



Revealing Land Subsidence in Heris Plain Using Radar Images and SBAS, PSI Method

Asadollah Hejazi¹ | Mohammad Hossein Rezaei Moghaddam² | Khalil Valizadeh Kamran³ | Neda Mousavi Kajabad⁴

1. Corresponding Author, Department of Geomorphology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Iran. E-mail: s.hejazi@tabriz.ac.ir
2. Department of Geomorphology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Iran. E-mail: Rezmogh@tabrizu.ac.ir
3. Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Iran. E-mail: valizadeh@tabrizu.ac.ir
4. Department of Geomorphology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Iran. E-mail: Neda.musavi69@yahoo.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received: 13 Nov 2021

Received in revised form:
21 Feb 2022

Accepted: 24 Feb 2022

Available online: 05 April 2022

Keywords:

Subsidence,
Radar Interferometry,
Time Series Analysis,
Sentinel,
Heris Plain.

ABSTRACT

Landslides are one of the most important environmental hazards to be considered in the Harris Plain area. The phenomenon of subsidence in recent decades has created many problems for agricultural lands, residential areas, roads and water supply canals in some parts of the country. In order to analyze the time series of surface displacement, a short baseline algorithm called SBAS was used. Subsidence time series analysis was performed using 6 interferograms calculated from 21 radar images of Sentinel1 satellite over a period of 4 years (2016-2019). It is an optimal attenuation factor that reduces atmospheric noise, phase recovery error, and orbital effects; in other words, it reduced atmospheric effects using the atmospheric model to optimally maintain nonlinear signals. The results of the time series analysis showed that the region is continuously subsiding. PSI method was also applied to estimate subsidence and compare it with SBAS method, which showed the superiority of SBAS method with PSI method in this study. In this research, using land radar images of Sentinel 1 and also images of Sentinel 2, the land subsidence in Harris plain has been estimated. The land uses in the plain were extracted from Sentinel 2 images and adapted to the results of radar images to investigate the relationship between land subsidence and each of the land uses in the Harris Plain. The results of two methods of estimating land subsidence showed the amount of land displacement (0 to 15) cm per year. The results of depth analysis of piezometric wells also show a strong relationship between subsidence and the depth of water wells in the region.

Cite this article: Hejazi, A., Rezaei Moghaddam, M. H., Valizadeh Kamran, Kh., Mousavi Kajabad, N. (2022). Revealing Land Subsidence in Heris Plain Using Radar Images and SBAS, PSI Method. *Geography and Environmental Sustainability*, 12 (1), 89-103. DOI: 10.22126/GES.2022.6909.2446



© The Author(s).

DOI: 10.22126/GES.2022.6909.2446

Publisher: Razi University

آشکارسازی فرونشست زمین جهت پایداری دشت هریس با استفاده از تصاویر راداری و روش‌های SBAS و PSI

اسدالله حجازی^۱ | محمد حسین رضائی مقدم^۲ | خلیل ولیزاده کامران^۳ | ندا موسوی کجباد^۴

۱. نویسنده مسئول، گروه ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: hejazi@tabrizu.ac.ir
۲. گروه ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: Rezmogh@tabrizu.ac.ir
۳. گروه سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: valizadeh@tabrizu.ac.ir
۴. گروه ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: Neda.musavi69@yahoo.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۲۲ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۱۲/۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۰۵ دسترسی آنلاین: ۱۴۰۱/۰۱/۱۷ کلیدواژه‌ها: فرونشست، تداخل سنجی رادار، تحلیل سری زمانی، دشت هریس، سنتینل S، PSI.BAS	از جمله مخاطرات محیطی بسیار مهم که در منطقه دشت هریس باید مورد توجه قرار بگیرد فرونشست است. پدیده فرونشست در دهه‌های اخیر مشکلات زیادی را برای زمین‌های کشاورزی، مناطق مسکونی، جاده‌ها و کانال‌های آبرسانی در برخی مناطق کشور به وجود آورده است. به منظور تحلیل سری زمانی جابه‌جایی سطح زمین، الگوریتم خط مبنای کوتاه موسوم به SBAS به کار گرفته شد. تحلیل سری زمانی فرونشست، با استفاده از ۶ تداخل نگاشت (اینترفروگرام) محاسبه شده از ۲۱ تصویر راداری ماهواره Sentinel1 در بازه زمانی ۴ سال (۲۰۱۶-۲۰۱۹) انجام شد. یک عامل نرم‌کنندگی بهینه که نوفه ناشی از اتمسفر، خطای بازیابی فاز و اثرات مداری را کاهش می‌دهد و یا به عبارت دیگر با استفاده از مدل اتمسفری تأثیرات این عامل کاهش یافت تا سیگنال‌های غیرخطی به صورت بهینه حفظ شوند. نتایج تحلیل سری زمانی نشان داد که منطقه به طور پیوسته در حال فرونشست است. همچنین از روش PSI نیز برای برآورد فرونشست و مقایسه آن با روش SBAS استفاده گردید که نتایج نشان دهنده برتری روش SBAS به روش PSI در این تحقیق بود. در این تحقیق با استفاده از تصاویر راداری سنتینل ۱ و همچنین تصاویر سنتینل ۲ اقدام به برآورد فرونشست زمین در دشت هریس شده است. کاربری‌های موجود در دشت را از تصاویر سنتینل ۲ استخراج شده و با نتایج حاصل از تصاویر راداری انطباق داده شده تا ارتباط فرونشست زمین با هریک از کاربری‌های موجود در دشت هریس بررسی شود. نتایج حاصل از اجرای دو روش برآورد فرونشست زمین میزان جابه‌جایی سطح زمین را (۰ تا ۱۵) سانتیمتر در سال نشان داد. نتایج بررسی عمق چاه‌های پیزومتری نیز ارتباط قوی بین فرونشست و عمق چاه‌های آب منطقه را نشان می‌دهد.

استناد: حجازی، اسدالله؛ رضائی مقدم، محمد حسین؛ ولیزاده کامران، خلیل؛ موسوی کجباد، ندا (۱۴۰۱). آشکارسازی فرونشست زمین جهت پایداری دشت هریس با استفاده از تصاویر راداری و روش‌های SBAS و PSI. *جغرافیا و مپاداری محیط*، ۱۲ (۱)، ۸۹-۱۰۳.

DOI: 10.22126/GES.2022.6909.2446



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه رازی

مقدمه

فرونشست زمین مسئله‌ای جهانی و پدیده‌ای مورفولوژیکی است. این پدیده متأثر از فعالیت‌های انسانی و عوامل طبیعی است. در ایجاد پدیده فرونشست در اثر برداشت نامناسب آب زیرزمینی، عوامل زمین‌شناسی و آب زیرزمینی نیز بسیار مؤثرند. تخلخل مصالح تشکیل‌دهنده لایه‌های خاک، تراکم، نوع، جنس و ترکیب لایه‌ها، نحوه پمپاژ، ساختار زمین‌شناسی منطقه، هدایت هیدرولوژیکی لایه‌های آبدار، بارندگی و دما، همگی از عوامل مؤثر در فرونشست زمین به شمار می‌روند. داده‌های سنجش‌ازدور قادر هستند دیدی گسترده و پوشش وسیعی را از منطقه مورد مطالعه فراهم کنند (Devanthery et al., 2018) و از این نظر برای مطالعه فرونشست بسیار مهم تلقی می‌شوند. استخراج بی‌رویه آب زیرزمینی باعث افت سطح آب زیرزمینی و کاهش فشار سیال و در نتیجه افزایش فشار میان ذره‌ای می‌شود که منجر به ایجاد تراکم و پدیده فرونشست زمین می‌شود (Terzaghi, 1925). تحلیل سری زمانی و تعیین آهنگ فرونشست به کمک الگوریتم خط مبنای کوتاه (Small Baseline Subset (SBAS)) انجام شده است که به برآورد فاز تجمعی در زمان‌های تصویربرداری می‌پردازد (Berardino et al., 2002).

روش تداخل سنجی راداری (InSAR) نیز در سال‌های اخیر به عنوان یکی از روش‌های غیر ژئودتیک باتوجه به مزایایی که نسبت به دیگر روش‌ها دارد، بسیار موردتوجه قرار گرفته است. این روش در میان روش‌های زمینی و فضایی به عنوان کارآمدترین روش برای اندازه‌گیری تغییرات سطح زمین بادقت و قدرت تفکیک مکانی بسیار بالا به شمار می‌رود (Ferretti et al., 2011). این تصاویر از حسگرهای فعال مانند Sentinel-1A یا B و Radarsat^۱ و غیره به دست می‌آید. در دهه‌های اخیر روش‌های مختلفی جهت تولید نقشه‌های فرونشست زمین به وسیله محققین ارائه شده است که شامل، PSI^۲ و SBAS^۳ هستند. تکنیک DINSAR^۴ می‌تواند برای کشف و پایش کردن تغییرات سطح زمین در مقیاس کوچک و بزرگ مورد استفاده قرار گیرد (Miles et al., 2011). روش PSI دارای انواع مختلف تکنیک برای پردازش کردن تصاویر راداری است که دو نوع بسیار مهم این روش شامل PSinsar و SqueeSAR هستند که برای آنالیز تغییر شکل زمین مورد استفاده قرار می‌گیرند (Tapete, 2012).

