

Plain Subsidence Monitoring based on SNAP2STAMPS Automated Algorithm by Radar Interferometry (PSI) Method (Case study: Marand Plain)

Shahram Roostaei^a, Samira Najafvand^{b*}

^a Professor in Geomorphology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

^b PhD Candidate in Geomorphology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Received: 24 January 2022

Revised: 15 February 2022

Accepted: 15 March 2022

Abstract

Global climate changes and population growth have increased the need to exploit underground water resources. The phenomenon of land subsidence as a result of groundwater extraction and water depletion is one of the environmental hazards that threatens societies all over the world. In this research, for the first time, Sentinel-1 radar satellite images were used by the SNAP2StAMPS to automate the process of processing and analyzing the subsidence in Marand Plain. In recent years, the uneven development of agricultural lands and the excessive extraction of underground water in the Marand plain in East Azerbaijan province have caused landslides on the surface of this plain. In this study, an automatic interferometric processing algorithm between SNAP and StAMPS was used to determine the displacement rate in the direction of the satellite line of sight. The results of the PSI interferometry technique were performed on 133 images of the Sentinel-1 satellite in the descending orbit of the Sentinel-1 satellite. Based on the obtained results, the annual land displacement rate for Marand plain in 2016, 2017, 2018, 2019, and 2020 was -13.7, -12, -2.15, -12.3 and -13.1 cm respectively. In order to validate the results, the amount of subsidence resulting from the interferometric processing was compared with the amount of groundwater level drop in the study area, using the unit hydrograph analysis method. The results showed that the amount of water level drop and the results of hydrograph analysis of observation wells in the region are consistent with the results of time series maps obtained from interferometry. Therefore, the automatic method presented in this study can be used for monitoring land subsidence.

Keywords: Land Subsidence, Radar Interferometry (PSI), Marand Plain, Snap2stamps Automated Algorithm

*. Corresponding author: Samira Najafvand E-mail: samira.najafvand@tabrizu.ac.ir Tel: + 989387607669

How to cite this Article: Roostaei, S., & Najafvand, S. (2023) Plain Subsidence Monitoring based on SNAP2STAMPS Automated Algorithm by Radar Interferometry (PSI) Method (Case study: Marand Plain). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 11(4), 21-42.

DOI:10.22067/geoeh.2022.74932.1161



Journal of Geography and Environmental Hazards are fully compliant With open access mandates, by publishing its articles under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).





Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

Geography and Environmental Hazards

Volume 11, Issue 4 - Number 44, Winter 2023

<https://geoeh.um.ac.ir>

 <https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.74932.1161> 

جغرافیا و مخاطرات محیطی، سال یازدهم، شمارهٔ چهل و چهارم، زمستان ۱۴۰۱، صص ۴۲-۲۱


مقاله پژوهشی

ویژه‌نامه (چالش جهانی فرونشست زمین: مدیریت بحران یا بحران مدیریت)

پایش پدیده فرونشست دشت‌ها بر مبنای الگوریتم خودکار SNAP2STAMPS به روش تداخل سنجی

راداری (PSI) (مطالعه موردی: دشت مرند)

شهرام روستایی - استاد گروه ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

 سمیرا نجف‌وند^۱ - دانشجوی دکتری رشته ژئومورفولوژی گرایش برنامه‌ریزی محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۴ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۱۱/۲۶ تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۱۲/۲۴

چکیده

در این تحقیق برای اولین بار به منظور خودکار سازی فرآیند پردازش و تحلیل فرونشست دشت مرند از تصاویر ماهواره‌ای راداری سنتینل-۱ توسط پکیج SNAP2StaMPS استفاده شده است. در سال‌های اخیر توسعه ناهمگون اراضی کشاورزی و برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی دشت مرند در استان آذربایجان شرقی موجب بروز پدیده فرونشست زمین در سطح این دشت شده است. لوله زایی میله چاه‌های منطقه، شکاف‌های افقی در سطح این دشت، حکایت از رخداد فرونشست سطح زمین دارد. در این تحقیق برای تعیین نرخ جابجایی در جهت خط دید ماهواره، از الگوریتم پردازشی تداخل سنجی خودکار بین نرم‌افزار SNAP و StaMPS استفاده شد. نتایج فن تداخل سنجی PSI بروی ۱۳۳ تصویر سنتینل-۱ در مدار Descending ماهواره Sentinel-1، حاکی از نرخ جابجایی سالانه زمین برای دشت مرند از سال‌های ۲۰۱۶، ۲۰۱۷، ۲۰۱۸، ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ به ترتیب ۱۳/۷، -۱۲، -۱۵/۲، -۱۲/۳ و ۱۳/۱ سانتی‌متر دارد. جهت صحت سنجی نتایج، مقایسه میزان فرونشست حاصل از پردازش تداخل سنجی با میزان افت سطح آب‌های زیرزمینی در محدوده مطالعاتی از طریق روش تحلیل هیدروگراف واحد انجام

Email: Samira.najafvand@tabrizu.ac.ir

۱ نویسنده مسئول: ۰۹۳۸۷۶۰۷۶۶۹

نحوه ارجاع به این مقاله:

روستایی، شهرام؛ نجف‌وند، سمیرا؛ ۱۴۰۱. پایش پدیده فرونشست دشت‌ها بر مبنای الگوریتم خودکار SNAP2STAMPS

به روش تداخل سنجی راداری (PSI) (مطالعه موردی: دشت مرند). جغرافیا و مخاطرات محیطی. ۱۱(۴)، صص ۴۲-۲۱

<https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.74932.1161>

شد. نتایج نشان می‌دهد که میزان افت سطح آب و نتایج حاصل از تحلیل هیدروگراف چاه‌های مشاهده‌ای منطقه، با نتایج حاصل نقشه‌های سری زمانی حاصل از تداخل سنجی تطابق دارند؛ بنابراین، از روش خودکار ارائه‌شده در این پژوهش می‌توان جهت پایش فرونشست زمین استفاده کرد.

کلیدواژه‌ها: فرونشست زمین، روش تداخل سنجی راداری (PSI)، دشت مرند، الگوریتم خودکار .snap2stamps

۱- مقدمه

مخاطره فرونشست زمین شامل فروریزش یا نشست رو به پایین سطح زمین است. این پدیده به یکی از مسائل و مشکلات اساسی جوامع بشری به دلیل خسارات جبران‌ناپذیر نسبت به دیگر مخاطرات تبدیل شده است. شکل‌گیری این پدیده به صورت آرام در طی مدت‌زمان طولانی اتفاق می‌افتد و فاقد برگشت‌پذیری است. فرونشست به‌طور کلی ناشی از دلایلی همچون انحلال تشکیلات زیرسطحی، تراکم رسوبات در اثر استخراج سیالات و ذخایر زیرزمینی، بارگذاری، زهکشی و یا ارتعاش، تراکم هیدرولیکی، ناپایداری خاک‌ها در سطوح شیب‌دار، انقباض خاک‌های رسی، ذوب یخ لایه‌های منجمد در اعماق زمین و ... پدیدار می‌شود. فرورفتگی قیفی شکل زمین، پس‌روی آب دریا، ریزش سطح و جابجایی پوسته‌های زمین از علائم آن است. علاوه بر این، فرونشست زمین در مناطق شهری می‌تواند باعث فروریختن فونداسیون، تخریب خط لوله زیرزمینی و آسیب جاده شود. این مخاطره، موجب تغییرات توپوگرافیکی سطح زمین نیز می‌شود که در اکثر اوقات آسیب‌های جبران‌ناپذیری به بار می‌آورد.

علل وقوع فرونشست زمین در نقاط مختلف دنیا به دلایل مختلفی رخ می‌دهد، از جمله، احیای مناطق ساحلی، توسعه فعالیت‌های صنعتی و ساخت‌وسازهای شهری در مناطق دلتایی و استخراج بی‌حد آب‌های زیرزمینی در جلگه‌ها، که جابجایی سطح زمین را به دنبال دارد. در سراسر جهان، دشت‌های ساحلی و مناطق دلتایی رودخانه‌ای بیشترین فرونشست زمین را دارند (هررا گارسیا^۱ و همکاران، ۲۰۲۱).

محرکان اصلی فرونشست به دو عامل انسانی و طبیعی تقسیم می‌شوند، عوامل ناشی از فعالیت‌های انسانی شامل استخراج سیالات از لایه‌های زیرسطحی (مانند آب، نفت و گاز)، تغییر کاربری زمین (به‌عنوان مثال بارگذاری ناشی از ساختمان‌های ساخت بشر)، ساخت تأسیسات زیرزمینی و معدنکاری و فعالیت‌های طبیعی شامل گسل، حرکات زمین ساختی، تثبیت و فشردگی رسوبات، فروریزش لس، افزایش سطح آب دریا، اکسیداسیون و زهکشی خاک‌های آلی، فرسایش کارستی و فروافتادگی ناشی از پرمافروست هستند (کروستو^۲ و همکاران، ۲۰۱۶). در این میان، عامل انسانی با ۷۶/۹۲ درصد از کل علل فرونشست در سراسر جهان و استخراج آب‌های زیرزمینی ۵۹/۷۵ درصد از دلایل

1 Herrera-García

2 Crosetto

اصلی فرونشست در سراسر جهان به شمار می‌روند (احمدی و همکاران، ۱۳۹۹). تقاضای روزافزون منابع آب زیرزمینی، به دلیل توسعه شهری و کشاورزی، محرک‌های اصلی فرونشست زمین، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک هستند (باقری گاو کش^۱ و همکاران، ۲۰۲۱).

امروزه فرونشست زمین یک مخاطره جهانی ناشی از عامل انسانی و طبیعی است و بیشترین مقدار میانگین فرونشست سالانه (LSavg) در شرق چین، دشت مرند در شمال غرب ایران، ساحل خلیج تگزاس در جنوب ایالات متحده، جاکارتای شمالی در اندونزی، منطقه شهری مکزیکوسیتی در مرکز مکزیک مشاهده شده است؛ بنابراین پیش‌بینی، تشخیص و کاهش فرونشست زمین در دشت‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است (هررا گارسیا و همکاران، ۲۰۲۱).

