



فصلنامه زمین ساخت

زمستان ۱۴۰۱، سال ششم، شماره ۲۴

doi 10.22077/JT.2024.6906.1165

زمین شناسی و ارزیابی تغییرات ارتفاعی در آبخوان دشت کهریز با استفاده از روش تداخل-سنجی راداری

لعیا جمشیدی تر کمانی مولا^۱، اکرم علیزاده^۲، فریبا همتی^{۳*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۲- دانشیار، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۳- نویسنده مسئول: گروه آموزشی جغرافیا، دانشگاه فرهنگیان، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۲۱

چکیده:

پدیده فرونشست از مخاطرات طبیعی بوده که دارای حرکت کند بوده و خسارات مالی و به ندرت تلفات جانی را در پی دارد. در این پژوهش به منظور مطالعه میزان تغییرات مورفولوژیکی برای آبخوان دشت کهریز از تکنیک تداخل سنجی راداری استفاده شده است و میزان فرونشست آبخوان دشت کهریز با استفاده از تصویر ماهواره سنتینل ۱ بین سالهای ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۳ مورد بررسی قرار گرفته است. این آبخوان در غرب فروافتادگی دریاچه ارومیه واقع شده است که دارای لیتولوژی غالب آهکی می باشد. ساختار زمین شناسی شکل گرفته در منطقه شامل لایه های شیب دار و آثار عملکرد گسل ها می باشد. در مقاطع میکروسکوپی تهیه شده از سنگ های منطقه، درزه های مزدوج، جابجایی و برش خوردگی و پدیده های چرخشی همزمان با تکنیک مشاهده می شوند که دلالت بر نقش تکنیک در شکل گیری ساختارهای موجود در منطقه را دارند. با توجه به فرنیچ های بدست آمده با استفاده از پردازش تصاویر راداری، آبخوان دشت کهریز در بازه زمانی مورد مطالعه هیچگونه فرونشستی مشاهده نشده است و میزان بالا آمدگی بین ۰/۳۴ تا ۱/۵۱ متر می باشد. دگرشکلی منطقه، ناشی از تغییر شکل های زمینی مثل زلزله یا فعالیت های تکتونیک، می تواند عاملی برای برخاستگی قابل توجه باشد.

واژه های کلیدی: فرونشست زمین، ساختار، تداخل سنجی راداری، آبخوان دشت کهریز.

* ایمیل: f.hemmati@cfu.ac.ir

تلفن تماس: ۰۹۱۸۸۳۴۰۵۰۳

Geological Assessment and Land Subsidence in the Kahrez Plain Aquifer Using Interferometric Radar Techniques

Laya Jamshidi Torkamani Mola¹, Akram Alizadeh², Fariba Hemmati³

1. M.Sc. student, Department of Geology, Faculty of Science, Urmia University, Urmia, Iran.
2. Associate Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, Urmia University, Urmia, Iran.
3. Corresponding author: Department of Geography Education, Farhangian University, Tehran, Iran.

Abstract

Land subsidence is a natural hazard characterized by gradual movement, resulting in financial losses and, occasionally, loss of life. This research employs interferometric radar techniques to study morphological changes in the Kahrez Plain aquifer. The extent of land subsidence in the Kahrez Plain aquifer is investigated using Sentinel-1 satellite imagery from 2014 to 2023. This aquifer is situated in the western subsidence of Lake Urmia and is predominantly composed of limestone lithology. The geological structure in the area comprises inclined layers and the effects of fault activity. Microscopic examinations of rocks from the region reveal dual fractures, displacement, collision, and simultaneous rotational phenomena, indicating the role of tectonics in shaping the existing structures in the area. According to the interferometric analysis results, no land subsidence has been observed in the Kahrez Plain aquifer during the study period, and the uplift ranges from 0.34 to 1.51 meters. Regional deformation, resulting from changes in landforms such as earthquakes or tectonic activities, could be a significant factor contributing to the notable uplift.

Keywords: Land subsidence, structure, interferometry radar, Kahriz plain aquifer.

مقدمه

آب‌های سطحی داشته باشد و همچنین موجب تحمیل خسارت بر تأسیسات زیربنایی شود. برآورد نرخ فرونشست نقش به‌سزایی در مدیریت و کنترل این پدیده خواهد داشت و ضروری است تا اقداماتی جهت جلوگیری از مشکلات ناشی از وقوع خطر فرونشست زمین صورت پذیرد. بر این اساس هدف از پژوهش حاضر ارزیابی فرونشست آبخوان دشت کهریز با روش تداخل‌سنجی راداری و ارتباط آن با ساختارهای زمین‌شناسی است. نتایج بدست آمده از این مطالعه می‌تواند مورد توجه مدیران سازمان و ادارت اجرایی و برنامه‌ریزان منابع اراضی و خاک قرار گیرد.

آبخوان دشت کهریز در شمال‌غرب ایران و در استان آذربایجان‌غربی بین طول جغرافیایی تا عرض جغرافیایی تا واقع شده است. منطقه مورد مطالعه از شمال به کوه‌های بایداغ - قره باغ و اوچ تپه، از جنوب به کوه آغداغ، از شرق به دریاچه ارومیه و از غرب به کوه‌های اوغام و قره داغ محدود می‌شود. میانگین ارتفاع منطقه مورد مطالعه از سطح دریا به طور متوسط ۱۳۶۴ می‌باشد (شکل ۱).

دخان و همکاران^۴ (۲۰۲۳) به بررسی فرونشست زمین در شهر پیشاور پاکستان با استفاده از تکنیک رادار دیافراگم مصنوعی تداخل سنتزی (InSAR) پرداختند. این مطالعه نشان‌دهنده فرونشست تا ۳/۲۳ سانتی متر از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۹ است.

جوکو وی دودو و همکاران^۵ (۲۰۱۹)، به تجزیه و تحلیل نرخ فرونشست زمین در منطقه شهری جاتاکارا با تکنیک D-InSAR پرداختند و نتیجه گرفتند که نرخ متوسط فرونشست زمین در شهرستان تنگرنگ و بخش جنوبی آن ۲-۳ سانتی‌متر در سال رخ داده است. ژائو و همکاران^۶ (۲۰۲۳)، به بررسی ارزیابی خطر فرونشست زمین در شیان چین با استفاده از تصاویر راداری و اپتیکی پرداختند و نتیجه گرفتند که فرونشست زمین با استفاده از یک ماتریس ریسک که نشست تفاضلی، شکاف‌های زمین و نتایج طبقه‌بندی کاربری زمین را ادغام می‌کند، ارزیابی می‌شود.

