



Monitoring Land Subsidence using Persistent Scatterer Interferometry Time Series Analysis and Groundwater Level Variations: (Case Study: Sarab Plain)

M. Sadrykia^{1*}

Abstract

Land subsidence is nowadays a usual phenomenon in the world. It can cause significant damages to transportation networks, facilities and structures. This study aims to monitor land subsidence in Sarab plain and its relation with groundwater level variations. Sarab Plain is one of the plains in East Azerbaijan province with high vulnerability to land subsidence. However, no study has been reported in the plain on investigating the relationship between groundwater level variations and land subsidence based on velocity maps. In this paper, in order to increase the accuracy of determining land subsidence, Persistent Scatterer time series analysis is applied using 36 Sentinel-1A datasets from 2017 to 2020. The maximum subsidence rate of about -45 mm/year in the vertical direction was obtained and the areas with the prevalence of subsidence were determined. Using the time series data of pizometric wells in the period of 2004 to 2020, it was determined that in areas with high land subsidence, there was a decline of several meters in groundwater level, while in areas without land subsidence, changes of groundwater level was in sinusoidal form. Also, with the preparation of water table equilibrium map in the three-year period, the correlation between groundwater level (independent variable) and ground surface displacement (dependent variables) was studied. According to the regression line equation, the statistical relationship was significant and direct relationship between the variables was confirmed. Therefore, regular monitoring of ground water storage and exploitation needs to be on the agenda for an effective mitigation of damages of the land subsidence.

Keywords: Land Subsidence, Radar Interferometry, Persistent Scatterer, Groundwater Level, Correlation.

Received: November 18, 2021

Accepted: April 26, 2022

پایش فرونشست زمین با تحلیل سری زمانی پراکنش گرهای دائمی و تغییرات تراز آب زیرزمینی (مطالعه موردی: دشت سراب)

منصوره صدری کیا^{۱*}

چکیده

امروزه، فرونشست زمین پدیده‌ای شایع در بسیاری از مناطق جهان است که آثار مخربی بر روی شبکه‌های حمل و نقل، تأسیسات و سازه‌ها دارد. هدف این مطالعه بررسی وضعیت فرونشست دشت سراب و ارتباط آن با تغییرات تراز آب زیرزمینی می‌باشد. دشت سراب از دشتهای دارای خطر بالایی فرونشست استان آذربایجان شرقی معرفی شده است، با این حال تاکنون مطالعه‌ای برای بررسی ارتباط سطح ایستایی با فرونشست زمین بر اساس نقشه‌های نرخ جابه‌جایی زمین انجام نشده است. در این مقاله ابتدا به منظور افزایش دقت در تعیین جابه‌جایی‌ها، روش تحلیل سری زمانی پراکنش گرهای دائمی و ۳۶ تصویر Sentinel-1A در بازه ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۰ استفاده شد و بیشینه نرخ فرونشست حدود -۴۵ میلی‌متر در سال در راستای قائم به دست آمد. بخش‌های دارای بیشینه فرونشست دشت نیز مشخص شد. با استفاده از داده‌های سری زمانی چاه‌های پیژومتری در فاصله سال‌های ۱۳۸۳ تا ۱۳۹۸، مشخص شد در مناطق دارای فرونشست زیاد، کاهش چند متری سطح ایستایی وجود داشته، در حالی که در مناطق فاقد فرونشست، تغییرات سطح ایستایی به شکل سینوسی بوده است. همچنین، با تهیه نقشه هم‌افت سطح ایستایی در بازه زمانی سه ساله، همبستگی بین سطح ایستایی (متغیر مستقل) و جابه‌جایی سطح زمین (متغیر وابسته) مورد بررسی قرار گرفت. وجود معادله خط رگرسیون نشان داد، رابطه آماری بین سطح ایستایی و جابه‌جایی‌های سطح زمین معنی‌دار است و رابطه مستقیم بین دو متغیر وجود دارد. بنابراین پایش مستمر میزان ذخایر آب‌های زیرزمینی و کنترل برداشت آب، نقش مؤثری در پیشگیری از خطرات پدیده فرونشست خواهد داشت که لازم است در دستور کار قرار گیرد.

کلمات کلیدی: فرونشست زمین، تداخل‌سنجی راداری، پراکنش گرهای دائمی، سطح ایستایی، همبستگی.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۸/۲۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۲/۶

1- Assistant Professor, Department of Geomatics Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

Email: m.sadrykia@tabrizu.ac.ir, m.sadrykia@gmail.com

*- Corresponding Author

Dor: [20.1001.1.17352347.1401.18.2.1.1](https://doi.org/10.1001.1.17352347.1401.18.2.1.1)

۱- استادیار گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان پائیز ۱۴۰۱ امکانپذیر است.



۱- مقدمه

بنا به تعریف یونسکو، فرونشست عبارت است از فروریزش و یا نشست سطح زمین در مقیاس بزرگ که به علت‌های متفاوتی روی می‌دهد. به طور معمول این اصطلاح، به حرکت قائم رو به پایین سطح زمین که می‌تواند با اندکی حرکت افقی همراه باشد، گفته می‌شود. فرونشست می‌تواند در اثر پدیده‌های طبیعی زمین‌شناختی مانند انحلال، آب شدگی یخ‌ها، تراکم نهشته‌ها، حرکات آرام پوسته و خروج گدازه از پوسته جامد زمین و یا فعالیت‌های انسانی نظیر معدن‌کاری، برداشت آب‌های زیرزمینی و یا استخراج نفت ایجاد شود (Amighpey et al., 2010). فرونشست می‌تواند ناشی از حرکات تکنونیک‌ی مانند زلزله و فعالیت گسل‌ها نیز باشد. خطر فرونشست بر اثر افت سطح تراز آب‌های زیرزمینی یک خطر جهانی است. در دهه حاضر با افزایش شهرنشینی و صنعتی شدن، شاهد برداشت بیش از حد بدون امکان ترمیم مجدد آب از سفره‌های زیرزمینی هستیم که نتیجه آن فشرده شدن آبخوان است (Amelung et al., 1999). برداشت دراز مدت و بی‌رویه آب از آبخوان‌ها که دارای میان‌لایه‌های تقریباً ضخیم و تراکم‌پذیر سیلت و رس می‌باشند، باعث کاهش تراز ایستابی یا پیرومتریکی در سفره آب زیرزمینی شده و با خروج آهسته آب از میان‌لایه‌ها و فشرده شدن آبخوان، تعداد و حجم فضاهای خالی آبخوان کاهش پیدا می‌کند و در نهایت سطح زمین دچار فرونشستی کند و بزرگ مقیاس می‌شود (Ravanfar, 2015).

فرونشست و شکاف‌های زمین که به آهستگی و به تدریج گسترش می‌یابند، شاید همان تأثیر خطرهای ناگهانی و فاجعه بار مانند سیل و زلزله را نداشته باشد. با این وجود به طور معمول خسارت‌های ناشی از فرونشست و شکاف‌های زمین، ترمیم‌ناپذیر، پرهزینه و مخرب می‌باشند. در ایران نیز پدیده فرونشست زمین سابقه نسبتاً طولانی (بیش از چند دهه) دارد. نخستین بررسی‌های علمی برای تعیین میزان فرونشست در ایران از حدود دو دهه قبل در دشت رفسنجان که دارای بالاترین سابقه و میزان فرونشست بود، آغاز شده است. با فراگیر شدن این پدیده در سایر نواحی ایران، مطالعات گسترده‌ای با روش‌های مختلف انجام شده است (Babae, 2016).

به منظور بررسی و تشخیص مناطق دارای فرونشست از تکنیک‌هایی همچون تداخل‌سنجی راداری^۲، سیستم تعیین موقعیت جهانی^۳ و ترازبایی دقیق استفاده می‌شود. ترازبایی دقیق در کنار مزیت دقت بالا، با محدودیت‌هایی مانند اندازه‌گیری به صورت نقطه‌ای و هزینه بالا مواجه است. در مورد استفاده از مشاهدات سیستم تعیین موقعیت جهانی

نیز محدودیت‌های اندازه‌گیری به صورت نقطه‌ای (محدود به ایستگاه مشاهداتی) و هزینه بالا وجود دارد (Amighpey et al., 2010). به همین دلیل روش تداخل‌سنجی راداری از دیدگاه صرفه‌جویی در هزینه و زمان و انجام مشاهدات پیوسته بر روی زمین در مقایسه با روش‌های دیگر از قابلیت بالایی برخوردار است. روش تداخل‌سنجی راداری تفاضلی^۴ برای اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های زمین به کار رفته است، این روش می‌تواند تغییر شکل‌های سطح زمین را با دقتی در حد سانتی‌متر تا میلی‌متر نشان دهد (Ferretti et al., 2007). لیکن عدم همبستگی مکانی و زمانی بین تصاویر و اثر اتمسفر، دقت نتایج این روش را کاهش می‌دهد (Zebker and Villasenor, 1992). برای غلبه بر این محدودیت‌ها تداخل‌سنجی پراکنش‌گرهای دائمی^۵ (PSI) بر روی یک سری از تصاویر SAR که در زمان‌های مختلف از یک منطقه اخذ شده‌اند ارائه شده است. در تحلیل سری زمانی تداخل‌سنجی راداری می‌بایست چندین تصویر در بازه‌های زمانی متفاوت از آن منطقه در دسترس بوده و چندین تداخل‌نگار برای محاسبه نرخ تغییر شکل وارد محاسبات گردند (Boerner et al., 1997). اولین الگوریتم PSI توسط Ferretti et al. (2001) با نام PSInSAR پیشنهاد شد. پس از آن الگوریتم‌های متعدد PSI ارائه شده‌اند که از آن میان می‌توان به روش SBAS^۶ (Berardino et al., 2002)، StaMPS^۷ (Hooper et al., 2007)، TCPInSAR^۸ (Zhang et al., 2012) و شبه PS^۹ (Perissin and Wang, 2012) اشاره کرد که در جهت بهبود کیفیت نتایج PSI توسعه داده شده‌اند. در الگوریتم PSI هدف‌های زمینی که قدرت بازتاب زیاد امواج راداری را دارند و فاز پایداری از آن‌ها در تصاویر ثبت می‌شود (پراکنش‌گرهای دائمی) مشخص و آنالیز می‌شوند. در میان روش‌های PSI نیز روش‌هایی که از پایداری دامنه در زمان- که با شاخص پراکنندگی دامنه تعریف می‌شود- استفاده می‌کنند، برای استفاده در مناطق غیرشهری که پراکنش‌گر دائمی یافت نمی‌شود و نسبت سیگنال به نویز کمتر است، مناسب نیستند. اما در روش StaMPS پیکسل‌هایی که پایداری فاز دارند به عنوان کاندید پراکنش‌گر دائمی انتخاب می‌شوند و پس از انتخاب پیکسل‌های کاندید پراکنش‌گرهای دائمی، تداخل‌نگارها توسط شاخص پراکنندگی دامنه تشکیل می‌شوند. در این روش همچنین ناهمبستگی کاهش داده می‌شود (Hooper, 2006). از مزایای دیگر روش StaMPS این است که به مدل اولیه جابه‌جایی نیاز ندارد، در نتیجه برای تحلیل و بررسی فرونشست در مناطقی که فاقد مدل اولیه تغییر شکل و دارای عوامل متعدد تغییر شکل هستند، مناسب است (Crosetto et al., 2016).

در ادامه برخی از تحقیق‌های اخیر در ایران و جهان در زمینه بررسی فرونشست زمین با استفاده از روش‌های تحلیل سری زمانی

تداخل سنجی راداری از نظر تعداد و نوع تصاویر به کار رفته، بازه زمانی مورد مطالعه، روش به کار رفته و منطقه مورد مطالعه و نیز روش‌های صحت‌سنجی هر تحقیق، به صورت تطبیقی آورده شده است.

