



The Detection of Subsidence for Ground Stability Using Radar Interferometry Method with Permanent Scatterers (A Case Study: Shabestar-Sufian Plain)

Shahram Roostaei¹ | Mohammad Hossein Rezaei Moghaddam² | Jamshid Yarahmadi³
Samira Najafvand⁴

1. Corresponding Author, Department of Geomorphology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail: roostaei@tabrizu.ac.ir
2. Department of Geomorphology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail: Rezmogh@tabrizu.ac.ir
3. East Azerbaijan Agricultural Research and Training Center and Natural Resources, Tabriz, Iran. E-mail: yarahmadi@itc.nl
4. Department of Geomorphology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail: samira.najafvand@tabrizu.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received: 27 Feb 2022

Received in revised form:
02 May 2022

Accepted: 25 May 2022

Available online: 30 July 2022

Keywords:

Land Subsidence,
Sentinel-1,
Radar Interferometry,
Shabestar-Sufian Plain,
Groundwater Depletion.

ABSTRACT

Land subsidence is one of the natural hazards that occurs as a result of natural factors or a combination of these two factors, in the form of flooding. Monitoring land surface changes requires the use of precise techniques. In this regard, the radar interferometry technique with permanent dispersers with wide spatial coverage as well as high temporal and spatial resolution is one of the most accurate and cost-effective remote sensing techniques for monitoring and measuring the amount of displacement on the ground. In recent years, following climate change and successive droughts on the one hand, and the improper management of water resources, improper abstraction of groundwater and increasing growth of population, on the other hand, has led to land displacement - and subsidence, in particular - on the Shabestar-Sufi plain. Therefore, this study has evaluated and monitored the rate of land movement in this region by using the mentioned method and by processing Sentinel-1 images between 2016 and 2020. To study the changes in groundwater level in the region and to prepare a water drop map as well as the hydrograph of the observation wells in the region, water level data between 2001 and 2017 have been used. The results of the permanent dispersion method indicate the annual land displacement rate for the region from 2016 to 2020 in five periods - 8.54, -9.47, 8-9, -9.7 and -9.02 cm, respectively. Due to the lack of geodynamic and GPS stations in the region, validation of the results of the radar interferometry method was assessed by using piezometric well data and the predominance of groundwater level drop (4.7 m) in the region and hydrograph analysis of the aquifer unit, and by comparing the results of the previous research, and the accuracy of the results of the present study was confirmed.

Cite this article: Roostaei, Sh., Rezaei Moghaddam, M. H., Yarahmadi, J., Najafvand, S. (2022). The Detection of Subsidence for Ground Stability Using Radar Interferometry Method with Permanent Scatterers (A Case Study: Shabestar-Sufian Plain). *Geography and Environmental Sustainability*, 12 (3), 57-74. DOI: 10.22126/GES.2022.7538.2508



© The Author(s).

DOI: 10.22126/GES.2022.7538.2508

Publisher: Razi University

آشکار سازی فرونشست جهت پایداری زمین با استفاده از روش تداخل سنجی راداری با پراکنش گرهای دائمی (مطالعه موردی: دشت شبستر – صوفیان)

شهرام روستایی^۱ | محمدحسین رضایی مقدم^۲ | جمشید یاراحمدی^۳ | سمیرا نجفوند^۴

۱. نویسنده مسئول، گروه ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: roostaei@tabrizu.ac.ir
۲. گروه ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: Rezmogh@tabrizu.ac.ir
۳. مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان شرقی، تبریز، ایران. رایانامه: yarahmadi@itc.nl
۴. گروه ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: samira.najafvand@tabrizu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۰۸ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۲/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۰۴ دسترسی آنلاین: ۱۴۰۱/۰۵/۰۸ کلیدواژه‌ها: فرونشست زمین، Sentinel-1، تداخل سنجی راداری، دشت شبستر – صوفیان، افت آب زیرزمینی.	فرونشست زمین یکی از مخاطرات طبیعی است که در اثر عوامل طبیعی و یا ترکیب این دو عامل، به شکل فروریزش یا نشست رو به پایین سطح زمین رخ می‌دهد. پایش تغییرات سطح زمین مستلزم استفاده از فن‌های دقیق است. در این راستا، فن تداخل سنجی راداری با پراکنش گرهای دائمی با پوشش وسیع مکانی و نیز قدرت تفکیک زمانی و مکانی بالا، یکی از دقیق‌ترین و کم‌هزینه‌ترین فن‌های سنجش‌ازدور جهت پایش و اندازه‌گیری میزان جابه‌جایی به وجود آمده در سطح زمین است. در سال‌های اخیر، در پی تغییرات اقلیمی و خشک‌سالی‌های پیاپی از یک سو و نیز مدیریت غیراصولی منابع آب، برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی و رشد فزاینده جمعیت، سبب رخداد جابه‌جایی زمین به‌خصوص فرونشست دشت شبستر – صوفیان شده است. از این رو، این تحقیق با استفاده از روش مذکور و طریق پردازش تصاویر Sentinel-1 بین سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۰، نرخ جابه‌جایی زمین در این منطقه را مورد ارزیابی و پایش قرار داده است. برای بررسی تغییرات سطح آب زیرزمینی منطقه و تهیه نقشه افت آب همچنین هیدروگراف واحد چاه‌های مشاهداتی منطقه از داده‌های سطح آب بین بازه زمانی ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۸ استفاده شده است. نتایج روش پراکنش گرهای دائمی حاکی از نرخ جابه‌جایی سالانه زمین برای منطقه از سال ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۰ به ترتیب $-۸/۵۴$، $-۹/۴۷$، $-۸/۹$، $-۹/۷$ و $۹/۰۲$ – سانتی‌متر بوده است. بدین سبب که منطقه فاقد ایستگاه‌های ژئودینامیک و GPS بوده است، اعتبارسنجی نتایج روش تداخل سنجی راداری با استفاده از داده‌های چاه‌های پی‌زومتری و مقدار افت سطح آب زیرزمینی (۴/۷ متر) در منطقه و تحلیل هیدروگراف واحد آبخوان، همچنین مقایسه نتایج تحقیقات قبلی صحت نتایج تحقیق حاضر تأیید گردید.

استناد: روستایی، شهرام؛ رضایی مقدم، محمدحسین؛ یاراحمدی، جمشید؛ نجفوند، سمیرا (۱۴۰۱). آشکار سازی فرونشست جهت پایداری زمین با استفاده از روش تداخل سنجی راداری با پراکنش گرهای دائمی (مطالعه موردی: دشت شبستر – صوفیان). *جغرافیا و پایداری محیط*، ۱۲ (۳)، ۷۴-۵۷

DOI: 10.22126/GES.2022.7538.2508



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه رازی

مقدمه

فرونشست زمین یک مخاطره زمینی است که در اثر عوامل طبیعی و فعالیت‌های انسانی ایجاد می‌شود. این مخاطره، عمدتاً در دشت‌های آبرفتی و دلتایی جهان با درجات مختلفی در حال رخ دادن است (Chen et al., 2018). در این میان، پدیده فرونشست زمین که حاصل فشرده شدن آرام و تدریجی نهشته‌های زیرسطحی در دشت‌ها است که به‌صورت جابه‌جایی بخشی از پوسته زمین به سمت پایین رخ می‌دهد. این مخاطره نگرانی‌های بسیاری نیز به‌ویژه در مراکز حساس و راهبردی برانگیخته، برآیند فعالیت‌های انسان‌ساز مانند انواع استخراج معادن مختلف، برداشت آب و نفت و گاز، حفاری و کندوکاوهای زیرزمینی اعم از تونل، مترو و سدها، و فرایندهای محیطی از قبیل؛ فعالیت‌های آتش‌فشان و فوران گدازه، فرایندهای انحلالی، ذوب و تراکم برف و یخچال‌ها، حرکات گسل و گاهی هر دو عامل هستند. عوامل انسانی و تغییر کاربری زمین، محرک‌های اصلی فرونشست هستند و بین افزایش نرخ فرونشست و برداشت از منابع آب زیرزمینی ارتباط مستقیمی وجود دارد (Bagheri et al., 2021). از همه مهم‌تر تحرک مواد مایع یا جامد زیرزمینی از دلایل اصلی وقوع فرونشست است (Herrera-García et al., 2021). باین‌حال، برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی بیش‌ترین گزارش را داشته است (Khan et al., 2021). فرونشست زمین تخریب غیرقابل‌برگشت زیست‌محیطی است که آینده یک شهر را تهدید می‌کند (Hamdani et al., 2021).

در بسیاری از مناطق، پیامدهای فرونشست زمین در شکل تغییر ناهمسان در ارتفاع و شیب رودها، آبراهه‌ها و سازه‌های آبرسانی، شکست و بیرون‌زدگی لوله کناره چاه‌ها، بروز آشفتنگی و نابسامانی در بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی و ماسه دهی چاه‌ها، کاهش برگشت‌ناپذیر همه یا بخشی از مخزن آب زیرزمینی در نتیجه نابودی یا کاهش تخلخل مفید نهشته‌ها که به ویرانی سامانه‌های آبیاری و نابودی خاک‌های حاصلخیز کشاورزی می‌انجامد و کاهش بازدهی و ویرانی شریان‌های حیاتی و سازه‌های راهبردی و کاهش میزان نفوذپذیری سطحی و در پی آن، گسترش پهنه‌های بیابانی و تغییر عوارض جغرافیایی و گسترش دشت سیلابی نمود می‌یابد.

بسته به نوع فرونشست، جابه‌جایی عمودی زمین ممکن است با تغییر شکل افقی نیز همراه بوده که می‌تواند آسیب‌های قابل‌توجهی بر جای بگذارد این پدیده می‌تواند به خیابان‌ها، پل‌ها، ساختمان‌ها، خطوط انتقال نیرو، شبکه آب و فاضلاب، راه‌های دسترسی و دیگر سازه‌ها آسیب برساند، شبکه آبرسانی، گاز و فاضلاب را درهم بیچد و به ترک‌خوردگی پی ساختمان‌ها، شکستگی و ترک در سازه‌های زیرساختی به آتش‌سوزی برخاسته از انفجار لوله‌های گاز بینجامد (Aslan et al., 2019). فرونشست زمین پیامدهای ویرانگری برای زیرساخت‌های شهری و روستایی، خسارت به بزرگراه‌ها، شکستگی و شکاف در سازه‌ها، آتش‌سوزی در پی انفجار لوله‌های گاز دارد. از این‌رو، پدیده فرونشست رشته پیوستاری از برهم‌کنش‌های ناگوار هم‌افزاست، بدین معنا که کاهش بارش به همراه افزایش مصرف آب به کندن چاه‌های عمیق و برداشت بی‌رویه از آبخوان‌ها و آن نیز به فرونشست زمین می‌انجامد. زمانی که دولت‌های محلی و مردم در مورد خطرات و اثرات فرونشست زمین آگاهی نداشته باشند، شهرها و مناطق اطراف آن آسیب‌پذیرتر می‌شوند که این عامل منجر به تصمیم‌گیری نادرست و در نتیجه بی‌اثر شدن اقدامات انجام‌شده می‌شود (Hamdani et al., 2021).

