



Ferdowsi University of Mashhad

CERTIFICATE

Article Acceptance & Presentation
The 2st International Conference of GIScience:
Basis & Trans/Interdisciplinary Applications

6th FUM-GIS Day

Certifies that article titled:

**Land Subsidence Assessment in Kashmar Plain Using the Sentinel-1
Radar Interferometry Techniques**

By:

Amin Moslemzadeh, Hadi Memarian khalilabad, Seyed Mohammad Tajbakhsh Fakhrabadi , Morteza Akbari

Has accepted in:

The 2st International Conference of GIScience.Basis & Trans/Interdisciplinary Applications
20 December 2021, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

Scientific Secretary
Dr. Masoud Minaei



استفاده از تداخل سنجی راداری داده های ماهواره سنتینل-۱ در ارزیابی فرونشست زمین در دشت کاشمر

امین مسلم زاده، کارشناس ارشد علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشگاه بیرجند *، آدرس الکترونیکی:

Aminmoslemzadeh7@gmail.com

هادی معماریان خلیل آباد، دانشیار گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه بیرجند،

آدرس الکترونیکی: hadi_memarian@birjand.ac.ir

سید محمد تاجبخش فخرآبادی، دانشیار گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه بیرجند،

آدرس الکترونیکی: tajbakhsh.m@birjand.ac.ir

مرتضی اکبری، استادیار، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد، آدرس الکترونیکی:

m_akbari@um.ac.ir

چکیده

پدیده فرونشست به عنوان یک مخاطره محیطی توسط عوامل مختلف طبیعی و انسانی به وقوع می پیوندد که در مقیاس جهانی روش های مختلفی برای ارزیابی و تعیین میزان فرونشست زمین وجود دارد. در این پژوهش فرونشست دشت کاشمر به عنوان بخشی از حوضه آبریز مرکزی و با مساحتی در حدود ۶۳۴۰۰ هکتار به روش تداخل سنجی راداری در طی سال های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۱ مورد ارزیابی قرار گرفت. جهت انجام این پژوهش از دو تصویر ماهواره سنتینل ۱، تصویر مبنا مربوط به تاریخ ۲۰۱۷/۰۴/۰۴ و تصویر متغیر مربوط به تاریخ ۲۰۲۱/۰۳/۲۵ به عنوان ورودی به نرم افزار SNAP معرفی شدند. پردازش تصاویر در شش گام انجام شد شامل؛ ورود داده های خام به نرم افزار، تبدیل آنها به تصاویر مختلط منفردنگر، ثبت هندسی تصاویر، تهیه تداخل نما، حذف اثر توپوگرافی و فیلترگذاری و بازیابی فاز. نتایج نشان داد در مناطق مختلف دشت کاشمر و در مدت ۴ سال، منطقه مورد مطالعه به میزان ۴۶ تا ۸۴ سانتیمتر دچار فرونشست شده است. بطوریکه سالانه در این مناطق بطور متوسط بین ۱۱/۵ تا ۲۱ سانتیمتر فرونشست اتفاق افتاده است. الگوی کامل فرونشست دشت کاشمر و بررسی پروفیل ها در جهات مختلف نشان داد این روند جهت شرقی-غربی و شمالی-جنوبی داشته است و حداکثر فرونشست مربوط به بخش های مرکزی و اطراف شهر کاشمر است. باتوجه به اینکه گسل درونه که از ساخت های مهم زمین شناسی منطقه است و آب زیر زمینی به سمت این گسل متمایل شده، بنابراین بهره برداری بی رویه از سفره در این محدوده می تواند سبب افت شدید در سطح آب زیرزمینی شود که جهت فرونشست را توجیه پذیر خواهد کرد. نتایج بدست آمده از این پژوهش بیانگر آنست که فرونشست زمین، دشت کاشمر را درحالت بحرانی قرار داده و در صورت عدم مدیریت به موقع و مناسب، این مخاطره محیطی می تواند خسارات جبران ناپذیری را ایجاد نماید.

واژه های کلیدی: فرونشست زمین، دشت کاشمر، سنتینل، مدیریت منابع آب، تخریب سرزمین

Land subsidence assessment in Kashmar plain using the Sentinel-1 radar interferometry techniques

Amin Moslemzadeh (MSc., Watershed Management Science and Engineering, University of Birjand). Email: Aminmoslemzadeh7@gmail.com

Hadi Memarian KhalilAbad (Associate Professor, Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Environment, University of Birjand).

Email: hadi_memarian@birjand.ac.ir

Seyed Mohammad Tajbakhsh Fakhrabadi (Associate Professor, Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Environment, University of Birjand).

Email: Tajbakhsh.m@birjand.ac.ir

Morteza Akbari (Assistant Professor, Department of Desert Areas Management, Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad).