در مطالعه حاضر جهت پایش فرونشست زمین در دشت مرند در استان آذربایجان شرقی از روش پراکنش گره‌های دائمی (PSI) که برای اولین بار توسط فرتی^۲ و همکاران در سال ۲۰۰۱ مطرح شد، استفاده شده است (فرتی و همکاران، ۲۰۰۱). این تکنیک مزایای زیادی دارد، مانند پوشش مکانی وسیع، حساسیت زیاد به تغییر شکل‌های کوچک و عملکرد در روز و شب و تمام شرایط آب و هوایی را ارائه می‌دهد، که این مزایا پایش دقیق فرونشست زمین را تضمین می‌کند. دقت بالای روش تداخل سنجی راداری PSI، سبب شده است تا در بسیاری از تحقیقات از این روش به‌منظور برآورد میزان فرونشست استفاده شود.

در ایران نیز بحث فرونشست زمین به یک بحران ملی تبدیل شده که در بیشتر موارد ناشی از برداشت بی‌رویه از منابع آب‌های زیرزمینی است. در این خصوص پژوهشگران مختلفی میزان فرونشست زمین را در مناطق مختلف ایران انجام شده است.

خرمی (۱۳۹۶)، در فاصله زمانی سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۷ میلادی با استفاده از ۶۹ تصویر راداری مدارهای بالا گذر و پایین‌گذر ماهواره سنتینل-۱، بیش‌ترین مقدار فرونشست را در شمال غرب مشهد و در حدود ۱۴ سانتی‌متر در سال به دست آورده است. مؤمنی (۱۳۹۷)، نرخ فرونشست را در دشت کبودآهنگ-فامنین همدان را در بازه‌های زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ و ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۸، با روش پراکنش گره‌های دائمی، به ترتیب ۹۲- و ۹۸- میلی‌متر در سال محاسبه کرده است. فروغ‌نیا و همکاران (۱۳۹۷)، با به‌کارگیری تصاویر سنجنده‌های انویست و سنتینل-۱ نرخ فرونشست را از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۶ حدود ۱۳۰ میلی‌متر در سال برآورد کرده‌اند. شرافت و همکاران (۱۳۹۸)، در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵ با استفاده از ۱۲ تصاویر ماهواره‌ای Envisat، متوسط سرعت فرونشست در دشت ابرکوه یزد را ۲ تا ۳ سانتی‌متر و در منطقه مهردشت ۵ سانتی‌متر به دست آورده‌اند.

1 Bagheri-Gavkosh

2 Ferretti

احمدی و همکاران (۱۳۹۹)، نرخ فرونشست دشت اسدآباد همدان را ۲۲۶-۲۶۶ میلی‌متر در سال به دست آورده است. همچنین با توجه به نتایج حاصل از تحقیق نرخ فرونشست از مناطق شهری به سمت دشت‌های اطراف سعودی بوده است. پاپی و همکاران (۱۳۹۹)، به تحلیل سری زمانی فرونشست در غرب تهران (دشت شهریار) و ارتباط آن با برداشت آب‌های زیرزمینی با تکنیک تداخل سنجی راداری پرداخته‌اند. نتایج این تحقیق بیانگر پیوستگی رخداد فرونشست در زمین‌های کشاورزی با نرخ متوسط ۹۰- سانتی‌متر و حداکثر ۲۳- سانتی‌متر در سال در منطقه دشتی نشان می‌دهد، که افت ۰/۵ تا ۱/۵ متری سطح آب در آبخوان علت آن است. خوش‌لهجه آذر (۱۳۹۹)، میزان جابجایی بخشی از دشت‌های کبودرآهنگ- فامنین و همچنین رفتار زمین قبل از رخداد فرو چاله در کردآباد همدان را با دو روش PSI و SBAS به ترتیب ۵/۷۱ سانتی‌متر و ۲۴/۶ سانتی‌متر در سال به دست آورده است. قره چلو و همکاران (۱۴۰۰)، با استفاده از تصاویر راداری آلوس (ALOS) و سنتینل-۱ میزان فرونشست سالانه را در دشت مشهد بررسی کرده‌اند. نتایج حاصل از فرآیند تداخل سنجی راداری برای ماهواره آلوس در این تحقیق، بیانگر مقدار فرونشست ۲/۵ تا ۸/۳ و ۷/۴ سانتی‌متر برای تصاویر ALOS و برای ماهواره سنتینل-۱ بین ۱/۱۶ تا ۴/۱۷ سانتی‌متر و ۳/۲۰ سانتی‌متر در بازه زمانی ۲۰۰۷ تا ۲۰۰۸ بوده است که نشان‌دهنده روند افزایش پدیده فرونشست در منطقه بوده است.

ماتوس^۱ و همکاران (۲۰۱۷)، فرونشست زمین در آبخوانی در اسپانیا را با استفاده از داده‌های راداری انویست در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۹، و ماهواره (COSMO-SkyMed)، بین سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۴ و تصاویر سنجنده سنتینل-۱ بین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۶. مقدار فرونشست را ۵۵ میلی‌متر به دست آورده‌اند. آن‌ها بیش‌ترین میزان فرونشست زمین مربوط به یک دوره طولانی و خشک در منطقه بوده که بر روی زمین‌های رسی رخ داده است. سان^۲ و همکاران (۲۰۱۷)، طی پژوهشی فرونشست زمین در بخش‌های جنوبی پایین‌دست دشت لیاوه^۳ چین بین سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۱ با استفاده از روش تداخل سنجی پراکنده ساز دائمی (PSI) پرداخته‌اند. تصاویر مورد پردازش در این تحقیق، تصاویر راداری مربوط به ماهواره L باند آلوس پالسا بوده که از طریق نرم‌افزار استمپس (StaMPS) مورد پردازش قرار گرفته‌اند؛ و فرونشست سالانه زمین را در این دشت به دست آورده‌اند و نقشه‌های سری زمانی برای سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۱ ایجاد کرده‌اند. در کل، بر اساس نتایج روش پراکنده سازهای دائمی، سه ناحیه فرونشست در زیرزمین کشف شد، و این مناطق در مناطق نفتی، مناطق استخراج نمک و مناطق ساحلی قرار داشتند. میزان فرونشست زمین از ۵۰ میلی‌متر در سال به ۲۳۶ میلی‌متر در سال رسیده است، مقصودی و همکاران (۲۰۱۸)، نرخ فرونشست جاوا در غرب اندونزی را در دو بازه زمانی ۲۰۰۷ تا ۲۰۰۹ و ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۶ را طبق داده‌های سنتینل-۱ و آلوس به ترتیب ۴/۶

1 Rosa María Mateos

2 Sun

3 Liaohé Plain

و ۲/۸ میلی‌متر در سال برای این منطقه گزارش کرده است. لیوسیسی^۱ و همکاران (۲۰۱۸)، فرونشست در نواحی روستایی الویگان^۲ امارات را بین سال‌های ۲۰۰۳-۲۰۱۰ به ترتیب برای داده‌های آلوس و سنتینل-۱ حدود ۱۸ سانتی‌متر و حدود ۱۰ سانتی‌متر در سال به دست آوردند. دالیو^۳ و همکاران (۲۰۱۸)، فرونشست زمین را در باتلاق‌های نمکی لاگونی و نیز با استفاده تداخل سنجی راداری و تحقیقات زمینی را مورد بررسی قرار داده‌اند. این محققین از تکنیک پراکنده ساز دائمی (PSI)، داده‌های راداری در یک دوره ۵ ساله مربوط به منطقه مورد مطالعه استفاده کرده‌اند. نرخ فرونشست را بیش از ۲۰ میلی‌متر در سال به دست آورده‌اند. عامل اصلی فرونشست، عامل انسانی بوده است. میلر^۴ و همکار (۲۰۱۹)، در مقاله‌ای به بررسی فرونشست زمین در هوستون و ارتباط آن با سیل حاصل از طوفان هاروی پرداخته‌اند. این محققین با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری و تصاویر سنجنده سنتینل-۱، سری B، نقشه پهنه‌های خطر سیلاب را مشخص کرده‌اند. نقشه فرونشست زمین را نیز قبل از وقوع طوفان را با استفاده از پردازش داده‌های چند زمانه SAR ماهواره‌ای پیشرفته (ALOS) و ماهواره‌های سنتینل-۱، سری B، به دست آورده‌اند. آن‌ها دریافتند که مقدار فرونشست بالای ۴۹ میلی‌متر در سال و ۳۴ میلی‌متر در طی بازه زمانی پردازش تصاویر آلوس (ژوئیه ۲۰۰۷-ژانویه ۲۰۱۱) و سنتینل-۱ سری B، (دسامبر ۲۰۱۵ تا اوت ۲۰۱۷) بوده است، و نتیجه گرفتند که ۸۵ درصد از منطقه سیل‌زده با نرخ کمتر از ۵ میلی‌متر در سال فرومی‌نشینند. آن‌ها از طریق آزمون کای اسکوتر مستقل^۵ بیان نمودند که فرونشست زمین از طریق تغییر پایه ارتفاع سیلاب^۶ و گرادیان‌های شیب‌بر روی شدت سیل تأثیرگذار بوده است. حقیقی و معنق (۲۰۱۹)، فرونشست دشت تهران و ورامین را مطالعه کردند. آن‌ها مطالعه جامعی را برای بررسی دقیق پدیده فرونشست به کمک روش InSAR و پردازش ۳۹ تصویر ماهواره انویست و ۱۰ تصویر ماهواره آلوس پالسا (ALOS-PALSAR) و ۴۸ تصویر ماهواره تراسار-ایکس (TerrASAR-X) و ۶۴ تصویر ماهواره سنتینل-۱ برای یک بازه زمانی ۱۴ ساله به کمک ۴۰۰ ایتر فریوگرام انجام داده‌اند. نتایج آن‌ها نشان داد که دشت تهران با ماکزیمم نرخ فرونشست ۲۵ سانتی‌متر در حال فرونشست است و فرودگاه بین‌المللی تهران سالانه ۵ سانتی‌متر فرومی‌نشیند. ژئو^۷ و همکاران (۲۰۱۹)، در مقاله‌ای به ارزیابی سری‌های زمانی الگوهای فرونشست زمین در دشت پکن شرقی، چین پرداخته‌اند. این محققین نخست، به روش تداخل سنجی پراکنش گر دائمی (PSI)، و با به‌کارگیری داده‌های سنجنده انویست و رادارست (Radarsat-2) در بازه زمانی ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۵، برای جابجایی‌های درازمدت این دشت استفاده گردیده است. نتایج این تحقیقی ماکزیمم نرخ فرونشست را، ۱/۱۸۴ میلی‌متر در سال تا

1 Nikolaos Liosis

2 Al Wagan

3 Cristina Da Lio

4 Miller

5 The Chi-square Test of Independence

6 Base Flood Elevations

7 Junjie Zuo

سال ۲۰۱۵ به دست آوردند. دلیل عمده الگوهای تکاملی سری زمانی فرونشست، تغییرات سالانه تراز آب زیرزمینی بوده است.