Czikhardt et al. (2017) با استفاده از ۱۵۰ تصویر Sentinel-1A در بازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۷ با تحلیل سری زمانی پراکنش‌گرهای دائمی با استفاده از روش StaMPS نرخ فرونشست سالانه در منطقه Nitra در اسلواکی را مشخص کردند. نتایج این تحقیق با نتایج ترازیبی زمینی مورد ارزیابی قرار گرفته است. (Du et al. (2018) با استفاده از ۲۴ تصویر Sentinel-1، ۱۹ تصویر ALOS-1 و ۹ تصویر ALOS-2 در بازه زمانی ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۷ با روش SBAS مناطق دارای فرونشست را در شرق یکن تعیین کردند. نتایج تحقیق با داده‌های ترازیبی مقایسه شده است. در تحقیق (van der Horst et al. (2018) با استفاده از ۳۳ تصویر Sentinel-1A در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۷ با روش DePSI^{۱۱} مناطق با فرونشست بالا در شهر Yangon در Myanmar مشخص شد. در این تحقیق ارتباط فرونشست زمین با سطح آب‌های زیرزمینی مورد بررسی قرار گرفته است و مشخص شده است که استخراج آب‌های زیرزمینی با فرونشست در Yangon همبستگی دارد و عامل اصلی فرونشست بوده است. همچنین در محل وقوع فرونشست‌ها، جنس زمین‌شناسی محل، مورد بررسی قرار گرفته است. (Haghshenas Haghghi and Motagh (2019) با ۳۹ تصویر Envisat ASAR، ۱۰ تصویر ALOS PALSAR (باند L)، ۴۸ تصویر TerraSAR-X (باند X) و ۶۴ تصویر Sentinel-1 (باند C) در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۷ با روش SBAS نرخ فرونشست در دشت تهران را تعیین کردند. نتایج تحقیق با تحلیل زمین‌شناسی و بررسی سطح آب‌های زیرزمینی ارزیابی شده است. همچنین، این محققین تبعیت شکل کاسه فرونشست از روند گسل‌های منطقه را مورد ارزیابی قرار داده‌اند. (Lu et al. (2019) با استفاده از ۳۶ تصویر Envisat ASAR در بازه زمانی ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۰ با روش SBAS تغییر شکل سطح زمین در شهر Changzhou چین را مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل با داده‌های ترازیبی و چاه‌های پیژومتری مقایسه شدند. تجزیه و تحلیل همبستگی بین سطح ایستابی و تغییرات سطح زمین نشان داد که تغذیه آب‌های زیرزمینی می‌تواند باعث بازگشت سطح زمین در منطقه مورد مطالعه شود. در تحقیق (Yang et al. (2019) با استفاده از ۲۲ تصویر Sentinel-1A در بازه زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۱۷ با روش SBAS پدیده فرونشست در فصل خشک در Yunlin تایوان مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج با داده‌های ترازیبی و مشاهدات GPS ارزیابی شده است. (Goli et al. (2019) با استفاده از ۸ تصویر Envisat ASAR در بازه زمانی ۲۰۰۵

تا ۲۰۱۰ با روش SBAS میزان فرونشست در استان فارس را تعیین کردند. نتایج با سطح آب‌های زیرزمینی از طریق چاه‌های پیژومتری مقایسه شده و مشخص شده است بین میزان افت سطح آب‌های زیرزمینی و فرونشست زمین در منطقه رابطه معنی‌داری وجود دارد. (Li et al. (2020) با ۱۸ تصویر Sentinel-1 در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۶ با روش SBAS فرونشست زمین در Nanning چین را بررسی کردند. در این تحقیق برای ارزیابی نتایج از داده‌های ترازیبی و GNSS^{۱۱} استفاده شده است. (Karimzadeh and Matsuoka (2020) با ۱۵ تصویر PALSAR-2 ماهواره ALOS-2 در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ با روش SBAS نرخ فرونشست را در استان آذربایجان شرقی تعیین کردند. نتایج با نرخ فرونشست تعیین شده با تصاویر Sentinel-1 در همان بازه زمانی مقایسه شده است. (Soodmand and Afshar and Ahmadi (2020) با ۱۷۴ تصویر Sentinel-1 در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۸ با روش PS-InSAR فرونشست زمین در شهرستان اسدآباد و دشت‌های مجاور در استان همدان را مورد بررسی قرار دادند، نتایج با داده‌های چاه‌های پیژومتری مقایسه شده است. (Fotamy et al. (2020) نیز با ۱۹ تصویر Envisat ASAR، ۶ تصویر Sentinel-1 و ۱۴ تصویر ALOS PALSAR در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۷ با استفاده از روش تداخل‌سنجی تفاضلی و به‌کارگیری ۳۵ زوج تصویر، برای فاصله‌های زمانی یک ساله، فرونشست در استان قزوین را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج با داده‌های چاه‌های پیژومتری مقایسه شده است. همبستگی بین افت سطح ایستابی و ضخامت لایه ریزدانه با پدیده فرونشست از طریق بررسی جنس لایه‌بندی خاک در عمقی که در مدت ۲۷ سال آب خود را از دست داده بود، نشان داده شده است. (Li et al. (2022) با ۴۰ تصویر Sentinel-1 از ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۸ با روش SBAS مناطق دارای فرونشست و نیز نرخ فرونشست را در شمال و مرکز دشت هنان در چین مشخص کردند. برای صحت‌سنجی از شبکه GPS و ترازیبی استفاده شده است و نشان داده شده است که در امتداد خط آهن منطقه مورد مطالعه، نتایج ترازیبی، GPS و تداخل‌سنجی مطابقت خوبی داشته‌اند. (Yang et al. (2022) با دو سری تداخل‌نگار ۲۱ و ۲۳ تایی از تصاویر Envisat ASAR در فاصله ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۰ و ۴۲ تداخل‌نگار از تصاویر Sentinel-1A در فاصله ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۱ با روش StaMPS در منطقه Su-Xi-Chang چین، فرونشست زمین و تغییرات سطح زمین در دو بازه زمانی را مورد مطالعه قرار دادند. برگشت نسبی زمین در بیشتر قسمت‌های منطقه مورد مطالعه در سال‌های اخیر را مشخص کردند که به دلیل کنترل برداشت آب بوده است. برای بررسی علل تغییر شکل نیز از تحلیل لاگرانژ برای مطالعه استرس و جابه‌جایی‌ها در لایه‌های خاک استفاده شده است که نشان دهنده افزایش شدت فرونشست بر اثر برداشت آب‌های زیرزمینی

بوده است.

دربا به عنوان مهم‌ترین نقطه شهری شهرستان سراب مطرح است (Esfandyary and Gharachorlu, 2018). شکل ۱ منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

۳- داده‌های مورد استفاده

در این پژوهش از تصاویر راداری تک منظر پیچیده (SLC) ماهواره سنتینل-۱A در پلاریزاسیون VV در بازه زمانی ماه مه سال ۲۰۱۷ تا آوریل سال ۲۰۲۰ استفاده شده است. تعداد تصاویر انتخاب شده ۳۶ عدد می‌باشد که یک تصویر در هر ماه انتخاب شده است. تصاویر در حالت پایین‌گذر بوده و منطقه مورد مطالعه ما را پوشش می‌دهند. لازم به ذکر است تصاویر انتخاب شده باید از یک مسیر و فریم تهیه شوند که در این تحقیق تصاویر مسیر ۶ و فریم ۴۶۷ انتخاب شده‌اند. در جدول ۱ مشخصات تصاویر راداری مورد استفاده نمایش داده شده است.

از وبسایت تسهیلات فضایی آلاسکا (ASF)^{۱۲} که دسترسی کامل، رایگان و آزاد به داده‌های سنتینل-۱ را فراهم می‌کند برای تهیه تصاویر استفاده شده است. برای انجام تحلیل سری زمانی تداخل سنجی راداری از تصاویر سنتینل-۱ در حالت IW استفاده شده است. حالت IW سه زیر نوار ایجاد می‌کند. با توجه به این که در تصاویر، منطقه مورد مطالعه در دومین نوار قرار دارد برای کاهش حجم پردازش‌ها و زمان، نوار (IW2) انتخاب شده است.

چاه‌های پیژومتری برای تعیین نوسانات سطح آب زیرزمینی در آبخوان مورد استفاده قرار می‌گیرند. تغییرات مثبت سطح ایستابی در دشت سراب مربوط به تغذیه دشت، ناشی از نزولات جوی، جریان‌های زیرزمینی، سیلاب‌ها و آب‌های برگشتی کشاورزی بوده که سبب بالا آمدن سطح آب زیرزمینی می‌شود و تخلیه آب زیرزمینی دشت به دلیل بهره‌برداری از چاه‌ها، تخلیه قنوات و چشمه‌ها سبب پایین رفتن سطح آب زیرزمینی در سفره می‌گردد (Asghari Moghaddam and Vadiati, 2016). برای بررسی تغییرات سطح ایستابی در این تحقیق، اطلاعات چاه‌های پیژومتری محدوده دشت سراب از شرکت آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی تهیه شده است. به دلیل کامل نبودن داده‌های جمع‌آوری شده برای بعضی از چاه‌ها (به دلیل عدم امکان اندازه‌گیری سطح آب در برخی از زمان‌ها توسط آب منطقه‌ای) در این تحقیق از بین کل ۷۰ چاه پیژومتری موجود در منطقه، تعداد ۴۶ چاه که اطلاعات همه ماه‌ها در فاصله سال‌های ۱۳۸۳ تا ۱۳۹۸ به صورت کامل برای آن‌ها جمع‌آوری شده بود، انتخاب شدند. شکل ۲ موقعیت

در مقاله حاضر فرونشست دشت سراب در استان آذربایجان شرقی در فاصله سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۰ با روش تحلیل سری زمانی تداخل سنجی راداری بررسی شده است. طبق گزارش جامع بررسی مناطق فرونشست استان آذربایجان شرقی بر اساس پردازش‌های راداری و ژئودیتیک انجام شده توسط سازمان نقشه‌برداری کشور، دشت سراب از جمله مناطق دارای خطر فرونشست در استان آذربایجان شرقی می‌باشد (ncc.gov.ir/vdcb.abaurhbawiuipr.html). طبق اعلام شرکت آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی در سال ۱۳۹۵ نیز سالانه حدود ۱۵ میلیون مترمکعب آب از چاه‌های مجاز سراب اضافه برداشت شده است. با این حال تاکنون مطالعه‌ای در مورد چگونگی تأثیر تغییرات سطح ایستابی بر روی فرونشست زمین در دشت سراب گزارش نشده است. در این مقاله ابتدا الگو و نرخ فرونشست دشت سراب از ابتدای سال ۱۳۹۶ تا آخر سال ۱۳۹۸ (فاصله سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۰) با روش Stamps مدل شده است. صحت سنجی با بررسی نوسانات سطح آب زیرزمینی با استفاده از داده‌های چاه‌های پیژومتری در مناطق دارای فرونشست زیاد و فاقد فرونشست انجام شده است. همچنین، با استفاده از سری زمانی جابه‌جایی‌های نقاط پراکنش گر دائمی حاصل از روش تداخل سنجی راداری Stamps، همبستگی بین جابه‌جایی سطح زمین و سطح ایستابی در سال‌های مورد مطالعه به صورت آماری مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- منطقه مورد مطالعه

دشت سراب دارای ۷۶۱۴۲ هکتار اراضی باغی، آبی و دیم می‌باشد. این دشت با مختصات جغرافیایی ۱۲° ۳۸' - ۳۷° ۴۴' عرض شمالی و ۵۴° ۴۷' - ۴۷° ۱۵' طول شرقی، در دامنه جنوبی توده آتشفشان سیلان و دامنه شمالی رشته کوه بزقوش قرار گرفته است (Ahmadifar et al., 2017). دشت سراب در حوضه آبریز ارومیه با وسعتی حدود ۴۲۰ کیلومترمربع و در فاصله ۱۳۰ کیلومتری شرق شهر تبریز واقع شده است (Asghari Moghaddam and Vadiati, 2016). این دشت از شمال و شرق توسط کوهستان سیلان و رشته قوشا داغ و از سمت جنوب توسط ارتفاعات رشته بزغوش احاطه شده و تنها از سمت غرب با مانع ارتفاعی مهمی روبه‌رو نیست. با توجه به محصور بودن دشت سراب از سه طرف، برودت هوا در این ناحیه بارز بوده است و دارای اقلیم نیمه خشک سرد است. متوسط بارندگی در ایستگاه سراب ۲۴۰ میلیمتر و در ایستگاه میرکوه ۳۵۰ میلیمتر گزارش شده است (Esfandyary et al., 2018). شهر سراب با ارتفاع ۱۶۵۰ متر از سطح

همچون ترازیبی و سیستم تعیین موقعیت جهانی که عموماً گران قیمت و وقت گیر هستند، مناسب است. مزایای تصاویر راداری باعث شده است که این تصاویر برای منبع مناسبی باشند. در تداخل سنجی راداری، با تولید تداخل نگارها و تصحیح آن‌ها نسبت به خطاهای موجود، مجموعه‌ای از تداخل نگارها در بازه‌های زمانی مختلف برای یک منطقه حاصل خواهد شد.