Email: m_akbari@um.ac.ir

Abstract

The phenomenon of land subsidence as an environmental hazard occurs by various natural and human factors. There are different methods on global scale to assess the extent of land subsidence. In this study, the subsidence of Kashmar plain as a part of central basin of Iran with an area of 63400 ha was evaluated by radar interferometry method during the years 2017 to 2021. To conduct this research, two images of Sentinel-1 satellite, i.e. the base image (Master) dated 04/04/2017 and the variable image (Slave) dated 03/25/2021 were introduced to the SNAP software. Image processing includes six steps; 1- Raw data converted into single-dimensional mixed images, 2- Geometric registration, 3- Preparation of the interferogram, 4- Removal of topographic effect, 5- Filtering and 6- Phase recovery. The results showed that in different areas of Kashmar plain during 4 years, the study area has suffered from 46 to 84 cm of land subsidence; so that the annual subsidence has been recorded between 11.5 and 21 cm. The subsidence pattern of Kashmar plain and the study of profiles in different directions showed that this trend had an east-west and north-south direction and the maximum subsidence is related to the central parts and around the city of Kashmar. The results of this study indicate that these records of land subsidence pushes the Kashmar plain in a critical state and if not managed in a timely and appropriate manner, this environmental hazard can cause irreparable damages.

Keywords: Land subsidence, Kashmar plain, Sentinel, Water resources management, Land degradation

۱- مقدمه

در دهه های اخیر عوامل مختلف طبیعی و انسانی همچون تغییر اقلیم، خشکسالی های مستمر و طولانی مدت، برداشت بی رویه از سفره های آب های زیرزمینی، و تغییر کاربری اراضی باعث تخریب سرزمین شده و خسارات زیست محیطی فراوانی ایجاد نموده است (اکبری و همکاران، ۲۰۱۹).

خشکسالی ها به دلیل کمبود بارش کوتاه مدت ایجاد می شوند، بطور مثال در یک منطقه، بروز خشکسالی آب زیرزمینی نسبت به سایر خشکسالی ها در بازه زمانی طولانی تری رخ می دهد. خشکسالی های هواشناسی (تبخیر زیاد و کمبود بارش) یا خشکسالی کشاورزی (کمبود رطوبت خاک) می تواند باعث خشکسالی آب زیرزمینی شود. یکی از دلایل بالارفتن میزان خشکسالی، می تواند دخالت بشر باشد. به طوریکه تاثیر تغییر کاربری اراضی بر تبخیر و تعرق، اثر برداشت آب زیرزمینی بر سطح آن و زهکشی زمین بر افزایش تخلیه سیستم آب سطحی را می توان موثر دانست که این موارد باعث کاهش تغذیه سفره آب زیرزمینی و دلیلی بر وقوع خشکسالی آب زیرزمینی می باشد (نادریان فر و همکاران، ۱۳۸۹).

افزایش روز افزون برداشت از منابع آب زیرزمینی، بویژه از حوضه هایی که با رسوبات تحکیم نیافته آبرفتی یا نهشته های کم عمق دریایی انباشته شده اند منجر به فرونشست سطح زمین و یا به عبارتی نشست عمومی زمین می گردد (حسین زاده و نوحه گر، ۱۳۹۰). در این راستا افت سطح آب های زیرزمینی و فرونشست زمین ناشی از آن، از اهمیت بیشتری برخوردار است. در مناطق مختلف جهان پدیده فرونشست طی چندین دهه و سده های گذشته مورد بررسی قرار گرفته است که نشان دهنده تاثیر دخالت انسان در طبیعت و در نتیجه رخداد پدیده فرونشست بوده است. لین هو در سال ۲۰۱۹ به بررسی ارتباط فرونشست با استفاده از تصاویر سنتینل-۱ با گسل های زمین شناسی در پکن پرداخت که نتایج آن مطالعه نشان داد حداکثر فرونشست در شرق پکن رخ داده است و تا سال ۲۰۱۷ به بیش از ۱۱ سانتی متر در سال رسیده است. نورخاکیم (۲۰۱۴)، فرونشست کنترل شده توسط لیتولوژی و پاسخ آبخوان فصلی در حوضه باندونگ، اندونزی را توسط تداخل سنجی راداری بررسی کرد. تاریخچه فرونشست تخمین زده شده نشان داده است که فرونشست به طور مداوم به میزان ۴۵ سانتی متر تجمعی افزایش یافته و نرخ فرونشست خطی به ۱۲ سانتی متر در سال رسیده است. ژن گوا (۲۰۱۴) به ارزیابی فناوری DInSAR^۱ برای نظارت بر فرونشست ناشی از استخراج مکرر در مناطق کوهستانی پرداخت. نتیجه مطالعات ایشان نشان داد که استخراج مکرر باعث فرونشست مناطق کوهستانی شده است. در ایران نیز مدیریت و بهره برداری نادرست آب، منجر به تشدید پدیده تخریب سرزمین و ایجاد بحران آب شده است. رودخانه خاموش، خشکیدگی تالاب ها، چشمه ها و دریاچه ها، افت سطح آب زیرزمینی، ممنوعه و بحرانی شدن ۲۹۲ دشت در کشور، شور شدن خاک، نشست زمین و رخداد ریزگردها، عینی ترین آثار این موضوع است (جلیلی و همکاران، ۱۳۹۵). باگذشت زمان و با نصب سیستم های موقعیت یاب جهانی^۲ و رفتارسنجی سطح زمین، مقدار فرونشست و ارتباط آن با برداشت آب مشخص شده است (موسوی و همکاران، ۲۰۰۱).

