌های تاریخی است. این پژوهش ضمن بررسی نرخ تغییرات ناشی از فرونشست زمین در محدوده دشت اردبیل، به اثرات احتمالی تغییرات فرونشست زمین بر ۵ محوطه تاریخی اوزریک، قلعه‌بوینی، قطار تپه‌سی، تپراقلو و نیارچمنی واقع در دشت اردبیل می‌پردازد. در تحقیق حاضر جهت بدست آوردن سطح ایستابی آب زیرزمینی از داده‌های ۲۲ چاه پیزومتری در سطح دشت اردبیل با استفاده از روش RBF و برای دست‌یابی به تغییرات فرونشست زمین از تصاویر SAR ماهواره Sentinel1-A به روش تداخ‌سنجی راداری استفاده شده است. بازه زمانی مورد استفاده در این پژوهش، یک بازه ۷ ساله؛ از سال ۱۳۹۵ تا سال ۱۴۰۲ است. نتایج تحقیق نشان داد که سطح آب زیرزمینی در جنوب-شرقی دشت اردبیل وضعیت خطرناکی دارند. به دلیل تمرکز بی‌رویه چاه‌ها در این منطقه و برداشت زیاد آب، باعث افت شدید سطح آب زیرزمینی شده است که تبعات بسیار بدی مانند خشک شدن سفره‌های آب زیرزمینی و فرونشست شدید زمین در این منطقه را به دنبال داشته است. همپوشانی موقعیت محوطه‌های تاریخی با مناطق دارای فرونشست نشان می‌دهد که تپه تپراقلو مربوط به هزاره اول قبل از میلاد دارای فرونشست با نرخ ۲۵۰ میلی‌متر است که در مقایسه با دیگر محوطه‌های تاریخی بیشترین مقدار را به خود اختصاص داده است. تپه اوزریک نیز که در شمال غربی شهر اردبیل قرار دارد با نرخ ۶۹ میلی‌متر فرونشست زمین در رتبه دوم قرار دارد. سایر تپه‌ها نیز علارغم اینکه در شرایط موجود در محدوده فرونشست زمین قرار نگرفته‌اند ولی با توجه به روند پیشروی محدوده-های تحت تاثیر فرونشست، در سال‌های آتی با توجه به مدیریت نامناسب آب‌های زیرزمینی، این محوطه‌های تاریخی نیز درگیر مسئله فرونشست زمین و تخریب بافت تاریخی خواهند شد.

واژگان کلیدی: فرونشست زمین، تداخل‌سنجی راداری، آب زیرزمینی، محوطه‌های تاریخی، دشت اردبیل.

---

* نویسنده مسئول: E-mail: Abedini@uma.ac.ir

مقدمه

یکی از مخاطرات پیش روی دشت‌های کشور، مخاطره فرونشست زمین است. پدیده فرونشست زمین به دلایل مختلف ازجمله برداشت بیش‌ازحد منابع آب زیرزمینی و تغییرات جوّی سبب بروز مشکلات و معضلات فراوان در زمین‌های کشاورزی، جاده‌ها، خطوط انتقال نیرو و انرژی شده است(عابدینی و همکاران،۱۴۰۱). در سال‌های اخیر، یکی از مخاطرات رایج شهری که در بسیاری از شهرهای جهان گسترش یافته است، فرونشست زمین است (چن[۱] و همکاران، ۲۰۲۰). فرونشست زمین پدیده‌ای آرام و نامحسوس و یا نشست ناگهانی سطح زمین بر اثر جابجایی ذرات خاک است (گورابی[۲] و همکاران، ۲۰۲۰). پدیده فرونشست زمین به علل گوناگونی از جمله عوامل طبیعی مانند زلزله، آتشفشان، فعالیت‌های گسلی، فرونشست ناشی از بالا آمدن سطح دریا، انحلال در سنگ، اکسایش، فشردگی رسوبات آلی، توسعه چاله در زمین‌های کارستی یا ناشی از فعالیت‌های انسانی، شامل برداشت بی‌رویه سیالات از زمین نظیر آب، نفت و گاز روی می‌دهد (شفیعی و همکاران، ۱۳۹۹). پیامدهای محیطی پدیده فرونشست زمین مخرب، پرهزینه و ترمیم ناپذیر بوده و شامل ایجاد شکاف روی سطح زمین، آسیب رساندن به سازه‌های انسانی مانند پی ساختمان‌ها، خیابان‌ها، پل‌ها، راه‌ها و خطوط انتقال نیرو و فاضلاب، تخریب سیستم‌های آبیاری و خاک‌های حاصل‌خیز کشاورزی و آسیب به محوطه‌های باستانی است (عابدینی و همکاران، ۱۴۰۲ به نقل از شیرانی و همکاران، ۱۴۰۰).

از روش‌ها و تکنیک‌های متعددی برای مطالعه میزان و نحوه گسترش و رفتار سنجی زمین در رابطه با فرونشست زمین استفاده شده است. یکی از جدیدترین و مؤثرترین روش‌ها تکنیک تداخل‌سنجی تصاویر راداری است. روش‌های هندسی برای پایش گسترده و جدی فرونشست زمین مناسب نیستند. قبل از روش‌های سنجش از دور (RS[۳]) مطالعات فرونشست زمین به مشاهدات میدانی و مدل سازی عددی محدود می شد؛ ولی امروزه تصاویر راداری برای پایش تغییر شکل زمین به‌صورت گسترده کاربرد دارد (جانباز فوتمی و همکاران، ۱۳۹۹). روش‌های سنجش از دور، برعکس داده‌های نقشه‌برداری و نقشه‌های توپوگرافی که در تماس فیزیکی با پدیده‌های زمینی هستند، بدون کوچک‌ترین دخل و تصرفی بر پدیده‌های زمینی بوده و سنجش و ارزیابی تغییرات پدیده‌ها از دور مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در میان روش‌های مبتنی بر تکنیک رادار، روش سری زمانی داده‌ها و تصاویر راداری به‌شدت مورد آزمایش قرار گرفته و به‌عنوان نتایج قابل قبول مورد استفاده قرار می‌گیرد. کاهش زمان دریافت و دقت بالای فضایی تصاویر راداری باعث شده به‌عنوان یک وسیله عمومی و پرکاربرد برای برآورد فرونشست زمین مورد استفاده قرار گیرد (لرما[۴] و همکاران، ۲۰۱۰). برهمین مبنا تکنولوژی ماهواره‌ای را می‌توان به‌عنوان یک راهکار مناسب در جهت برطرف کردن محدودیت‌های عملیات میدانی در نظر گرفت (شکوهی‌نژاد، ۱۳۹۵). استفاده از تصاویر رادار با روزنه مصنوعی[۵] برای تشخیص جابجایی‌های موجود در سطح زمین در حد زیرسانتی‌متر در اواخر دهه ۱۹۸۰ شروع شد که روش تداخل‌سنجی راداری[۶] را معرفی کرد. این روش با توجه به توانایی اندازه‌گیری دقیق جابجایی سطح زمین در یک محدوده گسترده، قدرت تفکیک مکانی بالا و همچنین صرف هزینه و زمان کم‌تر، به ابزاری قدرتمند برای تحلیل حرکات پوسته زمین تبدیل شد (کروستو[۷] و همکاران، ۲۰۱۳).

---

۱. Chen

۲. Goorabi

۳. Remote Sensing

۴. Lerma

۵. Synthetic Aperture radar

۶. Radar Interferometry

۷. Crosetto

پیشینه تحقیق

در ایران فرونشست زمین بیش از ۳ دهه سابقه دارد و حاکمیت شرایط اقلیمی خشک در اغلب نواحی داخلی ایران و تمرکز بهره‌برداری‌های رو به افزایش کشاورزی، مصارف آب شرب و صنعتی از منابع آب زیرزمینی، زیر ساخت لازم را برای رویداد این پدیده فراهم آورده است. براساس آمار اعلام شده در کشور ایران، اثرات سوء ناشی از رخداد فرونشست زمین رقم پایینی نیست و به سرعت در حال ایجاد و گسترش در مناطق مختلف کشور می‌باشد که عدم مدیریت و کنترل به موقع عوامل آن می‌تواند خسارت جانی و مالی جبران‌ناپذیری برجای بگذارد (منتظریون و اصلانی، ۱۳۹۸). برهمین مبنا و به دلیل اهمیت موضوع، در سال‌های اخیر محققان مختلفی در سراسر دنیا پدیده فرونشست زمین را مورد بررسی قرار داده‌اند که می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

تانگ[1] و همکاران (۲۰۱۶)، با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری به مانتیورتینگ و پایش محوطه کاخ تابستانه در پکن پرداخته است. نتایج تحقیق بیانگر فرونشست زمین در محدوده کاخ تابستانه به جهت تغییرات سطح آب زیرزمینی اشاره دارد.

تاپت و سیگنا[2] (۲۰۱۶) با ارائه یک مقاله مروری در زمینه کاربرد تصاویر راداری در باستان‌شناسی، اشاره کردند که تصاویر سنتینل ۱[3] جهت شناسایی سایت و نیز مانیتورینگ تغییرات و دخالت‌ها در محوطه‌های باستانی کابرد به‌سزایی دارد.

دروین[4] و همکاران (۲۰۱۷)، به بررسی شهر تاریخی جبیل در لبنان با استفاده از تصاویر راداری پرداخته است. نتایج یافته‌ها نشان داد که وضوح فضایی حدود نیم متر برای اهداف باستان‌شناسی ضروری است. رویکرد مطالعه چندزمانه در تحقیق امکان ارزیابی حساسیت سایت به عوامل خارجی مانند فرسایش ساحلی، تخریب صخره‌ها و نیز برنامه‌ریزی بهتر برای بهبود سایت برای اهداف گردشگری فراهم کرد.