اصغری سراسکانرود و همکاران (۱۳۹۹)، میزان فرونشست

زمین‌شناسان ساختاری، واژه ساخت را برای قسمتی از زمین که به وسیله دگر شکلی بر اثر عملکرد نیرو در سطح یا درون پوسته زمین تغییر شکل یا حالت داده است، به کار می‌برند. فرآیندهای تکتونیک سبب وقوع رخدادهای طبیعی مانند زلزله، آتشفشان و ... می‌شوند که به دنبال آنها، پدیده‌هایی نظیر: زمین‌لغزش، فرونشست و سایر تغییرات مورفولوژیکی حاصل می‌شوند. پدیده فرونشست از مخاطرات طبیعی بوده که خسارت مالی و به ندرت تلفات جانی دارد. ایجاد فروچاله، درز و شکاف، اختلال در بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی، آلودگی آب آبخوان‌ها، آسیب رساندن به سازه‌های دست‌ساز بشر مانند ساختمان‌ها، خیابان‌ها، پل‌ها و خطوط انتقال نیرو از جمله پیامدهای محیطی پدیده فرونشست می‌باشند (هافمن و همکاران ۲۰۰۱ و ان ۲۰۱۵). فرونشست زمین، به عنوان یکی از مخاطرات محیطی ژئومورفیک، روند تدریجی و آرامی داشته که در بسیاری از کشورهای جهان در حال وقوع و رخ دادن است. این پدیده در صورت عدم مدیریت صحیح، می‌تواند خسارت جبران‌ناپذیری را برای مناطق مبتلا به ایجاد نماید (UN-Water, ۲۰۲۱). پدیده فرونشست با ایجاد تغییر در وضعیت توپوگرافی زمین می‌تواند سبب بروز تغییرات چشمگیری در هیدرولوژی منطقه شود (چن و همکاران^۳، ۲۰۱۰، آزادی شیکوه و همکاران، ۱۳۹۹). ایران نیز به عنوان یکی از کشورهای که چندین دهه با انواع مخاطرات محیطی به خصوص فرونشست زمین روبروست، احتمالاً در آینده‌ای نه چندان دور متأثر از خسارات مستقیم و غیرمستقیم این پدیده از جمله صدمات به اراضی کشاورزی، ساختمان‌ها، راه‌ها، پل‌ها، خطوط لوله و غیره مواجه خواهد شد (آل شیخ و همکاران، ۱۴۰۱).

منطقه آبخوان دشت کهریز، از جمله مناطق پرخطر به لحاظ پدیده فرونشست بوده و لذا این مطالعه به بررسی نقش ساختارهای تکتونیک و علل و عوامل مؤثر بر فرونشست می‌پردازد. فرونشست می‌تواند اثرات مخربی روی کیفیت منابع آبی و الگوی جریان

4. D. Khan et al.
5. Joko Widodo et al.
6. Zhao et al.

1. Hoffman et al.
2. An
3. Chen et al.



دشت شهریار را با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری و پارامترهای آب‌های زیرزمینی و کاربری اراضی برآورد کردند و نشان داد که در طی سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰، ۷ متر افت آب زیرزمینی و ۱۱ سانتی‌متر فرونشست برای مناطق مسکونی در این دشت رخ داده است. حسین‌زاده و همکاران (۱۴۰۱)، به تحلیل فضایی فرونشست سطح زمین در دشت مرکزی شهر قاین با استفاده از تداخل سنجی راداری پرداختند و نتیجه گرفته شد که فرونشست از ۲/۶ سانتی‌متر در سال ۲۰۱۷ به ۷/۸ سانتی‌متر در سال ۲۰۲۰ رسیده است. همتی و بهرامی (۱۴۰۱) در پژوهش خود میزان جابجایی ایجاد شده در پوسته زمین در اثر زلزله سرپل‌ذهاب با استفاده از روش تداخل سنجی راداری را مورد بررسی قرار دادند، که نتایج به دست آمده از تکنیک تداخل سنجی راداری در حوضه آبریز از گله ۰/۰۹ متر فرونشست و ۰/۳۰ متر بالا آمدگی را نشان می‌دهد.

زمین‌شناسی منطقه

کهن‌ترین واحد سنگی منطقه، مجموعه‌ای از آمفیولیت‌ها، گابروهای دگرگونه، دایک‌های ورقه‌ای و پریدوتیت‌های دگرگونه می‌باشد. این مجموعه جزئی از مجموعه افیولیتی قدیمی (پرکامبرین) است که در شرق ترکیه رخنمون گسترده‌تری دارد. پس از آن، سازندهای پالئوزوئیک از جمله: باروت (با تناوبی از سنگ قرمز ارغوانی، دولومیت، مقدار کمی سنگ‌های آتشفشانی بازالتی)، لالون (شیل، سیلت‌های شیلی، ماسه‌سنگ به رنگ‌های قرمز و ارغوانی)، زایگون (ماسه‌سنگ به رنگ‌های قرمز و ارغوانی) و میلا (کوارتزیت زیرین و دولومیت و آهک تریلوبیت‌دار) در منطقه مشاهده می‌شوند. بین مجموعه‌های پالئوزوئیک پائینی و پرمین بالائی یک نبود چینه نگاشتی بسیار مشخص وجود دارد که با نبود رسوبگذاری اردوئین، سیلورین، دونین و کربونفر و پرمین زیرین و میانی مشخص می‌شود. پرمین بالائی باقاعده کنگلومراتی و ماسه‌سنگی، مستقیماً بر روی سازندهای قدیمی قرار است (شکل ۲) (سلطانی سیسی و همکاران، ۱۳۸۵؛ اژدری و همکاران، ۱۳۸۳)

مجموعه مزوزوئیک به صورت آمیزه رنگین و واحدهای سنگی بصورت آمیزه‌ای از آهک ریزلایه صورتی رنگ، گدازه‌های بازیک دگرگونه و لایه‌های

چرت رادیولاریتی مشاهده می‌شود که گمان می‌رود این مجموعه بخشی از ردیف‌های افیولیتی (ردیف رسوبی) باشد که بصورت یک تراشه تکنونیک می‌نمایان شده است. گسل شمال تبریز، گسله برکشلو-شکریازی، گسل ارومیه، گسله تسوج، گسل جرمی، گسل سلماس، گسل شیوه برو بخش عمده در قسمت شرقی منطقه مورد مطالعه را پهنه‌های نمکی تشکیل داده‌اند چراکه در ساحل غربی دریاچه ارومیه واقع گردیده است و با توجه به خشکسالی سال‌های اخیر، وسعت پهنه‌های نمکی افزایش یافته است. آبرفت‌ها، مخروط افکنه‌ها و پادگانه‌های آبرفتی از دیگر واحدهای زمین‌شناسی منطقه هستند که عمدتاً چینه‌شناسی عهد حاضر را شامل می‌شوند (شکل ۳).