در روش سری زمانی SBAS تنها زوج تصاویری مورد استفاده قرار می‌گیرند که مؤلفه قائم خط مبنای آنها کمتر از مقدار بحرانی خط مبنا باشد و همچنین خط مبنای زمانی آنها نیز هم‌زمان کمینه باشد. به این ترتیب فقط تداخل نگارهایی تشکیل می‌شوند که کیفیت مناسبی داشته باشند. باتوجه به اینکه روش تداخل سنجی راداری یکی از ابزارهای بسیار توانمند جهت پایش پدیده فرونشست است، این روش با مقایسه فازهای دو تصویر راداری که از یک منطقه ولی در دو زمان متفاوت اخذ شده‌اند قادر به تعیین تغییرات سطح زمین در آن بازه زمانی است.

دشت هریس در طی سال‌های اخیر به دلیل کاهش نزولات جوی و نیز افزایش برداشت بی‌رویه زیرزمینی توسط چاه‌های بهره‌برداری، باعث ایجاد افت زیادی در سطح آب زیرزمینی شده که نتیجه آن فرونشست زمین ایجاد ترک و شکاف‌ها در قسمت‌هایی از آن شده است و این مسئله نشان می‌دهد که به منظور شناسایی و کاهش پیامدهای ناشی از پدیده فرونشست نیاز به یک سیستم پایش فرونشست بیش‌ازپیش در کشور احساس می‌شود.

اولین گام در پایش فرونشست اندازه‌گیری مقدار جابه‌جایی ناشی از آن در سطح زمین است. باتوجه به میزان نرخ فرونشست و همچنین پهنه و گستره مناطق تحت‌تأثیر نه تنها قادر خواهیم بود میزان پیشرفت این پدیده را در یک منطقه شناسایی کنیم و از پیشرفت بیشتر آن هم جلوگیری نماییم.

- 1- Radio detecting and ranging
- 2- Persistent scatter index
- 3- Small baseline subset
- 4- Interferometric synthetic aperture radar

بر اساس تحقیق در پیشینه موضوع تاکنون هیچ پژوهشی در این زمینه صورت نگرفته و نوآوری این مقاله محسوب می‌شود. برخی مطالعات، روش تداخل سنجی راداری را به منظور شناسایی و اندازه‌گیری فرونشست زمین استفاده کرده‌اند (Devanthery et al., 2018).

برای پایش میزان جابه‌جایی در سطح زمین و خطر زمین‌شناسی ناشی از آن در منطقه موریلیا مکزیک از ۲۲ تصویر راداری ENVISAT در دوره‌های زمانی ۲۰۰۳-۲۰۱۰ استفاده کردند که نتایج حاصل از تحقیق آنها میزان جابه‌جایی ۷-۸ سانتیمتر در سال را در جهت غربی - شرقی یا شمال غربی - جنوب شرقی را در جهت موازی با گسل اصلی نشان داد (Cigna et al., 2012).

مسئله اصلی در این مقاله اندازه‌گیری میزان جابه‌جایی ناشی از فرونشست در محدوده دشت هریس است. باتوجه‌به پتانسیل بالای منطقه آذربایجان در وقوع هر دو نوع مخاطره طبیعی (فرونشست و زمین‌لغزش) و وارد ساختن خسارت به‌ویژه به شریان‌های حیاتی هدف اصلی پژوهش حاضر را می‌توان استخراج نرخ و میزان فرونشست منطقه مورد مطالعه در بازه زمانی (۲۰۱۶ تا ۲۰۱۹) توسط دو روش SBAS, PSI است. از داده‌های مرئی سنتینل ۲ نیز جهت استخراج نقشه کاربری زمین استفاده شده است که می‌تواند کمک شایانی در امر اندازه‌گیری جابه‌جایی ناشی از پدیده فرونشست باشد.

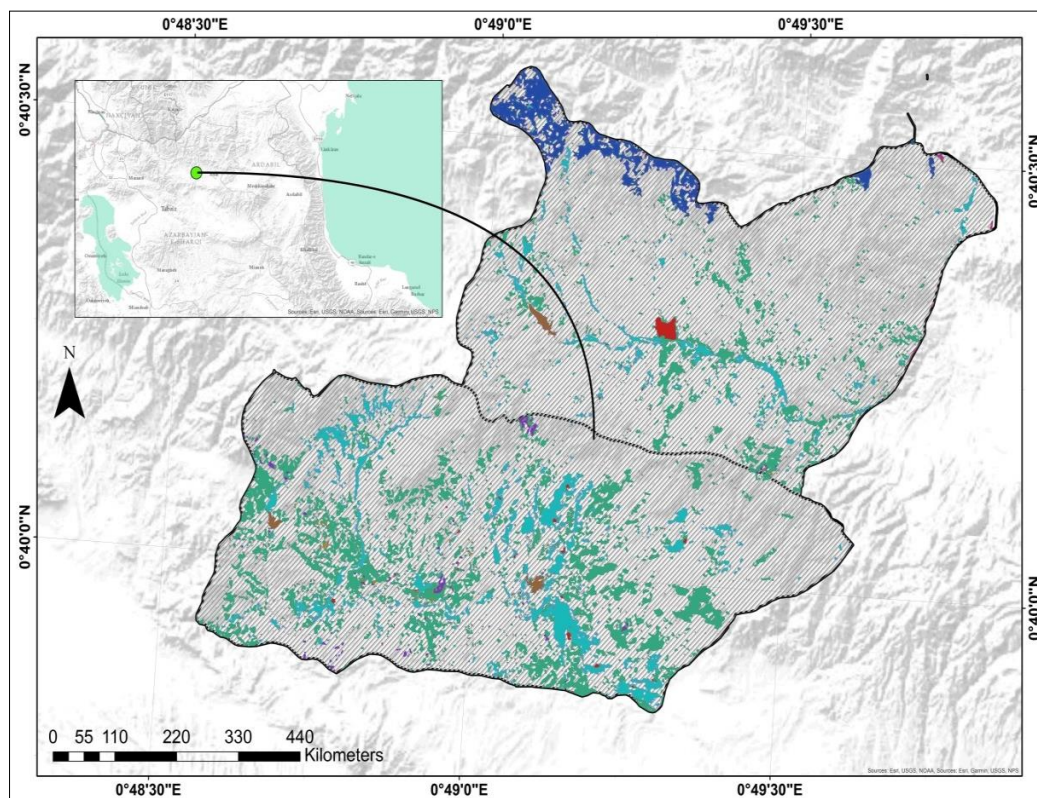
داده‌های سنجش‌ازدور در چندین طیف مرئی، حرارتی و رادار تولید می‌شوند که در تحقیق حال حاضر از داده‌های نوع راداری آن استفاده شده است. هدف اصلی در این مطالعه استفاده از روش تداخل سنجی راداری برای تعیین میزان فرونشست دشت هریس در یک بازه زمانی ۴ ساله است. در این پژوهش سعی شده است با روش‌های جدید برآورد میزان فرونشست، میزان آن در دشت هریس برآورد شده و با عوامل زمین‌شناسی و کاربری به‌عنوان نمونه‌ای از عوامل محیطی و انسانی مقایسه گردد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

شهرستان هریس در حدود ۲۳۷۷/۶ کیلومترمربع مساحت داشته و در استان آذربایجان شرقی قرار دارد. ارتفاع این شهر از سطح دریا بین ۱۸۰۰ تا ۱۸۵۰ متر است. پیشینه مطلق دمای هریس ۳۶/۵ درجه سانتی‌گراد بالای صفر و مربوط به اردیبهشت‌ماه بوده و کمینه مطلق دمای آن نیز ۳۳ درجه سانتی‌گراد زیر صفر و مربوط به بهمن‌ماه است. متوسط بارندگی سالانه شهرستان ۳۵۰ میلی‌متر بوده که غالباً ۸۷ میلی‌متر آن در پاییز و ۹۰ میلی‌متر در زمستان و ۱۷۲ میلی‌متر در بهار و یک میلی‌متر در تابستان نازل می‌گردد. بیشترین میزان متوسط بارندگی هریس ۶۴/۹ میلی‌متر و مربوط به اردیبهشت‌ماه بوده و کمترین میزان متوسط آن نیز ۶ میلی‌متر و مربوط به مردادماه است. در منطقه مورد مطالعه به دلیل تغییرات زیاد کاربری و کاهش آب‌های زیرزمینی سالانه نشست زمین اتفاق می‌افتد که باید موردتوجه مدیران و برنامه‌ریزان محیطی قرار بگیرد. شکل ۱ منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

این منطقه بیشتر شامل نهشته‌های کواترنری و نئوژن هستند. در یک نگاه کلی منطقه از دو واحد تشکیل یافته است که شامل واحدهای کوهستان، و دشت است. از نظر ژئومورفولوژی این واحد جزء مناطق معمولاً مرتفع محسوب شده و دارای ارتفاعات و فعالیت هوازگی شدید است. وجود گنبدی‌های گدازه به همراه جریان‌های ستر گدازه، برش و لایه‌های ایگنمبریتی، نشان‌دهنده یک مرکز فوران مهم در این منطقه است. بر اساس تحقیقات سازمان زمین‌شناسی بر اثر عملکرد گسل گوشه داغی در محدوده موردنظر باعث فعالیت گسل تبریز می‌گردد.