چاه‌های مورد استفاده را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۲ دیده می‌شود، تراکم و موقعیت چاه‌های مورد استفاده به گونه‌ای بود که در بیشتر نقاط دشت حداقل یک چاه پیزومتری وجود داشت.

۴- روش انجام کار

فناوری تداخل سنجی راداری با دارا بودن دقت قابل قبول و هزینه کم، در بررسی جابه‌جایی‌های سطح پوسته زمین در مقابل روش‌هایی

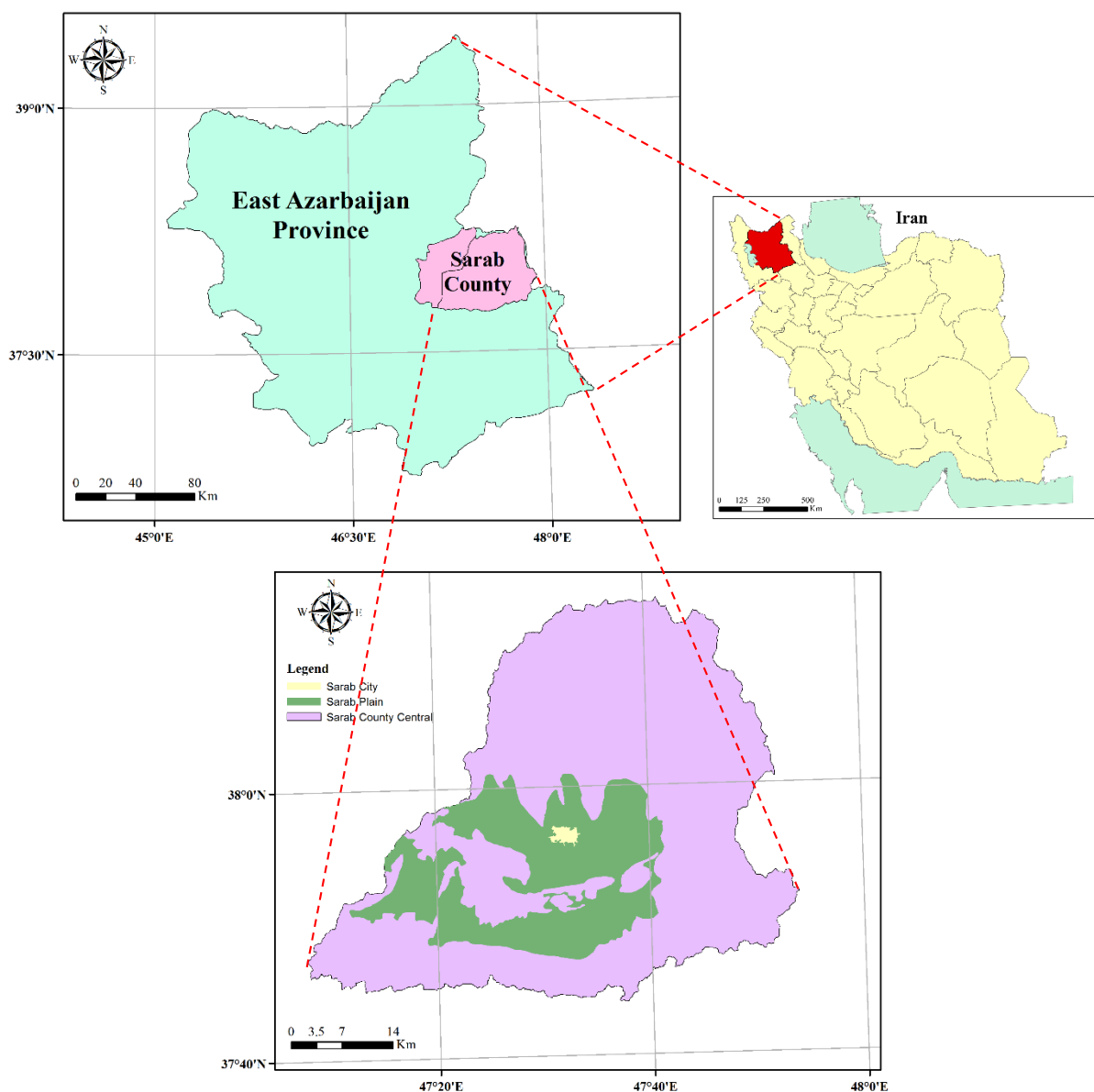


Fig. 1- Study area

شکل ۱- منطقه مورد مطالعه

Table 1- Characteristics of Sentinel-1A images used in this study

جدول ۱- مشخصات تصاویر سنتینل-۱A مورد استفاده

| No. | Orbit | Year | Month | Day | Perp. Baseline (m) | Period (Day) | Image type |
|-----|--------|------|-------|-----|--------------------|--------------|------------|
| 1 | 16178 | 2017 | 4 | 17 | -36.5 | 552 | slave |
| 2 | 16528 | 2017 | 5 | 11 | 57.46 | 528 | slave |
| 3 | 16878 | 2017 | 6 | 4 | -27.10 | 504 | slave |
| 4 | 17578 | 2017 | 7 | 22 | -23.71 | 456 | slave |
| 5 | 17753 | 2017 | 8 | 3 | 9.68 | 444 | slave |
| 6 | 18453 | 2017 | 9 | 20 | 43.33 | 396 | slave |
| 7 | 18803 | 2017 | 10 | 14 | -33.79 | 372 | slave |
| 8 | 19153 | 2017 | 11 | 7 | 25.11 | 348 | slave |
| 9 | 19503 | 2017 | 12 | 1 | -12.47 | 324 | slave |
| 10 | 200208 | 2018 | 1 | 6 | -4.42 | 288 | slave |
| 11 | 20728 | 2018 | 2 | 23 | -93.89 | 240 | slave |
| 12 | 20903 | 2018 | 3 | 7 | -94.74 | 228 | slave |
| 13 | 21603 | 2018 | 4 | 24 | -91.40 | 180 | slave |
| 14 | 21778 | 2018 | 5 | 6 | -54.80 | 168 | slave |
| 15 | 22303 | 2018 | 6 | 11 | 14.03 | 132 | slave |
| 16 | 23003 | 2018 | 7 | 29 | -47.49 | 84 | slave |
| 17 | 23353 | 2018 | 8 | 22 | -81.18 | 60 | slave |
| 18 | 23878 | 2018 | 9 | 27 | 14.75 | 24 | slave |
| 19 | 24228 | 2018 | 10 | 21 | 0 | 0 | *master |
| 20 | 24578 | 2018 | 11 | 14 | 27.35 | -24 | slave |
| 21 | 24928 | 2018 | 12 | 8 | 68.48 | -48 | slave |
| 22 | 25453 | 2019 | 1 | 13 | -38.87 | -84 | slave |
| 23 | 25978 | 2019 | 2 | 18 | 41.44 | -120 | slave |
| 24 | 16153 | 2019 | 3 | 2 | 47.50 | -132 | slave |
| 25 | 26853 | 2019 | 4 | 19 | 72.51 | -180 | slave |
| 26 | 27203 | 2019 | 5 | 13 | -65.02 | -204 | slave |
| 27 | 27553 | 2019 | 6 | 6 | -29.25 | -228 | slave |
| 28 | 28078 | 2019 | 7 | 12 | -54.58 | -264 | slave |
| 29 | 28603 | 2019 | 8 | 17 | 56.82 | -300 | slave |
| 30 | 28953 | 2019 | 9 | 10 | -46.04 | -324 | slave |
| 31 | 29478 | 2019 | 10 | 16 | -16.26 | -360 | slave |
| 32 | 30003 | 2019 | 11 | 21 | -32.33 | -396 | slave |
| 33 | 30353 | 2019 | 12 | 15 | 60.70 | -420 | slave |
| 34 | 30703 | 2020 | 1 | 8 | 28.22 | -444 | slave |
| 35 | 31403 | 2020 | 2 | 25 | 6.91 | -492 | slave |
| 36 | 31753 | 2020 | 3 | 20 | 22.03 | -516 | slave |

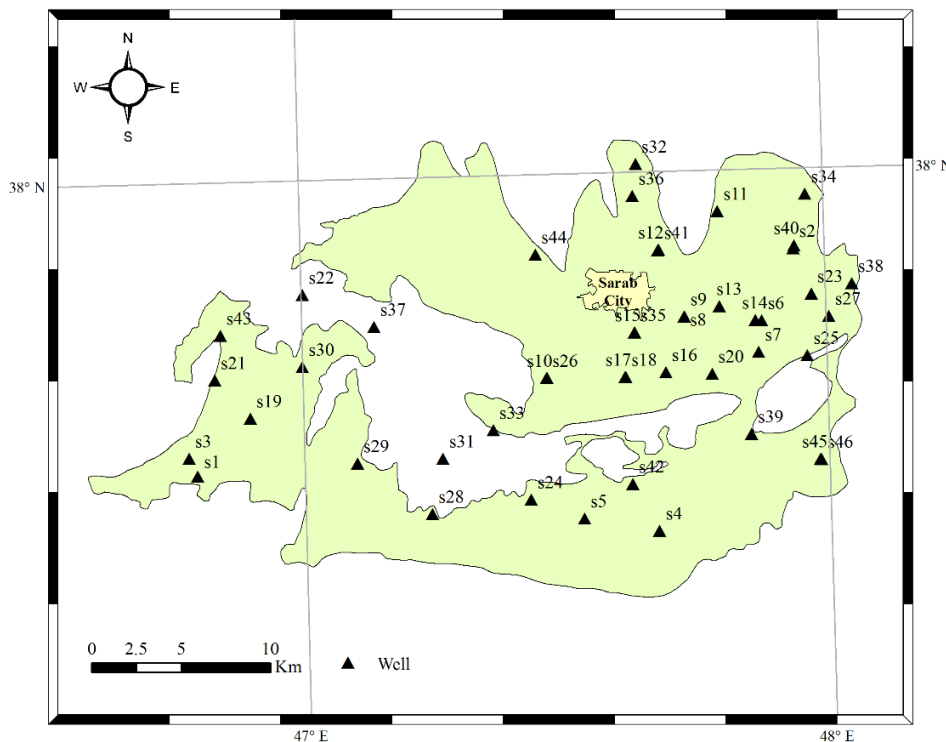


Fig. 2- Piezometric wells locations in Sarab Plain used in this study

شکل ۲- موقعیت چاه‌های پیزومتری مورد استفاده در دشت سراب

ابتدا پراکنش‌گرهای دائمی در هر پیکسل بر اساس شاخص دامنه انتخاب می‌شوند. بعد از غربالگری پیکسل‌ها بر اساس شاخص دامنه، فاز هر پیکسل مورد بررسی قرار می‌گیرد تا بر اساس نویز موجود در فاز هر پیکسل، پیکسل‌هایی که به عنوان پراکنش‌گرهای دائمی شناخته می‌شوند، انتخاب شوند. این فرآیند به صورت تکراری برای همه پیکسل‌ها در تمامی تداخل نگارها انجام می‌گیرد تا پراکنش‌گرهای دائمی شناسایی شوند. در ادامه با اعمال فیلترینگ بر روی پیکسل‌هایی که به عنوان پراکنش‌گر دائمی شناخته شده‌اند، خطاهای موجود حذف می‌شوند. در پایان با بازیابی فاز و حذف نویزهای همبسته در مکان، نقشه جابه‌جایی استخراج می‌شود.