آلبرتی[5] و همکاران (۲۰۱۷)، به بررسی تغییر شکل‌های سطحی در محوطه باستانی پترا در اردن بین سال‌های ۲۰۰۳ – ۲۰۱۰ با استفاده از تصاویر راداری با قدرت تفکیک متوسط پرداخته‌اند. محوطه پترا در دامنه کوه با سنگ‌های ماسه‌سنگ و تحت تأثیر لغزش می‌باشد. نتایج تحقیق به شناسایی تغییرات با استفاده از روش مطالعه سری زمانی اشاره دارد.

ژانگ[6] و همکاران (۲۰۱۹)، در پژوهشی با استفاده از روش تداخل‌سنجی رادار دهانه ترکیبی (InSAR[7]) و سیستم تقویت مبتنی بر ماهواره (SBAS[8]) و تصاویر رادارست[9] بین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۸ به پایش میزان فرونشست شهر ووهان چین با استفاده از تصاویر راداری پرداختند. نتایج تحقیق بیانگر این است که بیش از ۴ منطقه دارای میزان فرونشست قابل توجهی است که این میزان بین ۲۷/۸ تا ۵۱/۵۶ میلی‌متر متغیر می‌باشد.

---

1 . Tang
2 . Tapete & Cigna
3 . Sentinel-1
4 . Deroin
5 . Alberti
6 . Zhang
7 . Interferometric synthetic aperture radar
8 . Satellite Based Augmentation System
9 . RADARSAT

هیوسین[1] و همکاران (۲۰۲۲)، در کراچی در بخش جنوبی پاکستان، در امتداد ساحل دریای عرب، با استفاده از روش تداخل‌سنجی SAR، به پایش میزان فرونشست زمین پرداختند و به این نتیجه دست یافتند که میزان فرونشست زمین در محدوده بین ۶۷/۶۶ تا ۷۴/۶۸ میلی‌متر در سال بوده و استخراج آب‌های زیرزمینی برای مقاصد تجاری و خانگی علت اصلی فرونشست زمین در منطقه مورد مطالعه است.

کوه بنانی و همکاران (۱۳۹۸)، در پژوهشی به بررسی فرونشست زمین با بهره‌گیری از تداخل‌سنجی راداری در دشت کاشمر و خلیل‌آباد (بین سال‌های ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۷)، پرداختند. نتایج نشان داد این منطقه در بیش‌ترین حالت ۱۱ سانتی‌متر در سال فرونشست دارد و به طور تقریبی هر ۱ متر افت آب زیرزمینی منجر به فرونشست حداکثر ۱۳ سانتی‌متر زمین می‌گردد.

جانباز فوتمی و همکاران (۱۳۹۹)، در استان قزوین به بررسی فرونشست زمین ناشی از تغییرات سطح ایستابی آب زیرزمینی با استفاده از روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری پرداخته‌اند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که میانگین سالانه فرونشست سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۷ در محدوده آبخوان قزوین ۳۹/۹ میلی‌متر و در استان قزوین این مقدار کمتر و حدود ۳۳ میلی‌متر بوده است. همچنین، نتایج نشان داد که بیشینه فرونشست زمین مربوط به شمال بویین زهرا و مرز تاکستان می‌باشد که بیش‌ترین تخلیه آب زیرزمینی و سطح زیر کشت را دارا هستند.

گنجائیان و همکاران (۱۴۰۱)، مخاطره فرونشست زمین را در دشت کبودرآهنگ–فامنین مورد ارزیابی و تحلیل قرار دادند. بر اساس نتایج حاصله، منطقه موردمطالعه با افت شدید منابع آب زیرزمینی مواجه است به‌طوری‌که در بیش‌تری چاه‌های موردمطالعه، میانگین افت سالانه آب زیرزمینی بیش از ۲ متر بوده و همین مسئله سبب شده است تا دشت کبودرآهنگ–فامنین در طی دوره زمانی ۵ ساله (۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰) بین ۲۹ تا ۲۱۶ میلی‌متر فرونشست داشته باشد.

عابدینی و همکاران (۱۴۰۲)، به بررسی فرونشست زمین در شهرستان نمین با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری پرداخته‌اند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که بیش‌ترین میزان فرونشست زمین در بخش مرکزی، شمال‌غرب و شمال‌غرب شهرستان متمرکز است. معیارهای افت سطح آب و کاربری اراضی به‌ترتیب با ضریب وزنی ۰/۱۸۶ و ۰/۱۶۸، مهم‌ترین عوامل دخیل در ایجاد خطر فرونشست زمین در شهرستان نمین می‌باشد.

عابدینی و نظری گزیگ (۱۴۰۳)، اقدام به برر سی میزان فرونشست زمین واثرات آن بر ژئو مورفو سایت‌های گرد شگری شهر توریستی شاندیز خراسان رضوی و نتیجه کارشان نشان داده که در بازه ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۳ (۱۴۰۱–۱۳۹۵) فرونشست ۲۲ سانتی متر در شمال وشرق و غرب و جنوب و مرکز شهر پراکنده می‌باشد و ژئوسایت‌های (قنات کاریزنو، برج تاریخی شـاندیز، پدیده شـاندیز، باغ کلبه دنج، فنجان نما، پارک کوهسـتانی و ...) منطقه را به خطر می‌اندازد واین امر می تواند روی گردشگری منطقه تاثیر منفی بگذارد.

دشت اردبیل با داشتن منابع آب زیرزمینی غنی و خاک مرغوب، در نیم قرن اخیر همواره مورد توجه بوده و محل مناسبی جهت تأمین آب شرب و کشاورزی بوده است. در این دشت قبل از دهه ۵۰ و ۶۰ تعداد چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق محدود و چاه‌های عمیق نیز در مقایسه با چاه‌های دستی یا نیمه‌عمیق انگشت‌شمار بوده‌اند. در نتیجه برداشت از منابع آب زیرزمینی در حد محدود انجام می‌گرفت. با رونق کشاورزی از دهه ۶۰ به بعد و به تبع آن افزایش بی‌رویه برداشت از سفره مذکور از سال ۱۳۶۳، منبع یادشده شروع به افت نموده و تداوم این وضعیت طی سال‌های بعدی باعث بحرانی‌تر شدن این دشت گردید. به‌طوری که در سال ۱۳۶۸ حدود دو سوم دشت اردبیل و سپس در سال ۱۳۸۷ به منظور کنترل روند قسمتی از افت ایجادشده، کل دشت از سوی وزارت نیرو ممنوع اعلام گردید (گزارش سازمان آب منطقه‌ای اردبیل، ۱۳۸۸). این روند احتمال فرونشست را در این دشت شدت بخشیده است به‌خصوص این‌که افزایش جمعیت و تراکم شهرنشینی نیز عاملی دیگر بر شدت‌بخشی این پدیده به‌حساب می‌آید. جهت‌یابی مطالعات فرونشست زمین در کشورهایی که دارای آثار تاریخی

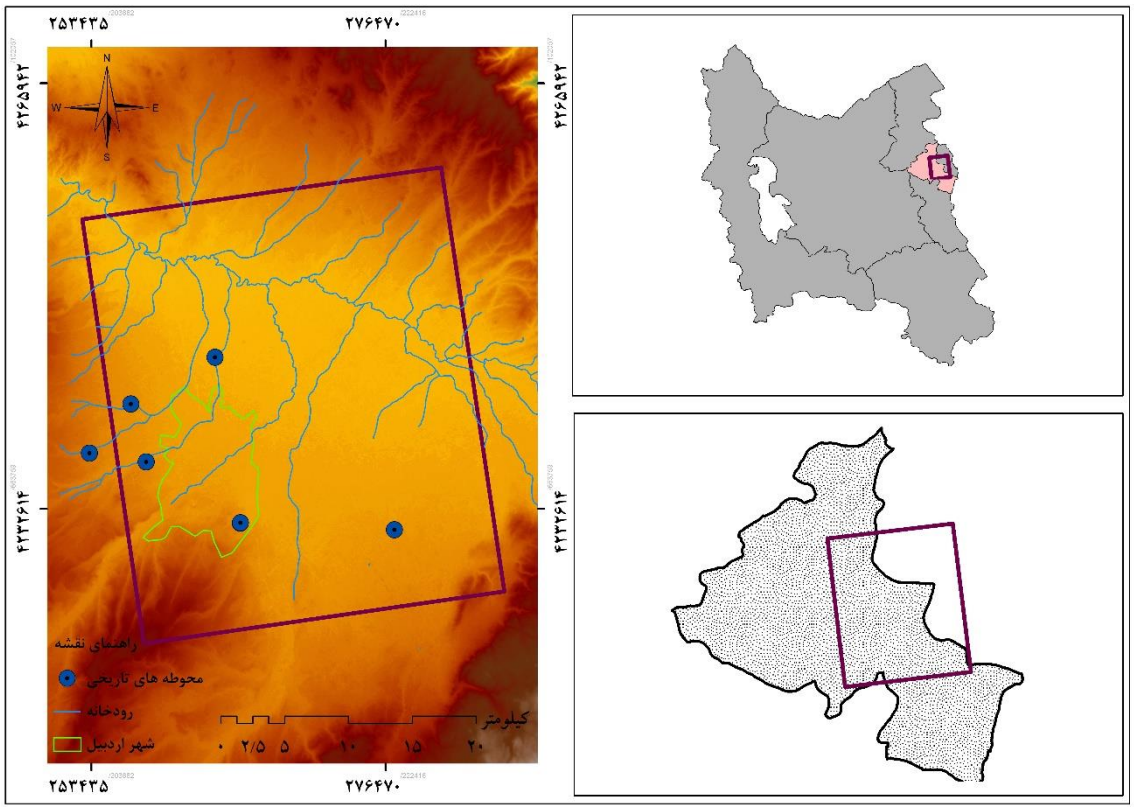
[1] . Hussain

– فرهنگی و تمدن دیرینه هستند، به سمت پایش تغییرات در محوطه‌های تاریخی، جهت حفاظت و نگهداری برای نسل‌های آتی و نیز به‌عنوان یک اثر فرهنگی و جاذب توریستی مطرح است. شهرستان اردبیل با داشتن آثار فرهنگی و تاریخی شاخص، همواره مورد توجه علاقه‌مندان به تمدن و فرهنگ ایران بوده است. لذا در این پژوهش ضمن بررسی نرخ تغییرات فرونشست ناشی از برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی در محدوده دشت اردبیل، به اثرات احتمالی زیان‌بار آن بر محوطه‌های باستانی واقع در این محدوده پرداخته می‌شود.