علاوه بر ساختارهای بزرگ مقیاس، ساختارهای میکروسکوپی نیز در منطقه مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. پهنه‌های برشی مناطقی به صورت نسبتاً باریک با مرزهای موازی هستند که واتنش برشی را از خود نشان می‌دهند. در یک پهنه برشی، سنگ‌های دیواره در طرفین آن، دگر شکل گردیده و در جهت موازی با صفحه برش نسبت به هم جابه جا شده‌اند. زون برشی دگرریختی در محیط شکل‌پذیر اغلب با دگرگونی همراه است و موجب ایجاد سنگ‌های دارای برگوارگی، خطوارگی‌ها، چین‌ها، رگه‌ها و ساختارهای دیگر می‌شود.

زون برشی شکنا شکل‌پذیر یا نیمه‌شکننده، مختص رژیم زمین‌ساختی خاصی نبوده و اغلب در تمامی رژیم‌های تکنونیک تشکیل می‌شود. در این زونها سنگ‌ها معمولاً به شکل برگوارگی‌های میلونیتی تشکیل می‌شوند. میلونیت‌ها در مقیاس مزوسکوپی و میکروسکوپی، به منظور تحلیل جنبشی و تغییرات ساختاری مورد استفاده قرار می‌گیرند. جهت یافتگی فابریک‌های شکل‌پذیر، تغییر اندازه دانه‌ها و تبلور مجدد دینامیکی در تشکیل این سنگ‌ها حایز اهمیت است. پهنه‌های برشی شکنا معمولاً به وسیله تغییر شکل یک صفحه شکستگی دچار لغزش می‌شود که گسل نامیده می‌شود اما در صورتی که منطقه برشی متشکل از گسل‌های نیمه موازی جداگانه‌ای باشد که بلوک‌های عدسی شکل سنگ‌های دگر شکل نشده را از هم جدا

تنش ماکزیمم و نیمساز زاویه باز به عنوان راستای کوچکترین تنش در نظر گرفته می‌شود. در شکل (۴)، یک شکستگی مزدوج به صورت پرشدگی کوارتزیتی در منطقه مورد مطالعه، قابل مشاهده می‌باشد.

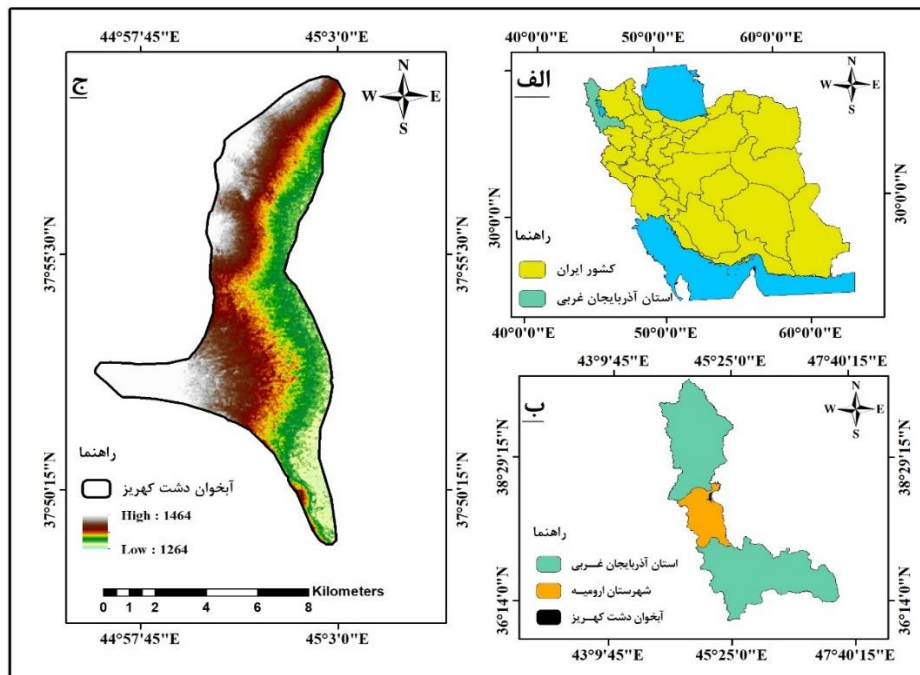
چین‌های Drag

معمولاً در مناطق برشی قابل مشاهده می‌باشند که نشان از شرایط دگرشکلی در منطقه هستند. این چین‌ها معمولاً در مقیاس کوچک (سانتیمتر تا چند متر)، به صورت تک یا سری در لایه‌های با اختلاف مقاومت متفاوت و در اثر حرکت به سمت مخالف، شکل می‌گیرند. این چین‌ها همچنین ممکن است در زیر صفحات تراستی نیز گسترش یابند. شکل (۵ و ۶)، نمونه‌ای از چین کشیدگی در مقیاس میکروسکوپی در سنگ‌های منطقه مورد مطالعه دیده می‌شود (رامبرگ، ۱۹۷۸).

می‌کنند و یا شامل نواری از سنگ‌هایی می‌باشند که به طور شکننده خرد و نرم شده‌اند، منطقه گسلی نامیده می‌شود. مکا نیسم تغییرشکل شکنا به گونه‌ای است که در آن، دما و فشار کم اما دارای نرخ استرین بالایی است. این پهنه‌ها در سرعت‌های بالای واتنش شکل می‌گیرند و با افزایش جابه‌جایی ضخامت پهنه برشی بیشتر می‌شود. این پهنه‌ها معمولاً در محیط‌هایی تشکیل می‌شوند که حاوی گسل‌های نزدیک به هم، شکستگی‌های برشی و درزه‌های فراوان باشند.