سیان^۱ و همکاران (۲۰۱۹)، فرونشست زمین در شهرهای ساحلی بانجول^۲ (گامبیا) و لاگوس^۳ (نیجریه) در آفریقا را با استفاده از تداخل سنجی پراکنش گرهای دائمی (PSI) و تصاویر سنتینل-۱، و تصاویر (TerraSAR-X) و تصاویر خودکار برای مناطق با جابجایی زیاد زمین، اطلاعات مفید برای توسعه شهری، مدیریت خطر بلایا و برنامه‌ریزی سازگاری با آب‌وهوا را ارائه می‌دهد. فیاسچی^۴ و همکاران (۲۰۱۹)، جابجایی زمین را با استفاده از روش پراکنش گرهای دائمی (PSI)، در مناطق معتدل اقیانوسی با به‌کارگیری داده‌های راداری سنتینل-۱، در جمهوری ایرلند مطالعه کرده‌اند. بازه زمانی این مطالعه از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۸ بوده است. بیشترین مقدار جابجایی زمین حاصل از فرونشست را ۱۷- میلی‌متر در سال در مناطق شهری و محیط‌های طبیعی رخ داده است. ال‌کمالی^۵ و همکاران (۲۰۲۱)، فرونشست و جابجایی زمین را در منطقه ریماه، امارات متحده عربی به‌عنوان یک منطقه با آب‌وهوای خشک و بیابانی بررسی کرده‌اند. سرعت فرونشست در این محدوده را ۴۰ میلی‌متر در سال به دست آورده‌اند که به علت افت ۱۲ متری سطح آب‌های زیرزمینی در این منطقه بوده است. در این تحقیق، از روش تداخل سنجی پراکنش گرهای پایدار (PS-InSAR) بر مبنای پردازش خودکار SNAP2STAMPS برای برآورد فرونشست در دشت مرند استفاده شد.

دشت مرند، یکی از دشت‌های مهم استان آذربایجان شرقی است که به دلیل بهره‌برداری بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی جهت تأمین نیازهای آبی منطقه خصوصاً کشاورزی و همچنین کاهش نزولات جوی و خشک‌سالی‌های اخیر دچار فرونشست شده است. سطح آب‌های زیرزمینی در این دشت از سال ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۷، به‌طور متوسط تا ۳ متر در سال برآورد شده است، که زمین‌های کشاورزی حاشیه کوشک سرای و یامچی بالاترین نرخ افت سطح ایستابی را داشته‌اند (داداشی و همکاران، ۱۳۹۹: ۹۲). لذا با توجه به اهمیت این موضوع، تحقیق حاضر با استفاده از ۱۳۴ تصویر ماهواره سنتینل-۱ (Sentinel-1A) برای به دست آوردن نرخ فرونشست زمین در محدوده مطالعاتی از سال ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۰ انجام گرفته است که نتایج آن می‌تواند در مدیریت آبخوان این دشت مؤثر واقع شود.

1 Cian

2 Banjul

3 Lagos

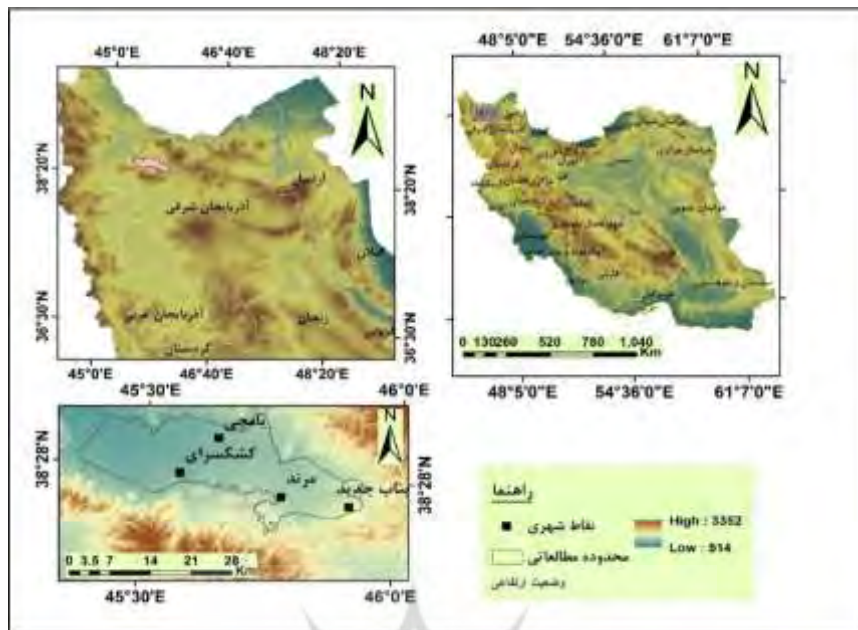
4 Simone Fiaschi

5 Muhagir El Kamali

۲- مواد و روش

۲-۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

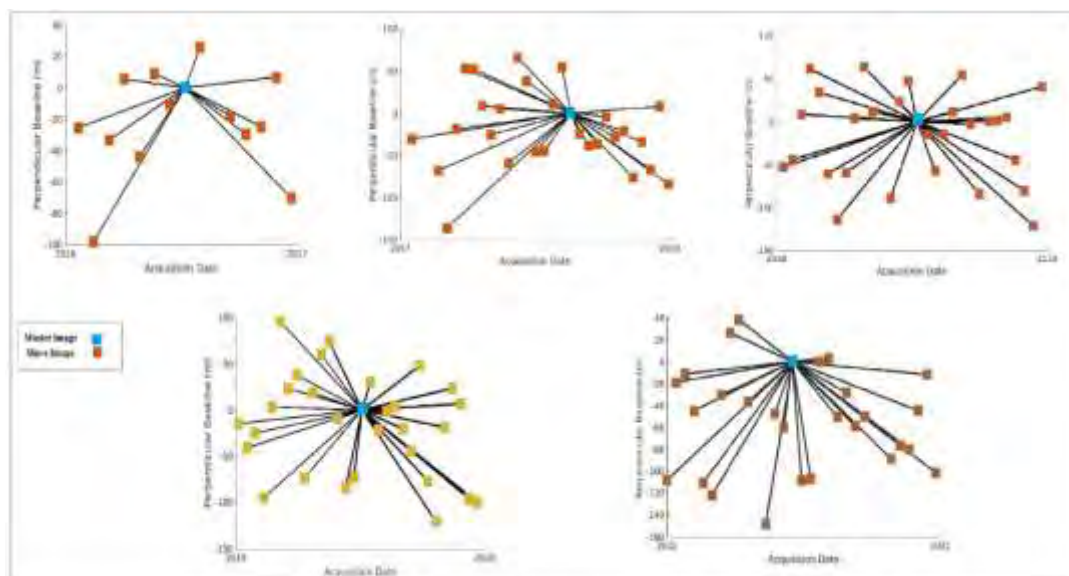
دشت مرند به‌عنوان بخشی از حوضه آبریز رودخانه ارس در شمال غرب ایران واقع شده است و از نظر زمین‌ساختی به‌صورت یک گرابن - در حدفاصل رشته‌های کوهستانی قره داغ در شمال و میشوداغ در جنوب - فروافتاده است. گسل‌های متعددی به‌ویژه گسل شمالی میشو در شکل‌گیری این دشت نقش داشته‌اند. این دشت با روند شرقی-غربی، به‌صورت یک چاله ساختمانی نئوژن-کواترنری در شمال غرب ایران و حدفاصل دو رشته‌کوه عمده منطقه یعنی قره داغ و میشو داغ واقع شده است. این چاله انباشته از نهشته‌های آبرفتی دوران کواترنری است که در قالب مخروط افکنه‌هایی در امتداد جبهه کوهستانی مشرف به دشت ردیف شده‌اند (مختاری کشکی، ۱۳۸۶). قدیمی‌ترین واحد زمین‌شناسی منطقه، متعلق به پرکامبرین است که در جنوب دشت در مجاورت توده‌های نفوذی گرانیت شیل و گرانیت قوشچی از گسترش محدودی برخوردار است. دو رودخانه اصلی این زیر حوضه؛ زیلبر چای و زنوز چای است که پس از اتصال به رودخانه قطور چای و سپس ارس، به حوضه آبریز دریای خزر می‌ریزند. سلسله جبال جنوبی شامل ارتفاعات میشو و مورو هستند که حد بین حوضه‌های آبریز دشت مرند یکی از دشت‌های با توان بالا در زمینه تولید محصولات باغی است. این دشت بهره‌مندی مناسبی از منابع آبی داشته و این امر، به رونق کشاورزی آن کمک نموده است، اما با توجه به مشکلاتی نظیر کم‌آبی و نیاز به افزایش تولید با توجه به افزایش جمعیت، مکانیزه شدن سیستم آبیاری، کاشت و برداشت محصولات در دشت مرند، در سال‌های اخیر دچار فرونشست شده است. برداشت‌های بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی طی سنوات گذشته موجب کاهش ذخایر آبی و ایجاد مشکلات جدی از جمله کاهش آبدهی چاه‌ها، خشک شدن قنات و چشمه‌ها، شور شدن آب‌های زیرزمینی در بخش‌های زیادی از دشت مرند شده است. برداشت بیش‌ازحد آب و افت سطح آب زیرزمینی موجب ایجاد فروچاله و یا فرونشست زمین در این دشت شده است. فرونشست رخ داده در دشت مرند باعث شده در منطقه بر زیرساخت‌های موجود تأثیر گذاشته و باعث شکست پایه بتنی چاه‌های کشاورزی و خم شدن تیرهای برق گردیده است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه، دشت مرند