روش تحقیق

معرفی منطقه مورد مطالعه

دشت اردبیل در بین ارتفاعات باغروداغ در شرق، عنبران در شمال، سبلان در غرب، در مختصات ′۲۸ °۳۸ - ′۵ °۳۸ عرض شمالی و ′۱۰ °۴۸ - ′۴۱ °۴۸ طول شرقی قرار دارد (شکل ۱). ارتفاعات حاشیه‌ای دشت باعث استقلال جغرافیایی این بخش شده و به‌صورت چاله بسته‌ای درآورده است که تنها به سمت شمال‌غربی (مشکین‌شهر و مغان) باز می‌باشد. این دشت از سمت شرق توسط گردنه حیران با استان گیلان و از سمت غربی به وسیله دره بالیخلوچای و گردنه صائین با استان آذربایجان‌شرقی ارتباط مستقیمی پیدا می‌کند. با توجه به اطلاعات نقشه زمین‌شناسی اردبیل، عمده سازندهای محدوده مورد مطالعه آبرفت‌های کواترنری است. از نظر تکتونیکی، پس از شکل‌گیری ارتفاعات حاشیه‌ای دشت بر اثر عملکرد نیروهای درونی، گسل‌های عمیقی شکل می‌گیرد که مهم‌ترین آن‌ها، گسل آستارا در دامنه شرقی و گسل نئور در دامنه غربی ارتفاعات باغروداغ هستند. در سمت غرب دشت نیز ساختارهای خطی متعددی وجود دارند که می‌توان به گسل بالیخلوچای در امتداد رودخانه بالیخلو اشاره نمود. در محدوده توده آتشفشانی سبلان در دامنه شرقی و جنوب شرقی سبلان دو ساختار گسلی وجود دارد (سبحانی، ۱۳۷۸). یکی از مهم‌ترین این ساختارهای خطی، گسلی است که از دره سردابه تا نزدیکی ویلادره با راستای شمالی–جنوبی امتداد یافته است. این گسل‌ها در مجموع به‌صورت پلکانی عمل نموده و باعث بالاآمدگی ارتفاعات باغروداغ و فروافتادگی دشت اردبیل و حوضه رسوبی نئوژن در ضلع جنوب‌غربی دشت اردبیل شده است. تسلط ارتفاعات حاشیه‌ای بر محدوده دشت اردبیل باعث شده است تمامی جریان‌های سطحی دامنه‌های غربی باغروداغ، شرقی و جنوبی سبلان، عنبران و بزغوش، از قبیل: بالیخلوچای، هیرچای و نمین‌چای جزو زیرحوضه‌های رودخانه قره‌سو هستند، به خارج از دشت زهکشی شود.



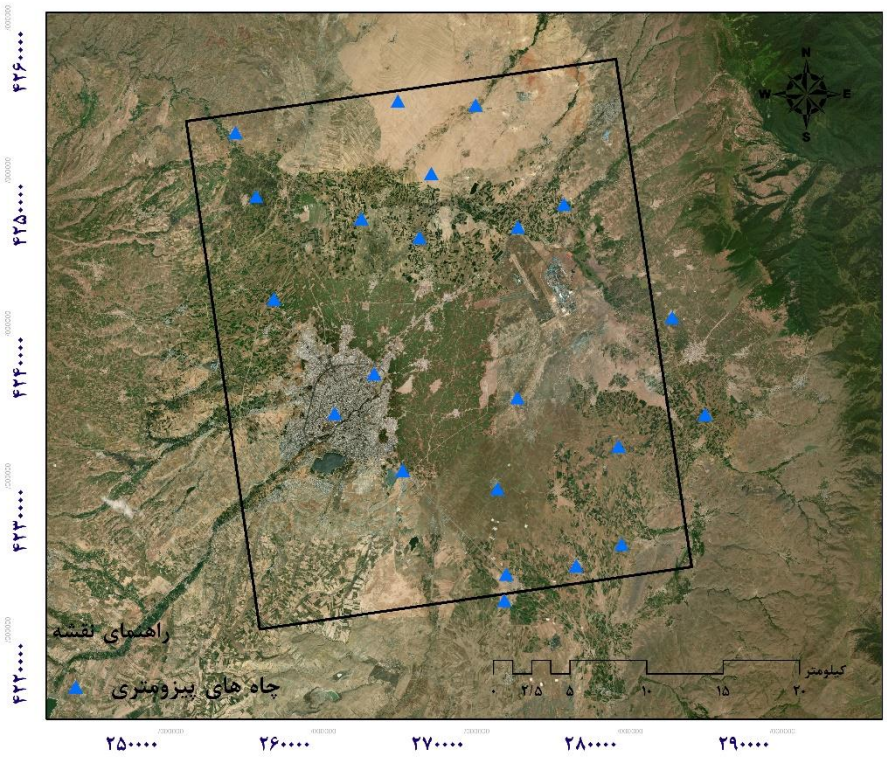
شکل ۱: نقشه معرفی منطقه

داده‌ها و روش مورد استفاده

جهت انجام این پژوهش از داده‌های ۲۲ چاه پیزومتری در سطح دشت اردبیل استفاده شده است (شکل ۲). بازه زمانی مورد استفاده در این پژوهش، یک بازه ۷ ساله از سال ۱۳۹۵ تا سال ۱۴۰۲ است. روش مورد استفاده برای داده‌های این بخش، روش RBF[۱]، به‌عنوان یکی از روش‌های توابع شعاعی است که به‌دلیل داشتن مقدار خطای کمتر و دقت بالا مورد استفاده قرار گرفته است. توابع پایه شعاعی این توانایی را می‌دهند که سطوحی را ایجاد کنیم که هم روندهای عام در آن‌ها درنظر گرفته شده‌اند و همچنین تغییرات محلی نیز در آن‌ها لحاظ شده باشند. این روش در نمونه‌هایی کمک‌کننده خواهد بود که رویه برازش‌شده بر حسب مقادیر نمونه‌برداری شده، به دقت سطح را نمایش نمی‌دهد (آزاد ترابی[۲] و همکاران، ۲۰۱۰). این روش می‌تواند روی داده‌های نویزداری که به‌طور نامنظم در یک منطقه پخش شده‌اند، اعمال‌شده و یک درون‌یابی چندمتغیره هموار روی داده‌ها انجام دهد.

۱. Radial Basis Function

۲. Azad Torabi



شکل ۲: نقشه پراکندگی موقعیت فضایی چاه‌های پیزومتری در بازه ۷ ساله در سطح دشت اردبیل

در تحقیق حاضر برای دست‌یابی به تغییرات فرونشست زمین در دشت اردبیل از تصاویر SAR ماهواره سنتینل ۱ سازمان فضایی اروپا[۱] با فرمت SLC[۲] و با پلاریزان[۳] vv استفاده شده است (جدول ۱). تصاویر مورد استفاده ماهواره سنتینل ۱ (در باند C با طول‌موج ۵/۶ سانتی‌متر) از نظر قدرت تفکیک فضایی، در گروه سنجنده‌های با قدرت تفکیک متوسط قرار دارد. بعد از اخذ تصاویر مربوط به منطقه مورد مطالعه، تصاویر با استفاده از نرم افزار سارپروز[۴] تحت برنامه متلب[۵] مورد پردازش قرار گرفت.