برخاسته از موقعیت جغرافیایی کشورمان، رشد پرشتاب و الگوی نامتعادل توزیع جمعیت، کشاورزی ناکارا، برنامه‌های رشد محور ناسازگار با توسعه پایدار، خشک‌سالی‌های پیایی، شهرنشینی فزاینده و برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی، مدیریت ناکارای این منابع، پائین بودن سواد زیست‌محیطی شهروندان، دگرگونی سبک زندگی و حاکم شدن روحیه سرمایه‌زدگی طی چند دهه گذشته گستره و ژرفای بحران‌های زیست‌محیطی را به‌صورت پیوستاری درهم‌تنیده و رو به فزاینده‌ای درآورده که امنیت، ثبات و توسعه کشورهای بسیاری از جمله ایران را درگیر چالش‌های بنیادی کرده‌اند.

پدیده فرونشست زمین در سالیان اخیر، یکی از موانع موجود در عدم تحقق توسعه پایدار شهری در سکونتگاه‌های شهری است این مخاطره محیطی که در اثر مصرف بی‌رویه منابع آب زیرزمینی به وجود آمده باعث بروز مشکلات متعددی در فضاهای عمومی و خصوصی و همچنین کلان‌شهرها شده است. درواقع، این پدیده به‌عنوان یک چالش جهانی مطرح است و

تنها مربوط به ایران نیست، و مقابله با آن یک چالش بزرگ تر است. برای مقابله بهتر با این مخاطره، شهرها باید تعهدات مهمی را برای اتخاذ اقدامات پیشگیرانه بپذیرند. اقدامات نوآورانه و یکپارچه، همان طور که در شانگهای چین در زمینه یکپارچه سازی نظارت بر استخراج و تغذیه آب های زیرزمینی و توسعه شهری برای توسعه استفاده از زمین و سیاست منطقه بندی بهتر انجام شد، آن ها را به کاهش نرخ فرونشست زمین تا دو برابر رساند. در ژاپن، محدودیت های استخراج آب های زیرزمینی نیز با تثبیت زمین های آن ها، نرخ فرونشست را با موفقیت متوقف کرد (Hamdani et al., 2021).

سابقه فرونشست زمین در ایران بیش از چهار دهه است. قبلاً فقط استان های کویری همچون یزد و کرمان درگیر بودند، اما امروزه با گسترش برداشت از آب های زیرزمینی باعث شده تا بسیاری از دشت های کشور این پدیده ظاهر شود. این پدیده دیگر محدود به مناطق خشک و نیمه خشک نیست، به نواحی مرطوب کشور مانند غرب و شمال غرب کشور نیز کشیده شده است.

باتوجه به میزان افت آب های زیرزمینی و تأثیر مستقیم آن بر میزان فرونشست منطقه، در تحقیق برای ارزیابی وضعیت افت آب های زیرزمینی از اطلاعات آماری سازمان آب و منطقه ای استان آذربایجان شرقی استفاده شده و همچنین به منظور برآورد نرخ فرونشست منطقه نیز از تصاویر Sentinel-1، بین بازه زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۰ و روش تداخل سنجی پراکنش گرهای دائمی (PSI)، به دلیل قابلیت پوشش مکانی وسیع، زمان و دقت نسبت به دیگر فن های سنجش از دوری استفاده شده است.

دقت بالای روش تداخل سنجی راداری PSI، سبب شده است تا در بسیاری از مناطق از این روش به منظور برآورد میزان فرونشست استفاده شود. در فاصله زمانی سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۷ میلادی با استفاده از ۶۹ تصویر راداری مدارهای Ascending و Descending ماهواره Sentinel-1، مقدار فرونشست را در شمال غرب مشهد و در حدود ۱۴ سانتی متر در سال به دست آمده است (خرمی، ۱۳۹۶:۷۴). نرخ فرونشست را در دشت کبودرآهنگ - فامنین همدان را در بازه های زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ و ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۸، با روش PSI، به ترتیب ۹۲- و ۹۸- میلی متر در سال محاسبه شده است (مؤمنی، ۱۳۹۷:۶۷). در تحقیقی با به کارگیری تصاویر سنجنده های ENVIAT و Sentinel-1، نرخ فرونشست را از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۶ حدود ۱۳۰ میلی متر در سال برآورد گردیده است (فروغ نیا و همکاران، ۲۰۱۹). در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵ با استفاده از ۱۲ تصاویر ماهواره ای ENVIAT، متوسط سرعت فرونشست در دشت ابرکوه یزد را ۲ تا ۳ سانتی متر و در منطقه مهردشت ۵ سانتی متر بوده است (شرافت و همکاران، ۱۳۹۹). نرخ فرونشست دشت اسداباد همدان را ۲۲۶-۲۶۶ میلی متر در سال به دست آورده است. همچنین باتوجه به نتایج حاصل از تحقیق نرخ فرونشست از مناطق شهری به سمت دشت های اطراف صعودی بوده است (احمدی و همکاران، ۱۳۹۹).

با به کارگیری تحلیل سری زمانی فرونشست در غرب تهران (دشت شهریار) و ارتباط آن با برداشت آب های زیرزمینی با فن تداخل سنجی راداری پرداخته شده است (پاپی و همکاران، ۱۳۹۹). میزان جابه جایی بخشی از دشت های 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 سانتی متر و ۲۴/۶ سانتی متر در سال محاسبه شده است (خوش لهرجه آذر، ۱۳۹۹:۷۰). قره چلو و همکاران (۱۴۰۰) با استفاده از تصاویر راداری ALOS و Sentinel-1 میزان فرونشست سالانه را در دشت مشهد بررسی کرده اند. نتایج حاصل از فرایند تداخل سنجی راداری برای ماهواره آلوس در این تحقیق، بیانگر مقدار فرونشست ۲/۵ تا ۸/۳ و ۷/۴ سانتی متر برای تصاویر آلوس و برای ماهواره Sentinel-1 بین ۱/۱۶ تا ۴/۱۷ سانتی متر و ۳/۲۰ سانتی متر در بازه زمانی ۲۰۰۷ تا ۲۰۰۸ بوده است که نشان دهنده روند افزایش پدیده فرونشست در منطقه بوده است.

فرونشست سطحی در شهر Wuhan چین عمدتاً به فعالیت های انسانی، فشردگی لایه خاک، کارستی شدن و استفاده بیش از حد از آب های زیرزمینی مربوط می شود (Zhou et al., 2017). برخی محققین نیز فرونشست جاوا در غرب اندونزی را از طریق پردازش داده های Sentinel-1 و آلوس پالسا به ترتیب ۴/۶ و ۲/۸ میلی متر در سال به دست آورده اند (Maghsoudi et al., 2018). لیوسیس و همکاران با استفاده از تصاویر ماهواره های ENVIAT، آلوس و Sentinel-1

و تداخل سنجی تفاضلی و به منظور برآورد تغییر الگوی تغییر شکل زمین در اثر فرونشست نواحی روستایی Al-Wagan امارات پرداخته‌اند (Liosis et al., 2018). در همین ارتباط چن و همکاران نتایج حاصل از پردازش تصاویر نرخ فرونشست را ۱۸ و ۱۰ سانتی متر محاسبه نمودند و میزان فرونشست زمین در ارتباط با ایجاد زمین و شهرسازی سریع در فلات‌های لسی چین را بین صفر تا ۵۵ میلی‌متر در سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۶ و برای بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ مقدار آن صفر یا کمتر از ۲ میلی‌متر در سال ثبت کردند (Chen et al., 2018). فرونشست زمین در هوستون و ارتباط آن با سیل حاصل از طوفان هاروی را از طریق پردازش داده‌های آلوس و Sentinel-1، به ترتیب ۳۴ میلی‌متر در سال و ۴۹ میلی‌متر محاسبه شده است (Miller et al., 2019).

حقیقی و همکاران فرونشست دشت تهران و ورامین را مطالعه کردند. نتایج مطالعه ایشان نشان می‌دهد دشت تهران با حداکثر نرخ فرونشست ۲۵ سانتی‌متر در حال فرونشست است، همچنین فرودگاه بین‌المللی تهران سالانه ۵ سانتی‌متر فرومی‌نشیند (Haghighi et al., 2019). بررسی‌های زو و همکاران نشان می‌دهد دلیل عمده الگوهای تکاملی سری زمانی فرونشست، تغییرات سالانه تراز آب زیرزمینی در دشت پکن شرقی بوده است (Zuo et al., 2019). فیاسچی و همکاران با استفاده از تحلیل داده‌های سنجنده Sentinel-1 با روش پراکنده ساز دائمی به آشکارسازی حرکات سطح زمین در مناطق اقیانوسی با پوشش ابر همیشگی در جمهوری ایرلند "به‌دست‌آمده است" (Fiaschi et al., 2019). به روش تداخل سنجی راداری پراکنش گرهای دائمی و همچنین پردازش هر دو سری تصاویر ماهواره سنتینل - ۱ مشخص شد که تغییرات ارتفاعی جزیره Bhasan Char واقع در خلیج بنگال ± 20 میلی‌متر در سال است (Braun et al., 2020). میلانکوواسکا و همکاران به روش تداخل سنجی راداری پراکنده سازهای پایدار و همچنین پردازش هر دو سری تصاویر ماهواره Sentinel-1 دریافتند که فعالیت‌های معدن کاوی باعث فرونشست قابل توجهی در معادن سنگ مس و انیدریت در معدن Konrad لهستان با نرخ ۱/۴ متر شده است (Malinowska et al., 2020).

یکی از دشت‌های حوضه دریاچه ارومیه که از نظر آب زیرزمینی در وضعیت بحرانی قرار گرفته، دشت شبستر - صوفیان است. این دشت به دلیل برداشت بیش از حد از آب‌های زیرزمینی جهت تأمین نیازهای آبی منطقه خصوصاً مصارف کشاورزی و باغات در بسیاری از مناطق، بخصوص در منطقه وایقان آثار تخریب سفره در قالب جابه‌جایی زمین و چاله‌ها و شکاف‌هایی ظاهر شده است. مطابق گزارش سازمان آب و منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی، در دشت شبستر - صوفیان تراز متوسط سطح آب زیرزمینی آبخوان آبرفتی طی سال‌های آبی ۶۶-۱۳۶۵ تا ۹۰-۱۳۸۹، معادل ۱/۹ متر افت نموده که متوسط سالانه آن برابر ۰/۳۶ متر رسیده است (زینالی و همکاران، ۱۳۸۸).

باتوجه به اهمیت این موضوع، تحقیق حاضر با استفاده از ۱۳۳ تصویر راداری سنجنده Sentinel-1 برای آشکارسازی وضعیت جابه‌جایی سطح زمین در محدوده مطالعاتی از سال ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۰ انجام گرفته است که نتایج آن می‌تواند در مدیریت آبخوان این دشت مؤثر واقع شود.