شکستگی‌های مزدوج

ساختارهایی هستند که می‌توان از آنها برای تعیین راستای تنش‌های اعمالی به منطقه بهره گرفت. رگه‌های مزدوج در واقع فضاهای پرشده‌ای هستند که در اثر تنش‌های کششی در منطقه ایجاد شده‌اند. نیمساز زاویه حاده بین دو شکستگی مزدوج به عنوان



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه. الف) نمایش موقعیت‌های جغرافیایی کشور ایران و استان آذربایجان غربی در پهنه ایران. ب) نمایش موقعیت جغرافیایی استان آذربایجان، شهرستان ارومیه و آبخوان دشت کهریز در استان آذربایجان غربی. ج) نمایش آبخوان دشت کهریز و مشخصات ارتفاعی آن.

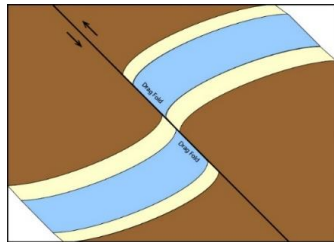
گرفت. داده‌های مورد استفاده در این پژوهش عبارتند از: مدل رقمی ارتفاعی (DEM SRTM) ۳۰ متر، نقشه زمین‌شناسی در مقیاس ۱:۱۰۰ هزار، شیت ارومیه و سرو (گنگچین)، تصاویر سنتیل ۱ (دانلود از سایت scihub).

روش تحقیق

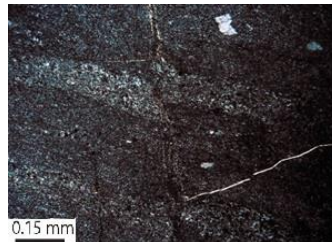
در این پژوهش با استفاده از تصاویر راداری منطقه مورد مطالعه و انجام پردازش‌های مختلف روی آنها، فرونشست در منطقه مورد مطالعه مورد بررسی قرار



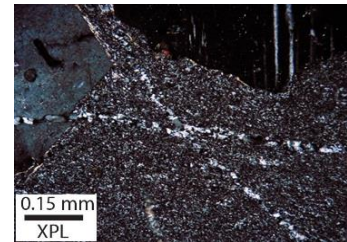
شکل ۲. برونزد واحدهای سنگی در منطقه: سنگهای آهکی، کوارتز و کنگلومرا در تصاویر صحرایی قابل مشاهده می‌باشند (دید عکس‌ها به سمت شمال شرق)



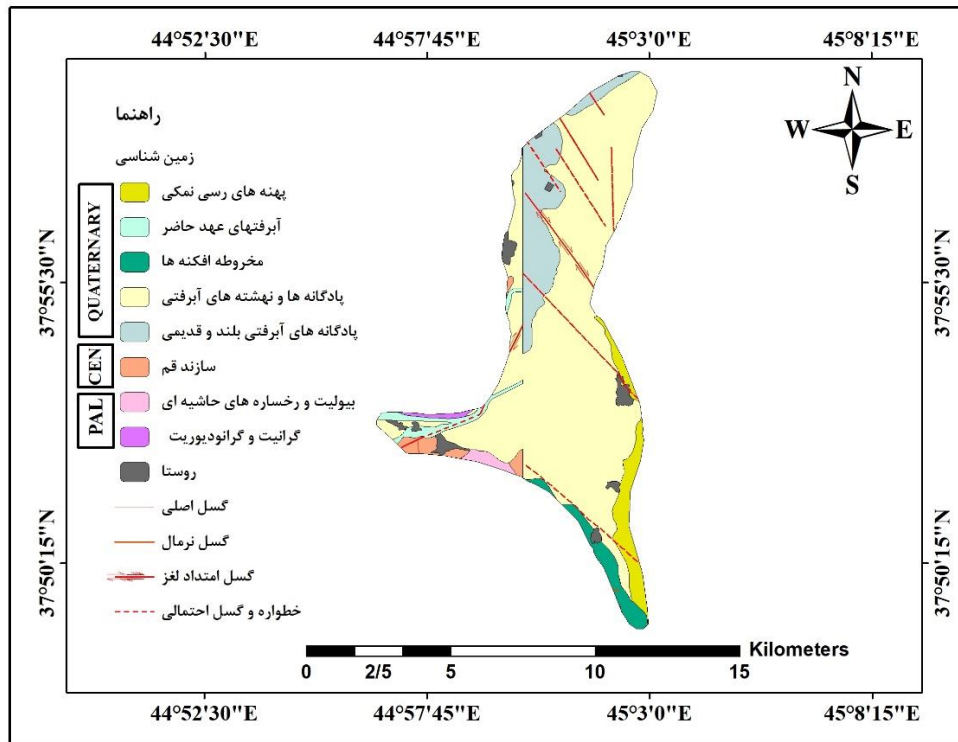
شکل ۶. شکل شماتیک از یک چین Drag در منطقه مورد مطالعه



شکل ۵. مقطع میکروسکوپی از یک چین Drag در منطقه مورد مطالعه



شکل ۴. شکستگی مزدوج در مقیاس میکروسکوپی



شکل ۳. نقشه زمین‌شناسی آبخوان دشت کهریز

❖ S1A_IW_SLC_1SDV_20230213T150121_20230213T150149_047219_05AA7B_BABA

جهت بررسی میزان فرونشست در منطقه مورد مطالعه از داده‌های راداری سنجنده سنتیل ۱ استفاده شده است، که طول موج این سنجنده ۵/۵۴ سانتیمتر می‌باشد و

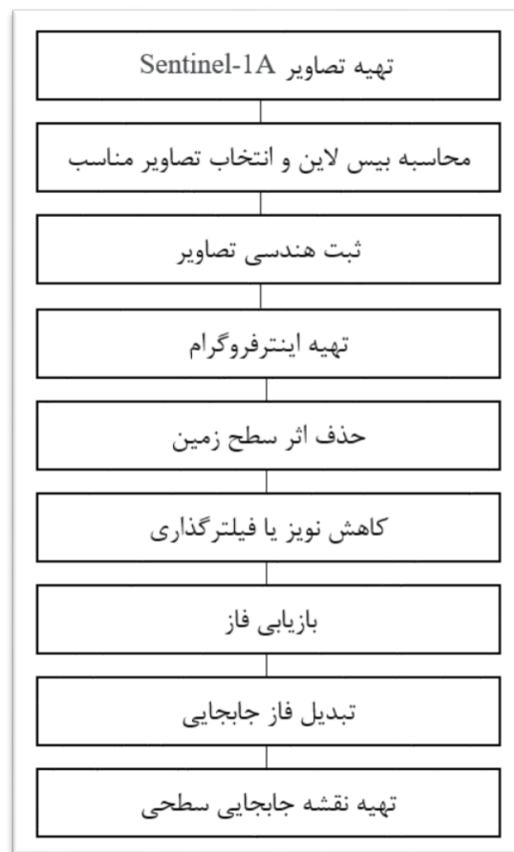
نرم‌افزار ، Arc Map 10.4.1 ، نرم‌افزار (copernicus.eu). SNAP