جدول ۱: اطلاعات تصاویر مورد استفاده برای علمیات پردازش تصویر

باند	کیفیت تصاویر	فرمت	Orbit	تاریخ تصویر
C-SAR	5 m x 20 m	IW (Interferometric Wide Swath)	۱۰۱	۰۷-۰۹-۲۰۱۶
C-SAR	5 m x 20 m	IW (Interferometric Wide Swath)	۱۰۱	۱۳-۰۹-۲۰۲۳

۱. Ertex.daac.asf.alaska.edu

۲. Single Looking Complex

۳. Polarization

۴. SARPROZ

۵. Matlab

روش تداخل‌سنجی راداری امکان تولید مدل رقومی ارتفاع زمین[۱] را فراهم می‌آورد که دقت ارتفاعی بهینه آن برای داده باند c با طول‌موج ۵/۶ سانتی‌متر حدود ۵ متر است. این روش قادر است با استفاده از حداقل ۲ تصویر یا تعداد بیشتری از تصاویر راداری تغییرات سطحی رخ داده در زمین را در بازه‌های متفاوت با دقت میلی‌متری آشکارسازی کند. در این روش به کمک مدل رقومی ارتفاعی زمین و تبدیل ارتفاع به فاز، یک تداخل‌نگار مصنوعی تولید می‌شود و از این راه به کمک معکوس اطلاعات DEM، اثر فاز ناشی از توپوگرافی محاسبه و از مقادیر اختلاف فاز حذف می‌شود (شریفی‌کیا، ۱۳۹۱). اختلاف فاز باقی‌مانده به اثر جابجایی سطح و اتمسفر تعلق دارد. با حذف اثر اتمسفر به کمک تصاویر اپتیکی، اختلاف فاز دو تداخل‌نگار فقط بیان‌کننده مقادیر جابجایی سطح زمین خواهد بود.

تکنیک مورد استفاده در این پژوهش روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری (DInSAR[۲]) است (گابرین و همکاران، ۱۹۸۹). به منظور اجرای روش DInSAR بین هر زوج تصویر راداری به خط مبنای زمانی و خط مبنای مکانی توجه داشت. خط مبنای زمانی مناسب، یعنی اختلاف زمانی میان تصاویر کمتر از یک سال باشد. این مسئله به کاهش عدم همبستگی و افزایش همدوسی[۳] فاز بین دو تصویر برمی‌گردد (لیو[۴] و همکاران، ۲۰۱۳). در این روش ابتدا دو تصویر نسبت به هم ثبت و هم‌مرجع می‌شوند. فرآیند یکی‌کردن سیستم مختصات دو تصویرSLC، ثبت کردن[۵] تصویر نامیده می‌شود. مختصات مداری سکو یا سکوها باید به‌طور دقیقی معلوم باشد تا برای رجیستر کردن تصویر ۱ و تصویر ۲ استفاده شوند. هم‌خط کردن غیردقیق در تصویر SAR باعث کاهش همبستگی بین دو سیگنال تداخل‌سنجی می‌شود، زیرا عملکرد همبستگی بر روی پیکسل متناظر در تصویر انجام نمی‌گیرد بنابراین برای به‌دست آوردن سیکل‌های رنگی[۶] با کیفیت بالا باید دو تصویر با دقت زیرپیکسل به یکدیگر ثبت شوند. یکبار که دو تصویر SLC، نسبت به‌هم رجیستر می‌شوند، پروسه ضرب مختلط بر سر تولید تداخل‌سنجی و تصویر همدوسی انجام شده و فاز مصنوعی ایجاد می شود. تداخل‌نگار دربرگیرنده میزان اختلاف فاز بین دو تصویر است. میزان ارتفاع در هر نقطه از منطقه در فاصله زمانی تهیه دو تصویر به‌وسیله بررسی میزان اختلاف فاز تعیین می‌شود. تداخل‌نگار در اثر ضرب مختلط تصویر اصلی (تصویر اول) در مزدوج تصویر وابسته (تصویر دوم) ساخته می‌شود (رابطه ۱).

رابطه (۱)

$$I = MS^*$$
$$\Phi_I = \Phi_M - \Phi_S$$

M: تصویر مختلط اصلی (master)، S: تصویر مختلط دوم (slave)، I: تداخل‌سنجی (Interferogram)، *: مزدوج مختلط، Φ_M: فاز تصویر (master)، Φ_S: فاز تصویر (Slave)، Φ_I: فاز تداخل‌سنجی

یک تداخل‌سنجی از سیکل‌های رنگی تشکیل شده است که هر سیکل رنگی نمایانگر سیکل اختلاف فاز است. دو نقطه‌ای که در یک نوار رنگی قرار دارند (با این شرط که مسیر بین دو نقطه از هیچ رنگ دیگری عبور نکند) به یک اندازه جابه‌جا شده‌اند (رهنمون‌فر، ۱۳۸۴). اگر منطقه‌ی مورد مطالعه دارای تغییرات ارتفاعی صفر باشد. اختلاف فاز در جهت موازی با

---

[1] . Digital Elevation Model (DEM)

[۲] . Differential Interfrometric Synthetic Aperture Radar

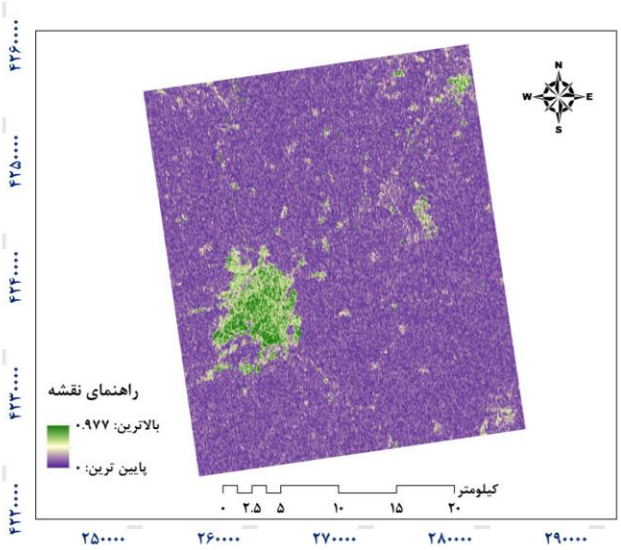
[۳] . Coherency

[۴] . Liu

[۵] . Register

[۶] . Fringe

حرکت سنجنده رادار[۱] ثابت است و در جهت ارسال سیگنال راداری به سمت زمین[۲] به‌طور خطی افزیش می‌یابد و هنگامی که این اختلاف به مقدار 2π رسید دوباره به صفر برمی‌گردد و این روند تکرار می‌شود بنابراین الگوی تداخلی چنین منطقه‌ای شامل سیکل‌های افقی در جهت موازی با حرکت سنجنده رادار است. این پدیده به‌علت وجود خط مبنا در جهت ارسال سیگنال راداری به سمت زمین، به‌وجود آمده است و باید اثر آن حذف شود که به تصحیح زمین مسطح[۳] معروف است. تداخل‌نگار مسطح‌شده حاوی مقداری نویز است که باعث پایین آمدن کیفیت بصری فرینچ‌ها (چرخه رنگ کامل از آبی تا قرمز) می‌شود. عامل به‌وجود آورنده این نویزها می‌تواند مختلف باشد؛ دو عامل اصلی در به‌وجود آمدن آن‌ها تأثیرگذار است. عامل اول مربوط به تفاوت زمانی بین دو تصویر اصلی و وابسته است. گاهی اوقات برخی از تغییرات در منطقه که در بین فاصله زمانی دو تصویر اتفاق می‌افتد جزو عوامل به‌وجودآورنده نویز می‌باشند و عامل دوم خط مبنای مکانی می‌باشد که میزان نویزها در تصاویر ارتباط مستقیمی با خط مبنای مکانی دارد؛ هرچه این میزان بیشتر باشد، شاهد وجود نویزهای بیشتری در تداخل‌نگار هستیم (پریملاثا[۴]، ۲۰۰۱). جهت حذف نویز تداخل‌نگار مسطح و اصلاح‌شده از فیلتر گلدشتاین[۵] استفاده شد. این عمل باعث بهبود کیفیت سیکل‌های رنگی تداخل‌نگار و حذف نویزهایی شده که منشأ آن به‌دلیل عدم همبستگی ناشی از پارامترهای مربوط به خط مبنا است. با انجام فیلتر مورد نظر نقشه همدوسی تهیه شد که پیکسل‌های این نقشه بیانگر درجه همبستگی بین دو سیگنال دریافتی برای تصویر هستند (شکل ۳).



شکل ۳: نقشه همدوسی زوج‌های تداخل‌نگاری

فاز تفاضلی دارای ابهام اندازه‌گیری در تعیین جهت جابجایی سطح زمین به نام پیچش است. با توجه به اینکه تغییرات فاز مضربی از 2π اندازه‌گیری می‌شود و تعداد دقیق چرخه‌های فاز در هر اندازه‌گیری از بین می‌رود، تداخل‌نگار بدون انجام فرآیندی برای بازیافت چرخه‌های ازدست‌رفته به نقشه تغییر شکل تبدیل نمی‌شود. بنابراین لازم است این فاز برای مقادیر بزرگتر از 2π بازیابی شود. برای این عمل الگوریتم‌های مختلفی ایجاد شده است که یکی از این الگوریتم‌ها، الگوریتم

---

۱. Azimuth

۲. Range

۳. Flat Earth

۴. Premelatha

۵. Goldstein

اسنفو[۱] (دانشگاه استنفورد) می‌باشد. فرآیند بازیابی موجب رفع ابهام[۲] فاز می‌شود. به‌منظور تبدیل صحیح فاز بازیابی‌شده به مقادیر ارتفاعی و محاسبات میزان جابجایی سطح زمین، بایستی مرحله پایش مجددا اجرا شود. انجام این کار باعث می‌شود تا خطاهای احتمالی مداری تصحیح و مقدار انحراف فاز محاسبه شود تا از این طریق مقادیر فاز مطلق به‌دست آید. مرحله نهایی که تبدیل فاز مطلق به جابجایی است در واقع مهم‌ترین بخش نامیده می‌شود؛ زیرا خروجی این مرحله میزان جابه‌جایی زمین را نشان می‌دهد، لذا بیشینه‌ی دقت به‌کار گرفته می‌شود. مقادیر تغییرات فاز بیان‌کننده، تغییرات ارتفاعی به اندازه نصف طول‌موج است، با توجه به این‌که طول‌موج تصویربرداری سنجنده ASAR، ۵/۶ سانتی‌متر است. در انجام تبدیل فاز به ارتفاع برای هر پیکسل مقداری برابر با میزان تغییر ارتفاعی آن نقطه برحسب متریک محاسبه می‌شود (الحسینی المدرسی، ۱۳۹۵). شکل ۴ مراحل تداخل‌سنجی تفاضلی راداری جهت دستیابی به نقشه جابه‌جایی با استفاده از تصاویر ماهواره سنتینل ۱ را نشان می‌دهد.