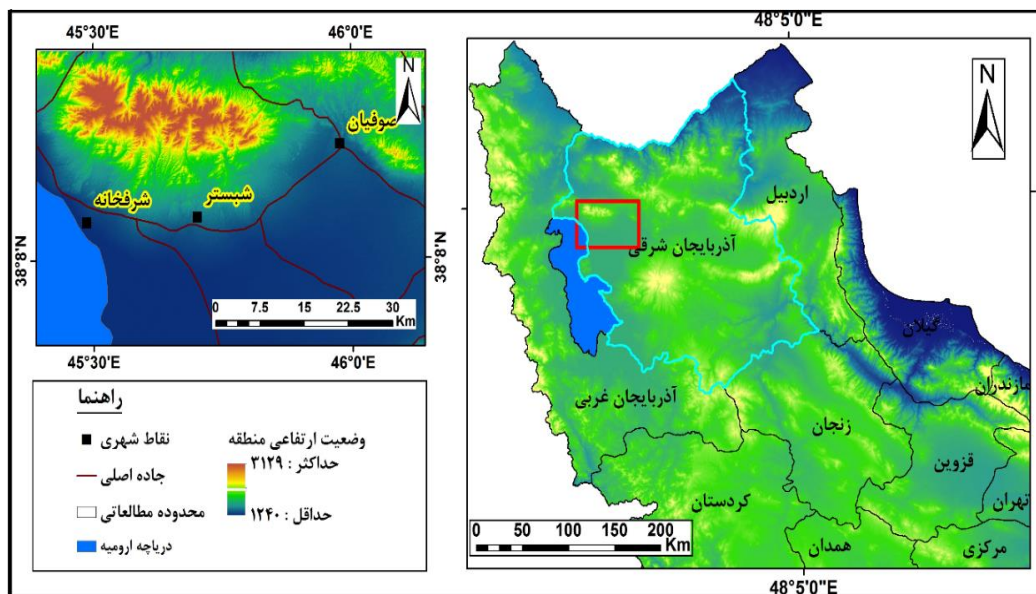
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

دشت شبستر - صوفیان در شمال غربی ایران قرار گرفته است که از مخروط افکنه‌های درهم تنیده تشکیل شده است. عمده نهشته‌های منطقه شامل نهشته‌های آبرفتی کواترنری می‌باشد که مبنای زمین‌شناسی را برای توسعه فرونشست زمین فراهم می‌کند. مختصات جغرافیایی این منطقه در $45^{\circ}41'7''$ تا $45^{\circ}23'14''$ و عرض‌های شمالی $38^{\circ}5'38''$ تا $38^{\circ}49'37''$ ، عرض شمالی واقع گردیده است. از جهت شمال به حوضه زیلبرچای مرنده، از غرب به دشت تسوج، از شرق به تبریز و از جنوب به دریاچه ارومیه و پهنه‌های نمکی - رسی محدود می‌شود. کوهستان میشو در شمال آن مشخص‌کننده حدود طبیعی این دشت از حوضه زیلبرچای است و ارتفاع این دشت بین ۱۲۴۰ تا ۳۱۲۹ متر متغیر است.

این محدوده در حوضه آبریز دریاچه ارومیه قرار گرفته است که بخشی از پهنه زمین‌ساخت البرز غربی - آذربایجان است. قدیمی‌ترین واحد چینه‌شناسی در آن مربوط به پرکامبرین (سازند کهر) است و فازهای کوه‌زایی مختلفی از جمله کاتانگانی،

ساردیک، تاکونیک، کالدونین، هرسینین، کیمیرین، لارامید، پیرنه، استیرین و پاسادنین در تکوین منطقه نقش داشته‌اند. عمده‌ترین عناصر ساختاری گسل‌ها و درزها هستند. شاخص‌ترین عارضه ژئومورفولوژیکی منطقه، دریاچه ارومیه است. آب‌وهوای این منطقه به‌طور کلی سرد و خشک است، ولی به علت تنوع توپوگرافیکی، از اقلیم‌های متفاوتی برخوردار است. محدوده مطالعاتی باتوجه به موقعیت جغرافیایی که دارد، دارای بارش بیشتری نسبت به میانگین کشوری (حدود ۲۵۰ میلی‌متر) است. درواقع، قرارگیری این منطقه در مناطق شمال غربی کشور سبب شده است که میانگین بارش بلندمدت این منطقه حدود ۳۰۰ میلی‌متر باشد. بیش‌ترین میزان بارش فصلی منطقه مربوط به اواخر فصل زمستان و اوایل بهار است (سلطانی سیستمی، ۱۳۸۴). در شکل ۱ موقعیت جغرافیایی محدوده مطالعاتی نشان داده شده است.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه

داده‌های مورد استفاده

در این تحقیق، ابتدا یک پیش‌پردازش تداخلسنجی تفاضلی (DInSAR) توسط نرم‌افزار متن‌باز SNAP و سپس بخش اصلی پردازش سری زمانی تداخلسنجی با پراکنش گرهای دائمی (PSI) در بسته نرم‌افزاری STAMPS بر روی منطقه مورد مطالعه انجام شد (شکل ۲). روش تداخلسنجی مورد استفاده در این تحقیق از روش ابداع شده در یک تحقیق برگرفته شده است (Ferrerti et al., 2001). به‌طور کلی فاز تداخل نما از سیگنال‌های مزاحمی تشکیل شده است (رابطه ۱). عواملی همچون φ_{topo} یعنی فاز ناشی از توپوگرافی، φ_{flat} فاز ناشی از زمین مسطح، φ_{lae} فاز ناشی از تغییر زاویه دید سنجنده، فاز ناشی از جابجایی ایجاد شده در فاصله زمانی بین دو تصویر، φ_{aps} اختلاف فاز ناشی از اتمسفر، و همچنین φ_{noise} که نشانگر سایر عوامل نویز است.

$$\varphi_{\text{DInSAR}} = \varphi_{\text{topo}} + \varphi_{\text{flat}} + \varphi_{\text{lae}} + \varphi_{\text{disp}} + \varphi_{\text{aps}} + \varphi_{\text{noise}} \quad \text{رابطه ۱}$$

براین اساس، φ_{disp} را می‌توان با مدل‌سازی یا برآورد سایر ترم‌های مزاحم فاز و در نتیجه کسر آن‌ها از فاز تداخلسنجی بازیابی کرد.

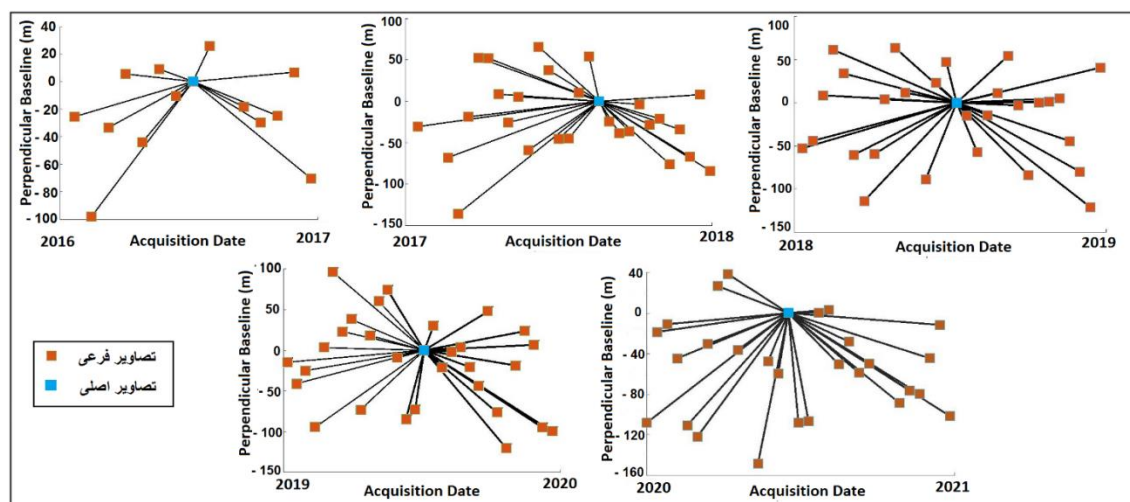
فرایند آماده‌سازی خودکار داده‌ها جهت پردازش اصلی در STAMPS از طریق اجرای کدهای الگوریتم SNAP2STAMPS که به زبان برنامه‌نویسی پایتون نوشته شده‌اند انجام شده است. خروجی‌های این الگوریتم، کاملاً با STAMPS و فن تداخلسنجی با پراکنش گرهای دائمی (PSI) سازگار است (Braun et al., 2021). اولین نسخه از این

اسکریپت در سال ۲۰۱۸، منتشر شده است (Delgado Blasco et al., 2018). در این تحقیق آخرین ورژن این بسته که توسط دلگادو بلاسکودر سال ۲۰۱۹ ارتقا یافت استفاده گردید (Delgado Blasco et al., 2019). در این تحقیق، تحلیل و پردازش روش تداخل سنجی با پراکنش گرهای دائمی با استفاده از داده‌های راداری Sentinel-1 و بر اساس دوره بازبینی ۱۲ روزه بوده است که باتوجه به مقدار جابه‌جایی‌ها و شناخت منطقه مورد مطالعه و همچنین تعداد بالای تصاویر راداری این انتخاب مناسب بوده است. این داده‌ها شامل؛ ۱۳۳ تصویر Sentinel-1، از نوع SLC با قطبش (VV) و حالت (IW) و پایین گذر (مسیر ۷۹) بوده که مشخصات آن‌ها در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱. مشخصات مربوط به تصاویر مورد استفاده در تحقیق، ماهواره Sentinel-1

ماهواره	تصویر اول	تصویر آخر	مسیر	گذر مدار	فریم	تعداد تصاویر
Sentinel-1	۲۰۱۶/۱۲/۲۳	۲۰۱۶/۱۲/۲۳	۷۹	پایین گذر	۴۶۴	۱۴
Sentinel-1	۲۰۱۷/۰۱/۱۶	۲۰۱۷/۱۲/۳۰	۷۹	پایین گذر	۴۶۴	۲۸
Sentinel-1	۲۰۱۸/۰۱/۱۱	۲۰۱۸/۱۲/۲۵	۷۹	پایین گذر	۴۶۴	۳۰
Sentinel-1	۲۰۱۹/۰۱/۰۶	۲۰۱۹/۱۲/۲۰	۷۹	پایین گذر	۴۶۴	۳۰
Sentinel-1	۲۰۲۰/۰۱/۰۱	۲۰۲۰/۱۲/۲۵	۷۹	پایین گذر	۴۶۴	۳۱

برای داشتن یک نمای کلی از رابطه زمانی و مکانی تصاویر و ایجاد تداخل نگارها، گراف شبکه زمانی - مکانی برای ۱۳۳ تصویر Sentinel-1 ارائه شده است که در آن یک محور، خط مبنای مکانی (متر) و دیگری زمان (سال) اخذ تصویر را نشان می‌دهد. این تصاویر به صورت شکل ۲، پردازش می‌شوند؛ در داخل گراف، هر ستاره نشان دهنده یک تصویر و هر خط نشان دهنده فاصله میان دو تصویر است.



شکل ۲. گراف مکانی - زمانی تصاویر راداری

تداخل سنجی تفاضلی

در این تحقیق، پیش از پردازش، از قابلیت کارور ایجاد گراف (GPT) در نرم افزار SNAP، جهت انتخاب تصویر اصلی (Master image) از بین مجموعه داده‌های راداری Sentinel-1 به کمک روابط (۲ و ۳) استفاده شد.

$$\gamma^m = \frac{1}{K} \sum_{k=0}^K g(B_{\perp}^{k,m} \cdot 1200) \times g(T^{k,m} \cdot 5) \times g(f_{dc}^{k,m} \cdot 1380) \quad \text{رابطه ۲}$$

که در آن تابع به صورت زیر تعریف می‌شود؛

$$g(x,c) = \begin{cases} 1 - |x|/c & \text{if } |x| < c \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{رابطه ۳}$$

که در این رابطه γ^m همدوسی تجمعی برای تصویر پایه m و K تعداد تصاویر فرعی است. مقدار بیشینه برای خط مبنای قائم $B_{\perp}$ خط مبنای زمانی T و فرکانس مرکزی دوپلر f_{dc} است. اعداد ۱۲۰۰، ۵ و ۱۳۸۰ به ترتیب به عنوان مقادیر بیشینه برای خط مبنای قائم $(B_{\perp}^{max})$ ، خط مبنای زمانی T^{max} و f_{dc}^{max} فرکانس مرکزی Doppler، در خصوص تصاویر سنجنده ERS در نظر گرفته شده است.