در این تحقیق از روش StaMPS برای تحلیل سری زمانی تداخل‌سنجی راداری استفاده شده است. نرم‌افزار StaMPS قابلیت پردازش تصاویر سنتینل-۱ را ندارد به همین علت، برای تولید تداخل نگارها از نرم‌افزار GMTSAR استفاده شد و خروجی‌ها برای پردازش سری زمانی پراکنش‌گرهای دائمی وارد نرم‌افزار StaMPS شدند. مراحل پیاده‌سازی به صورت زیر می‌باشد:

لیکن عدم همبستگی زمانی و مکانی بین تصاویر مورد استفاده، سبب می‌شود تا اطلاعات موجود در تداخل نگارها به تنهایی قابل اطمینان نبوده و برای بررسی یک پدیده در طی زمان همانند فرونشست، همدوسی تداخل نگارها پایین باشد (Zhou, 2013). همچنین، تأثیرات اتمسفر به شدت دقت نتایج را کاهش می‌دهد. جهت غلبه بر این محدودیت‌ها و افزایش صحت نتایج، از روش‌های تحلیل سری زمانی مانند سری زمانی پراکنش‌گرهای دائمی و سری زمانی خط منبای کوتاه استفاده می‌شود. در شکل ۳، مراحل کلی و نحوه انجام تحلیل سری زمانی با استفاده از یکی از الگوریتم‌های سری زمانی پراکنش‌گرهای دائمی به نام StaMPS به صورت فلوچارت نشان داده شده است.

پراکنش‌گرهای دائمی پیکسل‌هایی هستند که سهم نویز آنها بقدری کوچک است که سیگنال بطور کامل از بین نمی‌رود. اگر ابعاد پراکنش‌گرهای دائمی کوچک‌تر از ابعاد یک پیکسل باشد، که معمولاً نیز این چنین است، میزان همدوسی این پیکسل‌ها، حتی برای تداخل نگارهایی با طول منبای بزرگ‌تر از مقدار بحرانی مناسب است. در روش تحلیل سری زمانی StaMPS، پس از تولید تداخل نگارها،

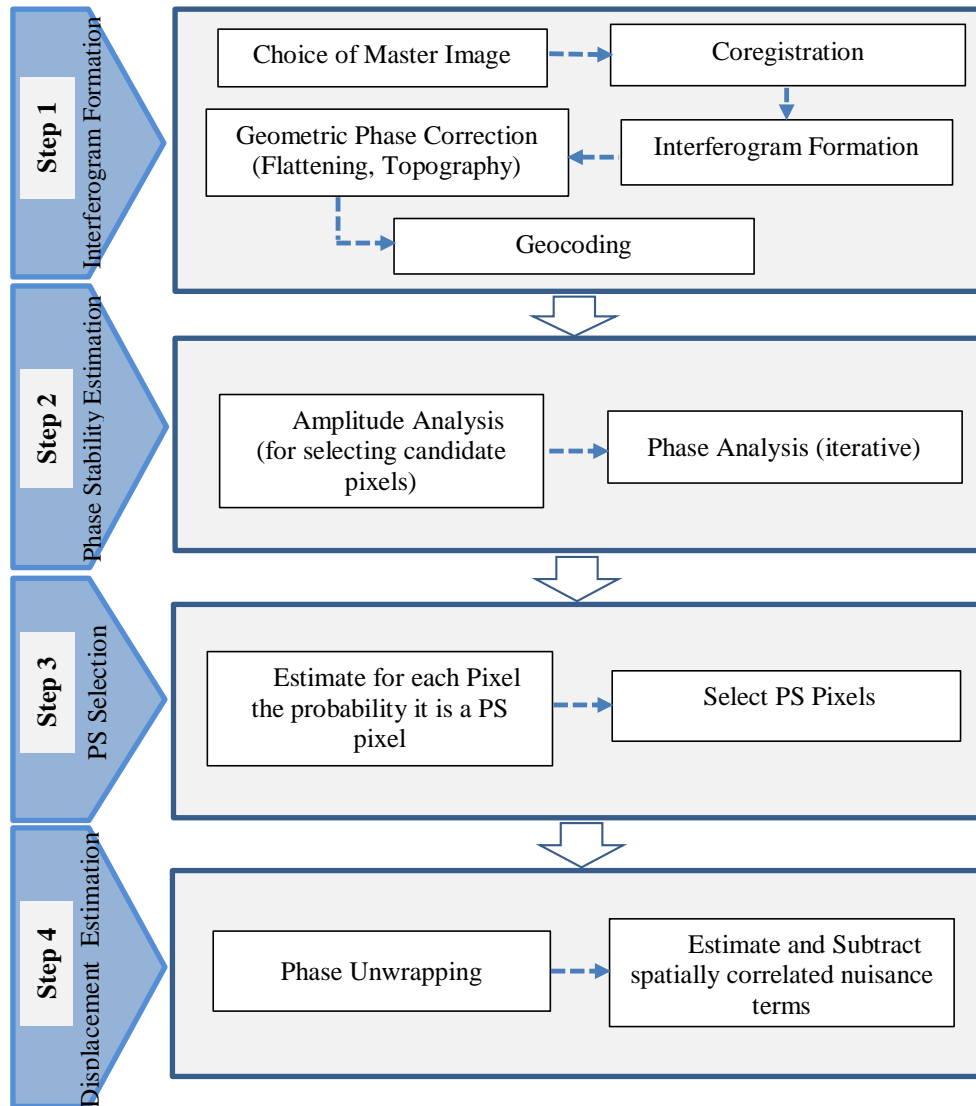


Fig. 3- Workflow of time series analysis in StAMPS method
 شکل ۳- مراحل پردازش سری زمانی به روش StAMPS

رابطه ۱، رابطه تعیین تصویر اصلی از روی مقدار خط‌مبنای زمانی، مکانی و داپلر تصاویر است که در آن T مؤلفه خط‌مبنای زمانی، B_{\perp} خط‌مبنای عمودی، F_{DC} داپلر، ρ نشان‌دهنده همبستگی و اندیس c نشان‌دهنده مقدار بحرانی است. بنابراین تصویری به عنوان تصویر اصلی انتخاب می‌شود که مقدار $\sum_{i=1}^N \rho_{total}$ به ازای N تصویر موجود، بیشترین مقدار را داشته باشد؛

۲) با استفاده از اطلاعات مداری دقیق، ثبت هندسی انجام می‌گیرد تا تصاویر به صورت دقیق‌تری بر روی همدیگر منطبق شوند. اثر مداری نیز در این مرحله به صورت هم‌زمان حذف می‌شود؛

۱) بعد از انتخاب تصاویر، به منظور افزایش سرعت پردازش و کاهش حجم تصاویر راداری، تصاویر بر اساس محدوده مورد مطالعه برش داده شدند. در مرحله انتخاب تصویر اصلی و فرعی، تصویر اصلی باید کمترین مقدار ناهمبستگی را داشته باشد، بنابراین تصویر انتخاب شده باید نسبت به بقیه تصاویر کمترین مقدار خط‌مبنای زمانی، مکانی و داپلر را داشته باشد؛

(۱)

$$\rho_{total} = \rho_{temporal} + \rho_{spatial} + \rho_{doppler} + \rho_{thermal} \approx \left[1 - f\left(\frac{T}{T_{\perp}}\right)\right] \left[1 - f\left(\frac{B_{\perp}}{B_{\perp c}}\right)\right] \left[1 - f\left(\frac{F_{DC}}{F_{DC c}}\right)\right] \rho_{thermal}$$

نقطه با عرض جغرافیایی ۴۷/۶۰۸۵ درجه و طول جغرافیایی ۳۷/۹۲۲۶ درجه که دارای کمترین جابه‌جایی در منطقه مورد مطالعه بود به عنوان نقطه رفرنس محاسبه جابه‌جایی‌ها بر روی نقشه نرخ جابه‌جایی انتخاب شد. نتایج نهایی، نشان‌دهنده نرخ جابه‌جایی بین حدود ۳۰/۵ میلی‌متر در سال تا ۱۵/۶+ میلی‌متر در سال در راستای خط دید ماهواره است (شکل ۵). با توجه به نقشه جابه‌جایی به دست‌آمده در این تحقیق، در بازه زمانی مورد مطالعه عمده فرونشست‌های دشت سراب در بخش‌های مرکزی و نیز شمال شرقی دشت دیده می‌شوند. همچنین میزان فرونشست در بخش‌های جنوبی محدوده شهر سراب نسبت به بخش‌های شمالی آن قابل توجه بوده و حداکثر نرخ فرونشست حدود ۳۰ میلی‌متر در سال در راستای خط دید ماهواره در این بخش‌ها دیده می‌شود.

همچنین با فرض این‌که در فرونشست زمین، تغییر شکل زمین در امتداد افقی در مقایسه با تغییر شکل در امتداد قائم ناچیز است مقدار جابجایی در راستای خط دید ماهواره به مقدار جابجایی در راستای قائم قابل تبدیل است:

$$\Delta r_{\text{vert}} = \frac{\Delta r_{\text{LOS}}}{\cos \theta} \quad (2)$$

با نمونه‌برداری دوباره از تصاویر فرعی نسبت به تصویر اصلی، تداخل‌نگارها تولید می‌شوند؛

۴) اثر توپوگرافی به کمک مدل ارتفاعی رقومی (داده‌های SRTM ۳۰ متری) حذف شد. در نهایت اعمال فیلتر پایین‌گذر برای تصحیح اثر اتمسفری از روی نتایج و بازیابی فاز صورت می‌گیرد تا اختلاف فاز حاصل از جابه‌جایی به صورت دقیق‌تری استخراج گردد. برای مرحله بازیابی فاز از نرم‌افزار SNAPHU استفاده شده است؛

۵) بعد از ایجاد شبکه تداخل‌نگارها و بازیابی فاز بر روی تداخل‌نگارها، نرخ جابه‌جایی پیکسل‌های پراکنش‌گر دائمی محاسبه می‌شود. با تصحیح اثرات ناشی از باقی مانده فاز توپوگرافی، فاز ناشی از رمپ‌های مداری و فاز ناشی از تغییرات اتمسفری از روی نتایج اولیه، نرخ جابه‌جایی برای محدوده دشت سراب محاسبه شده است.

۵- نتایج

شبکه ایجاد شده بین تصویر اصلی و تصویرهای فرعی در شکل ۴ نشان داده شده است، محور افقی نشان‌دهنده زمان اخذ تصاویر، محور قائم معرف خط مبنای مکانی تصاویر فرعی نسبت به تصویر اصلی و نقاط سیاه رنگ نشان‌دهنده تصاویر استفاده شده هستند. تصویر به تاریخ ۲۰۱۸/۱۰/۲۱ به عنوان تصویر اصلی انتخاب شده است.