شکل ۴: فلوچارت مراحل تداخل‌سنجی تفاضلی راداری

محوطه‌های تاریخی مورد مطالعه در محدوده دشت اردبیل

انسان بر حسب تصادف در مکانی مستقر نمی‌شود، لذا همواره محوطه‌هایی انتخاب می‌شوند که منابع اولیه بیشتری داشته باشند و امکان بهره‌وری بلندمدت را فراهم نمایند. در این بین دشت اردبیل به جهت شرایط منحصربه‌فرد طبیعی، همواره

۱. Snaphu

۲. Unwrap

مورد توجه انسان‌ها در دوره‌های مختلف تاریخی بوده است. در این تحقیق ۵ مورد از محوطه‌های تاریخی در محدوده دشت اردبیل مورد بررسی قرار گرفته است (جدول ۲). محوطه‌ها تاریخی مورد مطالعه عمدتا مربوط به قبل از اسلام و مربوط به دوره‌های اشکانی و ساسانی است. تنها محوطه تپراقلو به هزاره اول قبل از میلاد برمی‌گردد. محوطه‌های تاریخی مورد-بررسی از نظر اقدامات حفاظتی از شرایط مناسبی برخوردار نیستند و در قسمت‌هایی به‌دلیل حفاری‌های غیرمجاز متحمل آسیب شده است.

جدول ۲: فهرست آثار تاریخی در محدوده مورد مطالعه

ردیف	نام اثر	دوره	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	طول	عرض	ارتفاع از اطراف زمین
۱	اوزریک	اشکانی و ساسانی	۴۸° ۱۲′	۳۸° ۱۶′	۸۰	۷۲	۵
۲	قلعه‌بوینی	اشکانی و ساسانی	۴۸° ۱۳′	۳۸° ۱۴′	۴۰	۳۰	۵
۳	قطار تپه‌سی	اشکانی	۴۸° ۱۹′	۳۸° ۱۲′	۲۰۰	۶۰	۴۰
۴	تپراقلو	هزاره اول ق.ب	۴۸° ۲۷′	۳۸° ۱۱′	۴۰۰	۴۰۰	۵
۵	نیارچمنی	اشکانی	۴۸° ۱۹′	۳۸° ۱۳′	۲۶۰	۱۱۰	۱۷

با توجه به داده‌های سطحی، تاریخ استقرار در قطارتپه‌سی را می‌توان به دوره اشکانی نسبت داد. نام تپه نیز از به‌هم پیوستن تپه‌ها گرفته شده است. این تپه از نوع تپه‌های خاکی و صخره‌ای با طول نسبتا بزرگ که از به‌هم پیوستن چند تپه کوچک به تپه اصلی تشکیل شده است. ابعاد این تپه ۲۰۰×۶۰ متر است. بیشترین ارتفاع آن از سطح زمین‌های اطراف ۴۰ متر می‌باشد که پراکندگی سفال در دامنه تپه نسبت به خود تپه زیاد است. از ویژگی‌های این تپه وجود سفال‌های نخودی و قرمز با خمیره خاکستری و قرمز می‌باشد که سفال‌های ضخیم و خشن در داخل سفال‌ها دیده می‌شود (شکل ۷ – الف). تاریخ استقرار در تپه نیارچمنی را می‌توان به دوره اشکانی منسوب دانست. نام آن برگرفته از دریاچه کناری تپه می‌باشد. این تپه از نوع تپه‌های محوطه‌ای با طول نسبتاً بزرگ می‌باشد که ابعاد آن ۱۱۰×۲۶۰ متر می‌باشد. بیشترین ارتفاع آن از سطح زمین‌های اطراف ۱۷ متر است که پوشش گیاهی تپه از نوع گیاهان خودرو می‌باشد. از ویژگی‌های این تپه وجود سفال‌هایی با خمیره خاکستری–قرمز و با ضخامت ظریف و متوسط که دارای نقش تزئینات داغدار و ساده می‌باشد (شکل ۷– ب). تپه تپراقلو با ابعاد ۴۰۰ متر طول و ۴۰۰ متر عرض با ارتفاع ۵ متر در بخش مرکزی اردبیل در داخل روستای تپراقلو واقع شده است. از سفال‌های جمع‌آوری‌شده می‌توان به سفال خاکستری رنگ عصر آهن و همچنین سفال‌های قرمزرنگ با تزئینات اخرایی اشاره کرد. علاوه‌براین می‌توان از سفال‌های دوران اسلامی نام برد. وجود لایه‌های باستانی از هزاره دوم تا دوران اسلامی در این تپه کاملا مشهود است (شکل ۷– پ). محوطه تاریخی قلعه‌بوینی در حاشیه روستای حسن باروق و یک کیلومتری شهرستان اردبیل قرار گرفته است. با توجه به مواد فرهنگی و داده‌های سطحی این تپه بیانگر آثار دوران ساسانی و اشکانی است. مهم‌ترین شاخصه‌های سفالی این تپه وجود سفال‌های آجری مایل به قرمز و همچنین سفال‌های نخودی ساده می‌توان نام برد (گزارش ثبتی، – ۱۳۸۷، شکل ۷ – ت). اوزریک‌تپه در فاصله ۱ کیلومتری شمال‌شرق روستای صومعه و ۱۵ کیلومتری شهرستان اردبیل واقع شده است. با توجه به داده‌های فرهنگی و سفال‌های سطحی این محوطه بیانگر آثار دوره تاریخی و قرن اول اسلامی می‌باشد (گزارش ثبتی اوزریک‌تپه، ۱۳۸۷).

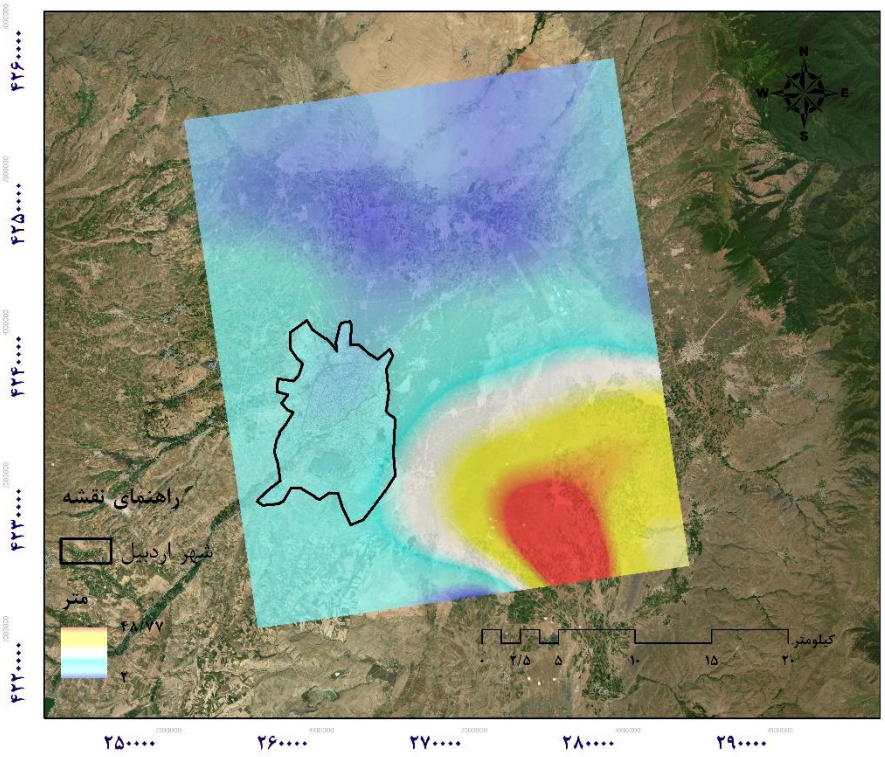
شکل ۷. تصاویر محوطه‌های تاریخی مورد مطالعه: الف: قطارتپه‌سی، ب: تپه نیارچمنی، پ: تپراقلو، ت: تپه قلعه‌بوینی

در اکثر مطالعات مربوط به پدیده فرونشست زمین، نتایج این پدیده در ارتباط با زیرساخت‌های کشور مورد بررسی قرار می‌گیرد. این در حالی است در کشورهایی مثل ایتالیا که دارای زیرساخت‌های فرهنگی غنی هستند پایش تغییرات و دست‌کاری انسان در محدوده محوطه‌های تاریخی با استفاده از تصاویر راداری به طور مداوم صورت می‌گیرد. پایش تغییرات محوطه‌های تاریخی ضمن حفاظت از میراث فرهنگی گذشته کشور، همواره به‌عنوان صنعت گردشگری و توریستی نیز مطرح بوده است و به‌عنوان منبع درآمد برای کشورها مطرح است.