تولید و پردازش فن تداخلسنجی تفاضلی راداری در این تحقیق در چهار گام پیوسته و خودکار در شکل ۳ به کمک اسکریپت‌های پایتون اجرا شد.

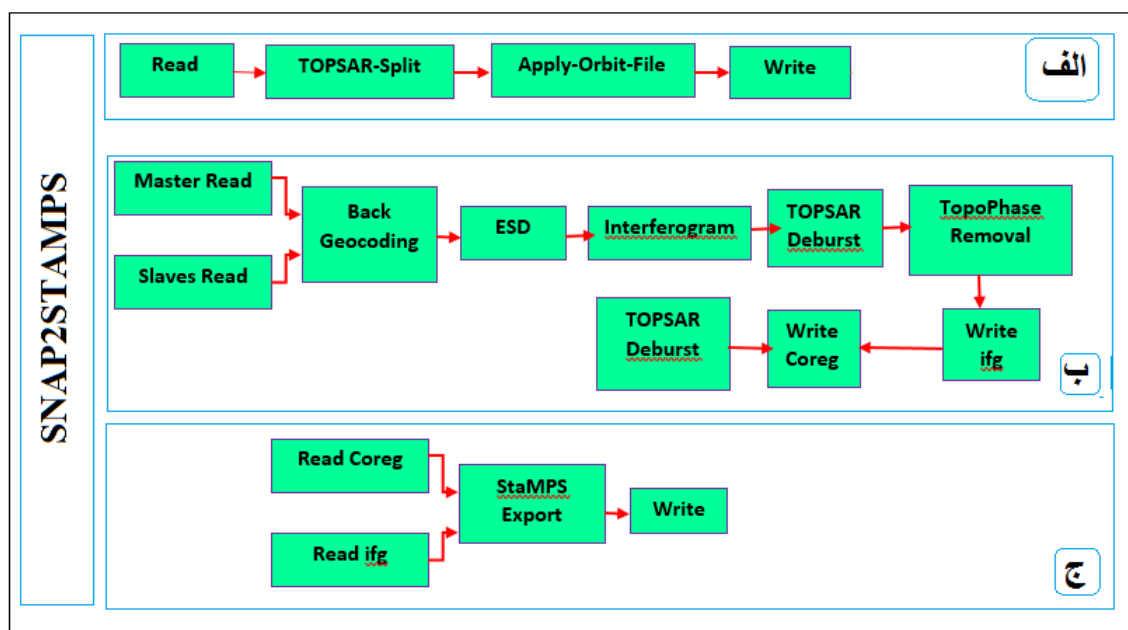
۱- آماده‌سازی تصاویر فرعی جهت مرتب‌سازی تصاویر

۲- تقسیم و به‌روزرسانی فایل‌های مداری مربوط به تصاویر فرعی

۳- عملیات استک‌سازی و تنوع‌طیفی پیشرفته، تولید اینترفروگرام‌ها و یکپارچه‌سازی و اتصال بخش‌های جدا شده هر جفت تصویر یا Debursing، حذف فاز ناشی از اثر زمین مسطح و در پایان حذف فاز ناشی از توپوگرافی باتوجه به نوع مدل رقومی ارتفاعی

۴- تهیه خروجی از داده برای پردازش اصلی

پس از اتمام هر چهار مرحله، خروجی‌های لازم برای پردازش اصلی داده‌ها مانند فایل اطلاعاتی مربوط به طول و عرض جغرافیایی اینترفروگرام‌ها در چهار فولدر (rscl,diff0,geo,dem) به دست آمده است.



شکل ۳. دیاگرام از مراحل پردازش تحقیق تداخلسنجی تفاضلی در نرم‌افزار SNAP

برآورد شاخص پراکندگی دامنه

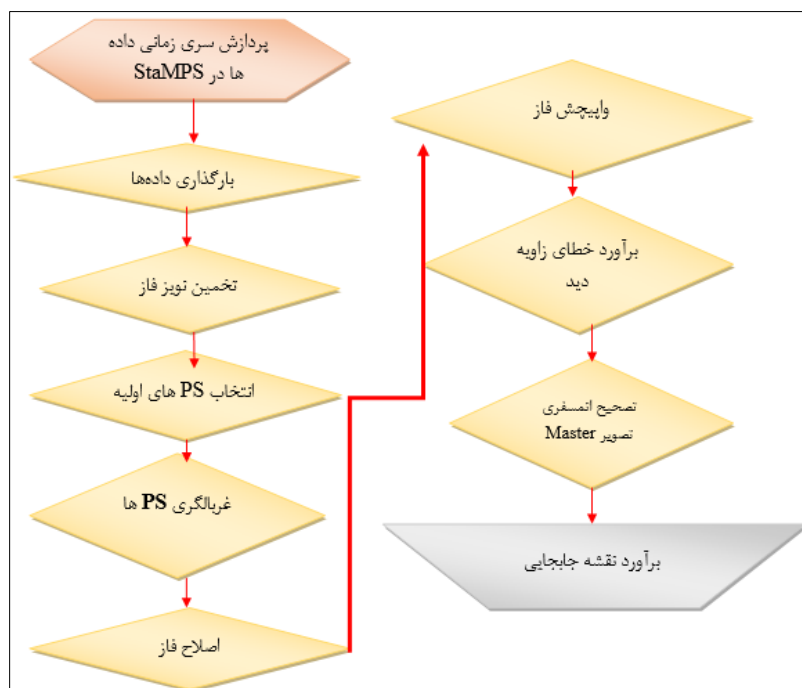
آخرین مرحله قبل از اینکه بتوانیم داده‌ها را برای پردازش تداخلسنجی پراکنش‌گرهای دائمی را جهت انجام پردازش‌های اصلی وارد بسته نرم‌افزار STAMPS کنیم، تخمین شاخص پراکندگی دامنه است. این روش بر پایه تحلیل سری زمانی دامنه است. در این روش هر پیکسل بر اساس نسبت بین انحراف معیار و میانگین دامنه در طول زمان ارزیابی می‌شود. شاخص پراکندگی دامنه (ADI) بر اساس رابطه ۴ بیان می‌شود (Hooper et al., 2018).

$$D_A = \frac{\sigma_A}{\mu_A} \quad \text{رابطه ۴}$$

که در آن و به ترتیب برابر با انحراف معیار و میانگین دامنه باز پراکنش هر پیکسل است. در این مرحله پراکنش

کننده‌های کمتر ولی باقابلیت اطمینان بالا جهت برآورد جو انتخاب می‌شوند. در این تحقیق، مقدار شاخص پراکندگی دامنه (ADI)، ۰/۴۲ انتخاب شده است، تا نقاط پراکنش گر بیشتری انتخاب شوند. این دامنه به این صورت عمل می‌کند که احتمال انتخاب پراکنش گرهای حقیقی را افزایش داده و احتمال انتخاب پراکنش گرهای با فاز تصادفی کاهش می‌دهد (Ferrerti et al., 2001).

مراحل پردازش تصاویر راداری Sentinel-1 در بسته Stamps طبق شکل ۴، در ادامه شرح داده شده است:



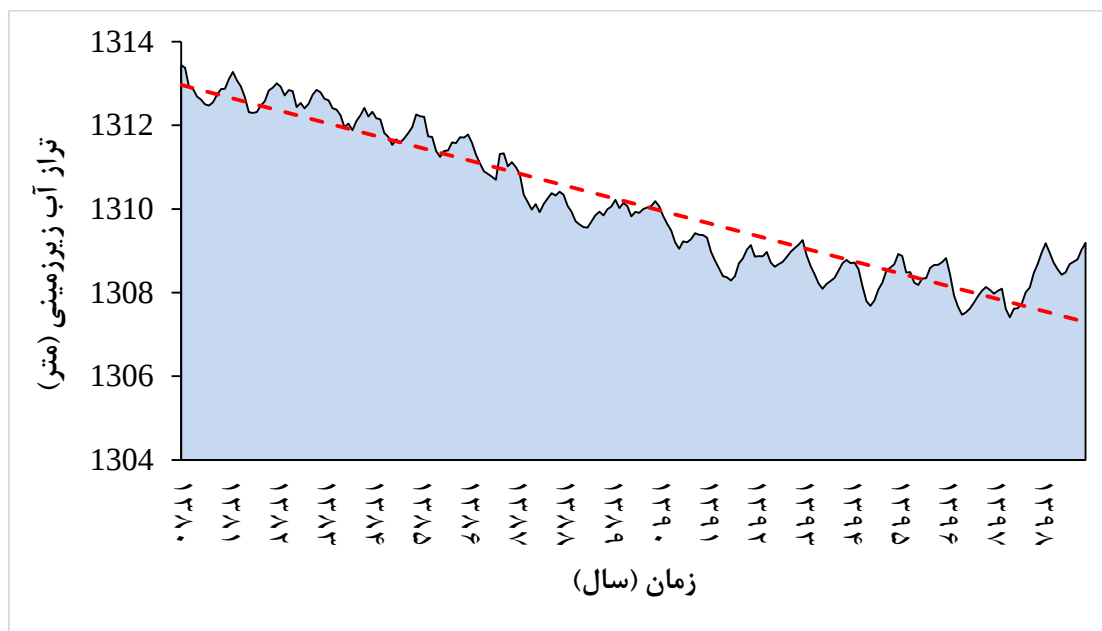
شکل ۴. مراحل پردازش پراکنش گر دائمی در نرم افزار StaMPS

- ۱- تبدیل و بارگذاری داده‌ها طبق قالب موردنیاز پراکنش گر دائمی در نرم افزار StaMPS؛
- ۲- تخمین نوفه‌های فاز پیکسل‌های کاندید تمام اینترفروگرام‌ها؛
- ۳- گزینش پیکسل‌های پراکنش گر دائمی (PSI) بر اساس ویژگی‌های نوفه آن‌ها؛
- ۴- Weeding کردن پیکسل‌های زائد جهت کاهش نوفه تصاویر؛
- ۵- تصحیح فاز پیکسل‌های غربال شده مرحله قبل از طریق یک مدل رقومی ارتفاعی (DEM) و ادغام آن‌ها؛
- ۶- Phase-Unwrapping و حذف ابهام پیکسل‌های پراکنده ساز انتخاب شده؛
- ۷- برآورد خطای زاویه دید ناشی از ناهمبستگی مکانی (SCLA)؛
- ۸- تولید نقشه جابه‌جایی زمین.

هیدروگراف واحد محدوده مورد مطالعه

برای تهیه هیدروگراف دشت شبستر - صوفیان در سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۸ که در شکل ۵ آورده شده است، از نقشه پلیگون بندی تیسن ۲۴ چاه مشاهداتی که از نظر آماری کامل بوده و توزیع مناسبی در سطح آبخوان داشتند، استفاده شد. بر اساس سهم هر پلیگون از مساحت کل آبخوان ضریبی به هر پلیگون اختصاص داده شد که بر اساس این ضریب در محاسبه تراز آب نماینده (متوسط تراز آبخوان در هر ماه) شرکت می‌کند. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، هیدروگراف در هر سال دارای دوشاخه صعودی و نزولی است. صعودی بودن شاخه اول به این علت است که این قسمت از هیدروگراف، ماه‌های مرطوب سال را در برمی‌گیرد که حداکثر میزان بارش و حداقل تبخیر را دارند. علاوه بر آن میزان برداشت آب جهت مصارف کشاورزی نیز رو به کاهش بوده، بنابراین به علت افزایش میزان تغذیه نسبت به تخلیه، سطح آب زیرزمینی روند صعودی پیدا می‌کند. بالعکس

شاخه دوم در ماه های خشک سال قرار می گیرد که میزان تخلیه بیشتر از تغذیه است (به علت مصارف کشاورزی و تبخیر بالا)، بنابراین سطح آب زیرزمینی پایین می رود. نکته قابل توجه این است که روند کلی هیدروگراف یک روند نزولی است به طوری که در طی این ۱۸ سال سطح آب زیرزمینی بیش از ۴/۲ متر افت پیدا کرده است. متوسط تراز آب از ۱۳۱۳/۴۴ متر در سال ۱۳۸۰ به ۱۳۰۷/۴۱ متر در سال ۱۳۹۸ کاهش یافته است. این روند بیانگر این است که بهره برداری از آب زیرزمینی به صورت اصولی و بهینه صورت نمی گیرد و ذخیره سفره در حال کاهش است.