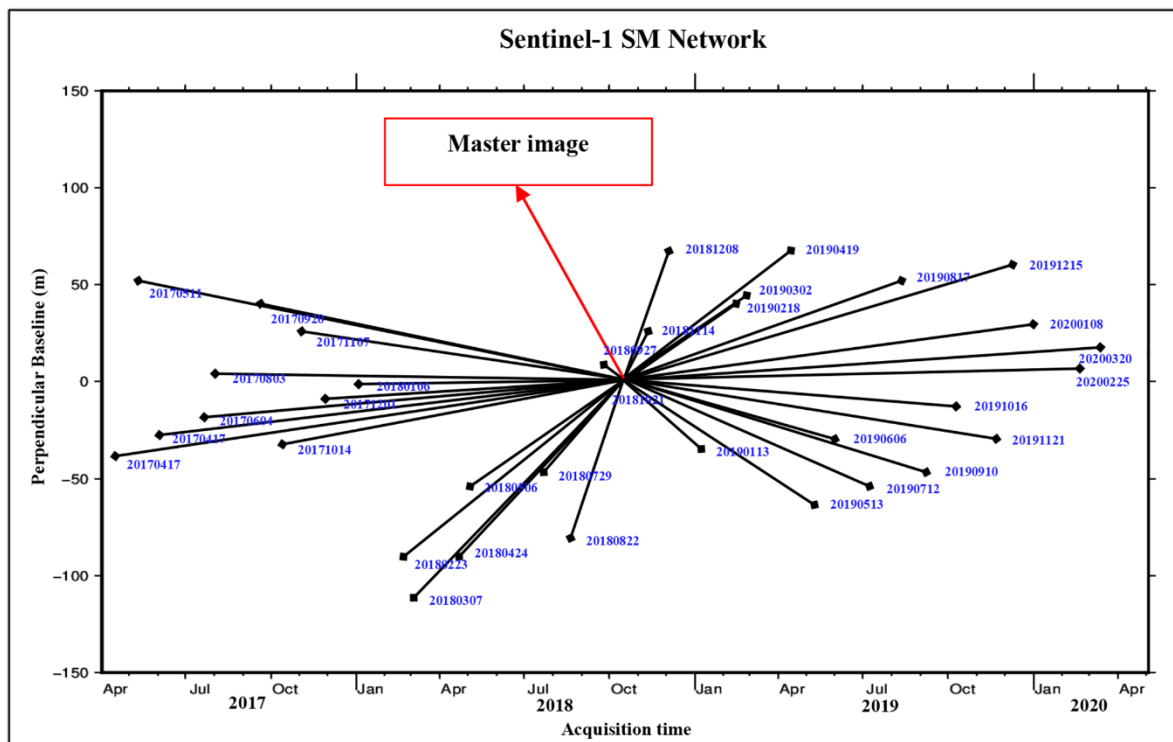


Fig. 4- Configuration of single-master Interferograms

شکل ۴- شبکه تداخل‌نگارهای ایجاد شده با تصویر اصلی

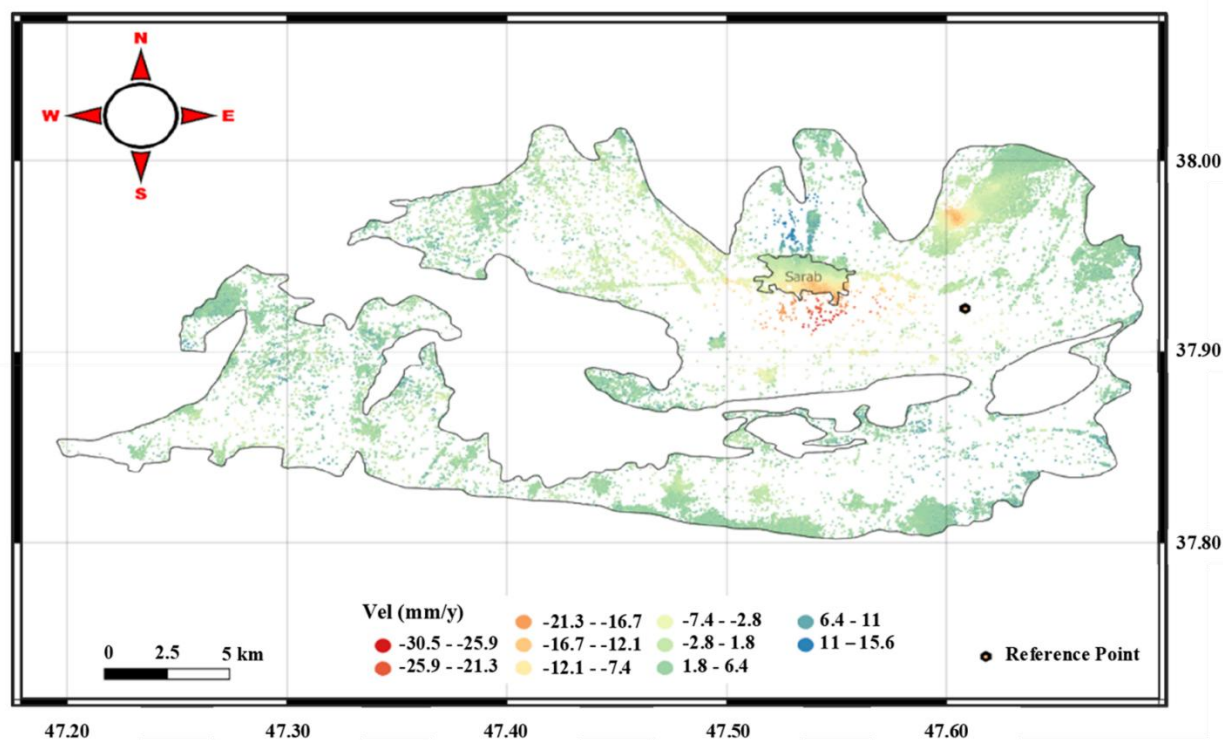


Fig. 5- Mean displacement velocity map in LoS direction
 شکل ۵- نقشه متوسط نرخ تغییر شکل در جهت خط دید سنجنده

انتخاب شدند. چاههایی که در محدوده فرونشست یا نزدیک به این مناطق بودند، کاهش عمق آب چند متری در فاصله سال‌های ۱۳۸۳ تا ۱۳۹۸ را نشان دادند (شکل ۶). به طور مثال برای چاه شماره ۱۱ که در منطقه فرونشست در قسمت شمال شرقی دشت سراب قرار دارد، عمق آب زیرزمینی کاملاً روند نزولی داشته و عمق آب چاه تقریباً از ۴۰- متر در سال ۱۳۸۳ به ۴۵- متر در سال ۱۳۹۸ رسیده است که نشان‌دهنده ۵ متر افت سطح ایستابی می‌باشد. عمق آب در چاه‌های شماره ۸ و ۹ نیز روند کاهشی نشان می‌دهد، به طوری که این چاه‌ها در مدت ۱۶ سال به ترتیب حدود ۷ و ۵ متر کاهش عمق آب داشته‌اند.

روند تغییرات عمق آب در چاه‌های انتخاب شده در محل‌های دور از منطقه فرونشست، نشان‌دهنده شیب کمتر تغییرات عمق آب زیرزمینی بود. به عبارت دیگر تغییر عمق آب این چاه‌ها اغلب روند سینوسی تجربه کرده‌اند و نمودار تغییرات آن‌ها روند کاملاً کاهشی نداشته است. به طور مثال نمودار چاه‌های شماره ۲۷ و ۳۸ در شکل ۷ نشان می‌دهد که عمق آب در این چاه‌ها در سال ۱۳۹۸ با عمق آب آن‌ها در سال ۱۳۸۳ تقریباً یکسان بوده است. بنابراین می‌توان گفت که نوسانات سطح ایستابی در سال‌های گذشته بر جابه‌جایی‌های زمین در این منطقه مؤثر بوده است.

در رابطه ۲، Δr_{LOS} نشان‌دهنده تغییر شکل در راستای خط دید ماهواره و θ زاویه دید می‌باشد. با توجه به رابطه ۲، مشخص شد که بیشینه نرخ فرونشست در منطقه مورد مطالعه تقریباً $44/85$ میلی‌متر در سال و بیشینه نرخ بالا آمدگی حدود $22/94$ میلی‌متر در سال بوده است.

۱-۵- بررسی تغییرات تراز سطح ایستابی

برای بررسی اثر نوسانات سطح ایستابی بر روی پدیده فرونشست زمین، از داده‌های چاه‌های پیژومتری که از شرکت آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی تهیه شدند استفاده شد.

نمودار متوسط عمق آب زیرزمینی در فاصله زمانی ۱۶ ساله (از ابتدای سال ۱۳۸۳ تا پایان سال ۱۳۹۸) برای هر یک از چاه‌های پیژومتری مورد مطالعه با نرم‌افزار پایتون ترسیم شد. نمودارها نشان دادند که در فاصله زمانی مورد مطالعه، عمق آب زیرزمینی در اغلب چاه‌های پیژومتری روندی کاهشی داشته است. برای بررسی چگونگی ارتباط بین تغییرات عمق آب چاه‌های پیژومتری با فرونشست زمین، به صورت تصادفی چند چاه در بخش‌های نزدیک به مناطق دارای فرونشست و چند چاه نیز در مناطق دور از مناطق دارای فرونشست

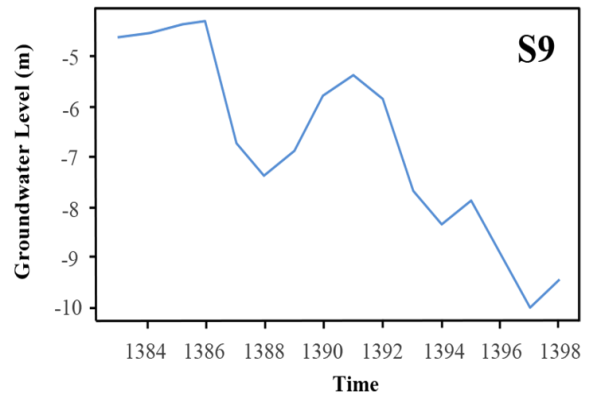
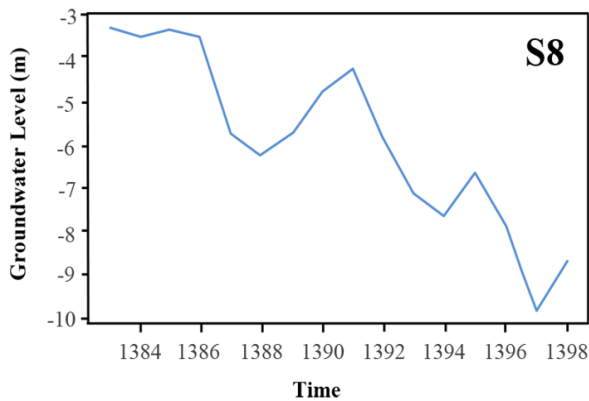
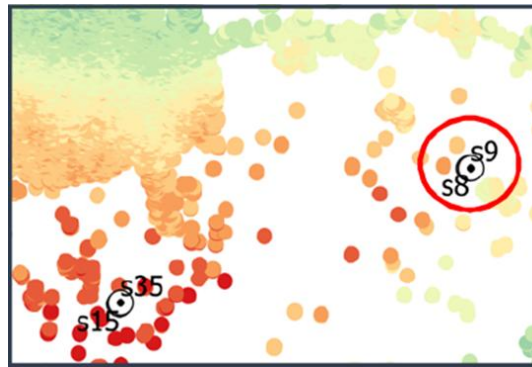
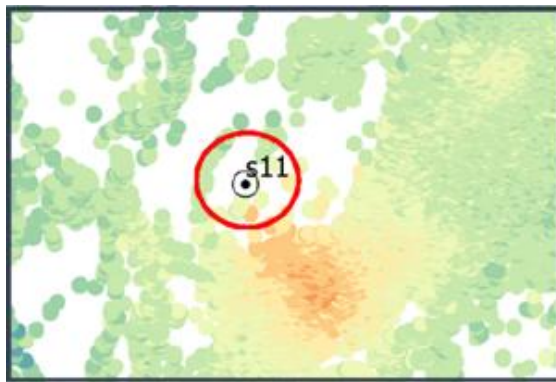


Fig. 6- Groundwater level time series in regions of land subsidence

شکل ۶- سری زمانی تغییرات عمق آب چاه‌های پیژومتری واقع در منطقه فرونشست دشت سراب

سپس در مناطق دارای افت تراز سطح ایستابی، تعداد ۴ پراکنش‌گر دائمی (دو پراکنش‌گر در دو منطقه دارای افت شدید تراز سطح ایستابی) و تعداد ۴ پراکنش‌گر دائمی نیز در مناطق دارای افزایش تراز سطح ایستابی (دو پراکنش‌گر در دو منطقه مختلف) به صورت تصادفی انتخاب شدند (شکل ۹). روند کلی جابه‌جایی نقاط پراکنش‌گر انتخابی مورد بررسی قرار گرفت.