شکل ۱. موقعیت دشت هریس

داده‌های مورد استفاده

اساس کار در اندازه‌گیری تغییرات سطح زمین، استفاده از تصاویر تکراری رادار است. تصویری که از یک منطقه در یک‌زمان مشخص برداشت می‌شود، با تصویری که در زمان دیگر توسط همان سنجنده رادار برداشت می‌شود، تلفیق می‌شود. در جدول ۱ داده‌های مورد استفاده و منابع تهیه آن آورده شده است.

جدول ۱. داده‌های مورد استفاده

نوع داده	منبع داده	تاریخ داده‌ها
تصاویر سنتینل ۱	https://scihub.copernicus.eu	۲۰۱۹-۲۰۱۶
تصاویر سنتینل ۲	https://scihub.copernicus.eu	۲۰۱۹-۲۰۱۶
عمق چاه‌های پی‌زومتری	سازمان آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی	۲۰۱۹-۲۰۱۶
داده‌های GPS	کار میدانی	۲۰۱۹

عملیات سنتینل ۱ از دو ماهواره مدار قطبی تشکیل شده که به‌صورت شبانه‌روزی با استفاده از باند C به تصویربرداری از سیاره زمین می‌پردازد. این ماهواره راداری که از سنجنده‌های سری رادار دریچه مصنوعی استفاده می‌نماید، قابلیت تصویربرداری در هر شرایط آب‌وهوایی را دارا است. این ماهواره به‌گونه‌ای طراحی شده است که بتواند برای مطالعه پدیده‌های مختلف سطح زمین در بازه زمانی طولانی مدت مورد استفاده قرار بگیرد. ماهواره سنتینل ۱ به‌عنوان نخستین ماهواره از سری ماهواره‌های پنج‌گانه کوپرنیکوس سازمان فضایی اروپا است. ماهواره سنتینل ۱ با ۴ حالت تصویربرداری از توان تفکیک مکانی کمتر از ۱۰ متر برخوردار است. داده‌های ماهواره سنتینل به‌صورت دوقطبی و با توان تفکیک زمانی بالا است. ماهواره سنتینل ۱ ادامه‌دهنده راه سایر ماهواره‌های راداری (که در باند C تصویربرداری می‌نمایند) مانند ERS-1، ERS-2، ENVISAT.

RADARSAT-1 و RADARSAT-2 است.

سنتینل ۲، بخشی از برنامه Copernicus است که توسط آژانس فضایی اروپا برای جمع‌آوری اطلاعات از زمین طراحی و ایجاد شده است. سنتینل ۲، شامل دو ماهواره تصویربرداری به نام‌های سنتینل A۲ و سنتینل B۲- است. سنتینل A۲- در حال حاضر در مدار قرار گرفته و در حال تصویربرداری از زمین است و سنتینل B۲- از مارس ۲۰۱۷ در مدار قرار گرفته است. سه مأموریت اصلی سنتینل ۲ شامل: ۱- ارائه تصاویر چند طیفی با پوشش جهانی و دارای توان تفکیک مکانی و زمانی بالا، ۲- ارائه تصاویری که مکمل داده‌های تصویری لندست و اسپات باشد و آنها را بهبود بخشد، ۳- جمع‌آوری اطلاعات برای نسل بعدی محصولات از قبیل نقشه‌های پوششی زمین، نقشه‌های تغییرات زمین و متغیرهای ژئوفیزیکی، است؛ بنابراین، داده‌های به‌دست‌آمده از ماهواره‌های سنتینل ۲ می‌توانند در حوزه‌هایی چون پایش زمین، مدیریت بحران و سرویس‌های امنیتی بسیار مفید واقع شوند. برای تولید نقشه جابه‌جایی با استفاده از تصاویر سنتینل این اقدامات انجام گردید: تولید Coregstration برای تولید تصاویر Slave و Master، انجام فرایند Interferometry برای تولید تداخل سنجی فازها، تولید حذف اثر توپوگرافی، انجام فیلتر بر روی تصویر فازی، اجرای اصلاح فاز، تبدیل تصویر حاصل به تصویر قابل اجرا در محیط sentinel Toolbox، تبدیل فازی به ارتفاع و جابه‌جایی، تعریف سیستم مختصات و تولید نقشه جابه‌جایی.

روش مطالعه

در تحقیق حال حاضر برای برآورد فرونشست زمین از روش پراکنش گر دائمی استفاده شد. Coregstration یکی از اساسی‌ترین مراحل پردازش تداخل سنجی تصاویر است که در این مرحله دو یا چندین تصویر باید مورد استفاده قرار بگیرند. تا تصاویر مستر (مخدوم) و اسلو (خادم) انتخاب شوند. در این بخش پیکسل‌های تصاویر اسلو با تصاویر مستر بادقت انطباق داده می‌شوند و اختلاف فاز حاصل از این تصاویر منجر به تشکیل اینترفرومتری خواهد شد (Danial et al., 2003). دامنه‌های زوج تصاویر از رابطه ۱ محاسبه می‌شود.

$$S_1 = A_1 e^{i\phi_1} \quad S_2 = A_2 e^{i\phi_2} \quad S_1 \cdot S_2^* = A_1 A_2 e^{i(\phi_1 - \phi_2) = e^{i\phi}} \quad \text{رابطه ۱}$$

از آنجاکه در یک سیستم رادیانسی، فاز یک اینترفروگرام می‌تواند فقط به اندازه 2π تغییر کند ولی در بعضی مواقع ممکن است تغییرات بیش از این باشد. فرایند اصلاح فاز انجام شد که باعث خواهد شد تا مقادیر واقعی پالس مجدداً محاسبه شده و ابهام 2π اصلاح شود. به دلیل دخالت عوامل مختلف در فاز تداخل نما، با استفاده از رابطه ۲ اصلاح می‌شوند

$$\phi_{\text{int}} = W(\phi_{\text{topo}} + \phi_{\text{def}} + \phi_{\text{FE}} + \phi_{\text{noise}} + \phi_{\text{atm}} + \phi_{\text{orb}}) \quad \text{رابطه ۲}$$

باتوجه به ماهیت اتفاقی بودن نویز، اعمال فیلتر میانگین، تغییرات ناگهانی فاز بین نقاط مجاور را از بین می‌برد و تداخل نما را به حالت طبیعی زمین نزدیک می‌کند. از این رو میانگین‌گیری از مقادیر فاز تداخل نما روشی مناسب برای اجتناب از اثر فاز ناشی از نویز در محاسبات تداخل سنجی است و با استفاده از فیلتر گلدشتاین اقدام به حذف نویز تداخل نما گردید. در نهایت به منظور تصحیح فاز اصلاح شده به مقادیر ارتفاعی و محاسبه میزان جابه‌جایی سطح زمین مرحله پالایش مجدداً اجرا گردید. اجرای این مرحله باعث می‌شود تا خطاهای احتمالی مداری تصحیح شده و مقدار انحراف (Off set)، فاز محاسبه شده تا از این طریق مقادیر فاز مطلق به دست آید. از آنجاکه این روش به‌تنهایی قابلیت برآورد خیلی دقیق را دارا نیست الگوریتم‌های دیگر همچون پراکنش گر دائمی و SBAS ارائه گردیده است.

فاز تداخل نگاشت با اعمال ضرب، $\pi - \lambda/4$ به جابه‌جایی در راستای خط دید ماهواره تبدیل می‌شود. از آن جا که زاویه دید ماهواره بسیار کوچک است و بیشترین بخش تغییر شکل ناشی از فرونشست، می‌تواند به صورت قائم در نظر گرفته شود، می‌توان از تداخل نگاشت‌های محاسبه شده، بیشترین بخش تغییر شکل مربوطه را اندازه‌گیری کرد. مقادیر منفی در تداخل نگاشت‌ها نشان دهنده سیگنال فرونشست هستند. لازم به بیان است که سیگنال‌های فرونشست در تداخل نگاشت‌ها سیگنال‌های پایدار در زمان هستند. به عبارت دیگر، مکان و موقعیت جغرافیایی آنها در تمام تداخل نگاشت‌ها ثابت است؛

بنابراین موقعیت اثرات اتمسفری، نوفه‌ها و خطاهای دیگر در زمان، تغییر می‌کند و موقعیت مشخصی در تداخل نگاشت‌ها ندارند، بنابراین به راحتی می‌توان آنها را از سیگنال‌های تغییر شکل مجزا کرد. (Masoud & Koike, 2011)

مرحله بعدی ایجاد سری زمانی تغییر شکل با استفاده از تداخل نگاشت‌ها است. هدف اصلی در تحلیل سری زمانی، وارون کردن تداخل نگاشت‌ها برای دستیابی به میزان تغییر شکل در زمان‌های دریافت تصاویر با استفاده از روش کمترین مربعات است.

$$k = 1, \dots, M, i, j = 1, \dots, N$$

$$\delta\phi_k = \phi(t_i) - \phi(t_j),$$

رابطه ۳

در رابطه ۳ $M \times N$ به ترتیب تعداد تداخل نگاشت‌های پردازش شده و تعداد تصاویر راداری $\phi(t_j)$ و $\phi(t_i)$ مقادیر مجهول فاز در هر تصویر راداری در دو تاریخ است. با حل کمترین مربعات A سامانه رابطه ۲، می‌توان مقدار فاز مربوط به هر تصویر راداری را برآورد کرد که مقدار فاز اولین تصویر صفر در نظر گرفته می‌شود ($\Phi_1 = 0$).