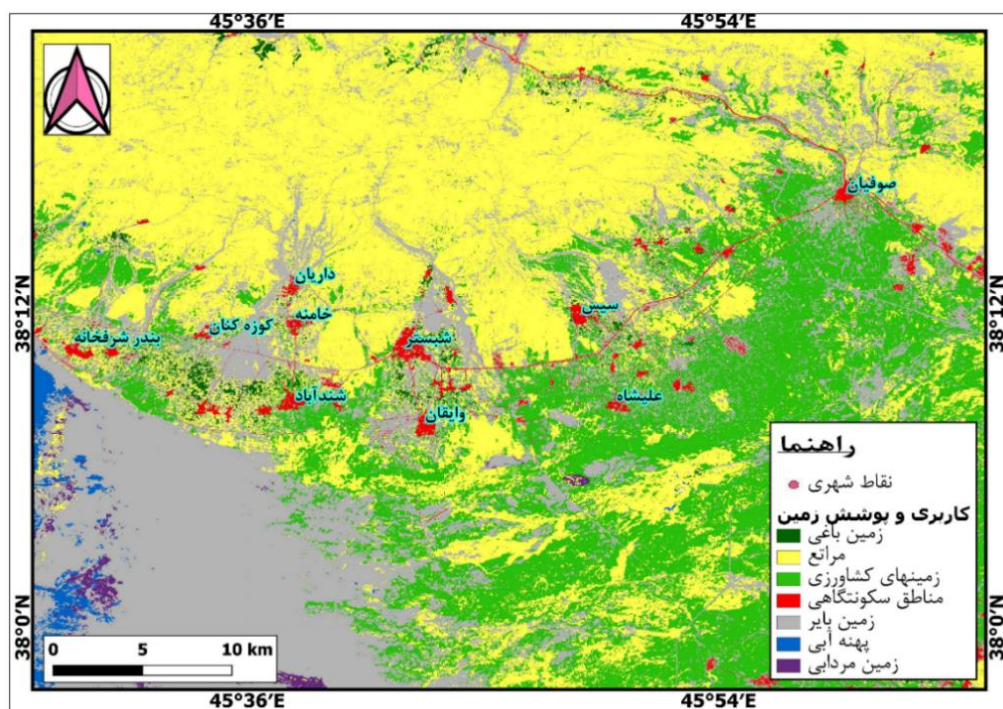


شکل ۵. هیدروگراف محدوده مطالعاتی در سال های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۸

در چند سال اخیر در برخی از چاه های مشاهده ای مورد بررسی به طور متوسط، سالانه بیش از چهار متر افت داشته است. بهره برداری زیاد آب های زیرزمینی، همچنین کاهش تغذیه ناشی از خشکسالی های اخیر به همراه افزایش بی رویه می تواند عامل این میزان افت سطح آب زیرزمینی در این چاه ها بوده باشد. هیدروگراف آبخوان و نقشه افت آب بیانگر رابطه معنادار بین میزان افت سطح آب زیرزمینی و فرونشست منطقه است که بر این اساس می توان گفت، عامل اصلی در پدیده فرونشست منطقه، افت سطح آب های زیرزمینی است.

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، بهره برداری های انسان یکی از عوامل مؤثر در وقوع فرونشست محسوب می شود، به طوری که مناطق دارای کاربری اراضی کشاورزی آبی به دلیل بهره برداری از مناطق آب زیرزمینی، پتانسیل بالایی جهت وقوع فرونشست دارد. همچنین مناطق سکونتگاهی نیز به دلیل ساخت و سازها، مستعد وقوع فرونشست هستند. در این تحقیق، برای مشخص کردن کاربری های دارای فرونشست، 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 داده های راداری Sentinel-1 و Sentinel-2، در ۱۱ رده پوشش زمین تهیه شده اخذ گردیده و محدوده مطالعاتی از نقشه کل برش داده شد (Zanaga et al., 2021). پس از اینکه محدوده را از نقشه سازمان ESA، جداسازی شد، نقشه کاربری را در محیط ARC-GIS از طریق ابزار Reclassify به ۵ رده، نواحی سکونتگاهی، کشاورزی - باغی، مراتع و اراضی بایر طبقه بندی شده است (شکل ۶). بر اساس نقشه کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه، مناطق میانی و جنوبی و شرقی محدوده به دلیل تراکم بالای اراضی کشاورزی و نواحی سکونتگاهی، مستعد وقوع مخاطره فرونشست بوده و فرونشست بالایی را تجربه کرده اند. عمده فرونشست منطقه بر روی کاربری های کشاورزی و باغی اتفاق افتاده است.

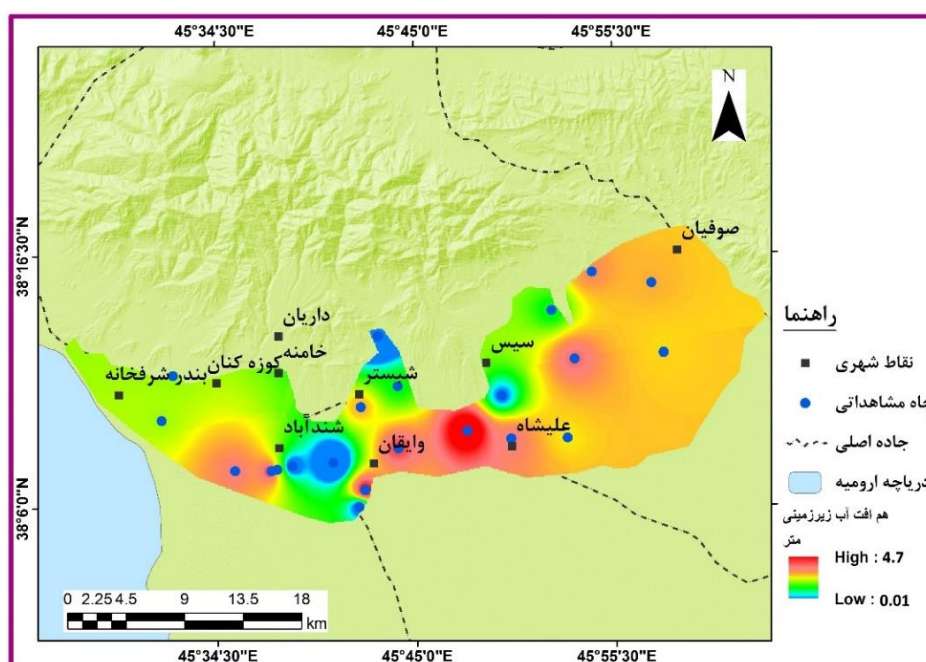


شکل ۶. نقشه کاربری اراضی محدوده مطالعاتی

نتایج

بررسی وضعیت چاه‌های منطقه و ارتباط بین جابه‌جایی زمین و افت سطح آب زیرزمینی

بررسی وضعیت میزان افت سطح آب در چاه‌های مورد مطالعه بیانگر این است که این چاه‌ها با افت سطح آب زیادی مواجه شده‌اند. در این تحقیق با استفاده از داده‌های سطح آب ۲۷ چاه مشاهداتی منطقه به روش درون‌یابی وزن‌دهی معکوس (IDW)، نقشه افت سالانه آب‌های زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه تهیه شده است (شکل ۷) که براین اساس مناطق میانی جنوبی محدوده مطالعاتی دارای بالاترین میانگین سالانه افت سطح آب زیرزمینی هستند.



شکل ۷. نقشه درون‌یابی میانگین سالانه افت آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه

همچنین نیز به منظور بررسی همبستگی و ارتباط فرونشست با تغییرات سطح آب چاه‌های پیژومتری، نمودار هیدروگراف واحد آبخوان در این چاه‌ها از سال ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۸ و نقشه میزان افت سطح آب در آن‌ها طی ۱۸ سال ترسیم شده است. روند تغییرات سطح آب چاه‌های پیژومتری در منطقه مورد مطالعه در تمامی سال‌های مورد بررسی از یک روند نزولی تبعیت می‌کند. تراز ایستایی آب زیرزمینی از سال ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۸ به طور مداوم در حال نزول بوده و هر سال نسبت به سال‌های قبل دچار افت شده است. بررسی وضعیت میزان افت سطح آب در چاه‌های مورد مطالعه بیانگر این است که این چاه‌ها با افت سطح آب زیادی مواجه شده‌اند، به طوری میانگین افت سالانه چاه‌ها بین ۱۰۰ تا ۴۷۰۰ میلی‌متر محاسبه شده است. در جدول ۲ نتایج حاصل از محاسبه میانگین افت سالانه سطح آب چاه‌های مورد مطالعه نشان داده شده است که بر اساس آن، در بین چاه‌های مورد مطالعه چاه شماره ۲۴ با میانگین افت سالانه ۴۷۳۳، دارای بالاترین افت سالانه سطح آب است و بعد از آن نیز چاه‌های شماره ۲۲ و ۱۹ به ترتیب با ۱۸۸۸ و ۱۱۲۰ میلی‌متر، دارای بالاترین میانگین افت سالانه هستند.