رخداد فرونشست زمین که حاصل برداشت آب زیر زمینی بوده در بسیاری از مناطق و دشت های کشور از جمله در استان خراسان رضوی بر اثر برداشت بی رویه از آب های زیرزمینی در دشت های کاشمر (لشکری پور و همکاران، ۱۳۸۵)، نیشابور (لشکری پور و همکاران، ۱۳۸۶) و در دشت مشهد (لشکری پور و همکاران، ۱۳۸۴ و ۱۳۸۶) به وضوح قابل مشاهده است. علاوه بر مطالعات انجام شده می توان به برخی دیگر از مطالعات که با استفاده از روش های نوین تداخل سنجی راداری است اشاره نمود: اندرسون و همکاران (۲۰۰۸)، که داده های آن ها حاکی از وجود فرونشست در مسیر غربی-شرقی دشت کاشمر می باشد. لشکری پور و همکاران (۱۳۹۸)، در مطالعه ای با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری، اطلاعات فرونشست دشت کاشمر- بردسکن را بررسی کردند. نتایج آن ها نشان داد که در این بازه زمانی سالانه ۱۷ سانتی متر نشست در دشت کاشمر رخ داده است. کوه بنانی و همکاران (۱۳۹۷)، نیز در پژوهشی دیگر از تصاویر جدید ماهواره Sentinel-1 مربوط به سال های ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۷ برای بررسی نرخ فرونشست در دشت کاشمر استفاده کردند. نتایج این

1- Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar (DInSAR)