چنانچه سیگنال مربوط به جابه‌جایی نسبت به مؤلفه‌های دیگر فاز مانند سیگنال اتمسفر بزرگ باشد، می‌توان فاز برآورد شده، را به جابه‌جایی نسبت داد. می‌توان به منظور کاهش اثرات اتمسفر، خطای باقیمانده مداری، نوفه و خطاهای مربوط به عمل بازیابی فاز از شرط نرم‌کنندگی در حل کمترین مربعات استفاده کرد (Schmidt & Burgman, 2003; Lundgren et al., 2001). شرط نرم‌کنندگی که در این مطالعه از آن استفاده شده، بر اساس تقریب تفاضل محدود برای مشتق درجه دو از سری زمانی است که مفهوم آن انحنای کمینه و یا سرعت ثابت تغییر شکل است. به عبارتی ساده‌تر در این شرط فرض می‌شود که سرعت جابه‌جایی در دو بازه زمانی متوالی کم و بیش ثابت و فاقد تغییرات ناگهانی است. در نتیجه با به کار بردن قید یادشده، خطاهایی که باعث ورود نوسانات غیرطبیعی و ناگهانی به سری زمانی می‌شود کاهش یافته و سری زمانی تغییرات به صورت نرم شده برآورد می‌شود. با وارد کردن شرط نرم‌کنندگی در حل کمترین مربعات، رابطه ۲، به صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$A\phi = \delta\phi$$

$$\left(\gamma^2 \frac{A}{\partial t^2} \right) \phi = \begin{pmatrix} \delta\phi \\ 0 \end{pmatrix}$$

رابطه ۴

در این رابطه γ عامل نرم‌کنندگی است که باید به صورت بهینه تعیین شود. با توجه به این که مشتق دوم (شتاب) صفر است، مشتق اول حالت خطی دارد؛ بنابراین، رابط ۳ را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\begin{bmatrix} A\phi \\ \gamma^2 * \left(\frac{\phi_{i+1} - \phi_i}{t_{i+1} - t_i} - \frac{\phi_i - \phi_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \right) \end{bmatrix}$$

رابطه ۵

i در این معادله شماره تصویر راداری است. اگر عامل نرم‌کنندگی کوچک انتخاب شود، سری زمانی به دست آمده دارای نوسانات زیاد بوده و اگر بزرگ در نظر گرفته شود، سری زمانی بیش از اندازه نرم می‌شود و در نتیجه مؤلفه غیرخطی جابه‌جایی از بین می‌رود؛ بنابراین عامل نرم‌کنندگی باید به گونه‌ای انتخاب شود که نخست خطاهایی که در سری زمانی نوسانات ناخواسته ایجاد می‌کنند حذف شوند و دوم تغییر شکل‌های ناپایدار مانند اثرات فصلی در سری زمانی حفظ شوند. یک روش برای تعیین بهینه عامل نرم‌کنندگی، رسم مقادیر مختلف جذر میانگین مربع بردار باقیمانده‌های برآورد شده از حل کمترین مربعات ((RMSE)، به ازای عامل‌های مختلف نرم‌کنندگی است که از رابطه ۶ محاسبه می‌شود:

$$rms = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (r^i)^2}{n}}$$

رابطه ۶

اگر ماتریس ضرایب را در رابطه ۳ با B نشان دهیم:

$$\hat{r} = B\hat{\phi} - \delta\varphi \quad \text{رابطه ۷}$$

نمودار حاصل یک منحنی با یک بازو خواهد بود. اگرچه انتخاب عامل نرم‌کنندگی بهینه اختیاری است، بسته به مقیاس نمودار باتوجه به مطالب بیان شده در بالا، نقطه میانی روی منحنی تقریبی از عامل نرم‌کنندگی است که نوسانات نوفه‌ای را حذف کرده و درعین حال تغییر شکل‌های غیرخطی را حفظ می‌کند. چنانچه عامل نرم‌کنندگی از مقدار بهینه بزرگ‌تر و یا کوچک‌تر انتخاب شود، سری زمانی به ترتیب نرم و یا خشن می‌شود. شکل ۳، نمودار مربوطه را نشان می‌دهد. با تعیین عامل نرم‌کنندگی بهینه و با استفاده از معادله ۳، حل کمترین مربعات تکرار شده و مقادیر فاز مربوط به هر تصویر رادار برآورد می‌شوند. در مرحله آخر مقادیر فاز برآورد شده به کمک ضریب $\lambda = 4\pi$ به جابه‌جایی تبدیل می‌شوند. به‌منظور برآورد مقادیر فاز از برآورد کمترین مربعات استفاده شده است. همچنین به‌منظور کاهش اثرات اتمسفر، خطای باقیمانده مداری، نوفه و خطاهای مربوط به عمل بازیابی فاز، یک شرط نرم‌کنندگی در تحلیل کمترین مربعات مورد استفاده قرار گرفته است. شرط نرم‌کنندگی با اعمال یک عامل نرم‌کنندگی تحقق می‌یابد. این عامل باید به‌صورت بهینه برآورد شود تا نخست، خطاها و نوسانات ناخواسته مربوط به اثرات اتمسفری و غیره در سری زمانی کاهش یابد و دوم، جابه‌جایی‌های ناپایدار که بیشتر مربوط به اثرات فصلی هستند در سری زمانی حفظ شوند.

روش خط مبنای کوتاه SBAS^۱

روش SBAS اولین بار در سال ۲۰۰۲ توسط براردینو و همکاران ارائه شد (Berardino et al., 2002) در این روش که به‌عنوان روش آنالیز سری زمانی تصاویر راداری در جهت برآورد فرونشست زمین شناخته می‌شود. تنها زوج تصاویری برای برآورد فرونشست زمین انتخاب می‌شوند که مؤلفه قائم خط مبنای آنها کمتر از مقدار بحرانی خط مبنای باشد، همچنین کمینه بودن خط مبنای آنها از دیگر شرایط لازم برای تولید تداخل سنجی خواهد بود. در همین راستا شبکه از تداخل‌سنج‌ها ایجاد می‌شود که با استفاده از روش کمترین مربعات مقدار جابه‌جایی پیکسل‌های تخمین زده می‌شود.

روش پراکنش گر دائمی PSI^۲

عدم همبستگی مکانی و زمانی اغلب مانع می‌شود که یک ابزار اجرایی برای پایش جابه‌جایی SAR تداخل سنجی باشد همچنین تأثیرات اتمسفر به‌شدت صحت نتایج را کاهش می‌دهد. میزان همبستگی سیگنال‌های رادار وابسته به توزیع پراکنده سازهایی است که داخل یک پیکسل قرار گرفته‌اند. اگر فاز یک پیکسل فقط توسط یک پراکنده ساز نقطه‌ای تعیین شود، مقدار ناهمبستگی صفر خواهد شد اگرچه در سطوح واقعی چنین حالتی هرگز رخ نمی‌دهد، باین حال پیکسل‌هایی وجود دارند که شبیه پراکنده ساز نقطه‌ای عمل می‌کنند و ناهمبستگی را کاهش می‌دهند.

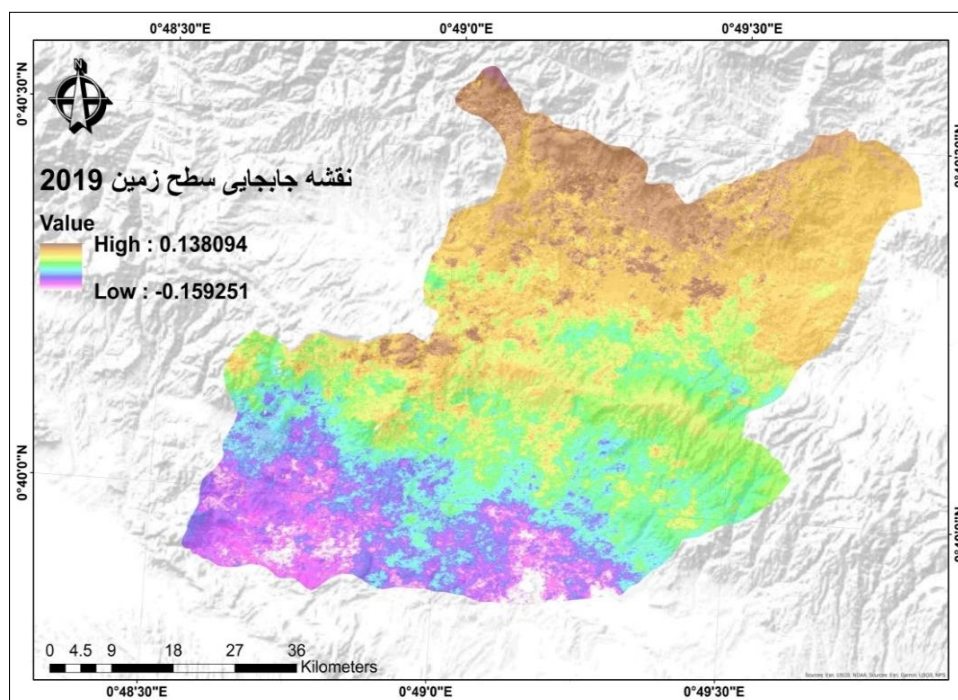
هدف روش پراکنش گر دائمی شناسایی پیکسل‌هایی از تصویر است که از این‌پس آنها را PS می‌نامیم که در بازه زمانی اخذ داده‌های مورد استفاده همدوس باقی می‌مانند اگر ابعاد پیکسل PS کوچک‌تر از ابعاد سلول تفکیک باشد که معمولاً نیز این چنین است، میزان همدوسی این پیکسل‌ها، حتی برای تداخل نگارهای با طول مبنای بزرگ‌تر از مقدار بحرانی مناسب است.