❖ S1A_IW_SLC_1SDV_20141115T150047_20141115T150115_003294_003D0B_8D71

همزمان اطلاعات جمع‌آوری می‌شود که این حالت خود نیز به دو حالت تداخل‌سنجی در راستای پرواز و تداخل‌سنجی در جهت عمود بر راستای پرواز تقسیم می‌شود. در تداخل‌سنجی با تکرار مسیر، سکو تنها حامل یک آنتن می‌باشد. این آنتن یک منطقه را در دو عبور مختلف با هندسه تقریباً مشابه پوشش می‌دهد. این روش بر پایه اطلاعات دقیق از مسیر پرواز است و برای نظارت بر دگرشکلی، زمین‌لغزش و مطالعات آتشفشان بسیار حائز اهمیت است (دهقانی، ۱۳۹۳). فاصله بین دو مسیر پرواز خط مبنا نامیده می‌شود. برای هر سیستم تصویربرداری SAR، خط مبنا بحرانی وجود دارد، که در صورت بیشتر بودن طول خط مبنا از این مقدار، تداخل‌سنجی غیر ممکن می‌شود. داده‌های ماهواره سنتینل ۱ به دلیل ماهیت تصویربرداری به صورت بلوک‌ها و تکه‌های مجزا می‌باشند. از این رو باید آنها را یکپارچه در آورد که به این عمل De-burst می‌گویند. از جمله مواردی که شرایط را برای تداخل‌سنجی راداری دشوار می‌کنند، شیب زیاد زمین، زاویه شدید برخورد، توان تفکیک پایین و طول موج کوتاه می‌باشد (میسونت و همکاران^۳، ۱۹۹۳). داده‌های راداری با دید جانبی تصویربرداری می‌شوند که در طول حرکت سطح زمین را با سیگنال‌های میکروویو جاروب می‌کند که سیگنال‌های دریافتی به صورت اعداد مختلط متشکل از دامنه و فاز ذخیره می‌شوند. اساس کار روش تداخل‌سنجی، استفاده از اطلاعات فاز سیگنال بازتابی از زمین است، به نحوی که تغییر شکل‌های ایجاد شده در سطح زمین، سبب تغییر فاز بین دو تصویربرداری جمع‌آوری شده از منطقه مشابه در دو زمان مختلف می‌شود. با بررسی این اختلاف فاز و مدل‌سازی آن، میزان جابجایی موجود در سطح زمین کمی‌سازی می‌شود (میسونت و همکاران، ۱۹۹۸). با کم کردن فازهای دو تصویربرداری با درجه مصنوعی (SAR) که در دو زمان مختلف از یک منطقه گرفته شده، اینترفروگرام (Interferogram) تولید می‌شود. در حالت کلی، فاز یک اینترفروگرام از مولفه‌های زیر تشکیل شده است (هانسن^۴، ۲۰۰۱).

$$\Delta\phi = \phi_{atm} + \phi_{Topo} + \phi_{Defo} + \phi_{orb} \quad (1) \text{ معادله}$$

تصاویر اخذ شده در گذر پایین و در تاریخ‌های ۱۱/۱۵/۲۰۱۴ و ۲۰۲۳/۰۲/۱۳ قرار دارند. همچنین داده‌های مورد استفاده در فرمت SLC می‌باشند. در این پژوهش به منظور به دست آوردن میزان جابجایی‌ها از روش تداخل‌سنجی تفاضلی استفاده شده است. به همین منظور تصویر مربوط به تاریخ ۱۵ نوامبر بعنوان تصویر پایه^۱ و تصویر تاریخ ۱۳ فوریه بعنوان تصویر پیرو^۲ انتخاب شده‌اند. چارت پژوهش در شکل (۷) نشان داده شده است.



شکل ۷. فلوچارت روش تداخل‌سنجی راداری تفاضلی (DInSAR)

تحلیل داده‌های راداری با استفاده از روش تداخل

سنجی تفاضلی (DInSAR)

بطور کلی دو روش برای تداخل‌سنجی راداری تفاضلی وجود دارد که عبارت است از: روش تداخل‌سنجی تک مسیر و روش تداخل‌سنجی با تکرار مسیر (چند مسیری). در روش تداخل‌سنجی تک مسیر، با استفاده از دو آنتنی که روی یک سکو نصب شده‌اند به صورت

3. Massonnet et al.

4. Hanssen.

1. Master.

2. Slave.



فرینج‌های دگرشکلی است که فاصله این فرینج‌ها از فرینج هم رنگ خود به اندازه نصف طول موج سنجنده می‌باشد. هدف اصلی تداخل‌سنجی تفاضلی، استخراج میزان دگرشکلی از فاز اندازه‌گیری شده کلی با حذف کردن یا به حداقل رساندن اثر دیگر مؤلفه‌هاست.

بحث و بررسی نتایج

روش تداخل‌سنجی راداری با استفاده از دو تصویر SAR بدست آمده از دو موقعیت متفاوت و در زمان‌های مختلف مقایسه می‌شود تا اختلاف فاز اینترفروگرام بدست آید که طی آن اندازه‌گیری فاز به علت تغییرات شکل زمین انجام می‌شود. جهت برآورد میزان تغییرات ناشی از وقوع فرونشست در آبخوان دشت کهریز دو تصویر ماهواره سنتیل ۱ در بازه زمانی ۹ ساله مورد بررسی قرار گرفت. به منظور تسهیل در سرعت پردازش ابتدا منطقه مورد مطالعه که در حالت نوار IW ۳ تصویر سنتیل ۱ قرار گرفته است، انتخاب شد. برای بدست آوردن جابجایی سطح زمین در یک بازه زمانی، می‌بایست خطاهای مدارای، اثرات توپوگرافی و نویز اتمسفر از اینترفروگرام حذف گردند. فاز اینترفروگرام حاوی اثر توپوگرافی، جابجایی هدف و تأثیرات اتمسفری است. به منظور حذف نویز اینترفروگرام‌ها از فیلتر Goldstein استفاده شده است و در مرحله بعد بازبازی فاز نیز انجام شد تا فازها به مقداری که نشان‌دهنده جابجایی پوسته زمین است تبدیل شوند. بعد از بدست آمدن نقشه جابجایی، جهت صحت‌سنجی مدل، تصویر کوه‌رنسی مورد استفاده قرار گرفت. طبق تصویر مورد نظر در بالا آمدگی ۱/۵۷ میزان کوه‌رنسی ۰/۷۲ می‌باشد که از دقت قابل قبولی برخوردار است.