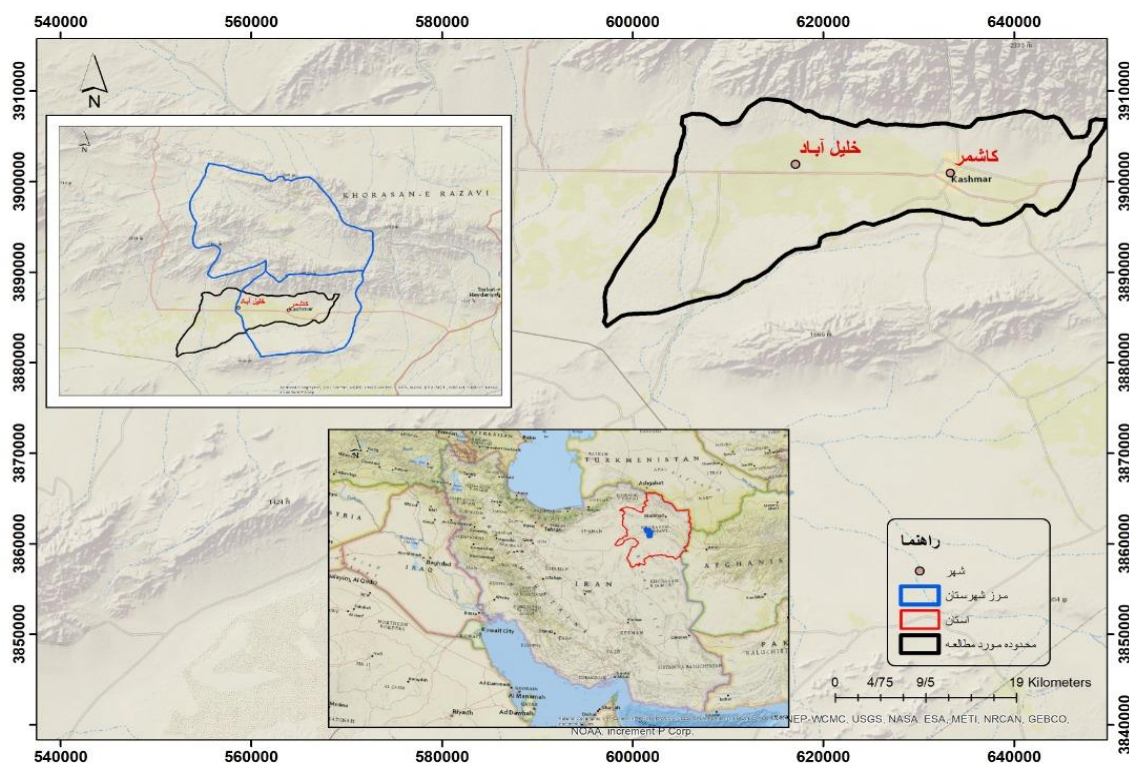
2- Global Positioning System, GPS

تحقیق نیز نشان داد که این منطقه در بیشترین حالت ۱۷ سانتیمتر در سال فرونشست دارد. هدف از انجام این پژوهش بررسی فرونشست دشت کاشمر به کمک فناوری سنجش از دور و تداخل سنجی راداری در جدیدترین بازه زمانی یعنی ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۱ است، که این مطالعات را سریع تر، دقیق تر و با هزینه های بسیار کمتر امکان پذیر می نماید. توسعه سریع کشاورزی همراه با رشد سریع جمعیت و افزایش نیاز آبی در دهه های اخیر سبب برداشت بی رویه و افت سطح آب زیرزمینی این دشت شده است. افت ممتد سطح آب زیرزمینی سبب شده تا این دشت در زمره دشت های بحرانی استان قرا گیرد. همچنین گزارش ها نشان می دهند خشکسالی در منطقه مورد مطالعه بیش از یک دهه است که ادامه داشته و کمبود بارندگی نیز نشان از استمرار این روند است. علاوه بر آن، امروزه شاهد خشک شدن قنات ها یکی پس از دیگری هستیم به طوری که ۷۰ درصد قنات ها بایر شده اند. دشت کاشمر با توجه به برداشت سالانه ۱۲۹ میلیون متر مکعب آب از سفره های زیرزمینی دارای کسری مخزن تجمعی بیش از ۳۵ میلیون متر مکعب است که نتیجه ی آن افت متوسط سالانه ۱/۲۱ متر سطح سفره در دوره آماری بوده است (نجف زاده و همکاران، ۱۳۹۳).

۲- داده ها و روش تحقیق

۲-۱ موقعیت جغرافیایی و خصوصیات منطقه مورد مطالعه

دشت کاشمر در شمال شرقی ایران در جنوب غربی استان خراسان رضوی و ۲۴۰ کیلومتری شهر مشهد قرار دارد. به عنوان بخشی از حوضه آبخیز کویر مرکزی در شمال کویر نمک با طول جغرافیایی ۵۷ درجه شرقی عرض جغرافیایی ۳۵ درجه شمالی در جنوب استان خراسان رضوی قرار دارد که در شکل ۱ نشان داده شده است. دشت کاشمر از شمال به محدوده مطالعاتی ریوش و از جنوب به محدوده مطالعاتی بجستان یونسی از شرق به ازغند و محولات فیض آباد و از غرب به محدوده مطالعاتی بردسکن و قاسم آباد بجستان محصور می شود (دفتر مطالعات پایه منابع آب، ۱۳۹۰). حوضه آبخیز دشت کاشمر دارای اقلیم نیمه خشک تا خشک است. در این منطقه ریزش باران عمدتاً محدود به فصل زمستان و بهار و معمولاً بارندگی ها به صورت رگباری همراه با رعد و برق و ایجاد سیلاب است. براساس آماربرداری سال ۹۷-۱۳۹۶ تعداد ۵۰۷ چاه عمیق و نیمه عمیق در این محدوده حفر شده است که میزان برداشت سالیانه از منابع آب زیرزمینی ۱۳۴/۳ میلیون متر مکعب می باشد. به عبارتی ۸۲ درصد از منابع تامین کننده آب زیرزمینی مربوط به چاه ها می باشد که حجم برداشت سالیانه از چاه ها ۹۸/۵ درصد است. در محدوده مورد مطالعه ۳۸۶ حلقه چاه در بخش کشاورزی، ۵۸ حلقه چاه در بخش شرب و بهداشت، ۲۸ حلقه چاه در بخش صنعت و ۳۵ حلقه چاه در بخش خدمات حفر شده است، که ۱۱۵/۴۲ میلیون متر مکعب آب استحصال از چاه ها در بخش کشاورزی، ۱۶/۰۴ میلیون متر مکعب به صورت شرب و بهداشت، ۰/۷۱ میلیون متر مکعب در بخش صنعت و ۲/۱۴ میلیون متر مکعب در بخش خدمات مورد استفاده قرار می گیرد که این حجم برداشت موجب افت سطح آب زیرزمینی، کاهش حجم استاتیک آبخوان و فرونشست در منطقه شده است (شرکت آب منطقه ای خراسان رضوی، ۱۳۹۸).



شکل ۱- موقعیت منطقه مطالعاتی در ایران و خراسان رضوی

۲-۲ داده‌های مورد نیاز

به منظور برآورد نرخ فرونشست حداقل دوتصویر ماهواره سنتینل-۱ از منطقه مورد مطالعه در تاریخ های متفاوت مورد نیاز است که منبع تهیهی تصاویر ماهواره ای پایگاه <https://scihub.copernicus.eu> است. در این پژوهش هدف انجام تداخل سنجی راداری و شناسایی پستی و بلندی ها، ناهمواری ها، شرایط توپوگرافی، میزان جابجایی و نهایتاً تهیه نقشه فرونشست می باشد. بدین منظور به کمک نرم افزار Snap که در واقع نرم افزاری برای پردازش تصاویر Sentinel-1 می باشد (زند و همکاران، ۱۳۹۸)، فرونشست زمین در منطقه ارزیابی و تخمین زده شد. برای تعیین میزان فرونشست در منطقه مورد نظر از دو تصویر ماهواره سنتینل ۱ استفاده شد: ۱- تصویر مبنا (master) در تاریخ ۲۰۱۷/۰۴/۰۴؛ ۲- تصویر متغیر (slave) مربوط به تاریخ ۲۰۲۱/۰۳/۲۵