نتایج

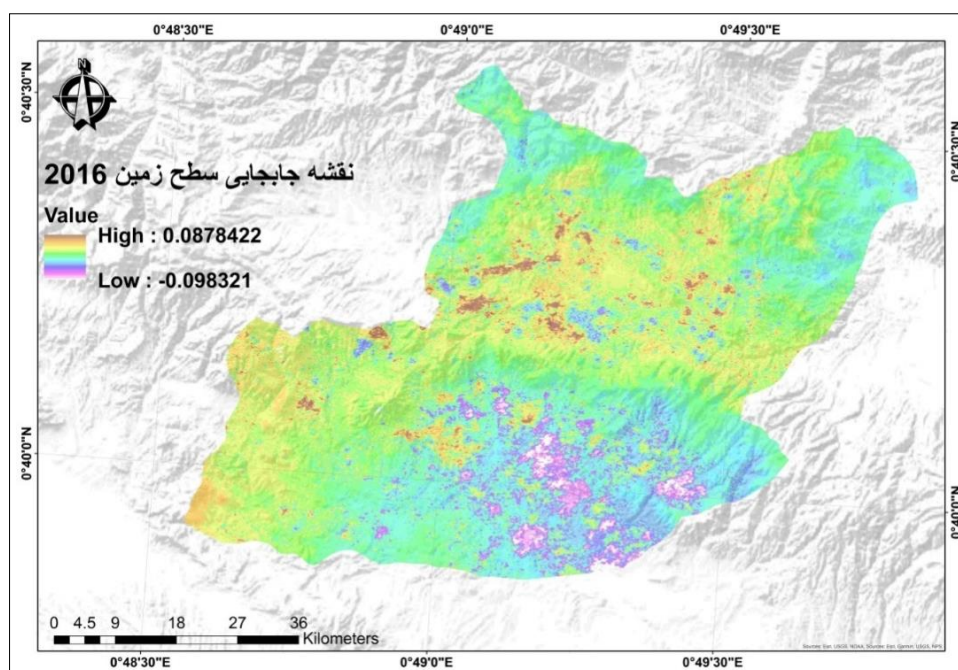
ارزیابی میزان فرونشست

ارزیابی و برآورد میزان فرونشست به‌دست‌آمده از تصاویر سنتینل - ۱ و روش PSI نشان می‌دهد که فرونشست زمین در طی

بازه زمانی مطالعه ۲۰۱۶ تا ۲۰۱۹ افزایش یافته است (شکل ۲). به طوری که بخش مرکزی دشت دارای بیشترین میزان نشست و بخش شرقی کمترین میزان فرونشست را داشته است. در این تحقیق جهت درک این میزان افزایش نشست در دشت هریس با استفاده از تصاویر سنتینل - ۲ اقدام به شناسایی کاربری‌های منطقه مورد مطالعه شد. تا ارتباط بین کاربری و فرونشست بررسی گردد. در شکل شماره ۳ نیز این مقدار فرونشست در همان بازه زمانی به روش SBAS نمایش داده شده است. در روش PSI حداکثر مقدار فرونشست ۱۵/۹ سانتیمتر و در روش SBAS 8/9 سانتیمتر برآورد شده است.



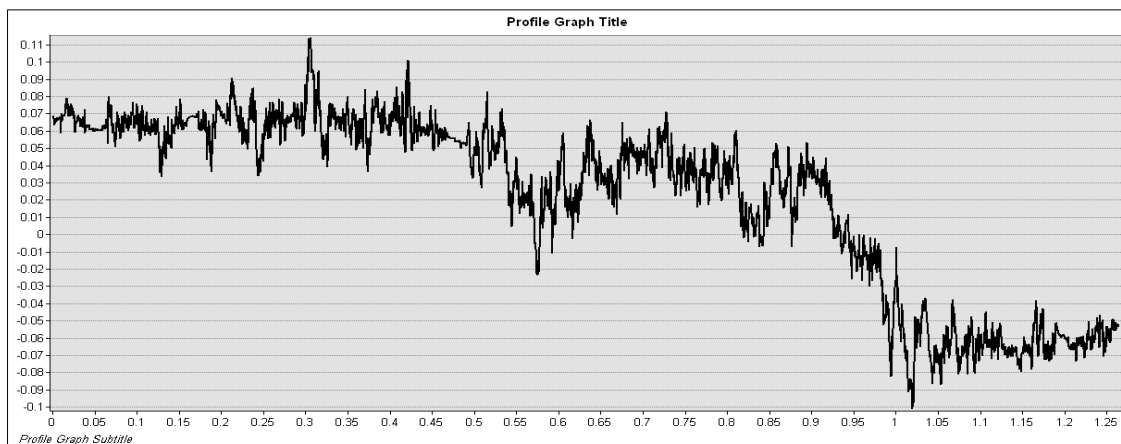
شکل ۲. میزان فرونشست دشت هریس بر حسب متر به روش PSI (۲۰۱۶-۲۰۱۹)



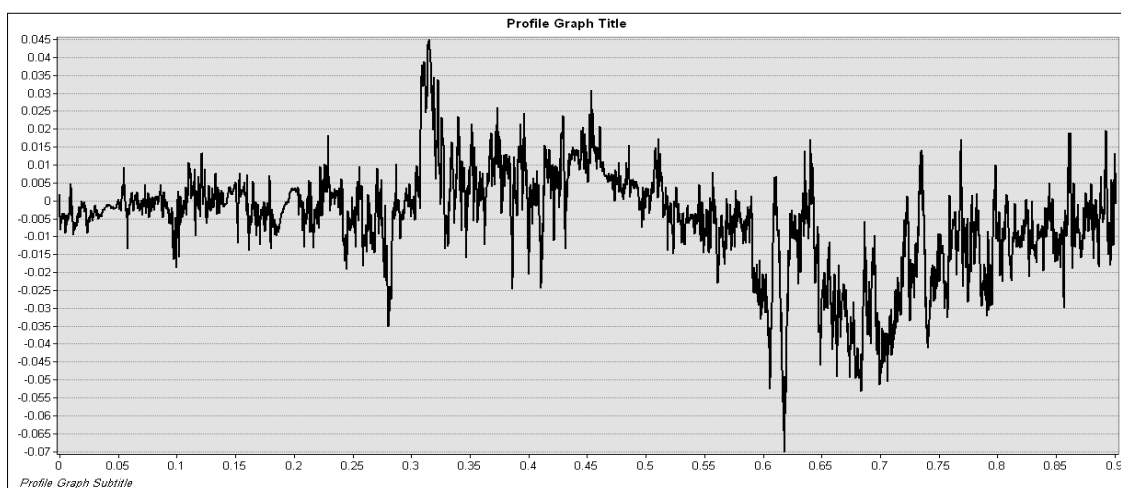
شکل ۳. میزان فرونشست دشت هریس بر حسب متر به روش SBAS (۲۰۱۶-۲۰۱۹)

همچنین نمودارها میزان تغییرات را در بازه زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۱۹ بر اساس هر دو روش نشان می‌دهند که بیشترین

میزان نشست در بخش مرکزی به طرف جنوب - جنوب غربی است به مقدار حدود ۱۶ سانتیمتر به روش PSI است. شکل ۴ و شکل ۵ نشان‌دهنده نمودار میزان فرونشست در سال‌های (۲۰۱۶ تا ۲۰۱۹) است. پایین رفتن خط نمودار در سال ۲۰۱۹ در (شکل ۴) نسبت به (شکل ۵) در سال ۲۰۱۶ نشانگر وقوع فرونشست در منطقه می‌باشد که محور X نشانگر فاصله و محور Y نشانگر مقدار جابه‌جایی محدوده موردنظر بر حسب متر است.



شکل ۴. نمودار فرونشست دشت هریس به روش PSI بر حسب m (۲۰۱۶-۲۰۱۹)



شکل ۵. نمودار فرونشست دشت هریس به روش SBAS بر حسب m (۲۰۱۶-۲۰۱۹)

ارزیابی فرونشست به روش PSI

مقادیر حاصل از این روش که حداکثر فرونشست را به مقدار حدود ۱۶ سانتیمتر نشان می‌دهد. باتوجه به مقادیر انحراف معیار آن که نسبت به روش SBAS مقدار بزرگ‌تر است نشان می‌دهد که مقادیر حالت غیرقابل قبول داشته و همچنین بازدهی منطقه و تحلیل چاه‌های پی‌زومتری نیز موید این مطلب است. هرچند برای اثبات دقیق این موضوع نیازمند برداشت داده‌های GPS^۱ چند فرکانسه می‌باشد که چنین داده‌هایی در دسترس نبوده و ملاک انتخاب بهترین روش مقادیر انحراف معیار این روش‌هاست.