نتایج بدست آمده از روش تداخل‌سنجی راداری که بین سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۳ می‌باشد، بیانگر آن است که در آبخوان دشت کهریز در بازه زمانی مورد مطالعه هیچگونه فرونشستی مشاهده نشده است و میزان بالا آمدگی بین ۰/۳۴ تا ۱/۵۱ متر می‌باشد. حداکثر بالا آمدگی ۱/۵۱ متر است که در قسمت شمال منطقه مورد مطالعه مشاهده می‌شود و مناطق جنوبی آبخوان دشت کهریز دارای ۰/۳۴ متر بالا آمدگی می‌باشد. این جابجایی در سطح آب زیر زمینی، میزان افت آب و

که ϕ_{atm} فاز اثر اتمسفری، ϕ_{Topo} فاز حاصل از توپوگرافی، ϕ_{Defo} فاز حاصل از دگرشکلی منطقه و ϕ_{Orb} فاز مدارای است.

اثر اتمسفری می‌تواند با استفاده از تصاویر تکراری خنثی شود یا با استفاده از منابع دیگری نظیر GPS تصحیح گردد. همچنین با در دست داشتن اطلاعات مدارای سنجنده می‌توان خطای مربوط به فاز مدارای را کاهش داد. اطلاعات اصلی حاصل از توپوگرافی و دگرشکلی است. بنابراین با معلوم بودن توپوگرافی می‌توان دگرشکلی را تعیین کرد.

در این پژوهش به منظور تولید اینترفروگرام، بعد از فراخوانی تصاویر سنتینل به نرم‌افزار و انجام مرحله multilooking به منظور ایجاد پیکسل‌های مربعی در هر دو راستا و همچنین ثبت اطلاعات مدارای، تصویر پیرو نسبت به تصویر پایه ثبت هندسی می‌گردد. بدین صورت تصویر پیرو پیکسل به پیکسل متناظر با تصویر پایه می‌شود. در مرحله بعد فیلتر گذاری در راستای آزیموت به علت تفاوت فرکانس داپلر در تصویر پایه و پیرو و در راستای رنج به دلیل زاویه دید متفاوت سنجنده‌ها انجام می‌گیرد. همچنین بر اساس پارامترهای ثبت هندسی محاسبه شده در مرحله قبل، تصویر Slave نسبت به تصویر master نمونه‌برداری مجدد می‌شود که در نتیجه پیکسل به پیکسل هر دو تصویر روی هم قرار می‌گیرند. بعد از اینکه تصویر Slave، پیکسل به پیکسل متناظر با تصویر Master شد، تصاویر پیکسل به پیکسل در هم ضرب می‌شوند تا اختلاف فاز هر دو پیکسل متناظر محاسبه شود. این اختلاف فاز در تصویر اینترفروگرام نمایش داده می‌شود. همانطور که قبلاً اشاره شد فاز نهایی باید عاری از خطاهای توپوگرافی، اتمسفری و مدارای باشد. برای حذف خطای توپوگرافی باید از مدل رقومی ارتفاعی با دقت مناسب استفاده گردد. در این مقاله به منظور حذف فاز توپوگرافی و مؤلفه زمین مسطح از مدل رقومی ارتفاعی SRTM استفاده گردیده است.

فاز تداخل‌سنجی اندازه‌گیری شده کسری از 2π است، تعداد سیکل‌های فاز در این اختلاف مسیر مجهول می‌باشد. در نتیجه به منظور اختصاص دادن فاز مطلق برای هر پیکسل در تصویر مرحله بازبازی فاز انجام می‌شود. تصویر نهایی تولید شده از این مرحله شامل

۳. دگرشکلی منطقه، ناشی از تغییر شکل‌های زمینی مثل زلزله یا فعالیت‌های تکتونیکی، می‌تواند عاملی برای برخاستگی قابل توجه باشد و فاز مداری نیز ممکن است در موقعیت مداری (orbit phasing) تأثیر داشته باشد که موجب اختلال در فرآیند فرونشست یا برخاستگی قابل توجه شود.

۴. همچنین دلیل بالاآمدگی آبخوان دشت کهریز، قرارگیری آن در فرودیواره گسل نرمال ارومیه می‌باشد که در فرادیواره و قسمت شرقی آن، فروافتادگی تکتونیکی دریاچه ارومیه واقع گردیده است.

۵. بالاآمدگی همچنین می‌تواند در ارتباط با وجود گسل کور در منطقه باشد که نیاز به مطالعات تکمیلی دارد.