۵-۲- نقشه هم‌افت تراز سطح ایستابی

برای بررسی وجود یا عدم وجود رابطه معنی‌دار بین رفتار جابه‌جایی‌ها در سطح زمین با تغییرات تراز سطح ایستابی در بازه زمانی سه ساله مورد مطالعه در این تحقیق، ابتدا منحنی‌های هم‌افت سطح ایستابی برای ۴۶ چاه پیژومتری با روش درون‌یابی IDW (معکوس وزنی فاصله) در نرم‌افزار ArcGIS ترسیم شدند (شکل ۸).

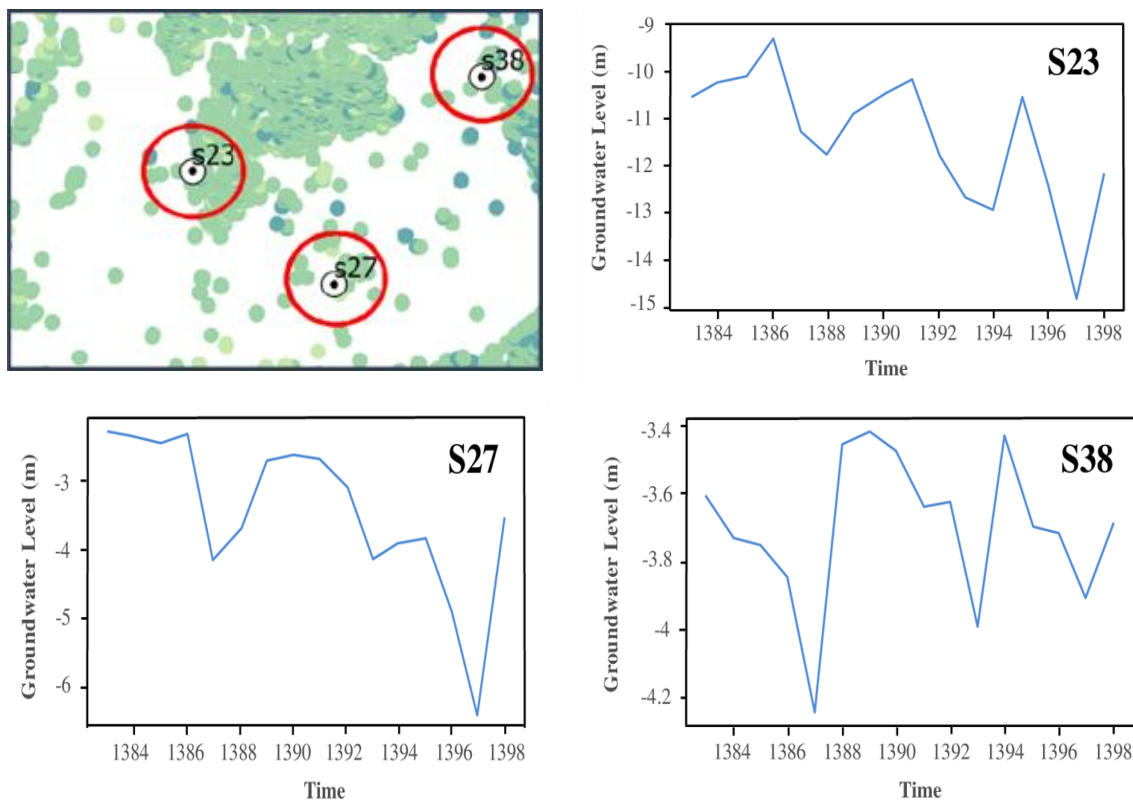


Fig. 7- Groundwater level time series in regions without land subsidence
شکل ۷- سری زمانی تغییرات عمق آب چاه‌های پیژومتری واقع در منطقه فاقد فرونشست دشت سراب

مثبت در سطح زمین بوده است، در نتیجه در این مناطق بالاآمدگی سطح پوسته زمین رخ داده است.

۵-۳- بررسی همبستگی بین تراز سطح ایستابی و جابه‌جایی‌های سطح زمین

برای مدل کردن رابطه بین تغییرات سطح ایستابی و تغییر شکل زمین به صورت کمی، از روش رگرسیون خطی استفاده شد. میانگین سطح ایستابی چاه‌های پیژومتری در دوره‌های شش ماهه (اول و دوم) برای سال‌های ۱۳۹۶ تا ۱۳۹۸ به عنوان «متغیر مستقل» و متوسط سطح زمین، بر اساس اطلاعات سری زمانی پراکنش‌گرهای دائمی در همان دوره‌ها، به عنوان «متغیر وابسته» در نظر گرفته شد. با بررسی محدوده‌های دارای فرونشست زیاد از داده‌های سری زمانی پراکنش‌گر دائمی PS1 برای جابه‌جایی‌های سطح زمین و داده‌های چاه S11 (محل: زیراسف شرق) برای تغییرات سطح ایستابی استفاده شد؛ در محدوده دارای بالاآمدگی نیز از داده‌های سری زمانی پراکنش‌گر دائمی PS6 و چاه S32 (محل: نرسیده به بافتان) استفاده شد.

برای نمونه رفتار جابه‌جایی پراکنش‌گرهای PS1 و PS2 انتخاب شده در مناطق دارای افت شدید تراز سطح ایستابی به صورت سری‌های زمانی، در شکل ۱۰ نشان داده شده است. شکل ۱۰ نشان می‌دهد که روند کلی جابه‌جایی در این نقاط به صورت نزولی بوده و به طور متوسط حدود ۶۵ میلی‌متر جابه‌جایی منفی ارتفاعی در این نقاط رخ داده است.

همچنین بررسی رفتار پراکنش‌گرهای PS5 و PS6 واقع در مناطقی که دارای افت تراز سطح ایستابی نبوده‌اند طی ۳ سال نشان داد که این نقاط، جابه‌جایی ارتفاعی قابل ملاحظه‌ای نداشته‌اند و روند تغییرات ارتفاع در این پراکنش‌گرها تقریباً به شکل سینوسی بوده است (شکل ۱۱).

به این ترتیب ملاحظه می‌شود رفتار کلی پراکنش‌گرهای دائمی در مناطق دارای افت سطح ایستابی، به صورت جابه‌جایی در جهت منفی بوده است و در نتیجه در این مناطق پدیده فرونشست دیده می‌شود. در حالی که رفتار کلی پراکنش‌گرهای دائمی در مناطقی که تغییرات سطح ایستابی منفی نبوده است، به صورت جابه‌جایی‌های پرریز و سینوسی بوده و در بعضی موارد حتی روند این جابه‌جایی‌ها در جهت

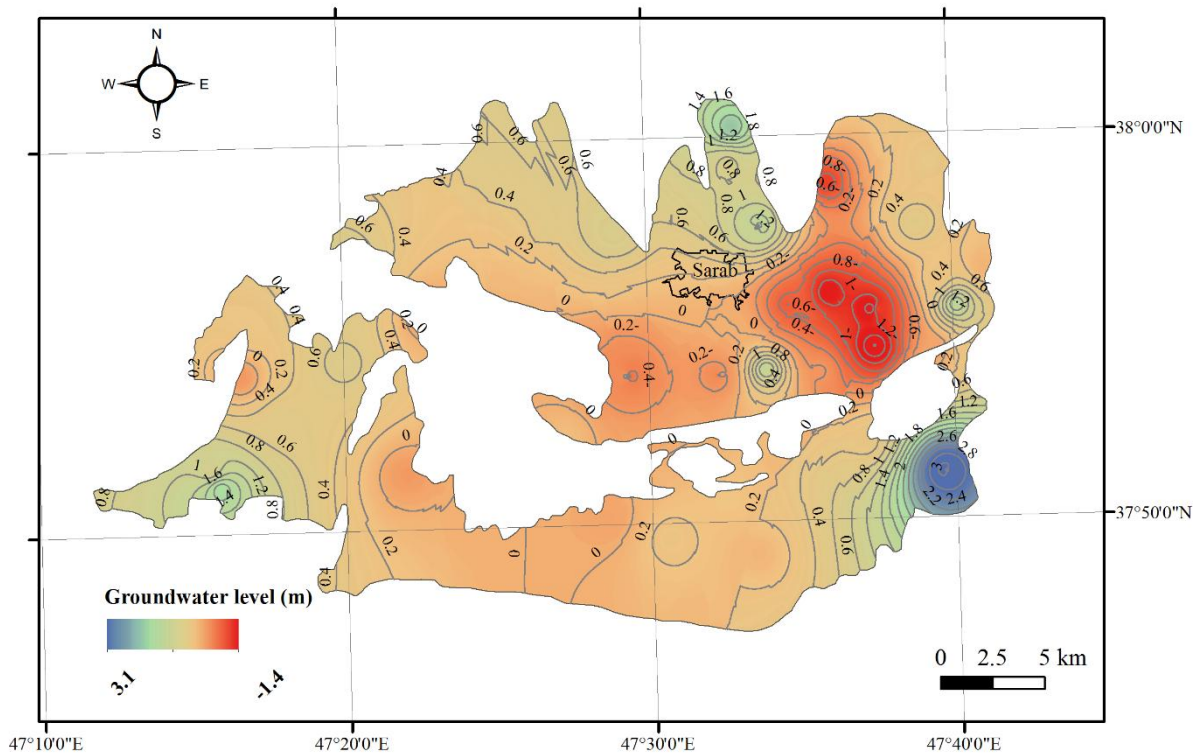


Fig. 8- Groundwater_level counters in Sarab Plain in the period of 2017-2020
 شکل ۸- منحنی‌های تراز آب زیرزمینی در منطقه دشت سراب طی سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۰