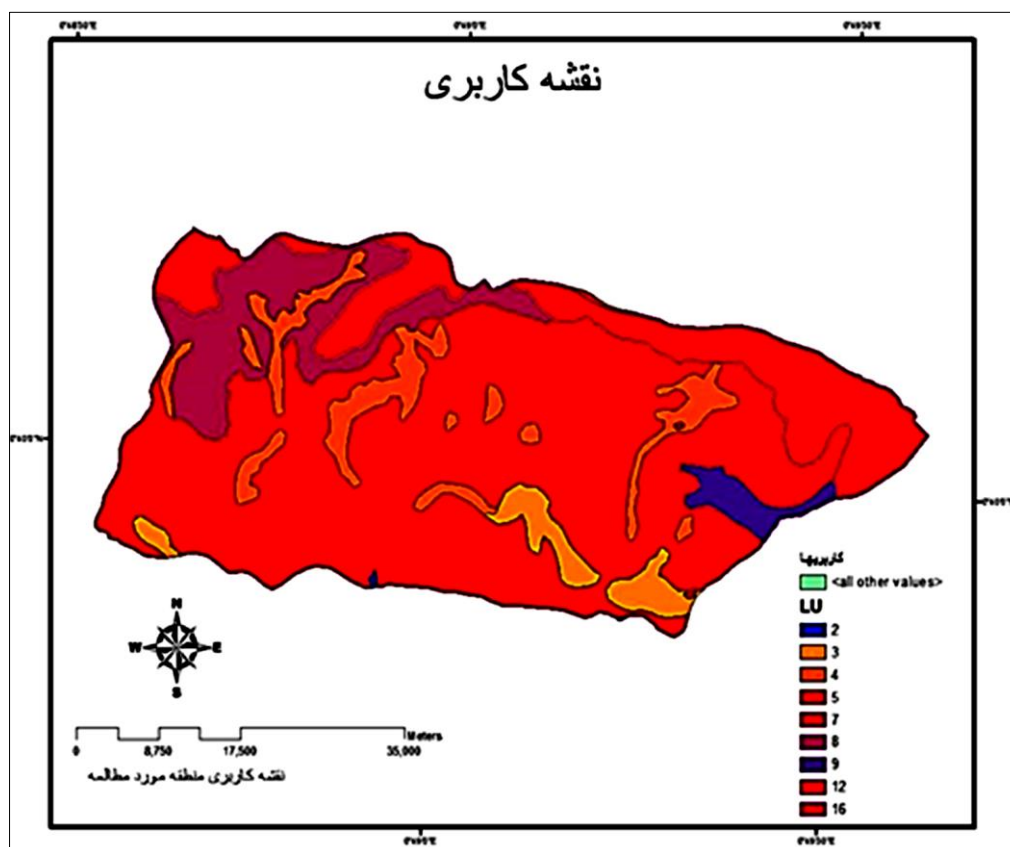
نتایج ارزیابی فرونشست به روش SBAS

همان‌طور که ملاحظه می‌شود نتایج به دست آمده از طریق SBAS دارای انحراف معیار کمتری نسبت به روش قبلی است که

هدف اصلی در تحلیل سری زمانی وارون کردن تداخل نگاشت‌ها برای دستیابی به میزان تغییر شکل در زمان‌های دریافت تصاویر با استفاده از روش کمترین مربعات است.

تولید نقشه کاربری اراضی

جهت تحقیق در این مورد که بیشترین تغییرات فرونشست در چه کاربری اتفاق افتاده است. با استفاده از تصویر سنتینل ۲- با قدرت تفکیک ۱۰ متر ابتدا اقدام به تولید یک تصویر با قدرت تفکیک مکانی بالا جهت تفکیک بهتر کاربری‌ها از طریق تصاویر شد (خزاعی و همکاران، ۱۳۹۸). سپس با استفاده از روش سگمنت سازی چندگانه اقدام به سگمنت تصاویر با مقدار ۰/۶ و فشردگی ۴/ شد این مرحله از مهم‌ترین مراحل اجرای طبقه‌بندی تصاویر به روش شی گراست (فیضی زاده و هلالی، ۱۳۸۹). برای کاربری‌های پهنه آبی، کشاورزی، جنگل، باغ، مسکونی، بایر و مرتع به ترتیب ۹۰، ۳۸۰، ۵۰۰، ۵۹، ۲۰۰، ۸۵ و ۷۰ نمونه آموزشی توسط بازدید میدانی، استفاده از نقشه‌های موجود، ایجاد تصاویر رنگی کاذب انتخاب شدند در جدول ۲ مفاهیم کاربری‌های آورده شده است. تصاویر پس از انجام پیش پردازش‌های لازم، با استفاده از الگوریتم نزدیک ترین همسایه و روش شی پایه در نرم افزار اکوگنیشن طبقه‌بندی شدند. نتایج در شکل ۶ ارائه شدند.



شکل ۶. نقشه پوشش زمین منطقه مورد مطالعه (بر حسب مترمربع)

جدول ۲. راهنمای آن در شکل شماره ۶ موجود است.

۱۶	۱۲	۹	۸	۷	۵	۴	۳	۲
اراضی شهری	جنگل نیمه انبوه	مراتع ضعیف	مراتع متوسط	مراتع خوب	اراضی زراعی دیم	مجتمع درختی	اراضی زراعت آبی مخلوط زراعت و باغ	زراعت آبی

همان‌طور که در شکل ۶ ملاحظه می‌کنید کاربری‌ها بر حسب میزان فرونشست به ترتیب اولویت در رنگ‌های مجزا طبقه‌بندی شده‌اند.

زراعت آبی: زراعت آبی زمین‌هایی است که از طریق آبیاری دائمی و از طریق آب‌های زیرزمینی و سطحی انجام می‌گیرد.

اراضی زراعت آبی مخلوط زراعت و باغ: زراعت مخلوط یعنی کشت بیش از یک نبات در یک سال مجتمع درختی: به بزرگ‌ترین مرکز فروش گل‌و گیاه

اراضی زراعی دیم: دیم‌کاری نوعی کشاورزی مخصوص مناطق خشک است که در آن تنها بارش‌ها تأمین‌کننده آب موردنیاز کشتزارها است.

مراتع خوب: همه سطح این مراتع را گیاه فراگرفته است و جای خالی و بدون گیاه در آن بسیار کم است.

مراتع متوسط: پوشش گیاهی این مراتع مناسب نیست و فقط برای چرای تعداد کمی از دام‌ها کافی است.

مراتع ضعیف: پوشش گیاهی زمین‌های این مراتع خیلی کم است و اکثر گیاهانی که در این زمین‌ها می‌رویند برای دام غیرقابل مصرف است.

مرتع: به دشت‌های پر از گیاه و گل و تپه‌ها و کوه‌های سرسبز و علفزارها و بوته‌زارهای وسیع گفته می‌شود.

جنگل نیمه انبوه: عبارت است از جنگل‌هایی که تراکم تاج پوشش آنها ۴۰ تا ۷۰ درصد باشد.

اراضی شهری: اراضی شهری زمین‌هایی است که در محدوده قانونی شهرها و شهرک‌ها قرار دارد.

جدول ۳. مجموع فرونشست در هر کدام از کاربری‌های موجود در منطقه

کد*	لایه	مجموع
۱	مرتع	-۶۸۳۷/۹۱۳۸۷۱
۲	مرتع - دیم	-۴۱۱۶/۷۱۷۰۲۱
۳	کشاورزی آبی	-۲۷۵۰/۹۶۶۰۳۶
۴	مرتع ۲	-۴۷۵/۷۸۳۱۴۹
۵	کشاورزی - باغ	-۱۹/۱۹۲۴۶۸
۶	بایر	-۴۷۱۷/۹۶۸۲۴۱۴
۷	مرتع ۱	-۵۵۹۶/۴۱۸۴۰۷
۸	بایر - شور	-۸۲/۰۷۰۶۸۹
۹	شور	-۲۰/۴۴۸۴۲۵
۱۰	باغ - کشاورزی	-۳۲/۲۷۱۷۹۸
۱۱	مسکونی	-۸۸/۶۹۹۸۴۸
۱۲	آب	-۴۳/۸۷۴۹۶۳

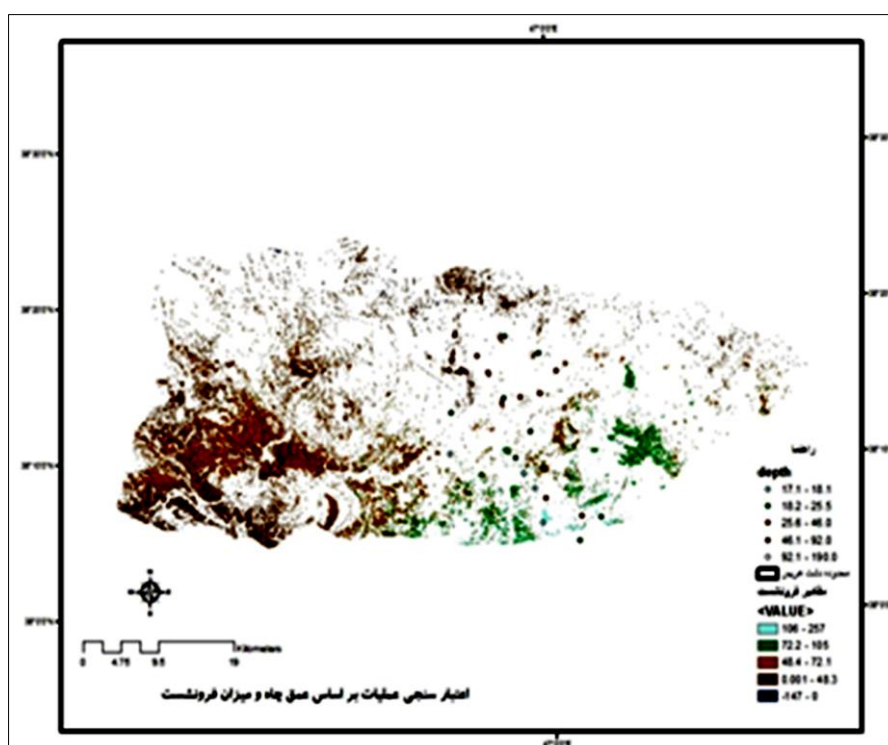
در جدول ۳ مجموع فرونشست در هر کاربری استخراج شده و مقادیر آن بر حسب مترمربع به روش PSI و SBAS محاسبه گردید؛ سپس آهنگ میانگین فرونشست در این بازه زمانی محاسبه شد. بیش‌ترین مقدار فرونشست در این بازه زمانی حدود ۱۶ سانتیمتر در سال به روش PSI در حدود ۱۰ سانتیمتر به روش SBAS است که مربوط به مراتع است و همچنین کمترین فرونشست مربوط به مناطق مسکونی می‌باشد.