۲-۲- روش انجام پژوهش

در تکنیک پراکنش گره‌های دائمی (PsInSAR) ایده اصلی شناسایی نقاط همبسته با رفتاری ثابت و پایدار در طول زمان با استفاده از سیگنال استخراج شده از داده‌های راداری است. در واقع بر روی هر پراکنش گر دائمی اطلاعاتی از قبیل نرخ سرعت جابجایی و خطای باقیمانده مدل ارتفاعی رقومی زمین برآورد می‌شود روند کلی تکنیک پراکنش گره‌های دائمی در شکل ۳ ارائه شده است. در مطالعه حاضر به منظور بررسی رفتار فرونشست در منطقه مطالعاتی، از پکیج StaMPS-PSI استفاده شده است (هویر، ۲۰۱۸). تغییرات و افت سطح آب در طول ۱۸ سال، از سال ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۸ با استفاده از داده‌های چاه‌های پیزومتری، از شرکت آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی دریافت و در سطح دشت بررسی و سطح آب در ۲۳ گمانه که داده‌های کامل و مشترک داشته‌اند در یک فایل اکسل تهیه گردید. سپس با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS روش درونیابی (IDW) انجام شد. از روش پراکنده ساز دائمی (PSI) بر مبنای پردازش خودکار SNAP2STAMPS به منظور پایش فرونشست منطقه استفاده شده است. جهت پردازش از تصاویر ماهواره سستینل-۱ مربوط به بازه زمانی ۵ ساله از تاریخ ۲۳ ژانویه ۲۰۱۶ تا ۲۲ دسامبر ۲۰۲۰ استفاده شده است. تعداد این تصاویر ۱۳۳ تصویر سستینل-۱، از نوع SLC با قطبش (VV) و حالت (IW) و پایین گذر (مسیر ۷۹) بوده است. بیس لاین زمانی هر تصویر، ۱۲ روز بوده است. به حداقل رساندن این بیس لاین به همدوسی داده‌ها می‌انجامد. شبکه گراف مربوط به تصاویر سستینل-۱ هر پنج پارت تحقیق ترسیم شده است، گراف مورد استفاده در این پردازش به روش ستاره‌ای است (شکل ۲).



شکل ۲- گراف ستاره‌ای اینترفروگرام‌های ایجادشده هر سال برای روش تداخل سنجی راداری (PSI)

در شکل ۲، نگاره‌های بیس لاین را برای هر پنج دوره مورد بررسی در تحقیق را نشان می‌دهد. تصویر پایه در مرکز و به رنگ قرمز که بیشینه مقدار همبستگی زمانی، مکانی و نرخ داپلر را با سایر تصاویر دارد، و موقعیت نسبی تصاویر پیرو را به رنگ آبی نشان داده است. هر خط مخفف یک جفت تصویر است که برای محاسبه اینترفروگرام مورد استفاده قرار می‌گیرد. پردازش‌های لازم در نرم‌افزار اسنپ (SNAP) و استمپس (STAMPS) انجام گرفته است و اینترفروگرام‌های لازم تهیه شده و در نهایت با استفاده از روش پراکنده ساز دائمی، میزان فرونشست به دست آمده است. مشخصات تصاویر انتخابی مورد استفاده در تحقیق در جدول ۱ ارائه شده است:

جدول ۱- مشخصات کلی تصاویر انتخابی مورد استفاده در تحقیق

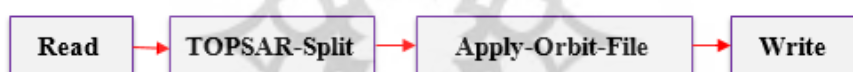
N-images	Fram	Orbit	Pass	Last image	First image	Satellite sensors
۱۴	۴۶۴	Descending	۷۹	۲۰۱۶/۱۲/۲۳	۲۰۱۶/۰۱/۲۳	Sentinel-1A
۲۸	۴۶۴	Descending	۷۹	۲۰۱۷/۱۲/۳۰	۲۰۱۷/۰۱/۱۶	Sentinel-1A
۳۰	۴۶۴	Descending	۷۹	۲۰۱۸/۱۲/۲۵	۲۰۱۸/۰۱/۱۱	Sentinel-1A
۳۰	۴۶۴	Descending	۷۹	۲۰۱۹/۱۲/۲۰	۲۰۱۹/۰۱/۰۶	Sentinel-1A
۳۱	۴۶۴	Descending	۷۹	۲۰۲۰/۱۲/۲۵	۲۰۲۰/۰۱/۰۱	Sentinel-1A

پردازش داده‌ها به روش پراکنده ساز دائمی در این تحقیق به دو بخش زیر تقسیم شده است که عبارت‌اند از:

پردازش خودکار با استفاده از یک تصویر پایه با استفاده از اسکریپت‌های بسته متن باز پایتون نرم افزار

اسنپ^۱

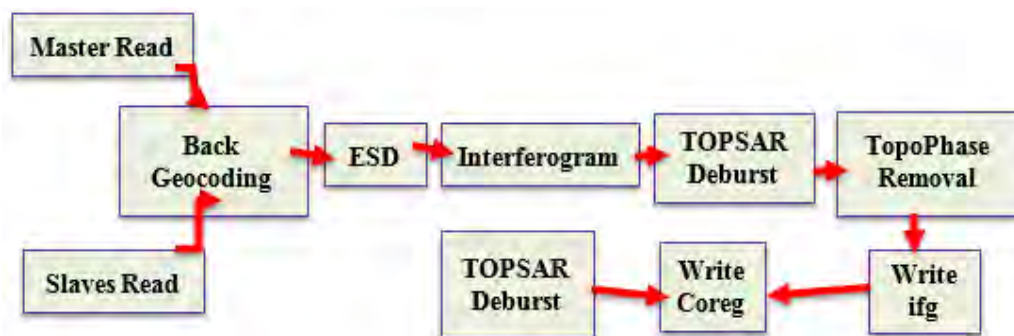
پکیج منبع باز SNAP2STAMPS، توسط ژوزه مانوئل دلگادو بلاسکو^۲ و میسائیل فیوملس^۳ در سال ۲۰۱۸ ارائه شده است (دلگادو بلاسکو و همکاران، ۲۰۱۹). در این تحقیق آخرین ورژن این پکیج که توسط دلگادو بلاسکو در سال ۲۰۱۹ ارتقاء یافت استفاده شده است (دلگادو بلاسکو و همکاران، ۲۰۱۹). برنامه پردازش خودکار SNAP2STAMPS طی چهار مرحله انجام می پذیرد. در این نوع پردازش، اسکریپت‌ها به طور سامانمند با استفاده از ابزار گراف، مجموعه‌ای از ایتترفروگرام را به حالت دسته‌ای^۴ ایجاد می کنند. قبل از آن تصاویر پایه هر دوره انتخاب می شوند، انتخاب تصویر Master به صورتی انجام می شود که در آن تأثیر عدم همبستگی‌های مکانی - زمانی و اختلاف داپلر مرکزی به حداقل برسد. آماده‌سازی و مرتب کردن تصاویر ستینل-۱ بر اساس تاریخ اخذ تصاویر انجام خواهند شد. بعد از اینکه تصویر Master برای هر دوره انتخاب گردید، تمامی تصاویر Slave بر اساس مختصات محدوده مورد مطالعه برش داده شده و اطلاعات مداری آن‌ها به طور خودکار توسط SNAP بارگیری و به روزرسانی می شوند (شکل ۳).



شکل ۳- گراف مربوط به مرحله جداسازی تصاویر و دریافت اطلاعات مداری آن‌ها در بسته متن باز پایتون نرم افزار اسنپ

ثبت هندسی تصاویر لازمه تشکیل ایتترفروگرام در مرحله بعدی است که تضمین می کند هر تارگت زمینی مربوط به یک پیکسل مشابه با مختصات آزیموت و رنج یکسان در هر دو تصویر پایه و پیرو است. مرحله بعدی، ثبت هندسی داده‌ها و تولید ایتترفروگرام‌ها است که با استفاده از تنوع طبقی آن‌ها صورت می گیرد (دلگادو بلاسکو و همکاران، ۲۰۱۹). این مرحله به لحاظ محاسباتی، دشوارترین مرحله پردازش در SNAP2STAMPS است، زیرا ثبت هندسی داده‌های تاپسار را انجام می دهد و هم‌زمان با تولید ایتترفروگرام‌ها، مقدار سهم فایز نویز و فاز زمین مسطح نیز حذف شده و بخش‌های جدا شده تصاویر نیز به همدیگر متصل می شوند (شکل ۴).

1 SNAP2STAMPS
2 Delgado Blasco
3 Michael Foumelis
4 Batch mode



شکل ۴- گراف مربوط مرحله ثبت هندسی و تولید اینترفروگرام‌ها در بسته متن‌باز پایتون نرم‌افزار اسنپ

داده‌های تکمیلی موردنیاز استمپس از جمله؛ باند ارتفاعی و مختصات عرض و طول جغرافیایی داده‌ها نیز تولید می‌شوند. در نهایت خروجی‌های استمپس آماده‌سازی می‌شوند، که داده‌های پردازش شده مراحل قبلی را به فرمت رستری باینری و سازگار با استمپس تبدیل می‌کند (شکل ۵).