۲-۳ روش انجام کار

تحلیل و پردازش داده ها در ۶ گام با انتقال داده ها به نرم افزار و تغییر دادن آنها به داده های مختلط منفرد نگر^۱ (SLC)، ثبت هندسی داده ها، تهیه تداخل نگار، حذف اثر توپوگرافی و قرار دادن فیلتر، برآورد فاز و زمین مرجع کردن انجام می شود (زند و همکاران، ۱۳۹۸). ورود داده های Sentinel-1 می تواند به صورت داده های خام و یا تصاویر مختلط منفرد نگر (SLC) باشد. در این پژوهش از داده های خام استفاده شد و توسط فایل های کالیبراسیون سنجنده و داده های مداری، تبدیل به داده های مختلط منفرد نگر انجام شد. در مرحله ثبت هندسی هر دو نوع تداخل سنجی مورد استفاده قرار می گیرد، این گام به دلیل زوایای دید مختلف و مسیرهای انحرافی رادار حالت بحرانی دارد. در طول ثبت تصاویر، یک تصویر متغیر است که نسبت به تصویر مرجع توجه می گردد. ثبت تصاویر شامل دو گام خواهد بود، اول جابه جایی هر پیکسل تصویر فرعی در مقایسه با تصویر اصلی و دوم برآورد دامنه و فاز پیکسل ها. با اینتر پولاسیون در هر کدام از پیکسل ها در تصویر فرعی، بعد از ثبت هندسی تصاویر، پیکسل های مشابه در هر تصویر متناظر با مکان مشترک در روی

^۱ - site laparoscopic colectomy (SLC)

زمین خواهند بود (اککی، ۲۰۰۶). تصاویر SLC تصاویر مختلطی هستند که شامل اطلاعات دامنه و فازند. نتیجه حاصل از ضرب مختلط دو تصویر راداری یک تداخل نما می باشد. برای بدست آوردن تداخل نما معمولاً هر سیگنال پیکسل تصویر اول در مزدوج مختلط تصویر دوم ضرب می شود. سیگنال یک پیکسل در تصویر رادار به صورت عدد مختلط Ae^{iq} بیان می گردد که در آن A دامنه، i زاویه تابش، و Q فاز تصویر رادار می باشد. اگر X و Y دو سیگنال تصویر رادار باشند (اطلاعات فاز و دامنه هر دو با هم در تصویر موجود باشند)، بنابراین خواهیم داشت (زیکر، ۲۰۰۰).

$$X = Ae^{(-iq1)} \quad y = Be^{-iq2}$$

که در این رابطه داریم A و B دامنه سیگنال هر پیکسل فاز سیگنال $Q_{1,2}$ می باشد. آنگاه تداخل نمای حاصله از دو تصویر برابر خواهد بود با:

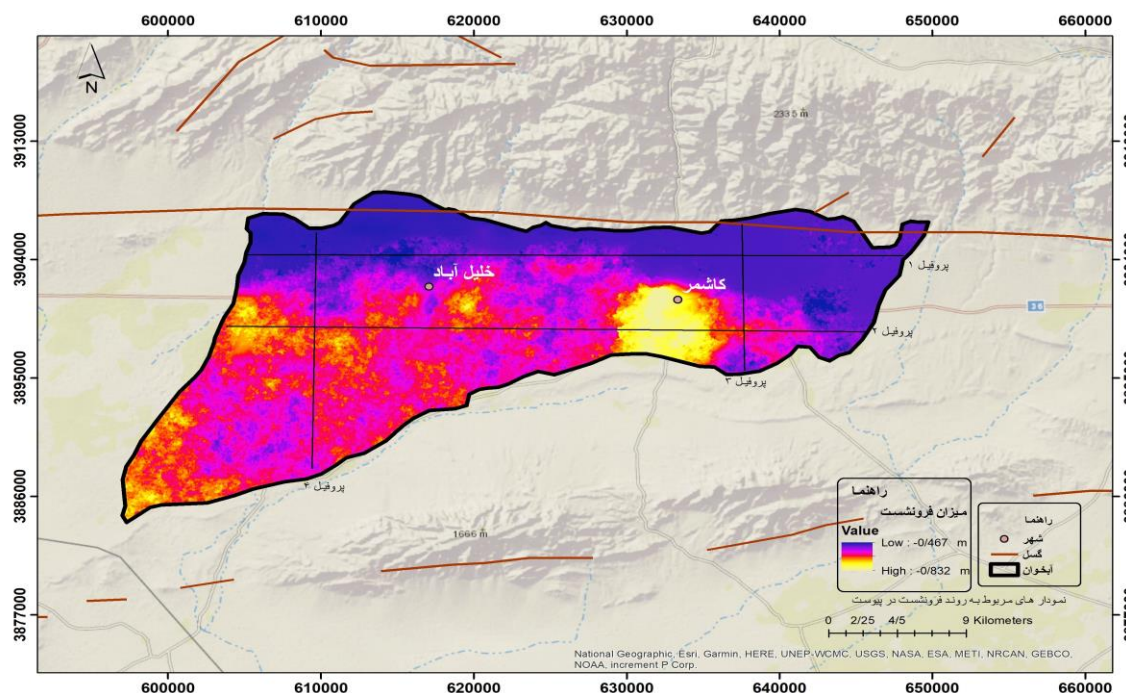
$$xy = Ae^{(-iq1)} * Be^{-iq2} = A * B = \pi r^{(Q2-Q1)}$$