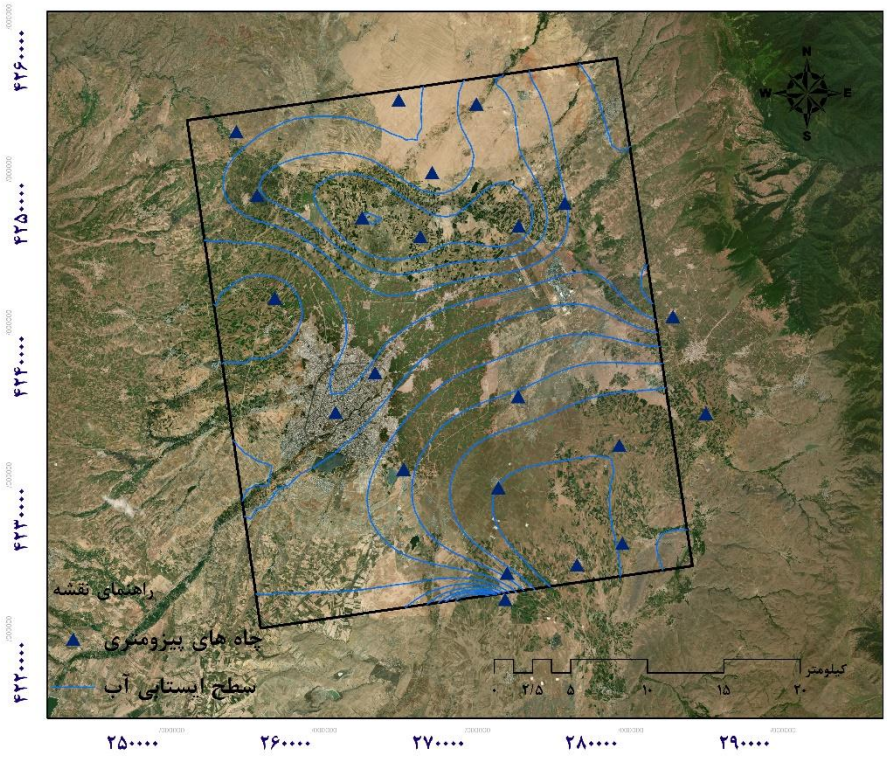
بحث و یافته‌ها

کاهش بارندگی و پدیده خشکسالی منجر به افزایش استفاده از منابع آب‌های زیرزمینی شده است. بیشترین مقدار آب‌های زیرزمینی برای مصارف کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرد. فرونشست ناشی از استخراج بی‌رویه آب‌های زیرزمینی به‌همراه پیامدهای زیست‌محیطی آن در اکثر دشت‌های دنیا به‌چشم می‌خورد (تولمن و پولاند، ۱۹۴۰؛ پولاند و دیویس، ۱۹۶۹؛ گالووی و همکاران، ۱۹۹۸). دشت اردبیل به جهت برداشت‌های بی‌رویه آب‌های زیرزمینی در سال‌های اخیر با مسئله نشست زمین مواجه شده است. نتایج بررسی چاه‌های پیزومتری در محدوده دشت اردبیل در شکل ۵ و ۶ نشان داده شده است. بر اساس نتایج بیشترین مقدار افت سطح آب زیرزمینی به‌میزان ۴۸/۷۷ متر در جنوب‌شرقی دشت اردبیل و کمترین افت سطح آب زیرزمینی به‌میزان ۱/۵۷ متر در شمال‌شرقی دشت اردبیل محاسبه شد. مقدار نوسانات سطح آب چاه‌های پیزومتریک نشان می‌دهد که بیشترین میزان نوسانات در محدوده چاه‌های پیرقوام، آراللوی بزرگ و اراضی خلیل‌آباد بوده است. کمترین نوسان نیز در محدوده چاه‌های آغچه‌چای، نوجه‌ده مشاهده شد. بر اساس کاربری اراضی در محدوده دشت اردبیل، عمده کاربری در نواحی با سطح نوسانات خیلی زیاد آب زیرزمینی، مربوط به زمین‌های تحت اشغال کشاورزی

و باغی در منطقه است. خاک‌های این قسمت دارای بافت سنگین تا خیلی سنگین در محدوده دارای نوسان سطح آب می‌باشد. محدوده با سطح نوسان خیلی کم عمدتا دارای کاربری مرتع، زراعت دیم و در بخش‌هایی کشاورزی – باغی است. در بازه زمانی مورد مطالعه، سطح آب چاه پیزومتری خلیل‌آباد در سال ۱۳۹۵ به‌مقدار ۲/۹۶ متر بود در حالی که در سال ۱۴۰۲ سطح آب در این محدوده به سطح ۴۶/۳ متر رسیده است. در طول ۷ سال سطح آب ۴۳ متر پایین رفته است که نشان‌دهنده وضعیت بحرانی در این بخش است. کمترین نوسان سطح آب نیز برای چاه آغچه‌چای است.

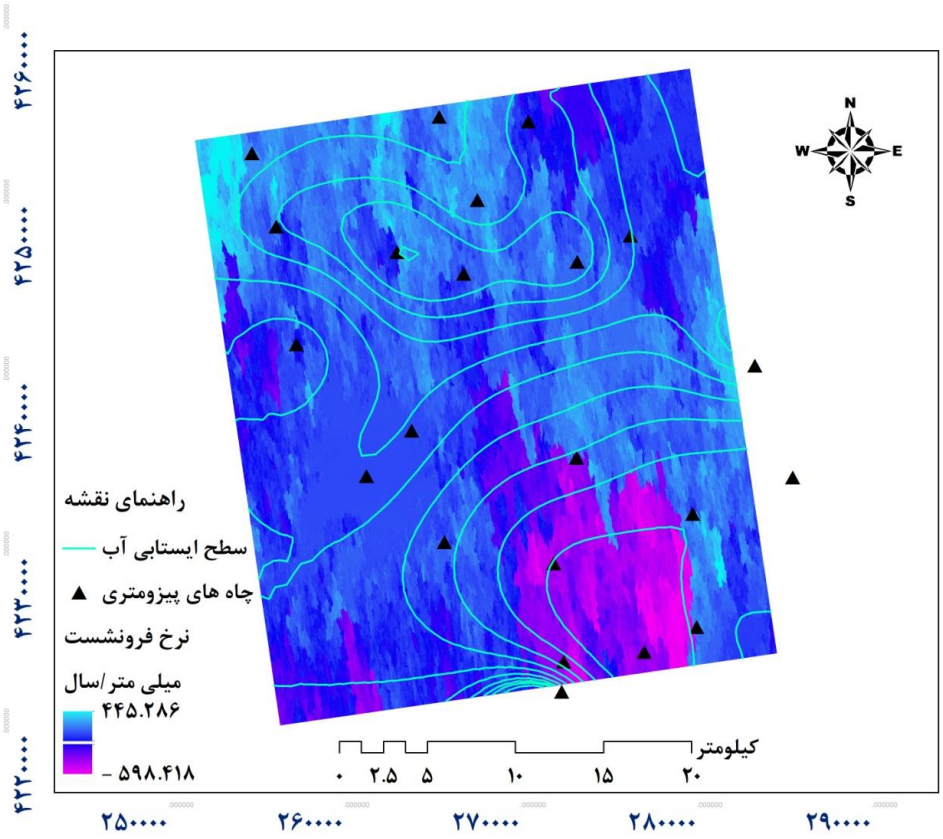


شکل ۵: سطح آب زیرزمینی در محدوده دشت اردبیل



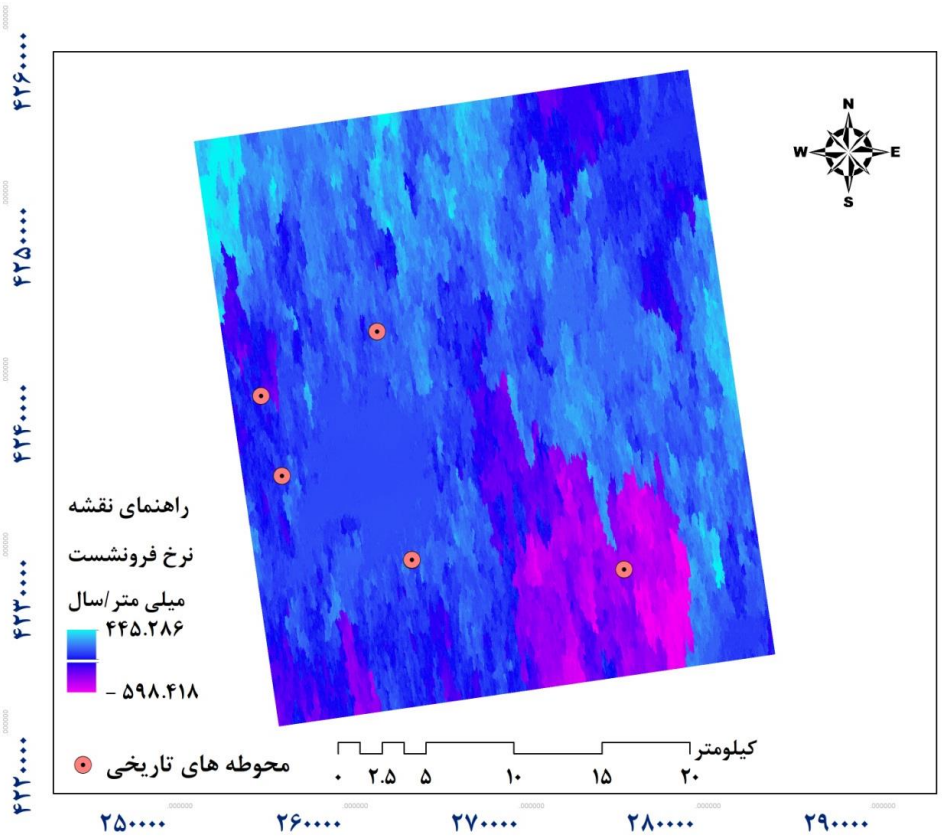
شکل ۶: سطح ایستابی آب زیرزمینی در محدوده دشت اردبیل