شکل ۵- گراف مربوط مرحله خروجی گرفتن در بسته متن‌باز پایتون نرم‌افزار اسنپ

یکی از کاربردی‌ترین شاخص‌های شناسایی پیکسل‌های پراکنده ساز دائمی، شاخص پراکندگی دامنه هست که برای اولین بار توسط فرتی^۱ و همکاران در سال ۲۰۰۱ معرفی شد. این شاخص پیکسل‌هایی را که نشان‌دهنده مقدار دامنه پایدار هستند، مطابق رابطه [۱] شناسایی می‌کند. شاخص پراکندگی دامنه بر اساس رابطه زیر بیان می‌شود (فرتی و همکاران، ۲۰۰۱).

$$D_A = \frac{\sigma_A}{m_A} \quad [1]$$

که در آن σ_A و m_A به ترتیب برابر با انحراف معیار و میانگین دامنه باز پراکنش هر پیکسل است. در این مرحله پراکنده‌سازهای کمتر ولی با قابلیت اطمینان بالا جهت برآورد اتمسفر انتخاب می‌شوند. مقدار بهینه این شاخص ۰/۴ پیشنهاد شده است. در این تحقیق مقدار شاخص پراکندگی دامنه (۰/۴۲) انتخاب شده است، تا تعداد پراکنده‌سازهای

دائمی) اولیه را در آغاز پردازش افزایش دهد، این دامنه به صورتی تعیین می‌شود که احتمال انتخاب پراکنش کننده‌های واقعی را افزایش داده و احتمال انتخاب پیکسل‌های با فاز تصادفی کاهش یابد. مرحله بعد از آماده‌سازی داده‌های استمپس، مربوط به وارد کردن داده‌های آماده‌شده در اسنپ به استمپس است. پس‌از آن، زنجیره پردازش پراکنده ساز استمپس (StaMPS-PSI) ایجاد می‌شود (هوپر^۱ و همکاران، ۲۰۱۸).

پردازش روش پراکنده ساز دائمی با استفاده از استمپس (StaMPS)

مجموعه‌ای از ایتترفروگرام‌ها با استفاده از روش‌های اجرایی متلب در استمپس پردازش شده است، که با تصحیحات تروپوسفریک مبتنی بر فاز خطی با استفاده از پکیج ترین (TRAIN) که تأخیر تروپوسفری را نسبت به توپوگرافی جبران می‌کند، تکمیل گردیده است (بکرت^۲ و همکاران، ۲۰۱۵).

مراحل پردازش تصاویر راداری سنتینل-۱ در پکیج استمپس (StaMPS) طبق شکل ۶، شرح داده شده است:



شکل ۶- مراحل پردازش استمپس (StaMPS)

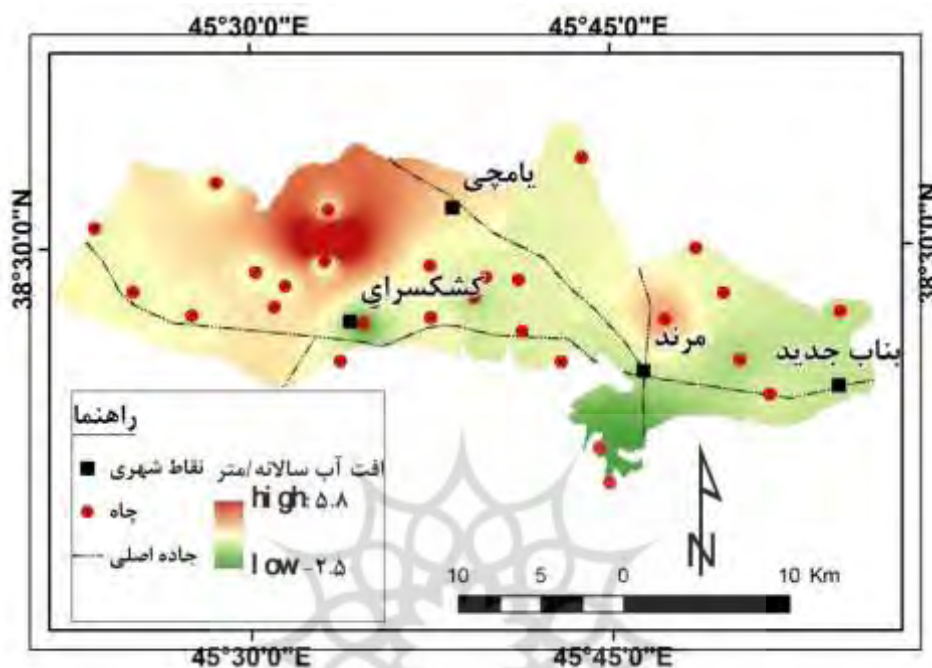
۳- نتایج و بحث

به‌منظور بررسی نوسانات سطح آب زیرزمینی در این محدوده، با استفاده از اطلاعات ثبت‌شده سطح آب زیرزمینی در ۳۰ چاه مشاهداتی که دارای داده‌های کامل بوده است، در بازه زمانی ۱۷ ساله (۱۳۸۰ تا ۱۳۹۷) نقشه هم‌افت سطح آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی در محیط نرم‌افزار ARC-GIS و از طریق درون‌یابی به روش IDW ترسیم شده است (شکل ۷). بر اساس نتایج حاصله، میانگین افت سالانه آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه بین ۵/۸ و ۲/۵- متر طی دوره ۱۷ ساله بوده است که از نظر پراکنش مکانی، مناطق میانی دارای بالاترین میزان افت بوده‌اند. چاه‌های واقع

1 Hooper

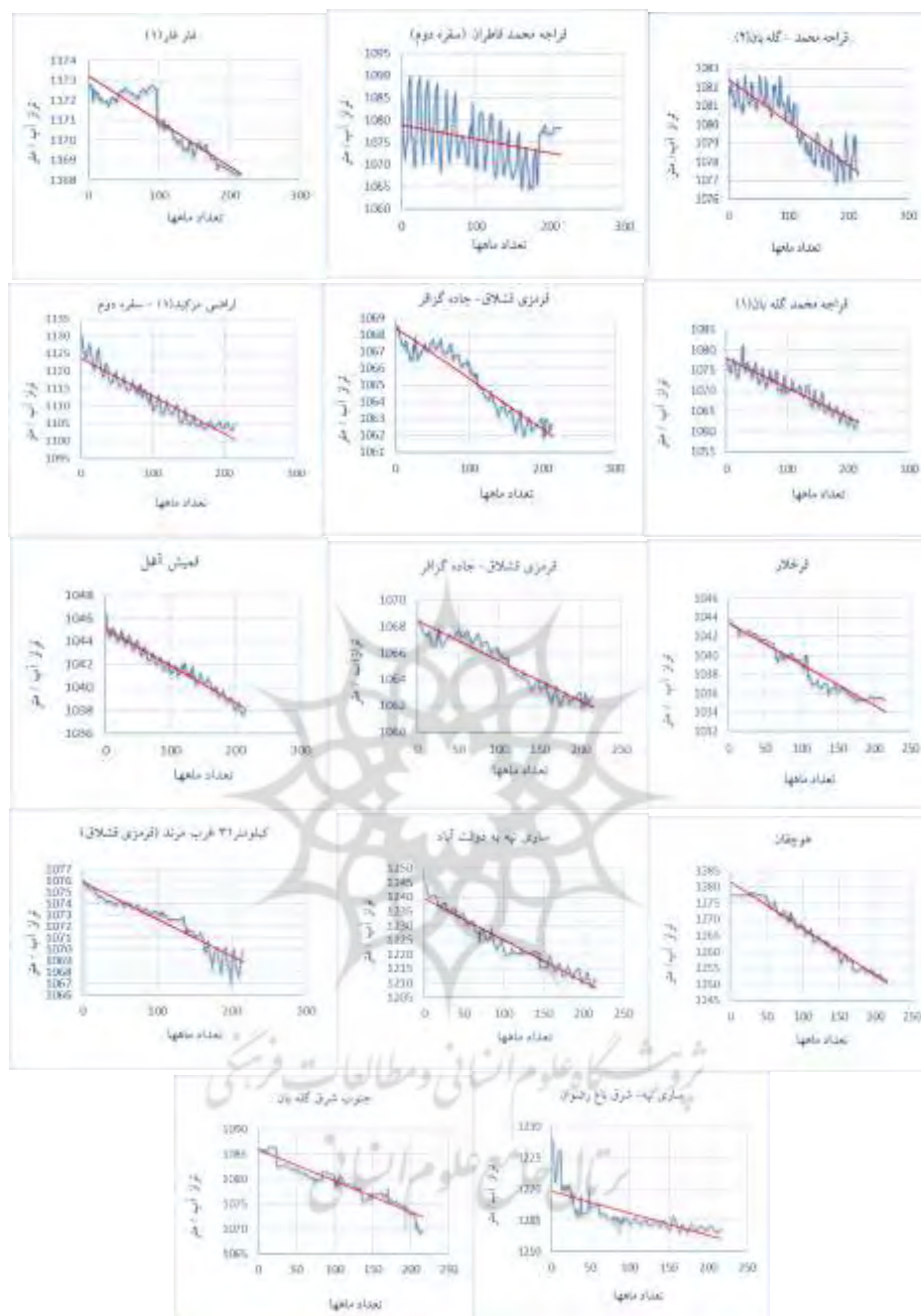
2 Bekert

در محدوده‌های شمال غرب و جنوب غرب کَشک سرای و یامچی دارای بالاترین افت سالانه آب زیرزمینی را داشته است.



شکل ۷- نقشه افت منابع آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه

همچنین برای بررسی تغییرات زمانی نوسانات سالانه سطح آب زیرزمینی، از داده‌های ماهانه سطح آب زیرزمینی ۳۰ چاه مشاهده‌ای در طی سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۷ استفاده شده است. شکل ۸ هیدروگراف مربوط به تغییرات سری زمانی سطح آب در ۳۰ چاه مشاهده‌ای موجود در دشت مرند را نشان می‌دهد. بررسی هیدروگراف‌های چاه‌های مشاهده‌ای قرار گرفته در آبخوان مرند نشان‌دهنده حالت نوسانی تراز آب چاه‌ها است و تراز آب همواره روند نزولی مشاهده‌ای قرار گرفته در آبخوان مرند نشان‌دهنده حالت نوسانی تراز آب چاه‌ها است و تراز آب همواره روند نزولی نسبت به زمان نشان می‌دهد. روند نزولی هیدروگراف‌ها نشان‌دهنده افت مداوم سطح آب زیرزمینی است. کاهش تغذیه ناشی از خشک‌سالی‌های اخیر به همراه افزایش برداشت بی‌رویه به‌عنوان عامل اصلی افت شدید سطح آب زیرزمینی در دشت مرند شده است.