در این رابطه Y نشان دهنده مزدوج مختلط می باشد. حاصل این ضرب حاوی اطلاعاتی در مورد دامنه های سیگنال ها و نیز اختلاف فاز آنها است. اختلاف فاز برای هر نقطه روی زمین در تداخل نما عددی است که بین صفر تا 360° درجه تغییر می کند. برای مجموعه ای از نقاط روی زمین، دامنه 360° درجه تغییر فاز را می توان با 256 سطح خاکستری و به صورت فرینچ هایی که معرف اختلاف فاصله صفر تا نصف مقدار طول موج یعنی $89/2$ سانتیمتر است با سطوح مختلف نمایش داد (رهمنون فر و همکاران، ۱۳۸۵). هر تداخل نما شامل اطلاعات فازی است که مستقیماً مرتبط با توپوگرافی و جابجایی می باشد. برای پی بردن به میزان جابجایی باید اثر توپوگرافی را حذف نمود. به منظور حذف اثر توپوگرافی یک تداخل نما با استفاده از اختلاف فاز دو تصویر اول و دوم و تداخل نمای دوم نیز از اختلاف فاز در تصویر دوم و سوم ایجاد می گردند. سپس، دو تداخل نمای حاصل از هم تفریق می شوند تا تداخل نمای تفریقی ایجاد شود. اختلاف فاز بین دو تصویر SAR از حاصل ضرب تصویر اول در مزدوج تصویر دوم به دست می آید. به تصویر حاصل از این ضرب مختلط، اینتر فروگرام گفته می شود، که از دو تصویر فاز و کوهرنسی بوجود آمده است. تصویر فاز همانطور که گفته شد نشان دهنده اختلاف پرتوها و سیگنال های ارسالی و دریافتی است و شکل متفاوت پستی ها و بلندی ها و عوارض مختلف سطح زمین از طریق اشکال موجی شکل را ثبت می کند و شدت تغییرات توپوگرافی را در مناطق مختلف متناسب با پستی و بلندی ها نشان می دهد. تصویر کوهرنسی نشان دهنده تطابق سیگنال های دو تصویر master و slave و دقت محاسبات در مناطقی که دچار فرونشست شده اند خواهد بود که معمولاً مقدار آن بین صفر و یک است و هرچه ضریب کوهرنسی به یک نزدیک تر باشد نشان دهنده دقت محاسبات بیشتر در این مناطق است. در انتهای این مرحله جهت کاهش نویز تداخل نماها از فیلتر تطبیقی گلداشتاین استفاده می شود (زند و همکاران، ۱۳۹۸). در این الگوریتم مناطقی که دارای نویز زیاد با همبستگی کمی هستند در رفع ابهام فاز نادیده گرفته می شود. از مزیت های آن می توان به تراکم بالای شبکه اشاره کرد. در این الگوریتم فازهایی که دارای کیفیت کم هستند، نادیده گرفته می شود و از فازهایی که دارای کیفیت بالایی می باشند، در پردازش تصاویر استفاده می شود. این عمل باعث می گردد که از تأثیر مناطقی دارای کیفیت کم بر روی مناطق با کیفیت بالا جلوگیری شود، که خود منجر به بازیابی فاز به بهترین وجه می گردد (زند و همکاران، ۲۰۰۳). در گام آخر تصویر بازیابی شده در مرحله قبل توسط مدل ارتفاعی رقومی، زمین مرجع خواهد شد.