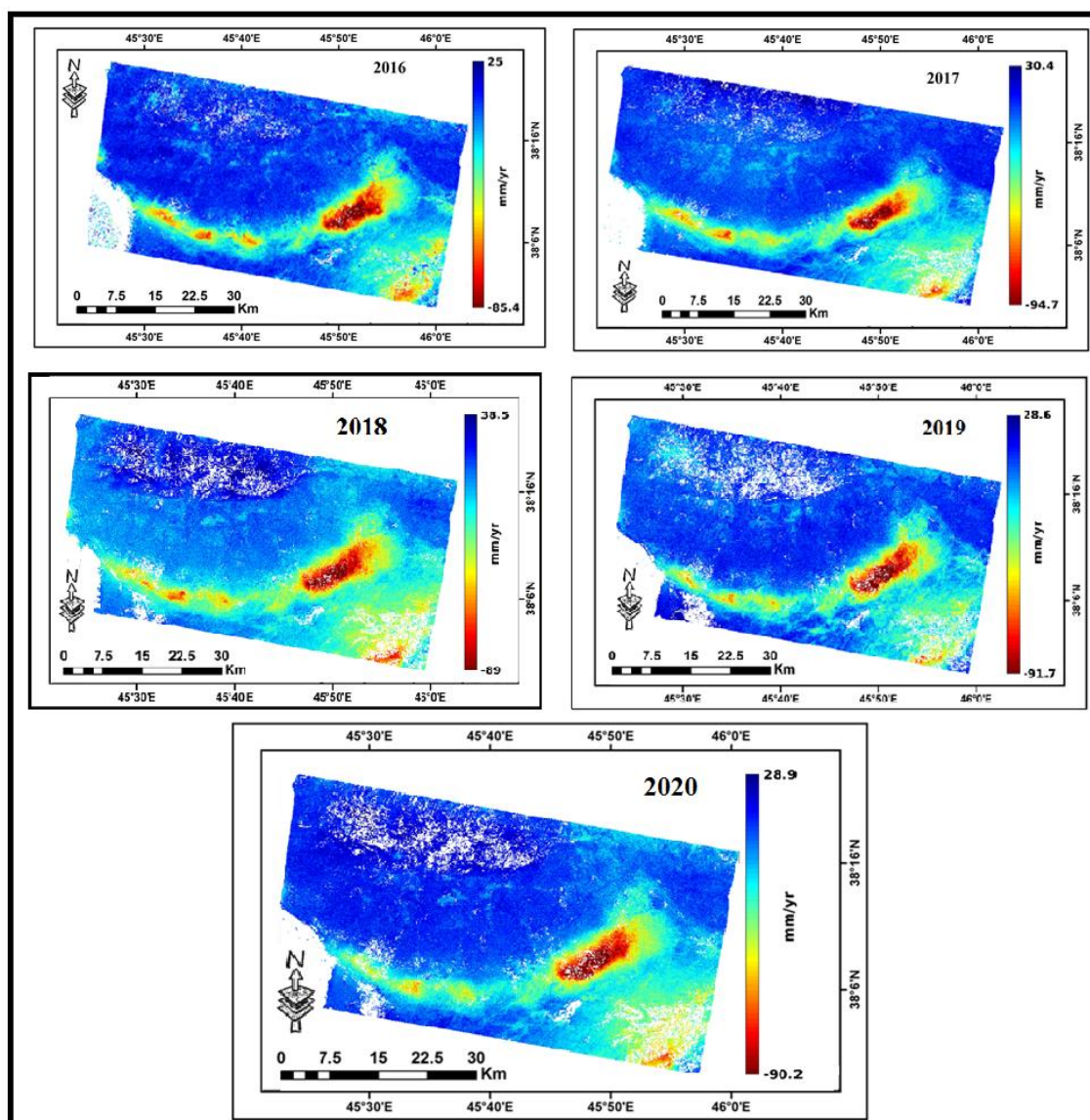
جدول ۲. میانگین افت سالانه چاه‌های مورد مطالعه بر حسب میلی‌متر در سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۸

شماره چاه	اسم چاه	میانگین افت سالانه	شماره چاه	اسم چاه	میانگین افت سالانه
۱	آق کهریز	۷۳۳	۱۳	علی بیگلر	۶۹۵
۲	بغل قنات بنیس	۳۸۶	۱۴	علیشاه	۶۹۴
۳	بیگجه خاتون	-۲۴۱	۱۵	قم تپه - جاده مه گستر	۷۴۴
۴	جاده سرکند دیزج	-۲۹۳	۱۶	قم تپه - کاو آب	۸۶۱
۵	دیزج خلیل	۵۲۴	۱۷	کوشک - کنار راه‌آهن	۹۲۷
۶	زیناب دشت	-۱۲۶	۱۸	کوشک - نرسیده به راه‌آهن	۹۲۰
۷	سفیدکمر	-۲۶۲	۱۹	مشق - جاده روستا	۱۱۲۰
۸	شندآباد - حصار ایلچی	-۱۵۱	۲۰	نظرو	۳۶۱
۹	شندآباد - راه ناچریولی	۱۴	۲۱	نوجه ده	-۲۸۸
۱۰	شندآباد - لوله بزرگ	۳۹۴	۲۲	وایقان اول جاده جزیره	۱۸۸۸
۱۱	شنگل‌آباد - کنار راه‌آهن	۶۰۶	۲۳	وایقان بعد از آبیاری	۱۵۷
۱۲	صوفیان - کنار راه‌آهن	۵۷۴	۲۴	وایقان بغل اکتشافی	۴۷۳۳

ارزیابی میزان فرونشست با استفاده از روش تداخل سنجی پراکنش گرهای دائمی (PSI)

نتایج نهایی پردازش تصاویر راداری، نقشه نرخ فرونشست است، این نقشه میزان سرعت متوسط فرونشست را بیان می‌کند. در شکل ۸ میانگین سرعت جابه‌جایی در راستای خط دید سنجنده، نشان داده شده است. محدوده سفیدرنگ، مناطقی هستند که به دلیل عدم همبستگی، هیچ پیکسلی در آن وجود ندارد و از پردازش حذف شده‌اند. این محدوده‌ها در شمال و غرب منطقه مورد مطالعه منطبق بر نقاط کوهستانی میشوداغ و دریاچه ارومیه و تا حدودی اراضی کشاورزی و باغی است. محدوده‌های با رنگ گرم (قرمز) مقدار فرونشست و رنگ‌های ملایم و سرد نیز بالآمدگی یا مناطقی که پایدار هستند و جابه‌جایی در آن اتفاق نیفتاده را نشان می‌دهد.

بیشترین میزان فرونشست در مناطق جنوب شرقی دشت و بخش‌های میانی و جنوب غربی آن، منطبق بر مناطق شرقی شهر علیشاه و مناطق جنوبی شهر وایقان و شندآباد تا سواحل شمال شرقی بندر شرفخانه رخ داده است. مخروط افکنه‌ها خصوصاً قاعده مخروط افکنه‌ها و دشت انتهایی به علت ریزدانه بودن نهشته‌ها دارای بیشترین مقادیر فرونشست هستند.



شکل ۸. نقشه میانگین سرعت جابه‌جایی منطقه مورد مطالعه از سال ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۰

بحث

یکی از متنوع‌ترین اشکال جابه‌جایی عمودی زمین، فرونشست است. فرونشست با فرو ریزش‌های محلی و فرورفتگی زمین در مقیاس منطقه‌ای فرق دارد. بسته به رژیم‌های تغییر شکل فرونشست، جابه‌جایی عمودی زمین ممکن است با تغییر شکل افقی نیز همراه بوده که می‌تواند آسیب‌های قابل توجهی بر جای بگذارد (Aslan et al, 2019). این پدیده ناشی از فشردگی تدریجی نهشته‌های سطح دشت‌ها است که می‌تواند در اثر عوامل انسانی مانند ساختمان‌سازی، تونل‌سازی، معدن‌کاوی، استخراج آب‌های زیرزمینی و یا نفت و گازهای طبیعی و یا عوامل طبیعی مانند فعالیت‌های تکتونیکی و ولکانیکی باشد. در این میان، استخراج بی‌رویه آب‌ها از سفره‌های زیرزمینی از دلایل اصلی فرونشست در سراسر جهان به شمار می‌رود (Aslan et al., 2019). در این تحقیق از الگوریتم snap2stamps با روش پراکنده سازه‌های دائمی استفاده شده است. این روش، یک روش نسبتاً نوین است که از اطلاعات فاز برای اندازه‌گیری فرونشست زمین استفاده می‌کند.

از نخستین مطالعات درخصوص پایش فرونشست زمین در دشت شبستر- صوفیان که در آن طی دوره‌ی آماری ۲۳ ساله (۱۳۶۵-۱۳۸۸) به بررسی تغییرات سطح ایستایی آب در دشت شبستر- صوفیان پرداخته شده است و به این نتیجه رسیدند این دشت در طول دوره‌ی آماری فوق ۳۷ سانتی‌متر افت داشته است. همچنین یکی از تبعات نامطلوب این افت، وقوع پدیده

فرونشست در برخی از نقاط دشت مذکور است. به طوری که فرونشست زمین تا حدود ۵۰ سانتی متر نیز مشاهده شده است (زینالی و همکاران، ۱۳۸۸). عزتی (۱۳۹۴)، نرخ و دامنه فرونشست در سطح دشت شبستر، با استفاده از تکنیک تداخل سنجی تفاضلی در بازه زمانی خرداد ۲۰۰۵ - مرداد ۲۰۰۶ و فروردین ۲۰۰۷ - خرداد ۲۰۰۸ به کار گرفته شد. بدین منظور تصاویر سنجنده ASAR ماهواره انویست در باند C مورد استفاده قرار گرفتند. یافته‌های تحقیق مؤید حاکمیت میزان فرونشست با حداقل ۴ سانتی متر تا حداکثر ۲۳ سانتی متر در سال بوده است.

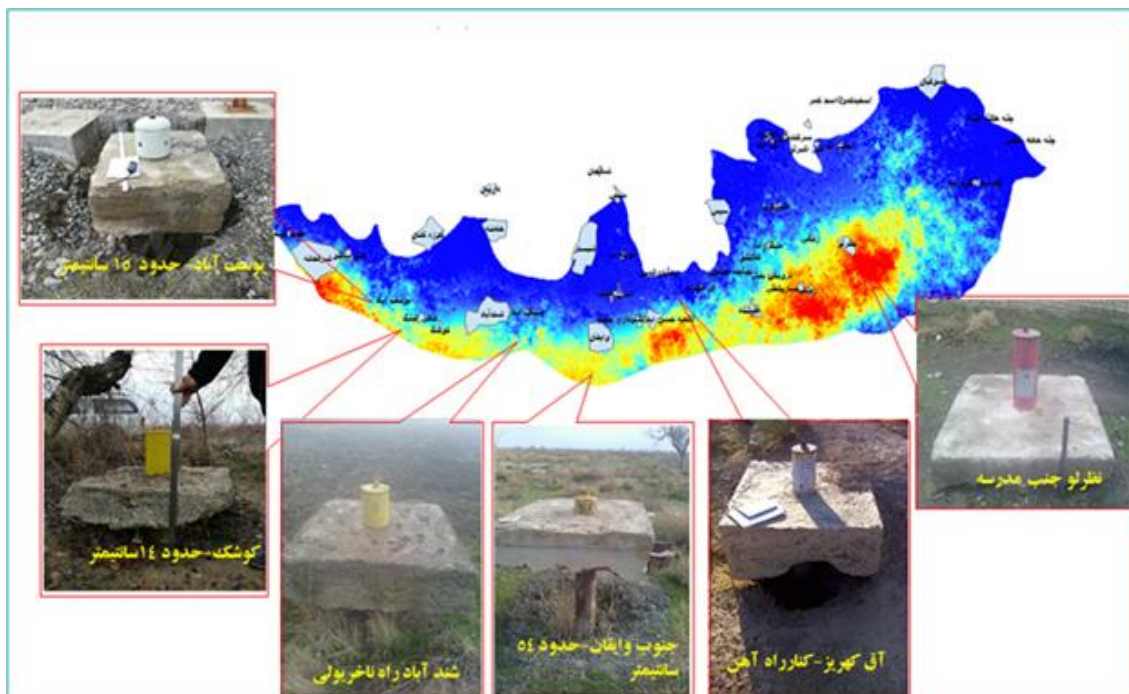
در تحقیقی دیگر، (ندیری و همکاران، ۱۳۹۷)، چارچوب جدید ALPRIFT را برای برآورد شاخص آسیب پذیری فرونشست در دشت شبستر را با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک" و روش تداخل سنجی راداری مورد مطالعه قرار داده‌اند. در این پژوهش، هفت عامل هیدروژئولوژیکی مؤثر بر فرونشست، شامل افت سطح آب زیرزمینی، محیط آبخوان، تغذیه، پمپاژ، کاربری اراضی، ضخامت آبخوان و فاصله از گسل مورد ارزیابی قرار گرفته و تلفیق شدند و نقشه آسیب پذیری در برابر فرونشست حاصل شد. همچنین از پردازش تصاویر راداری (INSAR) ماهواره Sentinel-1 برای بازه زمانی ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶ استفاده کرده‌اند که از مقایسه این دو تصویر با بازه یک ساله، میزان فرونشست آبخوان شبستر به دست آورده‌اند. نتایج این تحقیق نشان داد که روش الگوریتم ژنتیک با افزایش ضریب همبستگی بین شاخص فرونشست و فرونشست‌های به دست آمده در دشت، توانایی بیشتری در ارزیابی پتانسیل فرونشست دارد. همچنین، مشخص شد که قسمت‌های جنوبی و مرکزی دشت بیشترین پتانسیل فرونشست را دارا هستند، و سرانجام آخرین بررسی این پدیده توسط سازمان نقشه برداری در استان آذربایجان شرقی، با استفاده از ۳۲ تصویر ماهواره Sentinel-1 میزان تغییرات ارتفاعی این منطقه در طی دوره زمانی اسفند ۱۳۹۵ تا اسفند ۱۳۹۷ انجام شده که فرونشستی با نرخ ۱۰/۸ سانتی متر در سال مشاهده گردید. مناطقی به وسعت ۹۷۰ کیلومتر مربع در اطراف شهرهای شبستر، صوفیان، وایقان، خامنه و بندر شرفخانه دچار فرونشست با بیشترین نرخ ۱۰/۸ سانتی متر در سال که قابل توجه است.