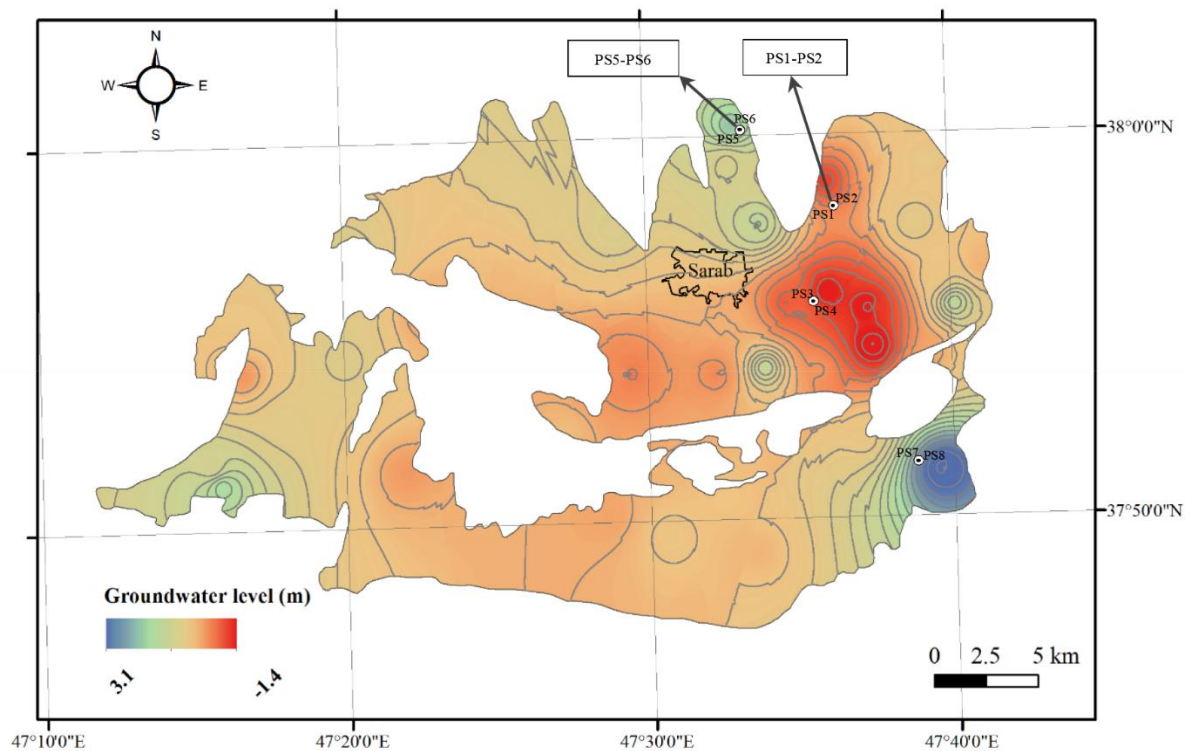


Fig. 9- Location of selected PS's
 شکل ۹- موقعیت پراکنش گره‌های دائمی انتخاب شده

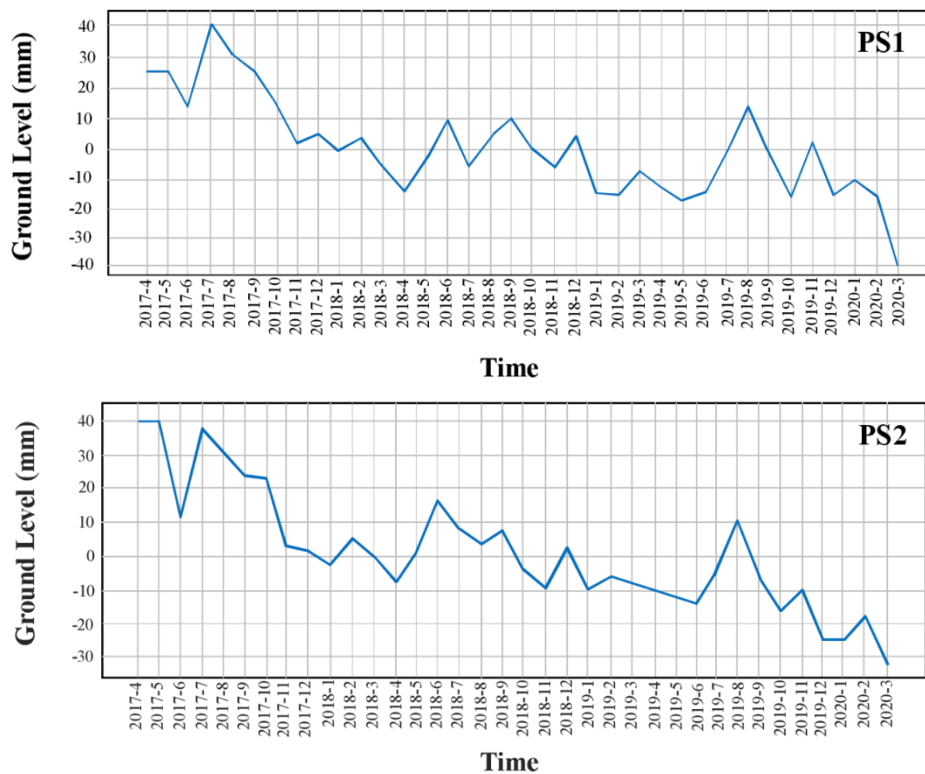


Fig. 10- Displacement behavior of PS's in areas with negative water table variations
 شکل ۱۰- جابجایی‌های پراکنش‌گرهای دائمی در مناطق با تغییرات سطح ایستابی منفی

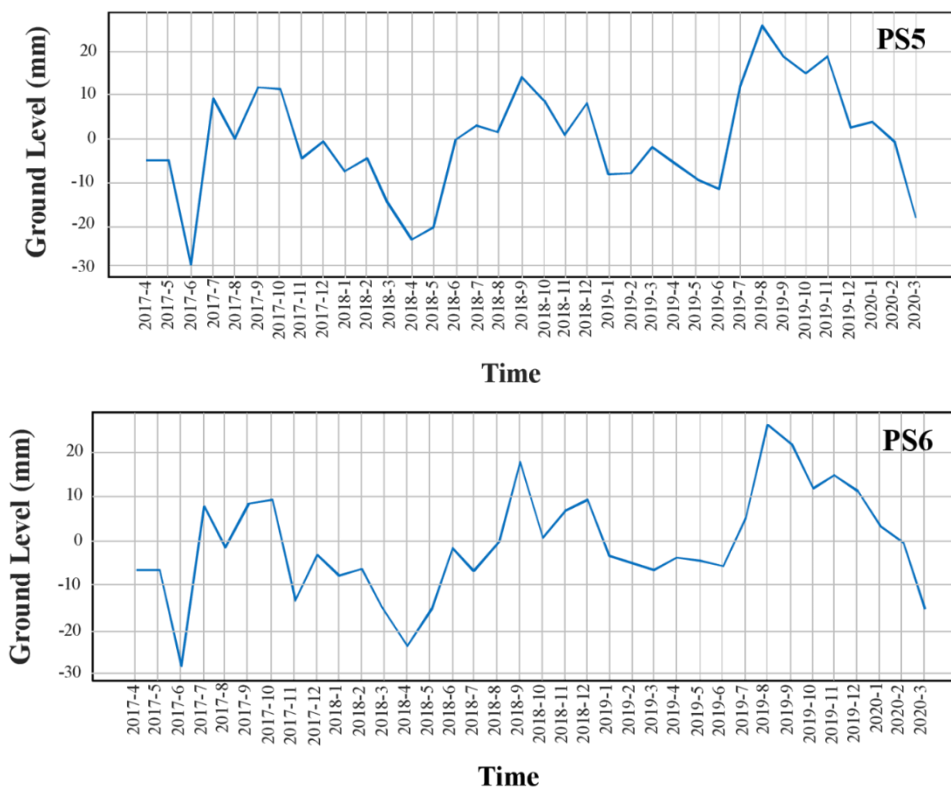


Fig. 11- Displacement behavior of PS's in areas without negative water table variations
 شکل ۱۱- جابجایی‌های پراکنش‌گرهای دائمی در مناطق فاقد تغییرات سطح ایستابی منفی

همان‌طور که در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است، بر اساس ضریب تعیین (R square) به دست آمده، در محدوده فرونشست ۷۱/۳ درصد از تغییرات سطح زمین از طریق تغییرات سطح ایستابی قابل پیش‌بینی است و این عدد برای محدوده بالآمدگی ۴۶/۶ درصد است.

رابطه آماری با نرم‌افزار SPSS بررسی شد. نتایج نشان داد که همبستگی بین دو متغیر معنی‌دار است و رابطه مستقیم بین سطح ایستابی و متوسط سطح زمین وجود دارد. در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ خط رگرسیون برازش داده شده و ضریب تعیین برای هر یک از محدوده‌های مورد بررسی نشان داده شده است.

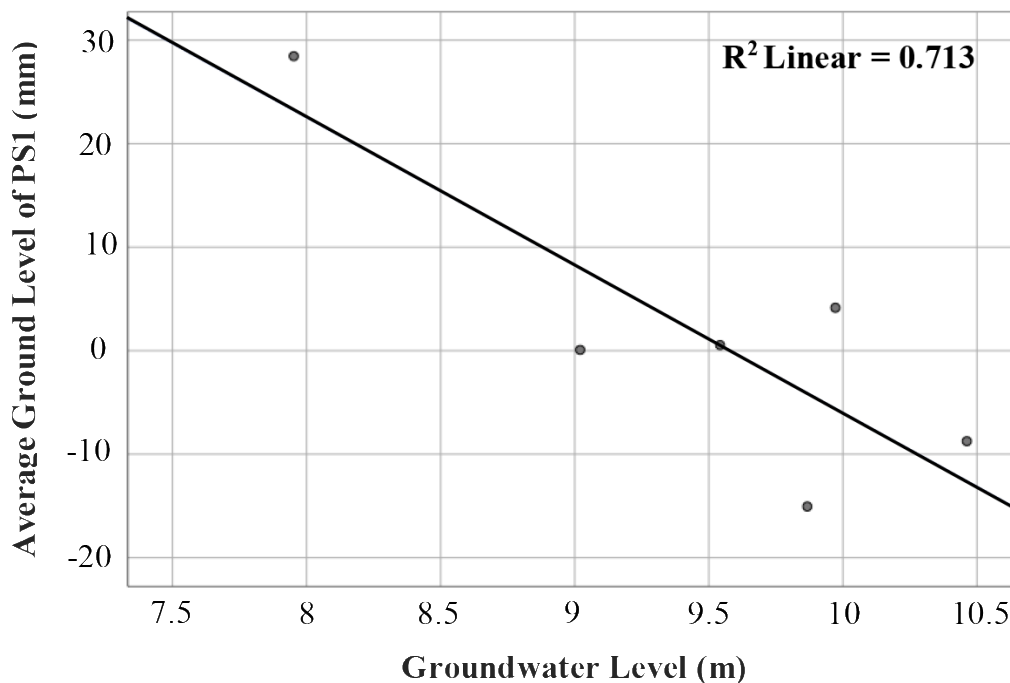


Fig. 12- Regression line for mean ground level and water_level in PS1

شکل ۱۲- خط رگرسیون بین سطح زمین و سطح ایستابی در PS1

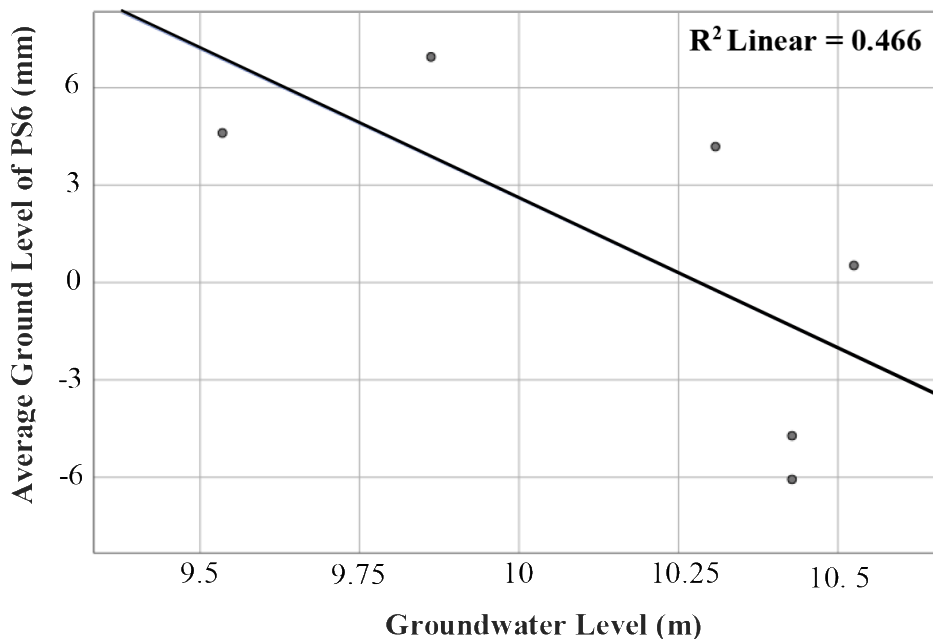


Fig. 13- Regression line for mean ground level and water level in PS6

شکل ۱۳- خط رگرسیون بین سطح زمین و سطح ایستابی در PS6

۶- نتیجه گیری

با استفاده از تصاویر ماهواره سنتینل-1A و تحلیل سری‌های زمانی تداخل‌سنجی راداری پراکنش‌گرهای دائمی، نرخ جابه‌جایی سطح زمین در دشت سراب در طی سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۰ تعیین شد. بر اساس نتایج پردازش سری زمانی با روش StaMPS، بیشینه فرونشستی حدود ۳۰/۵- میلی‌متر در سال در راستای خط دید ماهواره و حدود ۴۴/۸۵- میلی‌متر در سال در راستای قائم در دشت سراب دیده می‌شود. طبق نتایج به‌دست‌آمده فرونشست زمین در قسمت‌های جنوبی شهر سراب و همچنین قسمت مربوط به شهرک صنعتی شهر سراب واقع در شمال-شرقی دشت سراب بیشتر از سایر مناطق دیده می‌شود. در فاصله زمانی مورد مطالعه در مجموع فرونشستی حدود ۱۳۵- میلی‌متر در راستای قائم در فاصله سال‌های مورد مطالعه دیده می‌شود. علاوه بر قسمت‌هایی که دارای فرونشست هستند، مناطق دارای بالآمدگی نیز در دشت سراب دیده می‌شود که از جمله این مناطق قسمت‌های شمالی شهر سراب و بالادست آن می‌باشد.