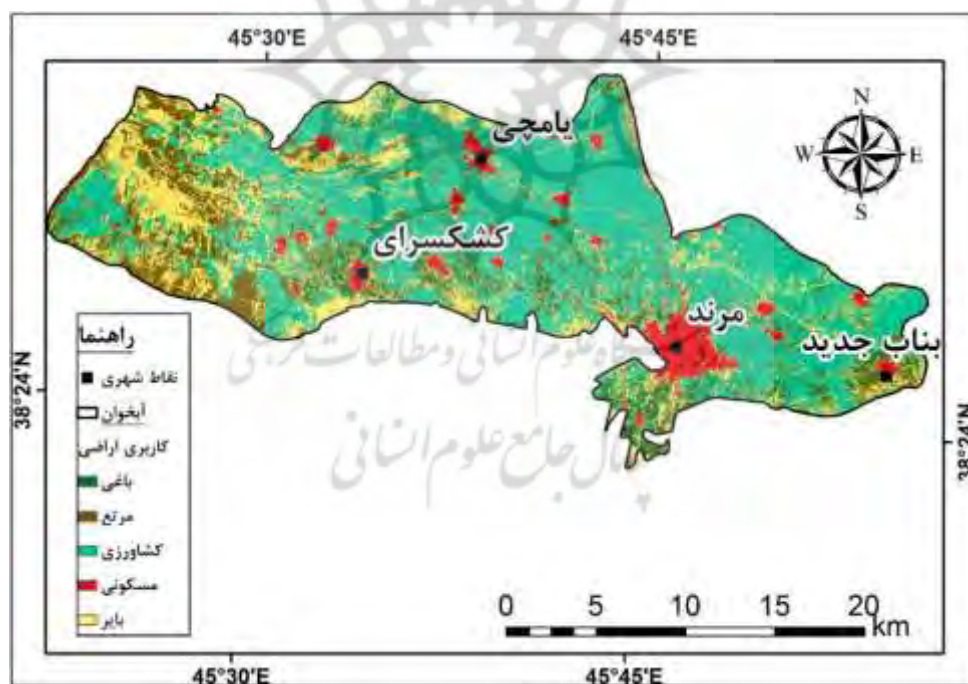


شکل ۸- نمودارهای سری زمانی چاه‌های مشاهداتی دارای افت آب و فرونشست در محدوده مطالعاتی

تحلیل نقشه کاربری و پوشش اراضی و ارتباط آن با فرونشست منطقه

نوع کاربری اراضی از عوامل انسانی مهم در تشدید وقوع فرونشست است. در واقع، بهره‌برداری‌های انسان یکی از عوامل مؤثر در وقوع فرونشست محسوب می‌شود، به طوری که مناطق دارای کاربری اراضی کشاورزی آبی به دلیل

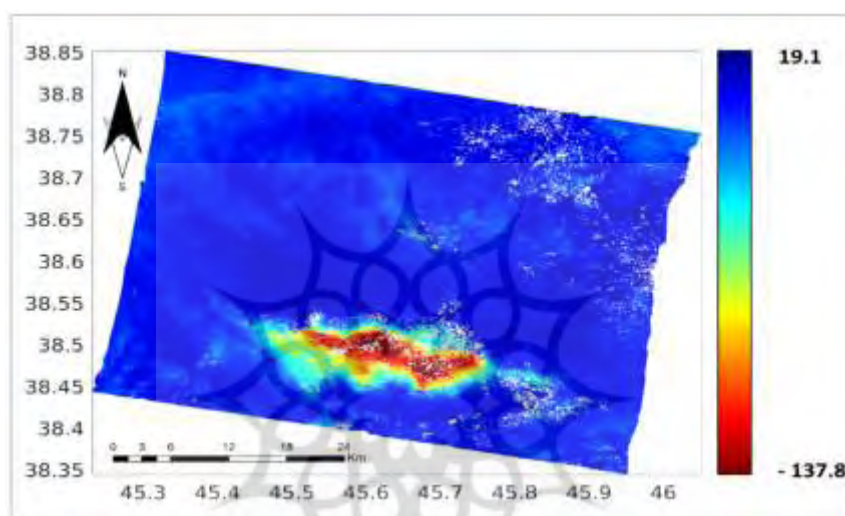
بهره‌برداری از مناطق آب زیرزمینی، پتانسیل بالایی جهت وقوع فرونشست دارد. همچنین مناطق سکونتگاهی نیز به دلیل ساخت‌وسازها، مستعد وقوع فرونشست هستند. در این تحقیق، نقشه کاربری اراضی محدوده مورد مطالعه از نقشه پوشش اراضی کل جهان که توسط سازمان فضایی اروپا که ۲۰۲۱ ماه اکتبر با رزولوشن ۱۰ متر که بر اساس داده‌های راداری Sentinel-1 و Sentinel-2، در ۱۱ کلاس پوشش زمین تهیه شده اخذ گردیده و محدوده مطالعاتی از نقشه کل برش داده شد. پس از اینکه محدوده را از نقشه سازمان ESA، جداسازی شد، نقشه کاربری را در محیط ARC-GIS از طریق ابزار Reclassify به ۵ طبقه، نواحی سکونتگاهی، کشاورزی - باغی، مراتع و اراضی بایر طبقه‌بندی شده است (شکل ۹). بر اساس نقشه مذکور، مناطق جنوبی و جنوب غربی محدوده منطبق بر کوهستان میشو را کاربری مراتع و اراضی بایر و همچنین مناطق مرکزی محدوده را اراضی کشاورزی آبی و دیم دربر گرفته است. فرونشست رخ داده در این منطقه در کلاس مربوط به اراضی زراعی نزدیک به مناطق سکونتگاهی اتفاق افتاده است. با توجه به این تغییرات، میزان افت آب‌های زیرزمینی و یا میزان افزایش آن را مشخص سازد. مطالعات بیشتری در کل جهان و کاربری‌های مختلف تأثیرات بسیار زیادی بر روی سطح تراز آب‌های زیرزمینی دارند، به این دلیل که کاربری‌های مختلف باعث مصرف متفاوتی از آب‌های زیرزمینی می‌شود.



شکل ۹- نقشه کاربری اراضی محدوده مطالعاتی

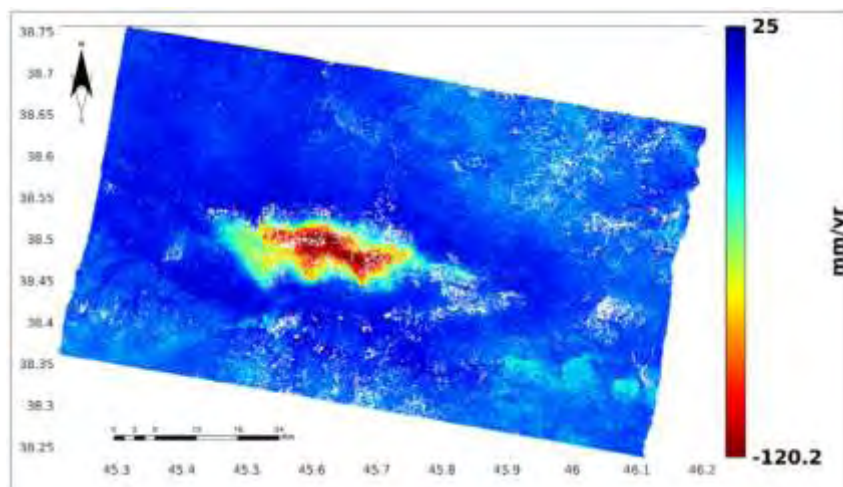
ارزیابی میزان فرونشست با استفاده از روش تداخل سنجی پراکنش گرای دائمی (PSInSAR)

بررسی وضعیت فرونشست در محدوده مورد مطالعه در بازه زمانی ۲۲ ژانویه سال ۲۰۱۶ تا ۲۳ دسامبر سال ۲۰۱۶ نشان می‌دهد که بیش‌ترین میزان فرونشست در قسمت میانی دشت مرنند، در قاعده مخروط افکنه‌های قدیمی و قسمت دشتی این محدوده، در محدوده روستاهای اربطان، فارفار، مرکید، یالقوزآغاج، گله بان و درویش محمد بوده است. حداکثر فرونشست در سال ۲۰۱۶ با فاصله زمانی ۱۲ روزه، $۱۳۷/۸$ میلی‌متر در سال برآورد شد. کمترین میزان جابجایی با مقدار $۱۹/۱$ میلی‌متر بالآمدگی در منطقه مورد مطالعه رخ داده است (شکل ۱۰).