نواحی یاد شده به لحاظ مکانی کاملاً منطبق بر مناطق با حداکثر فرونشست شناسایی شده در پژوهش حاضر هستند. در این تحقیق بر خلاف تحقیقات پیشین که از روش‌های تداخل سنجی سنتی به کار گرفته‌اند، از یکی از پرکاربردترین فن‌های پردازش مبتنی بر الگوریتم‌های تداخل سنجی SAR با رزولوشن بالا که به عنوان پراکنش گرهای دائمی (PSI) شناخته می‌شوند استفاده شده است. رویکرد PS بر این ایده استوار است که زیرمجموعه کوچکی از اهداف راداری، به نام PS ها، تقریباً عاری از اثرات همبستگی زمانی و هندسی هستند و بنابراین، با حفظ تمام اطلاعات فاز در طول زمان و با تغییر هندسه اکتسابی، دارای ویژگی‌های بهینه برای تداخل سنجی هستند.

پردازش PSI بر اساس یک مطالعه آماری از تصاویر راداری است و یک انتقال از تجزیه و تحلیل با جفت تصاویر روش تداخل سنجی دیفرانسیل کلاسیک، به تجزیه و تحلیل چند تصویر را نشان می‌دهد. برای هر PS منفرد، میانگین روند سرعت تغییر شکل زمین را می‌توان بادقت بین ۰/۱ و ۲ میلی متر در سال تخمین زد. با توجه به توسعه سنجنده‌های SAR با وضوح بالا، مقدار زیادی از PS یا نقاط پراکنش گر را می‌توان در یک زیرساخت شناسایی کرد تا به درستی انواع مختلف تغییر شکل را پایش کند. علاوه بر این، زمان بازبینی کوتاه‌تر مجموعه بزرگی از داده‌های SAR را فراهم می‌کند که تجزیه و تحلیل گسترش فصلی این پدیده را به دلیل تغییرات در سطح آب و یا دما ممکن می‌سازد. همچنین برخلاف تحقیقات قبلی، از تعداد تصاویر راداری بیشتر و با بازه زمانی کوتاه استفاده شده که کوتاه بودن و تعداد بالای این تصاویر به دقت نتایج و تهیه خروجی بهتر در بازه مطالعاتی طولانی‌تر کمک شایانی می‌کند. در این تحقیق، داده‌های پیرومتری بازه زمانی مربوط به داده‌های چاه‌ها (از ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۸) نیز طولانی‌تر در نظر گرفته شده است، بدین سبب که تأثیر افت آب بر پدیده فرونشست با تأخیر صورت می‌گیرد و این گونه نیست که بلافاصله و فوراً موجب فرونشست شود. در واقع تأثیر افت آب در درازمدت مشخص می‌گردد.

برای تأیید نتایج به دست آمده از روش تداخل سنجی پراکنش گرهای دائمی (PSI)، از شواهد صحرایی در منطقه مربوط به مطالعات قبلی نیز استفاده شد. بالا ماندن جداره فلزی میله چاه‌های عمیق، ارتفاع یافتن میله‌های چاه‌های اکتشافی

نشان‌دهنده فرونشست سطح این دشت است. باتوجه‌به تداوم شرایط پدیده فرونشست در این دشت، تداوم پایش و بررسی سنجش‌ازدوری، احداث و ایجاد ایستگاه‌های اندازه‌گیری ثابت (GPS) می‌تواند ضمن فراهم‌آوردن امکان پایش نرخ و دامنه نشست، امکان خوبی برای بررسی نتایج حاصل از روش‌های سنجش‌ازدوری و بهینه نمودن این روش‌ها را فراهم نماید. از آنجایی که منطقه مورد مطالعه فاقد ایستگاه‌های GPS و داده‌های ژئو دینامیکی بود، تفسیر نتایج پژوهش از طریق مقایسه آن با نتایج تحقیقات قبلی در این منطقه صورت گرفته است. (گزارش شرکت سهامی مدیریت منابع آب، ۱۴۰۰) (شکل ۹).



شکل ۹. آثار بالازدگی لوله چاه‌ها ناشی از فرونشست زمین در منطقه مورد مطالعه (گزارش شرکت سهامی مدیریت منابع آب، ۱۴۰۰)

مقایسه نتایج پژوهش حاضر با نتایج پیشین نشان می‌دهد که در تمامی این تحقیقات نیز، دلیل عمده فرونشست منطقه افت سطح آب ناشی از برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی بوده است.

نتیجه‌گیری

به کارگیری روش تداخل‌سنجی راداری پراکنش گرهای دائمی (PSI) از طریق پیش‌پردازش خودکار داده‌های سنجنده SENTINEL-1 در این منطقه، برای نخستین بار است که در تحقیقات فرونشست در دشت شبستر - صوفیان انجام شده است. روش پراکنش گرهای دائمی (PSI)، یکی از روش‌های پیشرفته تداخل‌سنجی راداری است که طی سال‌های اخیر نتایج دقیقی و قابل قبولی را در خصوص مطالعات جابه‌جایی سطح زمین و فرونشست طی مطالعات بسیاری به دست آورده است. نتایج پژوهش حاضر نشان داد که فن PSI برای پایش و آشکارسازی تغییر شکل سطح زمین در حد میلی‌متر در این منطقه قابل استفاده است. همچنین در این تحقیق، کارایی بسته متن‌باز STAMPS و الگوریتم پردازشی خودکار SNAP2STAMPS جهت پردازش تداخل‌سنجی راداری نشان داده شده است. از نتایج مهم استخراج شده از این الگوریتم پردازشی، ایجاد نقشه‌های متوسط جابه‌جایی با مقادیر $۸۵/۴$ ، $-۹۴/۷$ ، -۸۹ ، $-۹/۷$ و $-۹۰/۲$ میلی‌متر در راستای دید ماهواره در طول بازه زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۰ بوده است. میزان فرونشست به‌طوری قابل توجه در مناطق جنوب شرقی و میانی و غربی محدوده مشاهده می‌شود که این امر، همان‌طور که در دیگر تحقیقات انجام شده در منطقه نیز بیان شده است، به دلیل تمرکز بیشتر فعالیت کشاورزی و میزان استفاده از آب‌های زیرزمینی بوده است.

ارتباط بین افت چاه‌های منطقه و میزان فرونشست در دشت شبستر - صوفیان می‌تواند شاخص مناسبی برای ارزیابی صحت عملیات باشد. هر مکانی فرونشست زیادی دارد، در آن مکان افت آب چاه‌های پیرومتری نیز بیشتر است. در نتیجه،

ارتباط مستقیم و قوی بین فرونشست و میزان برداشت آب های زیرزمینی را اثبات می کند. تأیید این ادعا از طریق تهیه هیدروگراف واحد آبخوان و تهیه نقشه افت سطح آب زیرزمینی منطقه انجام شده است که این نمودار نشان دهنده حالت نوسانی تراز آب چاه های منطقه بوده است و تراز آب همواره روند نزولی نسبت به زمان نشان داده است، و روند نزولی نمودار، نشان دهنده افت مداوم سطح آب زیرزمینی است. افت سطح آب منطقه $4/7$ متر در طول دوره آماری ۱۸ ساله از ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۸ به دست آمده است. همچنین، بدین سبب که منطقه مورد مطالعه فاقد ایستگاه های GPS و داده های ژئودینامیک بوده است، نتایج این تحقیق بدون داشتن اطلاعات دقیق و مکفی از داده های ژئودینامیکی و همچنین، شبکه سنجش GPS، تنها بر اساس تحلیل تصاویر راداری و متد تداخل سنجی PSI و تطبیق آن با نتایج سایر تحقیقات مشابه صورت گرفته در منطقه بوده است که مشخص گردید که نتایج دارای مطابقت مناسبی با تغییرات سطح آب زیرزمینی دارد.

منابع

- احمدی، سلمان؛ سودمند افشار، رضا (۱۳۹۹). پایش فرونشست دشت های قروه و چهار دولی استان های همدان و کردستان به دلیل برداشت بی رویه از منابع آب های زیرزمینی با استفاده از فن پراکنش گرهای دائمی. محیط زیست و مهندسی آب، ۶(۳)، ۲۱۹-۲۳۳.
- پاپی، رامین؛ عطاری، سارا؛ سلیمانی، مسعود (۱۳۹۹). تحلیل سری زمانی فرونشست زمین در غرب استان تهران (دشت شهریار) و ارتباط آن با برداشت آب های زیرزمینی با تکنیک تداخل سنجی راداری. جغرافیا و پایداری محیط (پژوهش نامه جغرافیایی)، ۱۰(۳۳)، ۱۰۹-۱۲۸.
- خرمی، محمد (۱۳۹۶). تخمین فرونشست مشهد با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری و ارزیابی آن با توجه به مشخصات ژئوتکنیکی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی عمران گرایش ژئوتکنیک، مشهد.
- خوش لهجه آذر، مهدی (۱۳۹۸). بررسی رفتار فرونشست زمین در مناطق مستعد فرو چاله با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی نقشه برداری (ژئودزی و ژئوماتیک).
- زینالی، علی؛ علاف نجیب، مرتضی؛ حسن پور اقدم، محمدعلی (۱۳۸۸). فرونشست زمین در دشت شبستر - صوفیان به دلیل افت سطح آب زیرزمینی، دومین کنفرانس سراسری آب، بهبهان، ۳۴-۲۷.
- سلطانی سیسی، غلامعلی (۱۳۸۴)، وضعیت مورفوتکتونیک و نئوتکتونیک شهرستان شبستر، بیست و یکمین گرد هم آیی علوم زمین، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- سودمند افشار، رضا؛ احمدی، سلمان (۱۳۹۹). پایش فرونشست زمین در اثر برداشت بی رویه آب های زیرزمینی با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری به روش پراکنش گرهای پایدار (مطالعه موردی: شهرستان اسدآباد و دشت های مجاور)، نشریه علمی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی، ۸(۱)، ۹۹-۷۹.
- شرافت، متین؛ انصاری، عبدالحامید؛ مجتهد زاده، سید حسین؛ قربانی، احمد (۱۳۹۹). پایش فرونشست دشت ابرکوه یزد با استفاده از فن تداخل سنجی راداری مینی بر پراکنش گرهای پایا. خشک بوم، ۲(۹)، ۱۲۱-۱۳۶.
- فروغ نیا، فاطمه؛ نعمتی، صادق؛ مقصودی، یاسر (۱۳۹۷). مقصودی، یاسر، آنالیز سری زمانی تداخل سنجی راداری مبتنی بر پراکنش گرهای دائم. با استفاده از تصاویر Sentinel-1 و ENVISAT-ASAR برای برآورد پدیده فرونشست شهر تهران، سنجش از دور و GIS/یران، ۱۰(۱)، ۵۵-۷۲.
- قره چلو، سعید؛ اکبری قوچانی، حسام؛ گلیان، سعید؛ گنجی، کامران (۱۴۰۰). ارزیابی میزان فرونشست زمین در ارتباط با آب های زیرزمینی به کمک داده ماهواره ای راداری Sentinel-1 و الوس-۱ (منطقه مورد مطالعه: دشت مشهد). سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی (کاربرد سنجش از دور و GIS در علوم منابع طبیعی)، ۱۲(۳)، ۱۱-۱۴.
- گزارش شرکت سهامی مدیریت منابع آب (۱۴۰۰). اجرای ۵ برنامه تعادل بخشی برای جلوگیری از فرونشست زمین در آذربایجان شرقی، مطالعات پایه منابع آب شرکت آب منطقه ای آذربایجان شرقی.
- مؤمنی، سحر (۱۳۹۷). برآورد فرونشست زمین ناشی از برداشت بی رویه آب های زیرزمینی با استفاده از داده های سری زمانی (محدوده مورد مطالعه: دشت کبودرآهنگ- فامنین همدان، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده برنامه ریزی و علوم محیطی، گروه سنجش از دور، دانشگاه تبریز.