با توجه به این نتایج می‌توان در مورد عوامل ایجاد فرونشست مطالعه کرده و برنامه‌ریزی برای توقف ادامه روند فرونشست در این مناطق انجام داد. در این تحقیق مناسب بودن روش تحلیل سری زمانی مبتنی بر تداخل‌سنجی راداری به عنوان یک روش مقرون به صرفه، سریع و دقیق جهت تعیین نرخ جابه‌جایی‌های سطح زمین در دشت سراب نشان داده شد. این روش می‌تواند برای مطالعه فرونشست زمین و یا پیش‌تأثیر اقدامات پیشگیرانه قبلی در مورد خطر فرونشست، در مناطق متعدد دیگری نیز که در معرض خطر فرونشست زمین هستند، مورد استفاده قرار گیرد، چرا که روش‌های زمینی مانند ترازبایی دقیق یا GPS زمان‌بر و پرهزینه بوده و محدودیت‌هایی از قبیل عدم وجود ایستگاه‌های مشاهداتی GPS لازم در منطقه و یا صعب‌العبور بودن منطقه جهت انجام برداشت‌های ترازبایی در برخی مناطق وجود خواهد داشت. از سوی دیگر دقت در حد میلی‌متر تا سانتی‌متر در روش‌های تداخل‌سنجی راداری دقت قابل قبولی برای بسیاری از کاربردها می‌باشد. همچنین، در این مقاله برای بررسی چگونگی تأثیرپذیری تغییر شکل‌های سطح زمین از تغییرات عمق آب‌های زیرزمینی، تغییرات سطح ایستابی در منطقه با استفاده از داده‌های چاه‌های پیژومتری در فاصله سال‌های ۱۳۸۳ تا ۱۳۹۸ مورد بررسی قرار گرفت. در برخی از چاه‌های واقع در نواحی دارای فرونشست، کاهش ۵ تا ۷ متری عمق آب زیرزمینی مشاهده شد. در حالی که در چاه‌های مناطق فاقد فرونشست، روند تغییرات عمق آب زیرزمینی به شکل سینوسی بوده است. علاوه بر این، نقشه هم‌افت سطح ایستابی برای فاصله

زمانی مورد مطالعه تهیه شد و تغییرات ارتفاعی پراکنش‌گرهای دائمی که با تحلیل سری زمانی تداخل‌سنجی راداری به روش StaMPS تعیین شده بودند، در محل‌های دارای افت سطح ایستابی و فاقد افت، مورد بررسی قرار گرفتند. مشخص شد سطح زمین در دشت سراب در مناطقی که افت تراز سطح ایستابی قابل توجه بوده است دچار فرونشست شده است، در حالی که در مناطق فاقد افت سطح ایستابی، فرونشستی دیده نشده است. برای نشان دادن مدل رابطه بین سطح ایستابی و متوسط جابه‌جایی سطح زمین، از روش رگرسیون خطی استفاده شد و معنادار بودن رابطه آماری تأیید شد. با توجه به تأیید شدن وجود رابطه مستقیم بین کاهش سطح ایستابی و فرونشست زمین، کنترل مستمر برداشت آب‌های زیرزمینی جهت پیشگیری از خسارت‌های ناشی از فرونشست زمین در دشت سراب امری ضروری می‌باشد. جهت ادامه تحقیق با توجه به این که علاوه بر سطح ایستابی، عوامل دیگری نظیر جنس زمین‌شناسی، کاربری اراضی، ضخامت آبرفت، شیب زمین، فاصله از رودخانه‌ها و آبراه‌ها و فاصله از گسل نیز می‌توانند در فرونشست زمین مؤثر باشند، پیشنهاد می‌شود تأثیر این عوامل بر جابه‌جایی‌های رخ داده در سطح زمین نیز مورد مطالعه قرار گیرد. همچنین، پیشنهاد می‌شود روش معرفی شده برای بررسی تأثیر تغییرات تراز آب زیرزمینی بر روی پدیده فرونشست زمین، در سایر مناطق دارای خطر فرونشست نیز مورد استفاده قرار گیرد.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Deposit
- 2- Radar Interferometry
- 3- Global Positioning System (GPS)
- 4- Differential SAR Interferometry (DInSAR)
- 5- Persistent Scatterer Interferometry (PSI)
- 6- Small Baseline Subset
- 7- Stanford Method for Persistent Scatterer
- 8- Temporally Coherent Point InSAR
- 9- Quasi PS
- 10- Delft Persistent Scatterer Interferometry
- 11- Global Navigation Satellite System
- 12- Alaska Space Facility (ASF)

- Ahmadifar R, Mousavi SM, and Rahimzadegan M (2017) Mapping the risk of groundwater pollution using GIS (Case Study: Sarab Plain). *Journal of Water and Soil Conservation (Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources)* 24(3):1-20
- Amelung F, Galloway DL, Bell JW, Zebker HA, and Lacznik RJ (1999) Sensing the ups and downs of Las Vegas: InSAR reveals structural control of land subsidence and aquifer-system deformation. *Geology* 27(6):483-486
- Amighpey M, Sarabi S, and Talebi A (2010) Studying yazd subsidence using Insar and Precise Leveling. *Geosciences* 20(77):157-168
- Asghari Moghaddam A and Vadiati M (2016) Groundwater quality ranking of sarab plain for drinking purpose using entropy method. *Water and Soil Science* 26(3-2):1-13
- Babae SS (2016) Time series analysis of sar images using small baseline subset (SBAS) and persistent scatterer (PS) approaches to determining subsidence rate of Qazvin. M.Sc. Thesis, University of Zanjan
- Berardino P, Fornaro G, Lanari R, and Sansosti E (2002) A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 40(11):2375-2383
- Boerner W, Mott H, and Luneburg E (1997) Polarimetry in remote sensing: Basic and applied concepts. *IGARSS'97. 1997 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings. Remote Sensing, A Scientific Vision for Sustainable Development*, 1401-1403 vol.3
- Crosetto M, Monserrat O, Cuevas-González M, Devanthery N, and Crippa B (2016) Persistent Scatterer interferometry: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 115:78-89
- Czikhardt R, Papco J, Bakon M, Liscak P, Ondrejka P, and Zlocha M (2017) Ground stability monitoring of undermined and landslide prone areas by means of sentinel-1 multi-temporal InSAR, case study from Slovakia. *Geosciences (Switzerland)* 7(3):1-17
- Du Z, Ge L, Ng AH-M, Xiaojing L, and Li L (2018) Mapping land subsidence over the eastern Beijing city using satellite radar interferometry. *International Journal of Digital Earth*, Taylor & Francis 11(5):504-519
- Esfandyary F and Gharachorlu M (2018) Study the feasibility of physical expansion of Sarab City in Relation with the Natural Environmental Factors. *Geography and Territorial Spatial Arrangement* 8(28):1-16
- Esfandyary F, Gharachorlu M, and Ebadi E (2018) Assessment and estimation the spatial variation of groundwater level by various interpolation methods in Sarab Plain. *Geography and Development* 16(51):65-80
- Ferretti A, Prati C, and Rocca F (2001) Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing* 39(1): 8-20
- Fotamy MJ, Kholgi M, Kolahchi AA, and Roostaei M (2020) Assessment of land subsidence due to groundwater exploitation by using differential radar interferometry technique, Case Study: Qazvin Province. *Iran-Water Resources Research* 16(3):133-147 (In Persian)
- Goli A, Moradi M, and Dehghan M (2019) Land subsidence vulnerability assessment of rural settlements in Fars Province. *Journal of Research and Rural Planning* 8(4):91-106
- Haghshenas Haghghi M and 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*. Elsevier 221(November 2018):534-550
- Hooper A, Segall P, and Zebker H (2007) Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to Volcán Alcedo, Galápagos. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, John Wiley & Sons, Ltd 112(B7)
- Hooper AJ (2006) Persistent scatter radar interferometry for crustal deformation studies and modeling of volcanic deformation. Ph.D. Thesis, Stanford University
- Karimzadeh S and Matsuoka M (2020) Ground displacement in east Azerbaijan province, Iran, revealed by L-band and C-band InSAR analyses. *Sensors (Switzerland)* 20(23):1-20
- Li B, Wang Z, An J, Zhou C, and Ma Y (2020) Time-series analysis of subsidence in Nanning, China, based on Sentinel-1A data by the SBAS InSAR method. *PFG-Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*. Springer International Publishing 88(3-4):291-304
- Li Y, Zuo X, Xiong P, Chen Z, Yang F, and Li X (2022) Monitoring land subsidence in north-central Henan Plain using the SBAS-InSAR method with Sentinel-1 imagery data. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing* 50(4): 635-655

- Lu YY, Ke CQ, Jiang HJ, and Chen DL (2019) Monitoring urban land surface deformation (2004–2010) from InSAR, groundwater and levelling data: A case study of Changzhou city, China. *Journal of Earth System Science*, Springer India 128(6):1–15
- Perissin D and Wang T (2012) Repeat-pass SAR interferometry with partially coherent targets. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 50(1):271–280
- Ravanfar SM (2015) Evaluation of land subsidence using rastering model in GIS environment. M.Sc. Thesis, Islamic Azad University Marvdasht Branch (In Persian)
- Soodmand Afshar R and Ahmadi S (2020) Monitoring of land subsidence due to overexploitation of groundwater using PS-InSAR in the region in hamadan proviance, Iran. *Journal of Geospatial Information Technology* 8(1):79–99
- Van der Horst T, Rutten MM, van de Giesen NC, and Hanssen RF (2018) Monitoring land subsidence in Yangon, Myanmar using Sentinel-1 persistent scatterer interferometry and assessment of driving mechanisms. *Remote Sensing of Environment*, Elsevier 217(July):101–110
- Yang C, Lv S, Hou Z, Zhang Q, Li T, and Zhao C (2022) Monitoring of land subsidence and ground fissure activity within the Su-Xi-Chang area based on time-series InSAR. *Remote Sensing* 14(4):903
- Yang YJ, Hwang C, Hung WC, Fuhrmann T, Chen YA, and Wei SH (2019) Surface deformation from sentinel-1A InSAR: Relation to seasonal groundwater extraction and rainfall in central Taiwan. *Remote Sensing* 11(23):2817
- Zebker HA and Villasenor J (1992) Decorrelation in interferometric radar echoes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 30(5):950–959
- Zhang L, Lu Z, Ding X, Jung H-S, Feng G, and Lee C-W (2012) Mapping ground surface deformation using temporarily coherent point SAR interferometry: Application to Los Angeles Basin. *Remote Sensing of Environment* 117:429–439
- Zhou Z (2013) The applications of InSAR time series analysis for monitoring long-term surface change in peatlands. Ph.D. Thesis, University of Glasgow