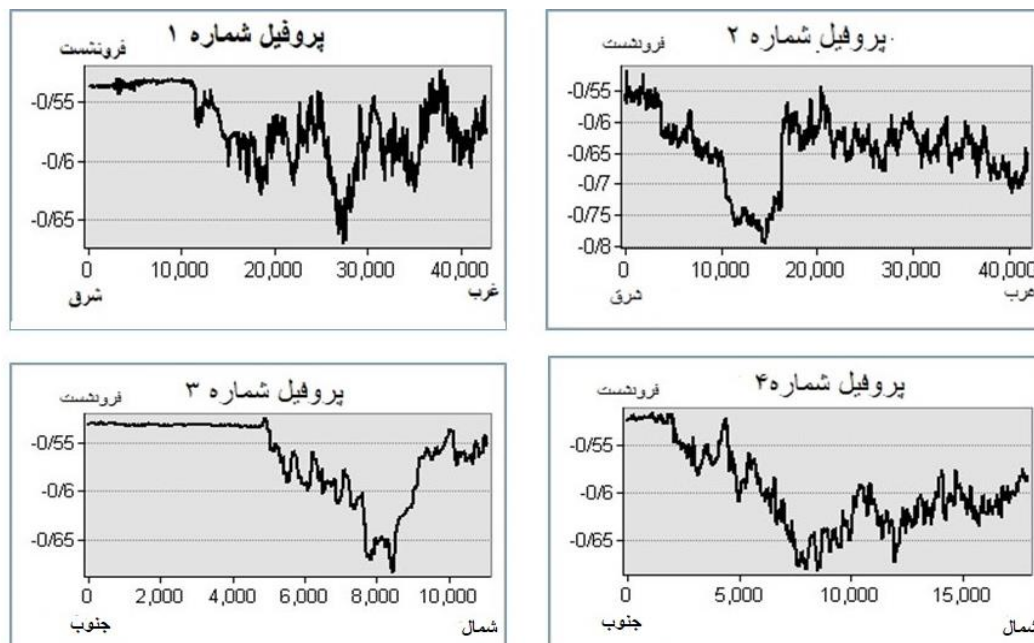
۳- نتایج و بحث

همانطور که گفته شد برای محاسبه فرونشست از تکنیک تداخل سنجی راداری استفاده شد که کمک فراوانی به ارزیابی جابه جایی زمین خواهد بود.

در این بررسی همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است مناطق مختلف دشت در بازه زمانی ۴ سال، ۴۶ تا ۸۴ سانتیمتر فرونشست داشته یعنی بصورت سالیانه در مناطق مختلف بین ۱۱/۵ تا ۲۱ سانتیمتر فرونشست قابل مشاهده است.



شکل ۲- نقشه میزان فرونشست زمین در دشت کاشمر



شکل (۳) پروفیل های بررسی روند فرونشست در دشت کاشمر

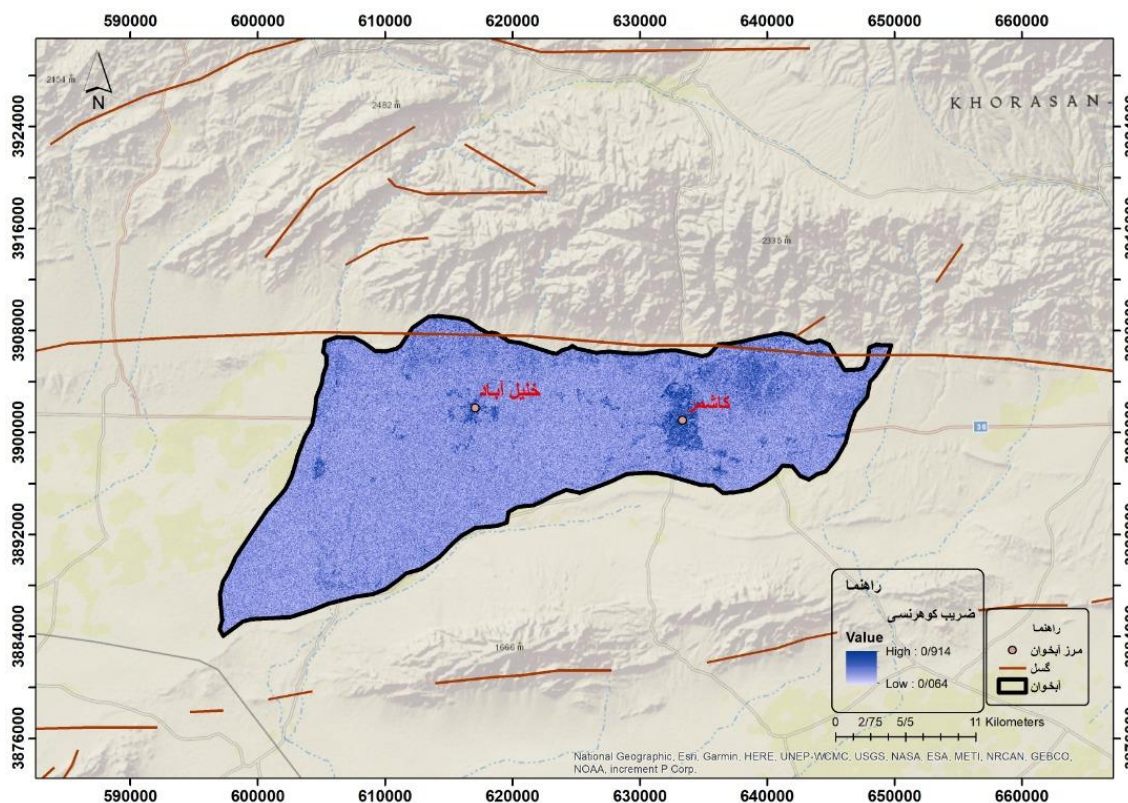
همانطور که در شکل ۳ مشاهده می شود در پروفیل ۱ پس از گذر از منطقه بیشینه فرونشست یعنی محدوده شهر