افزایش روزافزون بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی به‌ویژه در حوضه‌هایی که با نهشته‌های آبرفتی انباشته شده است، موجب فرونشست زمین شده است. تداوم خشکسالی و افزایش وابستگی به منابع آب زیرزمینی، دامنه نواحی در معرض نشست را به نواحی مرطوب شمال‌غربی نیز گسترش داده است. نتایج پردازش تصاویر راداری در محدوده دشت اردبیل در شکل ۷ آمده است. هم‌پوشانی نقشه فرونشست زمین با لایه سطح آب زیرزمینی صحت پردازش تصاویر راداری را نشان می‌دهد. وضعیت کلی منطقه بیانگر این مطلب است که: بخش‌های جنوب‌شرقی شهر اردبیل و نیز تا حدی در بخش جنوبی به جهت برداشت آب زیرزمینی دچار فرونشست زمین شده است. در مرتبه بعدی نیز بخش‌های غربی شهر اردبیل مستعد فرونشست زمین هست. با توجه به روند عمومی شیب در سطح دشت شمال به جنوب و از غرب به شرق است، زمین‌های کشاورزی بخش جنوبی حوضه و بخش‌های غربی شهر اردبیل با مسئله فرونشست زمین درگیر خواهد بود. بر اساس این نقشه بیشترین مقدار فرونشست زمین در حدود ۵۹۸ میلی‌متر در محدوده چاه خلیل‌آباد محاسبه شده است. در محدوده چاه خلیل‌آباد وضعیت افت سطح آب زیرزمینی به‌شدت بحرانی است و در طول ۷ سال از ۱۳۹۵ تا ۱۴۰۲، ۴۳ متر افت داشته است. نتایج همپوشانی سطح آب زیرزمینی و منحنی‌های هم‌عمق با نتایج تداخل‌سنجی راداری بیانگر دقت یافته‌ها در این بخش است.



شکل ۷: هم‌پوشانی نرخ فرونشست در بازه زمانی مورد مطالعه با داده‌های سطح آب زیرزمینی

دشت اردبیل با داشتن محوطه‌های تاریخی غنی و آثار فرهنگی بسیار، متأسفانه در طی چند سال اخیر به‌دلیل برداشت بی‌رویه از سفره‌های آب زیرزمینی، دچار پدیده فرونشست زمین شده است. در این مطالعه ۵ محوطه تاریخی اوزریک، قلعه‌بوینی، قطار تپه‌سی، تپراقلو و نیارچمنی در محدوده دشت اردبیل مورد مطالعه قرار گرفته است. هم‌پوشانی موقعیت محوطه‌های تاریخی با نقشه فرونشست زمین نشان می‌دهد که در مرتبه اول تپه تپراقلو (هزاره اول قبل از میلاد) در محدوده فرونشست زمین با نرخ ۲۵۰ میلی‌متر قرار دارد. در مرتبه دوم اوزریک تپه‌سی (اشکانیان و ساسانیان) در محدوده فرونشست زمین با نرخ ۶۹ میلی‌متر قرار گرفته است. در مرتبه‌های بعدی نیز به‌ترتیب قلعه‌بوینی با نرخ ۲۷ میلی‌متر، نیار تپه‌سی با نرخ ۴۶ میلی‌متر و قطار تپه‌سی با نرخ ۴۹ میلی‌متر در محدوده مستعد فرونشست زمین قرار گرفته‌اند (شکل ۸).



شکل ۸: هم‌پوشانی نرخ فرونشست با موقعیت محوطه‌های تاریخی در دشت اردبیل

.

کنش‌ها و واکنش‌های ژئومورفولوژیکی

حفاظت و مرمت در محوطه‌های تاریخی همواره مورد توجه مسئولین این امر بوده است. عمده دست‌کاری در محوطه‌های تاریخی، حفاری‌های غیرمجاز در اطراف آن‌ها بوده است. دشت اردبیل در مقابل دشت‌های داخلی و نیز اکثر دشت‌های ایران جزو باثبات‌ترین دشت‌ها بوده است ولی در طی سال‌های اخیر به جهت کاهش نزولات جوی و افزایش برداشت از سفره‌های آب زیرزمینی، تراز آب در محدوده دشت به‌شدت پایین آمده است و مردم و مسئولین منطقه را با چالش جدی روبه‌رو کرده است. به‌دلیل افت سطح آب زیرزمینی در سال‌های اخیر، دشت اردبیل در فهرست دشت‌های ممنوعه از جهت حفر چاه‌های جدید قرار گرفته است. بر اساس نقشه پهنه‌بندی تهیه شده توسط (امیر احمدی و همکاران، ۱۳۹۲) ۱۴درصد از مساحت دشت در پهنه خیلی زیاد افت، ۲۹/۷۳ درصد در پهنه زیاد، ۲۶/۶ درصد در پهنه متوسط، ۱۷/۳۸ درصد در پهنه‌کم و ۱۲/۲۹ درصد در پهنه خیلی‌کم افت قرار می‌گیرد. بعلاوه نتایج مطالعات عابدینی(۱۳۹۵) در محدوده دشت اردبیل نشان داده که به ترتیب ۲۴۴/۲۹ و ۳۷۰/۵۹ کیلومترمربع از مساحت این دشت، در طبقات بسیار پرخطر و پرخطر قرار دارند. نتایج تحقیقات بعمل آمده نیز در تایید نتایج این تحقیق و افت شدید سطح آب زیرزمینی دشت اردبیلی است. از طرفی نتایج مطالعات صورت‌گرفته در محدوده دشت اردبیل، تأکید بر خطر فرونشست زمین در طی سال‌های آتی بود که با استفاده از پردازش تصاویر راداری این مطلب تأیید شد. با توجه به استقرار اکثر محوطه‌های تاریخی بر سطح مخروط‌افکنه‌ها و دشت‌های کشور و این‌که این محوطه‌های تاریخی بیانگر هویت و تمدن مردم منطقه و ایران را می‌رساند، لذا پدیده فرونشست زمین تهدید جدی به تخریب معماری و محوطه‌ها خواهد شد و حفظ و مرمت محوطه‌های در معرض این مسئله عملا غیرممکن خواهد شد. با توجه به این‌که تخریب محوطه‌های تاریخی، چه آن‌هایی که کاوش شده و در معرض

دید قرار گرفته است و چه آن‌هایی که کاوش نشده و در زیر رسوبات دشت مدفون هستند صورت می‌گیرد، تنها طریق ممکن جهت حفظ این میراث باارزش، مدیریت صحیح منابع و تغییر الگوی صحیح مصرف در سطح دشت‌ها می‌باشد.

نتیجه‌گیری

نظارت بر پدیده تغییر شکل ساختمان‌ها و محوطه‌های تاریخی برای حفاظت از میراث فرهنگی و تاریخی یک ملت همواره اهمیت کلیدی دارد. در چندسال پیش مطالعه و پایش مداوم تغییرات رخداده در محوطه‌های تاریخی چالش اساسی برای مسئولان فرهنگی کشور بوده است. ولی با ورود تصاویر راداری و تکنیک‌های پردازش تصویری امکان پایش تغییرات اعم از دخل و تصرف‌های غیرمجاز و نیز بهره‌برداری غیراصولی از منابع زمینی که اثرات منفی آن متوجه محوطه‌های تاریخی نیز می‌شود، امکان‌پذیر شده است. به‌کارگیری تکنیک تداخل سنجی راداری در این تحقیق، ظرفیت مناسبی از قابلیت‌های آن برای تعیین میزان و دامنه فرونشست برای بحث مرمت آثار در محدوده محوطه‌های تاریخی معرفی کرد. در این تحقیق با استفاده از داده‌های سطح آب زیرزمینی و تصاویر راداری تغییرات سطح زمین و اثرات آن بر محوطه‌های باستانی در محدوده دشت اردبیل مورد مطالعه قرار گرفت. یافته‌های حاصل از به‌کارگیری این روش میزان فرونشست زمین بسیار بالایی را برای دشت اردبیل معرفی کرد (۵۹۸ میلی‌متر طی بازه ۷ ساله). نواحی جنوب‌شرقی دشت اردبیل به‌دلیل بهره‌برداری غیراصولی و عدم مدیریت صحیح، وضعیت بحرانی در طی سال‌های اخیر پیدا کرده است. هم‌پوشانی موقعیت محوطه‌های تاریخی با نقشه فرونشست زمین نشان داد که به‌ترتیب تپه تپراقلو با نرخ ۲۵۰ میلی‌متر و اوزریک تپه‌سی با نرخ ۶۹ میلی‌متر در محدوده فرونشست زمین قرار دارد. سه محوطه تاریخی قلعه‌بوینی، نیار تپه‌سی و قطار تپه‌سی نیز به ترتیب با نرخ ۲۷ میلی‌متر، ۴۶ میلی‌متر و ۴۹ میلی‌متر در محدوده مستعد فرونشست زمین قرار گرفته‌اند. عامل فرونشست زمین در دشت اردبیل با توجه به مطالعات صورت‌گرفته در مورد تغییرات سطح آب زیرزمینی، بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی جهت کشت محصولات کشاورزی و فراهم‌آوری امکان فشردگی لایه‌های زیرین است. محوطه‌های تاریخی مورد مطالعه عموما منطبق با کانون‌های حداکثر فرونشست زمین و منحنی بیشترین افت سطح آب زیرزمینی است. در نهایت می‌توان گفت که نتایج تحقیق بیانگر درگیر کردن محوطه‌های تاریخی در محدوده فرونشست زمین می‌باشد. به‌دلیل تداوم مسئله فرونشست زمین در دشت اردبیل، تداوم پایش راداری و نیز کنترل زمینی (GPS) در محدوده محوطه‌های تاریخی، ضمن فراهم آوردن امکان نرخ تغییرات، ابزار مناسبی جهت سنجش دقت یافته‌ها و استفاده گسترده این روش برای پایش و مدیریت تغییرات در محوطه‌ها و مکان‌های تاریخی فراهم می‌آورد.