پیشنهادها

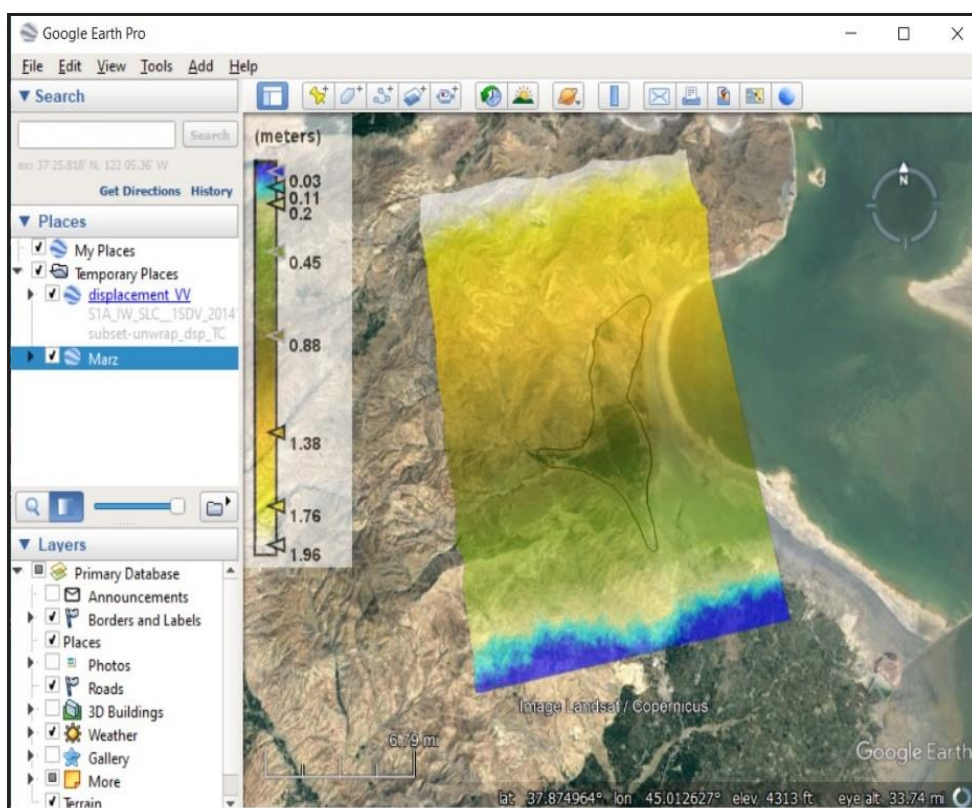
پیشنهاد می‌شود داده‌های آبهای زیرزمینی نیز به منظور جلوگیری از پدیده فرونشست و حفظ این دشت ارزشمند، مورد بررسی و مطالعه قرار گیرد.

غیره اثر می‌گذارد. میزان جابجایی زمین در کل تصویر راداری که مورد بررسی قرار گرفت، در شکل (۸) بر روی تصویر Google Earth نشان داده شده است و آبخوان دشت کهریز نیز بر روی آن نمایش داده شده است.

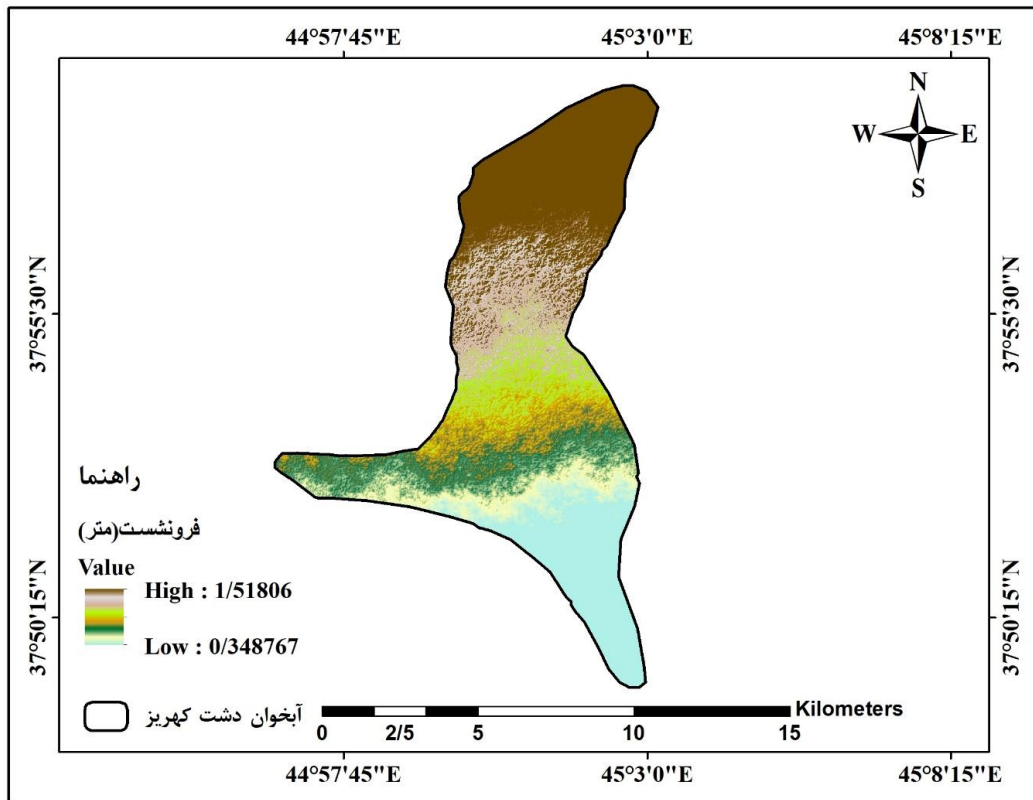
نتیجه‌گیری

۱. ساختارهای میکروسکوپی به مانند ساختارهای با مقیاس بزرگتر در منطقه، دلالت بر نقش فازهای تکتونیکی در شکل‌گیری و تکامل منطقه را دارند.

۲. در این پژوهش میزان فرونشست آبخوان دشت کهریز با استفاده از تصویر ماهواره سنتیل ۱ بین سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۳ مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به فرنج‌های بدست آمده با استفاده از پردازش تصاویر راداری که در طول تحقیق نشان داده شده است دشت کهریز در بازه زمانی مورد مطالعه هیچگونه فرونشستی مشاهده نشده است و میزان بالا آمدگی بین ۰/۳۴ تا ۱/۵۱ متر می‌باشد.



شکل ۸. میزان جابجایی زمین بر حسب متر بر روی تصویر Google Earth



شکل ۹. میزان فرونشست زمین بر حسب متر با استفاده روش تداخل سنجی راداری تفاضلی

منابع

زمین در اثر برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری-آبخوان مرودشت. مهندسی و مدیریت آبخیز، ۱۴(۱)، صص ۱۱۴-۱۲۵. حسین‌زاده، س.ر؛ اکبری، ا؛ جوانشیری، م؛ و محمدپورسنگانی، ز. (۱۴۰۱)، تحلیل فضایی فرونشست سطح زمین با استفاده از تداخل سنجی راداری (مورد مطالعه: دشت مرکزی شهرستان قاین)، مقالات فصلنامه جغرافیا و مخاطرات محیطی، دوره ۱۱، شماره ۴، شماره پیاپی ۴۴، صص ۹۹-۱۲۶.

دهقانی بیدگلی، ر؛ کوهبنانی، ح ر؛ یزدانی، م. ر. (۱۳۹۹)، پهنه‌بندی فرونشست دشت سمنان ناشی از برداشت بی‌رویه آبهای زیرزمینی با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری و تصاویر ۱A-Sentinel، نشریه مهندسی آبیاری و آب ایران، شماره ۳۹، صص ۱۸۷-۱۷۵.