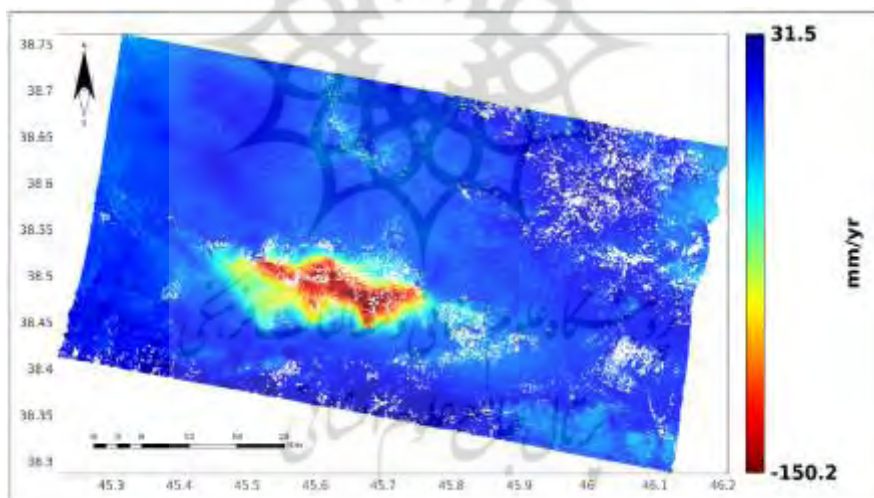
شکل ۱۰- نقشه سرعت جابجایی متوسط محدوده مطالعاتی سال ۲۰۱۶

نقشه فرونشست سال ۲۰۱۷ حاکی از افزایش نرخ فرونشست در محدوده مطالعاتی است (شکل ۱۱). حداکثر جابجایی زمین در سال ۲۰۱۷ در بازه زمانی ۱۲ روزه، $۱۲۰/۲$ میلی‌متر به صورت فرونشست و ۲۵ میلی‌متر به شکل بالآمدگی بوده است. تغییرات جابجایی زمین در این سال نسبت به سال قبل بدین صورت بوده است که نرخ فرونشست ۱۸ میلی‌متر کاهش و بالآمدگی منطقه ۶ میلی‌متر افزایش پیدا کرده است.



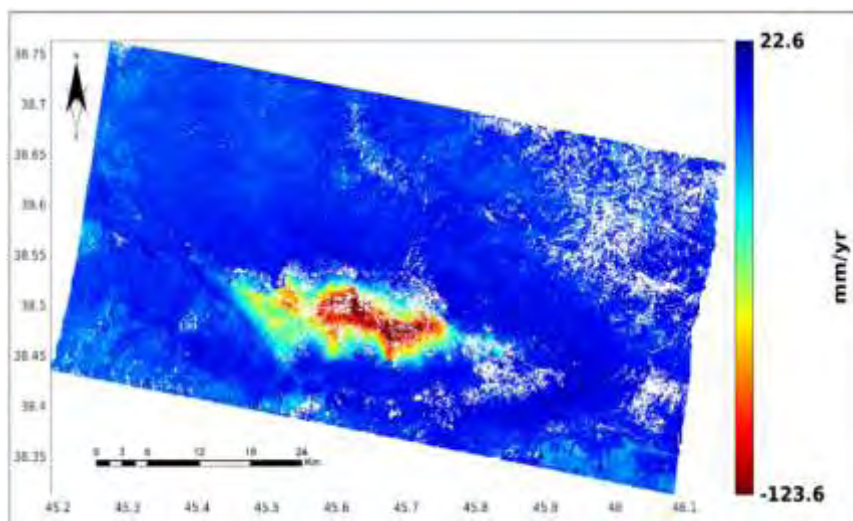
شکل ۱۱- نقشه سرعت جابجایی متوسط محدوده مطالعاتی سال ۲۰۱۷

تاریخ ۱۱ ژانویه ۲۰۱۸ تا ۲۵ دسامبر ۲۰۱۸، میزان فرونشست منطقه ۳۲ میلی‌متر افزایش یافته و به نرخ حداکثری ۱۵۲/۲- میلی‌متر فرونشست و ۳۴/۲ میلی‌متر بالآمدگی رسیده است (شکل ۱۲).



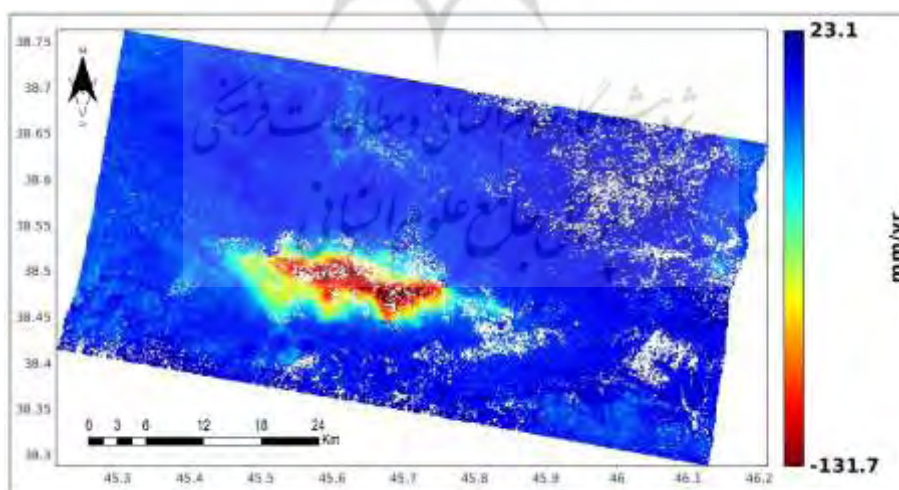
شکل ۱۲- نقشه سرعت جابجایی متوسط محدوده مطالعاتی سال ۲۰۱۸

بررسی وضعیت فرونشست در محدوده مورد مطالعه از روز ۶ ژانویه سال ۲۰۱۹ تا ۲۰ دسامبر همین سال نشان می‌دهد که نرخ جابجایی به صورت ۱۲۳/۶- میلی‌متر فرونشست و ۲۲/۶ میلی‌متر بالآمدگی به دست آمده است، وضعیت فرونشست زمین در این محدوده روند افزایشی ۱۲ میلی‌متر بالآمدگی و ۲۹ میلی‌متر کاهش فرونشست زمین نسبت به سال قبل را نشان می‌دهد (شکل ۱۳).



شکل ۱۳- نقشه سرعت جابجایی متوسط محدوده مطالعاتی سال ۲۰۱۹

بررسی وضعیت فرونشست در محدوده مورد مطالعه در بازه زمانی روز ۱ ژانویه سال ۲۰۲۰ تا دسامبر سال ۲۰۲۰ نشان می‌دهد که این مقدار نسبت به سال قبل حدود ۹ میلی‌متر کاهش فرونشست و ۱ میلی‌متر بالا آمدگی افزایش پیدا کرده است. در سال ۲۰۲۰، مقدار فرونشست و بالا آمدگی به ترتیب $131/7$ - میلی‌متر و $23/1$ میلی‌متر به دست آمده است (شکل ۱۴). بیشترین میزان جابجایی رخ داده در محدوده مطالعاتی، در سال ۲۰۱۸ اتفاق افتاده است در مجموع مخروط افکنه‌ها خصوصاً قاعده مخروط افکنه‌ها و دشت انتهایی دارای بیشترین مقادیر فرونشست هستند.



شکل ۱۴- نقشه سرعت جابجایی متوسط محدوده مطالعاتی سال ۲۰۲۰

۴- جمع‌بندی

روش سری زمانی تداخل سنجی با پراکنش گرهای دائمی (PSI)، کمک شایانی در جهت پایش فرونشست و جابجایی‌های سطح زمین کرده است. از جمله محدودیت‌های این روش وجود پیکسل‌های سفید زنگ در سطح نقشه جابجایی بود، این موضوع به دلیل ناهمبستگی زمانی که بر اثر تغییرات سریع پوشش منطقه و در نتیجه پایین بودن میزان هم‌دوسی ایجاد می‌شود. همچنین اختلاف فاز ناشی از باز کردن فاز (phase unwrapping) که با توجه به توپوگرافی منطقه مورد مطالعه قابل توجه نبوده است. در تحقیق حاضر، برای نخستین بار به پایش نرخ فرونشست زمین در دشت مرند استان آذربایجان شرقی، از فن تداخل سنجی راداری PSI با استفاده از داده‌های سنجنده سنتینل-۱ و پکیج خودکار SNAP2STAMPS استفاده شده است. همچنین در این تحقیق، پتانسیل بسته متن باز استمپس و نرم‌افزار اسنپ جهت پردازش تداخل سنجی راداری نشان داده شده است که از نتایج مهم استخراج شده از این الگوریتم پردازشی، ایجاد نقشه‌های متوسط جابجایی برای دشت مرند با مقادیر ۱۳/۷-، ۱۲-، ۱۵/۲-، ۱۲/۳- و ۱۳/۱- سانتی‌متر در سال در راستای دید ماهواره در طول بازه زمانی مورد مطالعه (از سال ژانویه ۲۰۱۶ تا دسامبر ۲۰۲۰) بوده است. فرونشست‌های رخ داده در منطقه بر زیرساخت‌های موجود تأثیر گذاشته و باعث شکست پایه بتنی چاه‌های کشاورزی و خم شدن تیرهای برق گردیده است. به لحاظ پراکنش مکانی، مناطق فرونشست یافته عمدتاً در مناطق میانی دشت مشاهده شده است؛ بنابراین مناطق میانی دشت بیشترین نرخ فرونشست نسبت به سایر نواحی دشت را دارا هستند. منطقه فرونشست در جنوب شهر یامچی و شمال و شمال غرب کشک سرای در حال اتفاق افتادن است و روستاهای زیادی از جمله اربطان، فارفار، مرکید ایلات یالقوزآغاج، درویش محمد در آن واقع شده در این کاسه فرونشست قرار دارد که منطبق بر کاربری اراضی کشاورزی و باغی است که به سمت مناطق شهری در حال پیشروی است. بررسی هیدروگراف‌های چاه‌های مشاهده‌ای قرار گرفته در آبخوان مرند نشان‌دهنده حالت نوسانی تراز آب چاه‌ها است و تراز آب همواره روند نزولی نسبت به زمان نشان می‌دهد، که نشان‌دهنده افت مداوم سطح آب زیرزمینی است. فرونشست‌های رخ داده در دشت مرند بیشتر منطبق بر زمین‌های کشاورزی بوده و سرعت بالایی دارد.

کتابنامه

احمدی، سلمان؛ سودمند افشار، رضا؛ ۱۳۹۹. پایش فرونشست دشت‌های قروه و چهاردولی استان‌های همدان و کردستان به دلیل برداشت بی‌رویه از منابع آب‌های زیرزمینی با استفاده از فن پراکنش گرهای دائمی. محیط‌زیست و مهندسی آب. دوره ۶. شماره ۳. صص ۲۳۳-۲۱۹.