منابع

- امیراحمدی، الف.ق.، معالی اهری، ن.، احمدی، ط.، ۱۳۹۲. تعیین مناطق فرونشست احتمالی دشت اردبیل با استفاده از GIS، نشریه علمی و پژوهشی جغرافیا و برنامه‌ریزی، سال ۱۷، شماره ۴۶، صص ۲۳-۱.
- الحسینی المدرسی، س.ع.، حاتمی، ج.، و سرکارگراردکانی، ع.، ۱۳۹۵. محاسبه خصوصیات فیزیکی برف با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی تفاضلی راداری و تصاویر سنجنده ترا سارایکس باند (TerraSAR-X) و مودیس (MODIS)، مجله سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، سال هفتم، شماره ۲، صص ۷۵-۵۹.
- جانباز فوتمی، م.، خلقی، م.، عبده کلاهچی، ع.الف.، و روستایی، م.الف.، ۱۳۹۹. بررسی فرونشست زمین ناشی از تغییرات سطح ایستابی آب زیرزمینی با استفاده از روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری: مطالعه موردی استان قزوین، مجله تحقیقات منابع آب ایران، سال شانزدهم، شماره ۳، صص ۱۴۷-۱۳۳.

- رهنمون‌فر، م.، سراجیان، م.ر.، توکلی، الف.، و رحمتی، م.، ۱۳۸۴. استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری در مطالعه زلزله بم و زلزله *IZMIT* در ترکیه، همایش ژئوماتیک ۸۴، سازمان نقشه‌برداری.
- سبحانی، ف.، ۱۳۷۸. بررسی آتشفشان سبلان با توجه خاص بر روند تشکیل منابع زمین گرمایی مشکین شهر- استان اردبیل، فصل نامه علوم زمین، سال هشتم، شماره ۳۲.
- شریفی کیا، م.، ۱۳۹۱. تعیین میزان و دامنه فرونشست زمین به کمک روش تداخل سنجی راداری (*D-InSAR*) در دشت نوق – بهرمان، مجله مدرس علوم انسانی- برنامه ریزی و آمایش فضا، شماره ۳، صص ۷۷-۵۵.
- شکوهی‌نژاد، الف.، ۱۳۹۵. تعیین میدان جابجایی ناشی از زلزله با استفاده از تصاویر رادار (زلزله بم)، پایان‌نامه برای دریافت درجهٔ کارشناسی ارشد، استاد راهنما حمیدرضا نانکلی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شاهرود، دانشکدهٔ مهندسی عمران.
- شفیعی، ن.، مختاری، ل.گ.، امیر احمدی، الف.ق، و زندی، ر.، ۱۳۹۹. بررسی فرونشست آبخوان دشت نورآباد با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمّی، دوره ۸، شماره ۴، صص ۱۱۱-۹۳.
- شیرانی، ک.، پسندی، م.، و ابراهیمی، ب.، ۱۴۰۰. بررسی فرونشست زمین در دشت نجف‌آباد اصفهان با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی تفاضلی راداری، مجله علوم آب و خاک، جلد ۲۵، شماره ۱، صص ۱۲۷-۱.
- عابدینی، م.، آقایاری، ل.، و پیروزی، الف.، ۱۴۰۲. ارزیابی و پهنه‌بندی فرونشست شهرستان نمین با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری و تکنیک چندمعیاره آراس، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال دوازدهم، شماره ۲، صص ۵۸-۴۰.
- عابدینی، م.، آقایاری، ل.، و پیروزی، الف.، ۱۴۰۲. ارزیابی و پهنه‌بندی فرونشست شهرستان نمین با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری و تکنیک چند معیاره آراس، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمّی، سال شانزدهم، شماره ۲، صص ۵۸-۴۰.
- عابدینی،م،۱۳۹۵. مبانی فرونشست زمین، تالیف، انتشارات دانشگاه محقق اردبیلی، چاپ اول، ۲۳. صفحه.
- عابدینی، م.،نظری‌گزیک، ز.، ۱۴۰۳. تجزیه و تحلیل میزان فرونشست زمین واثرات آن بر ژئو مورفوسایت‌های گردشگری شهر توریستی شاندیز خراسان رضوی، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمّی، دوره۱۲، شماره۴، صص ۱۹۲-۱۷۱.
- کوه بنانی، ح.، یزدانی، م. ر، و حسینی، ک.، ۱۳۹۸. پهنه‌بندی گسترهٔ خطر فرونشست زمین با بهره‌گیری از تداخل‌سنجی راداری (مطالعه موردی: دشت کاشمر و خلیل‌آباد)، مدیریت بیابان، دوره ۷، شماره ۱۳، صص ۷۶-۶۵.
- گنجائیان، ح.، منبری، ف.، قاسمی، الف.، و نصرتی، م.، ۱۴۰۱. ارزیابی و تحلیل مخاطره فرونشست در دشت کبودرآهنگ- فامنین، مجله اطلاعات جغرافیایی سپهر، شماره ۱۲۴، صص۸۶-۷۵.
- منتظریون، م.، و اصلانی، ف.، ۱۳۹۸. ارزیابی خطر فرونشست با بکارگیری سیستم اطلاعات جغرافیایی در پهنه استان‌های تهران و البرز، دانش پیشگیری و مدیریت بحران، دوره ۹، شماره ۱، صص ۱۳-۱.
- *Azad Torabi, M.. Siah sarani, A., & Eftekhary, R., 2010. A comprehensive training geostatistical analysis software Arc Gis, Geographical Organization of the Armed Forces. Tehran.*
- *Alberti, S., Ferretti, A., Leoni, G., Margottini, C., & Spizzichino, D., 2017. Surface deformation data in the archaeological site of Petra from medium-resolution satellite radar images and SqueeSARTM algorithm, Journal of Cultural Heritage. 1-11.*
- *Crosetto, M., Gili, J.A., Monserrat, O., Cuevas-González, M., Corominas, J., & Serral, D,. 2013. Interferometric SAR monitoring of the Vallcebre landslide (Spain) using corner reflectors, Natural Hazards and Earth System Sciences, Vol. 13, No 4, 923-933.*
- *Chen, B., Gong, H., Chen, Y., Li, X., Zhou, CH., Lei, K., Zhu, L., Duan, L., & Zhao, X., 2020. Land subsidence and its relation with groundwater aquifers in Beijing Plain of China, Science of the Total Environment, Volume 735, 139111.*

- *Deroin, J.P., KHeir, R.B., & Abdallah, C., 2017. Geoarchaeological remote sensing survey for cultural heritage management. Case study from Byblos (Jbail, Lebanon), Journal of Cultural Heritage. 23, 37–43.*
- *Gabriel, A.K; Goldstein, R.M, Zebker, H.A., 1989. Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry, Journal of Geophysical Research, 94:9183-9191.*
- *Goorabi, A., Karimi, M., Yamani, M., & Perissin, D., 2020. Land subsidence in Isfahan metropolitan and its relationship with geological and geomorphological settings revealed by Sentinel-1A InSAR observations, Journal of Arid Environments,181.*
- *Hussain, M.A., Chen, Z., Shoaib, M., Ullah Shah, S,. Khan, J., & Ying, Z., 2022. Sentinel-1A for monitoring land subsidence of coastal city of Pakistan using Persistent Scatterers In-SAR technique.,Sci Rep, 12, 5294.*
- *Lerma, J.L., Navarro, S., Cabrelles, M., & Villaverde, V., 2010. Terrestrial laser scanning and close range photogrammetry for 3D archaeological documentation: the Upper Palaeolithic Cave of Parpalló as a case study. J. Archaeol. Sci. 37, 499-507.*
- *Liu, P., Li, Z., Hoeya, T., Kincal, C., Zhang, J., Zeng, Q., & Muller, J.P, 2013. Using advanced InSAR time series techniques to monitor landslide movements in Badong of the three Gordes Region, China, International Journal of Applied Earth Obseservation and Geoinformation, 21, 253-264.*
- *Premelatha, M., 2001. Quality assessment of interferomefrically derived digital elevation models, Ph.D Thesis, University of Nottingham, Nottingham.*
- *Tang, P., Chen, F., Zhu, X., & Zhou, W., 2016. Monitoring Cultural Heritage Sites with Advanced Multi-Temporal InSAR Technique: The Case Study of the Summer Palace, JOURNAL OF Remote Sens. 8(5), 432.*
- *Tapete, D., & Cigna, F., 2016. Trends and perspectives of space-borne SAR remote sensing for archaeological landscape and cultural heritage applications, Journal of Archaeological Science: Reports. 14, 716-726.*