عمق چاه‌های پیزومتری برای اعتبارسنجی عملیات

نظر به اینکه فرضیه این تحقیق بر این اصل استوار بود که افزایش میزان استخراج آب‌های زیرزمینی باعث و عامل فرونشست در منطقه است لذا ارتباط بین عمق چاه‌های منطقه و میزان فرونشست در آن منطقه می‌تواند شاخص مناسبی برای ارزیابی صحت عملیات باشد؛ لذا آمار چاه‌های پیزومتری منطقه از سازمان آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی دریافت شده و در جدول ۴ نمایش داده شده است و پس از تبدیل آن به فرمت پایگاه‌داده نرم‌افزار Arc Map با استفاده از توابع تحلیل فضایی زونال بین مقادیر فرونشست و عمق چاه‌های پیزومتری ارتباط برقرار گردید. (شکل ۷) با تحلیل همبستگی رگرسیون بین این دو عامل مقدار همبستگی مثبت ۸۷ درصد بین آنها مشاهده گردید و مفهوم آن این است که هر مکانی که فرونشست زیادی دارد در آن مکان عمق چاه‌های پیزومتری نیز بیشتر است. این یافته صحت فرضیه این تحقیق مبنی بر وجود ارتباط مستقیم و قوی بین فرونشست و میزان برداشت آب‌های زیرزمینی را اثبات می‌نماید.

جدول ۴. عمق چاه پیزومتري

ایستگاه	میانگین تغییرات سطح آب بر حسب متر	Yutm	Xutm
بیلوردی	۲۷.۱	۴۲۳۴۰۱۰	۶۸۴۱۸۲
گوراوان	۸۶.۳	۴۲۳۶۳۱۳	۶۸۷۳۱۰
هریس	۶۵.۱۶	۴۲۳۶۶۹۶	۶۸۵۴۷۲
شمال هریس	۶۶.۷	۴۲۳۷۷۲۰	۶۸۶۴۹۱
شیخ رجب	۲.۲	۴۲۲۶۵۲۷	۶۶۲۳۶۵
احمدآباد	۶.۲	۴۲۳۱۴۱۳	۶۶۲۵۴۷
ینگجه	۵۷.۶	۴۲۴۰۶۰۱	۶۶۲۹۲۰
کشاوری بیلوردی	۲۵.۱۵	۴۲۳۶۶۰۳	۶۶۴۲۵۹
داخل بیلوردی	۶۲.۱۶	۴۲۳۶۶۰۳	۶۶۳۸۲
گلدیر	۳۱.۱	۴۲۳۶۱۹۱	۶۶۷۱۰۲
سارای	۴.۱۴	۴۲۳۳۲۰۳	۶۶۹۱۵۵۷
نمرور	۶۶.۲	۴۲۴۰۵۴۵	۶۶۹۲۲۵
اربطان	۲۵.۶	۴۲۲۶۰۹۴	۶۷۰۶۸۳
پارام	۸۲.۲۴	۴۲۳۳۲۸۷۴	۶۷۱۲۶۵
بخشایش	۶۲.۲	۴۲۲۴۲۰۶	۶۷۱۶۷۵



شکل ۷. نقشه اعتبارسنجی

بحث

به منظور بررسی فرونشست منطقه مورد مطالعه از دو روش SBAS و PSI استفاده شد و از ۲۱ تصویر Sentinel در بازه زمانی (۲۰۱۶ تا ۲۰۱۹) استفاده گردید و همچنین عمق چاههای تراز هم مورد بررسی قرار گرفت که نشان می دهد منطقه مورد مطالعه علی رغم نوسانات فصلی دارای روند نزولی است که بر حسب میلی متر ارائه شده است؛ لذا آمار چاههای پیزومتري منطقه از سازمان آب منطقه ای استان آذربایجان شرقی دریافت شده و پس از تبدیل آن به فرمت پایگاه داده نرم افزار Arc Map با استفاده از توابع تحلیل فضایی زونال بین مقادیر فرونشست و عمق چاههای پیزومتري ارتباط برقرار گردید. (شکل

شماره ۷). سرانجام، سری زمانی به دست آمده از روش SBAS و PSI با یکدیگر مقایسه شدند و مشخص گردید که روش SBAS قابلیت بیشتری در نشان دادن فرونشست منطقه دارا است که دلیل آن وجود انحراف معیار کمتری می‌باشد با تحلیل همبستگی رگرسیون بین این دو عامل مقدار همبستگی مثبت ۸۷ درصد بین آنها مشاهده گردید و مفهوم آن این است که هر مکانی که فرونشست زیادی دارد در آن مکان عمق چاه‌های پیرومتری نیز بیشتر است منظور از عمق چاه، عمق ایستایی چاه است که نشان دهنده این است که برای استخراج آب به عمق‌های پایین‌تر کشیده شده است و این به مفهوم خالی شدن سفره آب زیرزمینی و نهایتاً پدیده فرونشست خواهد بود و نتایج سری زمانی، نشان داد که بیشترین فرونشست مربوط به مراتع است که دلیل آن استفاده بیش از حد از آب‌های زیرزمینی می‌باشد که به ترتیب اولویت در جدول شماره ۲ نمایش داده شده است که بعد از مراتع، کشاورزی در اولویت دوم قرار گرفته است و مناطق مسکونی دارای فرونشست کمتری نسبت به مناطق دیگر می‌باشد. علت آن را می‌توان به تغذیه آبخوان دشت هریس در این دوره به دلیل بارندگی نسبت داد. با توجه به اینکه بیشترین فرونشست مربوط به مراتع است می‌توان نتیجه گرفت که روش SBAS با توجه به تعداد اندک تصاویر در یک بازه زمانی ۴ سال، توانسته است میزان فرونشست را با دقت بسیار مطلوبی نسبت به روش PSI محاسبه کند و همچنین فرونشست زیادی در بخش مرکزی به طرف جنوب، جنوب غربی است. همچنین استفاده از عامل نرم‌کنندگی بهینه در سری زمانی خطای ناشی از اتمسفر، اثرات مداری و بازایی فاز را به طور قابل توجهی بهبود بخشیده است. البته لازم به ذکر است که هنوز هم خطاهای اتمسفری و غیره در تداخل نگاشت‌ها وجود دارد که برای تعدیل آنها می‌توان از مدل اتمسفری و یا سنجنده‌هایی مانند MODIS بهره گرفت.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، قابلیت روش تحلیل سری زمانی تداخل سنجی SBAS و PSI در تعیین نرخ و الگوی منطقه تحت تأثیر فرونشست در دشت هریس به تصویر کشیده شده است. دشت هریس به دلیل استخراج بیش از حد آب‌های زیرزمینی دچار فرونشست شده است. برای محاسبه سری زمانی فرونشست با استفاده از روش SBAS از ۲۱ تصویر راداری سنتینل ۱ در بازه زمانی (۲۰۱۶-۲۰۱۹) استفاده شد که پردازش سری زمانی SBAS، PSI روی آنها صورت گرفت بعد از حذف منابع خطا از روی نتایج این سری‌های زمانی مشخص شد که فرونشستی پیوسته و قابل ملاحظه‌ای در این منطقه در حال اتفاق افتادن است. به منظور کاهش اثرات اتمسفر، خطاهای باقیمانده مداری، نوفه و خطای مربوط به عمل بازایی فاز، یک شرط نرم‌کنندگی در سری زمانی مورد استفاده قرار گرفته است که این امر با اعمال یک عامل نرم‌کنندگی بهینه تحقق یافت. سپس آهنگ میانگین فرونشست در این بازه زمانی محاسبه شد. بیشترین مقدار فرونشست در این بازه زمانی مربوط به مراتع است که حدود ۱۶ سانتی‌متر به روش PSI و حدود ۱۰ سانتی‌متر به روش SBAS می‌باشد. همچنین برای اعتبارسنجی روش‌ها از عمق سطح ایستایی چاه‌های پیرومتری منطقه استفاده گردید. مقدار انحراف معیار بالای روش PSI که نشان دهنده پراکندگی نتایج است و همچنین عدم انطباق بالای آن با تغییرات سطح ایستایی چاه‌ها در مقایسه با روش SBAS دارای انحراف معیار کمتری نسبت به روش قبلی است و انطباق یا همبستگی بیشتری با تغییرات سطح ایستایی چاه‌ها دارد نشان می‌دهد که روش SBAS در این منطقه دارای اعتبار بیشتری نسبت به روش PSI می‌باشد. نتایج طبقه‌بندی شی پایه به روش نزدیک‌ترین همسایه نشان داد که تصاویر سنتینل ۲ با صحت کل ۸۹٪ و ضریب کاپا ۰/۸۶ عملکرد خوبی جهت تولید نقشه‌های کاربری اراضی دارد.