- پاپی، رامین؛ عطارچی، سارا؛ سلیمانی، مسعود؛ ۱۳۹۹. تحلیل سری زمانی فرونشست زمین در غرب استان تهران (دشت شهریار) و ارتباط آن با برداشت آب‌های زیرزمینی با تکنیک تداخل سنجی راداری. *جغرافیا و پایداری محیط (پژوهشنامه جغرافیایی)*. دوره ۱۰. شماره ۳۳. صص ۱۲۸-۱۰۹.
- خرمی، محمد؛ ۱۳۹۶. تخمین فرونشست مشهد با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری و ارزیابی آن با توجه به مشخصات ژئوتکنیکی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه فردوسی. دانشکده مهندسی. گروه مهندسی عمران گرایش ژئوتکنیک. مشهد. صص ۱۴۰.
- خوش‌لهجه آذر، مهدی؛ ۱۳۹۸. بررسی رفتار فرونشست زمین در مناطق مستعد فروچاله با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی. دانشکده مهندسی نقشه‌برداری (ژئودزی و ژئوماتیک). صص ۱۲۰.
- داداشی، ثریا؛ صادق فام، سینا؛ ندیری، عطاالله؛ محبی، یوسف؛ ۱۳۹۹. تحلیل آسیب‌پذیری فرونشست آبخوان دشت مرند با استفاده از روش ALPRIFT بر اثر بهره‌برداری بیش‌ازحد از منابع آب زیرزمین. *مهندسی عمران*. دوره ۲، ۳۶. شماره ۱، ۳. صص ۸۵-۹۶.
- شرافت، متین؛ انصاری، عبدالحمید؛ مجتهد زاده، سید حسین؛ قربانی، احمد؛ ۱۳۹۹. پایش فرونشست دشت ابرکوه یزد با استفاده از فن تداخل سنجی راداری مبتنی بر پراکنش گرهای پایا. *خشک بوم*. دوره ۹. شماره ۲. صص ۱۲۱-۱۳۶.
- شمشکی، امیر؛ انتظام سلطانی، ایمان؛ بلورچی، محمدجواد؛ ۱۳۸۴. *فرونشست زمین در دشت تهران و عوامل مؤثر در شکل‌گیری آن*. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور. صص ۲۱.
- علی‌بخشی، حمید؛ ۱۳۹۵. *بررسی میزان فرونشست دشت ورامین با استفاده از ابزارهای ژئودتیکی داده‌های ترازبایی دقیق InSAR و تصاویر راداری GPS*. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه آزاد اسلامی. واحد شاهرود. دانشکده فنی و مهندسی گروه عمران. گروه ژئودزی. صص ۱۳۱.
- فروغ‌نیا، فاطمه؛ نعمتی، صادق؛ مقصودی، یاسر؛ ۱۳۹۷. آنالیز سری زمانی تداخل سنجی راداری مبتنی بر پراکنش گرهای دائم. با استفاده از تصاویر Sentinel-1A و ENVISAT-ASAR برای برآورد پدیده فرونشست شهر تهران. *سنجش‌ازدور و GIS ایران*. سال ۱۰. شماره ۱. صص ۵۵-۷۲.
- قره‌چلو، سعید؛ اکبری قوچانی، حسام؛ گلپان، سعید؛ گنجی، کامران؛ ۱۴۰۰. ارزیابی میزان فرونشست زمین در ارتباط با آب‌های زیرزمینی به کمک داده ماهواره‌ای راداری سنتینل-۱ و الوس-۱ (منطقه مورد مطالعه: دشت مشهد). *سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی*. دوره ۱۲. شماره ۳. صص ۶۱-۴۰.
- مختاری کشکی، داود؛ ۱۳۸۶. تحلیل‌های زمین‌ساخت - رسوبی چاله تکتونیکی و در حال گسترش مرند. *پژوهش‌های جغرافیایی*. دوره ۳۹. شماره ۶۰. صص ۱۴۹-۱۲۹.
- مؤمنی، سحر؛ ۱۳۹۷. *برآورد فرونشست زمین ناشی از برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی با استفاده از داده‌های سری زمانی (محدوده مورد مطالعه: دشت کبودرآهنگ - فامنین همدان)*. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی. گروه سنجش‌ازدور. دانشگاه تبریز. صص ۷۱.

- Bagheri, M., Hosseini, S. M., Ataie-Ashtiani, B., Sohani, Y., Ebrahimian, H., Morovat, F., & Ashrafi, S., 2021. Land subsidence: A global challenge. *Science of The Total Environment*, 146193. [10.1016/j.scitotenv.2021.146193](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146193)
- Bekaert, D. P. S., Walters, R. J., Wright, T. J., Hooper, A. J., & Parker, D. J., 2015. Statistical comparison of InSAR tropospheric correction techniques. *Remote Sensing of Environment*, 170, 40-47. [10.1016/j.rse.2015.08.035](https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.08.035).
- Cian, F., Blasco, J. M. D., & Carrera, L., 2019. Sentinel-1 for monitoring land subsidence of coastal cities in Africa using PSInSAR: a methodology based on the integration of SNAP and StaMPS. *Geosciences*, 9(3), 124. [10.3390/geosciences9030124](https://doi.org/10.3390/geosciences9030124).
- Crosetto, M., Monserrat, O., Cuevas-González, M., Devanthery, N., & Crippa, B., 2016. Persistent scatterer interferometry: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 78-89. [10.1016/j.isprsjprs.2015.10.011](https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.011).
- Da Lio, C., Teatini, P., Strozzi, T., & Tosi, L., 2018. Understanding land subsidence in salt marshes of the Venice Lagoon from SAR Interferometry and ground-based investigations. *Remote sensing of environment*, 205, 56-70. [10.1016/j.rse.2017.11.016](https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.11.016).
- Delgado Blasco, J. M., Fomelis, M., Stewart, C., & Hooper, A., 2019. Measuring urban subsidence in the Rome metropolitan area (Italy) with Sentinel-1 SNAP-StaMPS persistent scatterer interferometry. *Remote Sensing*, 11(2), 129. [10.3390/rs11020129](https://doi.org/10.3390/rs11020129).
- El Kamali, M., Papoutsis, I., Loupasakis, C., Abuelgasim, A., Omari, K., & Kontoes, C., 2021. Monitoring of land surface subsidence using persistent scatterer interferometry techniques and ground truth data in arid and semi-arid regions, the case of Remah, UAE. *Science of The Total Environment*, 776, 145946. [10.1016/j.scitotenv.2021.145946](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145946).
- Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F., 2001. Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 39(1), 8-20. [10.1109/36.898661](https://doi.org/10.1109/36.898661).
- Fiaschi, S., Holohan, E. P., Sheehy, M., & Floris, M., 2019. PS-InSAR analysis of Sentinel-1 data for detecting ground motion in temperate oceanic climate zones: a case study in the Republic of Ireland. *Remote Sensing*, 11(3), 348. [10.3390/rs11030348](https://doi.org/10.3390/rs11030348).
- Fomelis, M., Blasco, J. M. D., Desnos, Y. L., Engdahl, M., Fernández, D., Veci, L., ... & Wong, C., 2018. ESA SNAP-StaMPS integrated processing for Sentinel-1 persistent scatterer interferometry. In *IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (pp. 1364-1367). IEEE. <https://forum.step.esa.int>.
- Haghighi, M. H., & Motagh, M., 2019. Ground surface response to continuous compaction of aquifer system in Tehran, Iran: Results from a long-term multi-sensor InSAR analysis. *Remote sensing of environment*, 221, 534-550. [10.1016/j.rse.2018.11.003](https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.11.003).
- Herrera-García, G., Ezquerro, P., Tomás, R., Béjar-Pizarro, M., López-Vinielles, J., Rossi, M., ... & Ye, S., 2021. Mapping the global threat of land subsidence. *Science*, 371(6524), 34-36. [10.1126/science.abb8549](https://doi.org/10.1126/science.abb8549).
- Hooper, A., Bekaert, D., Ekbal, H., & Spaans, K., 2018. StaMPS/MTI manual: Version 4.1 b. School of Earth and Environment, University of Leeds. Retrieved October, 15, 2019. <https://homepages.see.leeds.ac.uk>.
- Liosis, N., Marpu, P. R., Pavlopoulos, K., & Ouarda, T. B., 2018. Ground subsidence monitoring with SAR interferometry techniques in the rural area of Al Wagan, UAE. *Remote Sensing of Environment*, 216, 276-288. [10.1016/j.rse.2018.07.001](https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.07.001).
- Maghsoudi, Y., van der Meer, F., Hecker, C., Perissin, D., & Saepuloh, A., 2018. Using PS-InSAR to detect surface deformation in geothermal areas of West Java in Indonesia. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 64, 386-396. [10.1016/j.jag.2017.04.001](https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.04.001).

- Mateos, R. M., Ezquerro, P., Luque-Espinar, J. A., Béjar-Pizarro, M., Notti, D., Azañón, J. M., ... & Jiménez, J., 2017. Multiband PSInSAR and long-period monitoring of land subsidence in a strategic detrital aquifer (Vega de Granada, SE Spain): An approach to support management decisions. *Journal of Hydrology*, 553, 71-87. [10.1016/j.jhydrol.2017.07.056](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.07.056).
- Miller, M. M., & Shirzaei, M., 2019. Land subsidence in Houston correlated with flooding from Hurricane Harvey. *Remote Sensing of Environment*, 225, 368-378. [10.1016/j.rse.2019.03.022](https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.03.022).
- Sun, H., Zhang, Q., Zhao, C., Yang, C., Sun, Q., & Chen, W., 2017. Monitoring land subsidence in the southern part of the lower Liaohe plain, China with a multi-track PS-InSAR technique. *Remote sensing of environment*, 188, 73-84. [10.1016/j.rse.2016.10.037](https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.10.037).
- Zuo, J., Gong, H., Chen, B., Liu, K., Zhou, C., & Ke, Y., 2019. Time-series evolution patterns of land subsidence in the eastern Beijing Plain, China. *Remote Sensing*, 11(5), 539. [10.3390/rs11050539](https://doi.org/10.3390/rs11050539).