ندیری، عطاالله؛ طاهری، زینب؛ برزگری، قدرت؛ دیده‌بان، خلیل (۱۳۹۷). ارائه چارچوبی برای تخمین پتانسیل فرونشست آبخوان با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک. *تحقیقات منابع آب ایران*، ۱۴ (۲)، ۱۷۴-۱۸۵.

عزتی، سوئبه (۱۳۹۴). بررسی فرونشست زمین در اثر برداشت از آب‌های زیرزمینی به روش تداخل‌سنجی راداری (مطالعه موردی: دشت شبستر - صوفیان)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تبریز، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری (ژئودزی و ژئوماتیک).

References

- Ahmadi, S., & Soudmand Afshar, R. (2020). Monitoring of Land Subsidence in Qorveh and Chahardoli Plains of Hamadan and Kurdistan Provinces using PS-InSAR Technique. *Environment and Water Engineering*, 6 (3), 219-233 (In Persian).
- Aslan, G., Cakir, Z., Lasserre, C., & Renard, F. (2019). Investigating subsidence in the Bursa Plain, Turkey, using ascending and descending Sentinel-1 satellite data. *Remote Sensing*, 11(1), 85.
- Bagheri-Gavkosh, 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*, 778, 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.
- Bignami, C., Brunori, C. A., Murgia, F., & Tolomei, C. (2018). Multi-sensor monitoring of Ciudad Guzman (Mexico) ground subsidence. *Procedia computer science*, 138, 362-365.
- Braun, A., Höser, T., & Delgado Blasco, J. M. (2021). Elevation change of Bhasan Char measured by persistent scatterer interferometry using Sentinel-1 data in a humanitarian context. *European Journal of Remote Sensing*, 54 (sup1), 109-126.
- Chen, G., Zhang, Y., Zeng, R., Yang, Z., Chen, X., Zhao, F., & Meng, X. (2018). Detection of land subsidence associated with land creation and rapid urbanization in the chinese loess plateau using time series insar: A case study of Lanzhou new district. *Remote Sensing*, 10(2), 270.
- Da Lio, C., & Tosi, L. (2018). Land subsidence in the Friuli Venezia Giulia coastal plain, Italy: 1992–2010 results from SAR-based interferometry. *Science of the Total Environment*, 633, 752-764.
- Delgado Blasco, J. M., Foumelis, 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.
- Di Paola, G., Alberico, I., Aucelli, P. P. C., Matano, F., Rizzo, A., & Vilardo, G. (2018). Coastal subsidence detected by Synthetic Aperture Radar interferometry and its effects coupled with future sea-level rise: the case of the Sele Plain (Southern Italy). *Journal of Flood Risk Management*, 11(2), 191-206.
- Ezzati, S. (2015). *Investigation of land subsidence due to groundwater abstraction by radar interference method (Case study: Shabestar-Sufian plain)*, M.Sc. Thesis, University of Tabriz, Faculty of Surveying Engineering (Geodesy and Geomatics) (In Persian).
- Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 39(1), 8-20.
- 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.
- Foroughnia, F., Nemati, S., Maghsoudi, Y. (2019). Radar Interferometry Based on Diffusers. Proceedings from Sentinel-A and ENVISAT-ASAR for Phenomena, *Remote Sensing and GIS*, 10 (1), 57-72, 2018.
- Foroughnia, F., Nemati, S., Maghsoudi, Y., & Perissin, D. (2019). An iterative PS-InSAR method for the analysis of large spatio-temporal baseline data stacks for land subsidence estimation. *International Journal Of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 74, 248-258.
- Gharechelou, S., Akbari Ghoochani, H., Golian, S., & Ganji, K. (2021). Evaluation of land subsidence relationship with groundwater depletion using Sentinel-1 and ALOS-1 radar data (Case study: Mashhad plain). *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 12(3), 11-14 (In

- Persian).
- 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.
- Hamdani, R. S., Hadi, S. P., & Rudiarto, I. (2021). Progress or Regress? A Systematic Review on Two Decades of Monitoring and Addressing Land Subsidence Hazards in Semarang City. *Sustainability*, 13(24), 13755.
- He, H., Zhou, L., & Lee, H. (2021). Ground Displacement Variation Around Power Line Corridors on the Loess Plateau Estimated by Persistent Scatterer Interferometry. *IEEE Access*, 9, 87908-87917.
- 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.
- 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.
- Jiang, S., Shi, F., Hu, B., Wang, W., & Lin, Q. (2017, December). Monitoring of the Ground Subsidence in Macao Using the PSI Technique. In *International Conference on Geo-Spatial Knowledge and Intelligence* (pp. 250-261). Springer, Singapore.
- Khan, R., Li, H., Afzal, Z., Basir, M., Arif, M., & Hassan, W. (2021). Monitoring Subsidence in Urban Area by PSInSAR: A Case Study of Abbottabad City, Northern Pakistan. *Remote Sensing*, 13(9), 1651.
- Khorami, M. (2017). *Estimation of Mashhad subsidence using radar interferometry technique and its evaluation according to geotechnical specifications*, M.Sc. Thesis, Ferdowsi University, Daheh, Kooch or Janjeh, Mashhad (In Persian).
- Khorrami, M., Alizadeh, B., Ghasemi Tousi, E., Shakerian, M., Maghsoudi, Y., & Rahgozar, P. (2019). How groundwater level fluctuations and geotechnical properties lead to asymmetric subsidence: A PSInSAR analysis of land deformation over a transit corridor in the Los Angeles metropolitan area. *Remote Sensing*, 11(4), 377.
- Khoshlahjeh Azar, M. (2019). *Investigating the behavior of land subsidence in susceptible areas of sinkhole using InSAR*, M.Sc. Thesis in Civil-Surveying Engineering In Photogrammetry, Faculty of Geodesy and Geomatics, K.N.Toosi University of Technology (In Persian).
- 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.
- 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.
- Malinowska, A. A., Witkowski, W. T., Guzy, A., & Hejmanowski, R. (2020). Satellite-based monitoring and modeling of ground movements caused by water rebound. *Remote Sensing*, 12(11), 1786.
- 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.
- Miller, M. M., & Shirzaei, M. (2019). Land subsidence in Houston correlated with flooding from Hurricane Harvey. *Remote Sensing of Environment*, 225, 368-378.
- Mirzaei, Z., Hasanlou, M., Samieie-Esfahany, S., Rojhani, M., & Ajournalou, P. (2019). Land subsidence monitoring in azar oil field based on time series analysis. In *Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings*, 18 (1), 1-2.
- Momeni, Sahar. (2019). *Estimation of land subsidence due to uncontrolled abstraction of groundwater using time series data (study area: Kaboudar Ahang-Famenin Plain, Hamedan*, M.Sc. Thesis, Faculty of Planning and Environmental Sciences, Department of Remote Sensing, University of Tabriz (In Persian).
- Motagh, M., Shamshiri, R., Haghighi, M. H., Wetzel, H. U., Akbari, B., Nahavandchi, H., ... &

- Arabi, S. (2017). Quantifying groundwater exploitation induced subsidence in the Rafsanjan plain, southeastern Iran, using InSAR time-series and in situ measurements. *Engineering geology*, 218, 134-151.
- Nadiri, A., Taheri, Z., Barzegari, Q., & Dideban, K. (2018). Provide a framework for estimating aquifer subsidence potential using the genetic algorithm method. *Iranian Water Resources Research*, 14 (2), 174-185 (In Persian).
- Papi, R., Attarchi, S., & Soleimani, M. (2020). Time series analysis of land subsidence in the west of Tehran province (Shahrar plain) and its relationship with groundwater abstraction by radar interferometry technique. *Geography and Environmental Sustainability (Geographical Research Journal)*, 10 (33), 128-109 (In Persian).
- Peng, M., Lu, Z., Zhao, C., Motagh, M., Bai, L., Conway, B. D., & Chen, H. (2022). Mapping land subsidence and aquifer system properties of the Willcox Basin, Arizona, from InSAR observations and independent component analysis. *Remote Sensing of Environment*, 271, 112894.
- Report of Water Resources Management Company. (2020). *Implementation of 5 balancing programs to prevent land subsidence in East Azerbaijan*, basic studies of water resources of the East Azerbaijan Regional Water Company (In Persian).
- Sharafat, M., Ansari, A. H., Mojtahedzadeh, S. H., & Ghorbani, A. (2020). Subsidence monitoring of Yazd Abarkuh plain using radar interferometry technique based on persistent scatterers. *Journal of Arid Biome*, 9(2), 121-136 (In Persian).
- Soltani Sisi, G (2005), Morphotectonic and neotectonic status of Shabestar city, *21st Geosciences Conference*, Geological Survey and Mineral Exploration Organization (In Persian).
- Soodmand Afshar, R, & Ahmadi, S. (2020). Monitoring of land subsidence due to overexploitation of groundwater using PS-InSAR (Case study: Assadabad city and adjacent plains), *Journal of Spatial Information Technology Engineering*, 8 (1), 99-79 (In Persian).
- Van der Horst, T., Rutten, M. M., van de Giesen, N. C., & Hanssen, R. F. (2018). Monitoring land subsidence in Yangon, Myanmar using Sentinel-1 persistent scatterer interferometry and assessment of driving mechanisms. *Remote sensing of environment*, 217, 101-110.
- Zanaga, D., Van De Kerchove, R., De Keersmaecker, W., Souverijns, N., Brockmann, C., Quast, R., ... & Arino, O. (2021). ESA WorldCover 10 m 2020 v100.
- Zeinali, A, Alaf Najib, M., & Hassanpour Aghdam, M. (2009). Land subsidence in Shabestar-Sufian plain due to falling groundwater level, *Second National Water Conference*, Behbahan, pp. 34-27 (In Persian).
- Zhou, L., Guo, J., Hu, J., Li, J., Xu, Y., Pan, Y., & Shi, M. (2017). Wuhan surface subsidence analysis in 2015–2016 based on Sentinel-1A data by SBAS-InSAR. *Remote Sensing*, 9(10), 982.