نتایج فرونشست نشان داد که بخش مرکزی و جنوب غربی دشت هریس دارای نشست بیشتری است. از علل فرونشست در این منطقه می‌توان به استفاده بی‌رویه از منابع آب‌های زیرزمینی و کاهش بارندگی که منجر به افت سطح آب‌های زیرزمینی گردیده است عنوان کرد. در عین حال روش SBAS پوشش وسیع و پیوسته‌ای از منطقه فراهم می‌کند که این امر، تعیین پهنه منطقه تحت تأثیر فرونشست را ممکن می‌سازد و همچنین مقایسه بین وسعت و الگوی فرونشست اتفاق افتاده در این منطقه، حاصل از نتایج تکنیک تداخل سنج راداری و موقعیت و تراکم چاه‌های برداشت آب‌های زیرزمینی در این دشت نشان می‌دهد که فرونشست درست در همان مناطقی که تراکم این چاه‌ها زیاد است اتفاق افتاده است. سری‌های زمانی

تغییرات سطحی مربوط به نواحی که در آن‌ها فرونشست رخ داده نشان می‌دهد که در سال‌های اخیر روند فرونشست منطقه سرعت بالایی پیدا کرده و در حال رشد است؛ بنابراین برای جلوگیری از سرعت رشد این پدیده در این مناطق و خسارت به ساختار زیربنایی و تحمیل هزینه‌های اقتصادی زیاد، نیازمند مدیریت درست برداشت از منابع آب‌های زیرزمینی و سایر عوامل تأثیرگذار در فرونشست زمین هستیم.

منابع

- خزاعی، مرضیه؛ زارع، محمد؛ مختاری، محمدحسین، رشتیان، آناهیتا؛ عربی علی‌آباد، فهیمه (۱۳۹۸). مقایسه دقت انواع روش‌های طبقه‌بندی در تهیه نقشه کاربری اراضی. *کاوش‌های جغرافیایی مناطق بیابانی*، ۷ (۱)، ۱۶۵-۱۷۸.
- رضایی مقدم، محمدحسین؛ رضایی بنفشه درق، مجید؛ فیضی زاده، بختیار؛ نظم‌فر، حسین (۱۳۸۹). طبقه‌بندی پوشش اراضی بر اساس تکنیک شی‌گرا در تصاویر ماهواره‌ای. (مطالعه موردی: استان آذربایجان غربی). *پژوهش‌های آب‌بخیزداری*، ۲۳ (۲)، ۱۹-۳۲.
- عزت آبادی پور، حمید (۱۳۹۵). معرفی تصاویر ماهواره سنتینل ۲، سومین کنفرانس سراسری نوآوری‌های اخیر در مهندسی عمران، معماری و شهرسازی. تهران: مؤسسه آموزش عالی نیکان.
- عظیمی بخار کلایی، احمد؛ جمالی، علی‌اکبر؛ سید زین‌العابدین، حسینی (۱۳۹۶). مقایسه دقت طبقه‌بندی سری زمانی لندست در پایش تغییرات کاربری اراضی. *کاربرد سنجش‌ازدور و GIS در علوم منابع طبیعی*، ۸ (۲)، ۳۳-۴۷.
- فیضی زاده، بختیار؛ هلالی، حسین (۱۳۸۹). مقایسه روش‌های پیکسل پایه، شی‌گرا و پارامترهای تأثیرگذار در طبقه‌بندی پوشش/ کاربری اراضی استان آذربایجان غربی. *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی (پژوهش‌های جغرافیایی)*. ۷۳-۸۴ (۷۱) ۴۲.

References

- Alessandro, F., Andrea M., Guarnieri, C. P., & Fabio, R. (2007). Interferometric SAR image processing and interpretation, European Space Agency. 1-40.
- Azimi Najarkolaei, A., Jamali, A. A., & Hosseini, S.Z.A. (2017). Comparing The accuracy of time series classification of landsat images in monitoring land use change. *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 8 (2), 33-47 (In persian).
- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., & Sansosti, E. (2002). A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 40, 2375-2383.
- Cao, Y., Wei, Y. N., Fan, W., Peng, M., & Bao, L. (2020). Experimental study of land subsidence in response to groundwater withdrawal and recharge in Changping District of Beijing. *PloS one*, 15(5), e0232828.
- Cigna, F., Osmanoğlu, B., Cabral-Cano, E., Dixon, T. H., Ávila-Olivera, J. A., Garduño-Monroy, V. H., & Wdowinski, S. (2012). Monitoring land subsidence and its induced geological hazard with Synthetic Aperture Radar Interferometry: A case study in Morelia, Mexico. *Remote Sensing of Environment*, 117, 146-161.
- Daniel, R. C., Maisons, C., Carnec, S., Mouelic, L., King, C., & Hosford, S. (2003). Monitoring of slow ground deformation by ERS radar interferometry on the Vauvert salt mine (France) Comparison with ground-based measurement. *Remote Sensing of Environment*, 88(4), 468-478.
- Devanthery, N., Crosetto, M., Monserrat, O., Cuevas-González, M., & Crippa, B. (2018). Deformation monitoring using Sentinel-1 SAR data. Paper presented at the Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings.
- Djamour, Y., Vernant, P., Nankali, H. R., & Tavakoli, F. (2011). NW Iran-eastern Turkey present-day kinematics: results from the Iranian permanent GPS network. *Earth and Planetary Science Letters*, 307(1-2), 27-34.
- Dong, S., Samsonov, S., Yin, H., Ye, S., & Cao, Y. (2014). Time-series analysis of subsidence

- associated with rapid urbanization in Shanghai, China measured with SBAS InSAR method. *Environmental earth sciences*, 72(3), 677-691.
- Ferretti, A., Fumagalli, A., Novali, F., Prati, C., Rocca, F., & Rucci, A. (2011). A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 49(9), 3460-3470.
- Ferretti, A., Fumagalli, A., Novali, F., Prati, C., Rocca, F., & Rucci, A. (2011). A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 49(9), 3460-3470.
- Feyzizadeh, B., & Helali, H. (2010). Omparison pixel - based, object - oriented methods and effective parameters in classification land cover / land use of west province azerbaijan. *Physical Geography Research*, 42 (71), 73-84 (In persian).
- He, X. C., Yang, T. L., Shen, S. L., Xu, Y. S., & Arulrajah, A. (2019). Land subsidence control zone and policy for the environmental protection of Shanghai. *International journal of environmental research and public health*, 16(15), 2729.
- Khazaei, M., Zare, M., Mokhtari, M.H., Rashtian, A., & Arabi Aliabad, F. (2019). Comparison of different classification methods in terms of accuracy for land use mapping: acase study of the city of yazd., *Geographical Research on Desert Areas*, 7 (1), 165-178 (In persian).
- Masoud, A. A., & Koike, K. (2011). Morphotectonics inferred from the analysis of topographic lineaments auto-detected from DEMs: Application and validation for the Sinai Peninsula, Egypt. *Tectonophysics*, 510(3-4), 291-308.
- Miles, S. B. (2011). Participatory model assessment of earthquake-induced landslide hazard models. *Natural hazards*, 56(3), 749-766.
- Qiang, S., Xuejun, Q., Qi, W., Jingfa, Z., Kai, T., & Shaomin, Y. (2011). Co-seismic deformation of the 2010 Mw6. 9 Yushu earthquake from InSAR images. *Geodesy and Geodynamics*, 2(4), 16-20.
- Raucoules, D., Bourguine, B., De Michele, M., Le Cozannet, G., Closset, L., Bremmer, C., ... & Engdahl, M. (2009). Validation and intercomparison of Persistent Scatterers Interferometry: PSIC4 project results. *Journal of Applied Geophysics*, 68(3), 335-347.
- Rezaeimogadam, M.H., Rezaeibanfshe, M., Feizadeh, B., & Nazmfar, H. (2010). Land Use /Land Cover classification based on object-oriented technique and satellite image case study: west azerbaijan provinces. *watershed management research*, 23 (2), 19-32 (in persian).
- Sedaghat, M., Ghazifard, A., Ajalloeian, R., & Shirani, K. (2020). Evaluation of the subsidence hazard due to groundwater withdrawal in Isfahan Metropolis. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38(1), 297-318.
- Tapete, D., Fanti, R., Cecchi, R., Petrangeli, P., & Casagli, N. (2012). Satellite radar interferometry for monitoring and early-stage warning of structural instability in archaeological sites. *Journal of Geophysics and Engineering*, 9(4), S10-S25.
- Terzaghi, K. (1925). Principles of soil mechanics, IV—Settlement and consolidation of clay. *Engineering News-Record*, 95(3), 874-878.
- Tobita, M., Nishimura, T., Kobayashi, T., Hao, K. X., & Shindo, Y. (2011). Estimation of coseismic deformation and a fault model of the 2010 Yushu earthquake using PALSAR interferometry data. *Earth and Planetary Science Letters*, 307(3-4), 430-438.
- Zebker, H. A., Rosen, P. A., Goldstein, R. M., Gabriel, A., & Werner, C. L. (1994). On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry: The Landers earthquake. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 99(B10), 19617-19634.