دهقانی، م. (۱۳۸۸)، تعیین نرخ و مدل‌سازی فرونشست زمین تحت تأثیر استخراج آبهای زیرزمینی با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری، دانشگاه صنعتی خواجه

احمدی، ن؛ موسوی، ه.را؛ معصومی، ز. (۱۳۹۷)، مطالعه فرونشست دشت خرمدره با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری و بررسی مخاطرات آن، فصلنامه سنجش از دور و GIS ایران، سال دهم شماره ۳، پیاپی ۳۹، صص ۵۲-۳۳.

اژدری، ک؛ تاجبخش، غ.ر؛ حقی‌پور، ع؛ آقائباتی، م. (۱۳۸۳)، شرح نقشه زمین‌شناسی ورقه ارومیه و چهارگوش سرو (کنگچین)، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

اصغری سراسکانرود، ص؛ محمدزاده شیشه‌گران، م. (۱۳۹۹)، برآورد میزان فرونشست با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری و پارامترهای آب‌های زیرزمینی و کاربری اراضی (مطالعه موردی: دشت شهریار)، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال دهم، شماره ۱، صص ۴۰-۵۴.

آل شیخ، ع. ا؛ چترسیماب، ز؛ وثوقی، ب؛ مدیری، م؛ پاکدامن، م. ص. (۱۴۰۱). بررسی فرونشست سطح

Water Company of Khorasan Razavi. First edition.
<https://www.khrw.ir/?l=EN>.

Chen. C.; Wang. C.; and L. Chen Kuo.(2010). Correlation between groundwater level and variations in land subsidence area of the Choshuichi Alluvial Fan. Taiwan. Engineering Geology, 115 (2), 122–131. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.05.011>.

D. Khan, S., I. Faiz, M., Gadea, Otto C.A., and Laeiq, A.(2023). Study of land subsidence by radar interferometry and hot spot analysis techniques in the Peshawar Basin, Pakistan, Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, 26, Iss: 1, 173-184.

Du, Y., Feng, G., Peng, X., and Li, Z .(2017). Subsidence Evolution of the Leizhou Peninsula, China, Based on InSAR Observation from 1992 to 2010, Appl., 7, 466.

Hanssen, R. F.(2001). Radar Interferometry, Data Interpretation and Error Analysis: Springer Science and Business Media. ese Edition, 59(4), 1359-1370.

Hoffman, J., Galloway, D.L., Zebker, H.A., and Amelung, F.(2001). Seasonal subsidence and rebound in Las Vegas Valley, Nevada, observed by synthetic aperture radar interferometry, Water Resour. Res., 37 (6),pp: 1551-1566.

Maghsoudi, Y., Amani, R., and Ahmadi, H. (2019). A Study of land Subsidence in West of Tehran Using Sentinel-1 Images and Permanent Scatterers Interferometry. Iran Water Resources Research, 15(1), 299-313.

Massonnet, D., and Feigl, K. L.(1998). Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface: Reviews of Geophysics, 36(4),pp: 441-500.

Massonnet, D., M. Rossi, C. Carmona, F. Adragna, G. Peltzer, K. Feigl, and T. Rabaute.(1993). The

نصیرالدین طوسی، دانشکده نقشه برداری.

سلطانی سیسی، غ.ع؛ امینی آذر، ر؛ یوسفی‌راد، ا؛ جلال‌زاده، م. (۱۳۸۵)، شرح نقشه زمین‌شناسی ورقه ارومیه، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

شیوا آزادی شییکوه، ش؛ معاریان خلیل‌آباد، ه؛ پوررضا ییلندی، م؛ عابدین‌پور، م؛ اکبری، م. (۱۳۹۹)، ارزیابی تغییرات زمانی-مکانی منابع آب زیرزمینی دشت کاشمر مبتنی بر تحلیل سری زمانی داده‌های بارش و خشکسالی، سامانه سطوح آبگیر باران، دوره (۸)، شماره (۱)، صص ۶۹-۵۵.

قاسمی، ع؛ بهمنی، ا؛ اخوان، س؛ پورقاسمی، ح. ر. (۱۴۰۲)، بررسی فرونشست دشت کبودرآهنگ بر مبنای تکنیک تداخل‌سنجی راداری و تغییرات تراز آب‌های زیرزمینی، دانش آب و خاک، دوره ۳۳، شماره ۲، صص ۲۰۳-۱۸۳.

مجبی، ی؛ اصغری مقدم، ا. (۱۳۹۷)، ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان دشت کهریز با استفاده از مدل دراستیک در محیط GIS. فصلنامه زمین‌شناسی محیط زیست، سال ۱۲، شماره ۴۵، صص ۱۷-۱.

همتی، ف؛ بهرامی، ش. (۱۴۰۱)، اندازه‌گیری میزان جابجایی زمین در حوضه آبریز ازگله (زلزله سرپل‌دهاب ۱۳۹۶/۸/۲۱) با استفاده از روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری، دومین همایش ملی دوسالانه زمین‌شناسی کوهزاد البرز و دریای خزر، گرگان، دانشگاه گلستان.

Agustan, A., Sulaiman, A., and Ito, A.(2016). Measuring Deformation in Jakarta through Long Term Synthetic Aperture Radar (SAR) Data Analysis, 2nd International Conference of Indonesian Society for Remote Sensing (ICOIRS).

An, K. (2015). Investigating the Relationship between Land Subsidence and Groundwater Depletion in the Nort Plain Using GRACE and ICESat Master's Thesis, Univeversity of California, Los Angeles, p44.

Bureau of Basic Studies of Water Resources. 2021. Floods of Khorasan Razavi 1995-2020. Regional

Displacement Field of the Landers Earthquake Mapped by Radar Interferometry. *Nature* 364, 138–142.

Widodo, J., A. Herlambang, A. Sulaiman, P. Razi, D. Perissin, H. Kuze and J. T. S. Sumantyo .(2019). Land subsidence rate analysis of Jakarta Metropolitan Region based on D-InSAR processing of Sentinel data C-Band frequency. *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing.

Ramberg, H. (1987). Drag folds . In: *Structural Geology and Tectonics*. Encyclopedia of Earth Science. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/3-540-31080-0_34

Zhao, F., W. Gong, H. Tang, S. P. Pudasaini, T. Ren and Z. J. E. G. Cheng .(2023). “An integrated approach for risk assessment of land subsidence in Xi’an, China using optical and radar satellite images.” 314: 106983.