کاشمر، هرچه از شرق به غرب می رویم روند نسبی فرونشست افزایشی است و پروفیل ۲ نیز از الگوی مشابهی پیروی می کند. پروفیل های ۳ و ۴ نیز نشان دهنده افزایش شدت نشست از شمال به جنوب است پس می توان گفت که الگوی کامل فرونشست دشت کاشمر روند شرقی- غربی و شمالی- جنوبی است و منطقه حداکثر فرونشست مربوط به بخش های مرکزی و اطراف شهر کاشمر است.

گسل ها در مناطق خشک و نیمه خشک محل بالا آمدگی آب زیر زمینی و نقطه تلاقی توده سخت زیرین با سطح زمین است، بنابراین در حاشیه گسل ها منابع آب به فراوانی در دسترس می باشند. در نتیجه بسیاری از سکونت گاه های انسانی برای دسترسی به این منابع آب در حواشی و مناطق مجاور گسل ها استقرار یافته اند. مناطق همجوار گسل بزرگ درونه با طول حدود ۷۰۰ کیلومتر یکی از این مناطق به شمار می رود. تعداد حدود ۱۳۰ هزار نفر جمعیت در فاصله ۵ کیلومتری از گسل درونه و محدوده بسیار نزدیک به آن استقرار یافته اند و حتی پاره ای از روستاها مانند فرشه، نای، آبنو، علی آباد و قوچ پلنگ بر روی گسل بنا شده اند که در جنوب گسل درونه استقرار یافته اند و با توجه به وضعیت گسل درونه و شکستگی به وجود آمده در محل گسل، امکان بهره برداری از منابع آبی را در گذشته و حال فراهم نموده است (عنایستانی، ۱۳۸۷). گسل درونه از جمله ساخت های مهم زمین شناسی منطقه است که سبب تغییر رخساره رسوبی در محل تشکیل شکاف ها شده است به طوری که در این قسمت از دشت تغییر رخساره رسوبی از مواد دانه درشت به مواد ریزدانه (به طور عمده سیلت و رس) تشخیص داده شده است، به نحوی که برداشت اندک آب های زیر زمینی در این بخش سبب فرونشست بیشتری نسبت به سایر مناطق می گردد. به علت تغییر رخساره و در نتیجه تغییر در میزان نفوذپذیری و هدایت هیدرولیکی، تغییرات عمق سنگ کف به ویژه نقش گسل درونه در زهکشی آب های زیر زمینی منطقه، آب زیر زمینی به سمت این گسل متمایل شده به نحوی که در غرب آن جهت جریان به طور محلی از غرب به سمت شرق است. لذا در حاشیه جنوبی گسل درونه و محل شکاف ها در غرب دشت، محدوده ای وجود دارد که سهم ورودی آب زیر زمینی به آن بسیار کم است. بنابراین حتی بهره برداری کم از سفره در این محدوده می تواند سبب افت شدید در سطح آب زیرزمینی شود (لشکری پور و همکاران، ۱۳۸۷) که خود می تواند دلیلی بر توجیح فرونشست در جهات گفته شده در منطقه باشد. دشت کاشمر به صورت یک ناودیس با محور شرقی- غربی است و ارتفاعات بخش شمالی دشت بیشتر شامل شیست های دگرگونی است و در نواحی جنوبی رسوبات رسی، مارنی و گچی با سن میوسن وجود دارد و رسوبات این دشت از لایه هایی با دانه بندی متفاوت تشکیل شده اند که لایه سطحی متشکل از قله سنگ، سنگ، شن و رس می باشد و با افزایش عمق تناوب افق های آبرفتی با دانه بندی ریز و درشت مشاهده می گردد. در عمق، رس میوپلیوسن به عنوان سنگ بستر سفره آب زیرزمینی محسوب می شود. در توزیع دانه بندی آبرفت های دشت، سنگ شناسی سازندها، رژیم بارندگی و جریان های سیلابی، مورفولوژی و توپوگرافی ارتفاعات و تکتونیک منطقه نقش داشته است. بر اساس آنچه گفته شده در این منطقه جنس طبقات آبرفتی که بر روی سنگ کف قرار گرفته اند، از شمال به سمت جنوب دشت تغییر رخساره می دهد و به تدریج درصد کانی های رسی افزایش می یابد که این موضوع نیز می تواند یکی از دلایل برقراری روند شرقی- غربی و شمالی- جنوبی فرونشست در دشت کاشمر باشد.

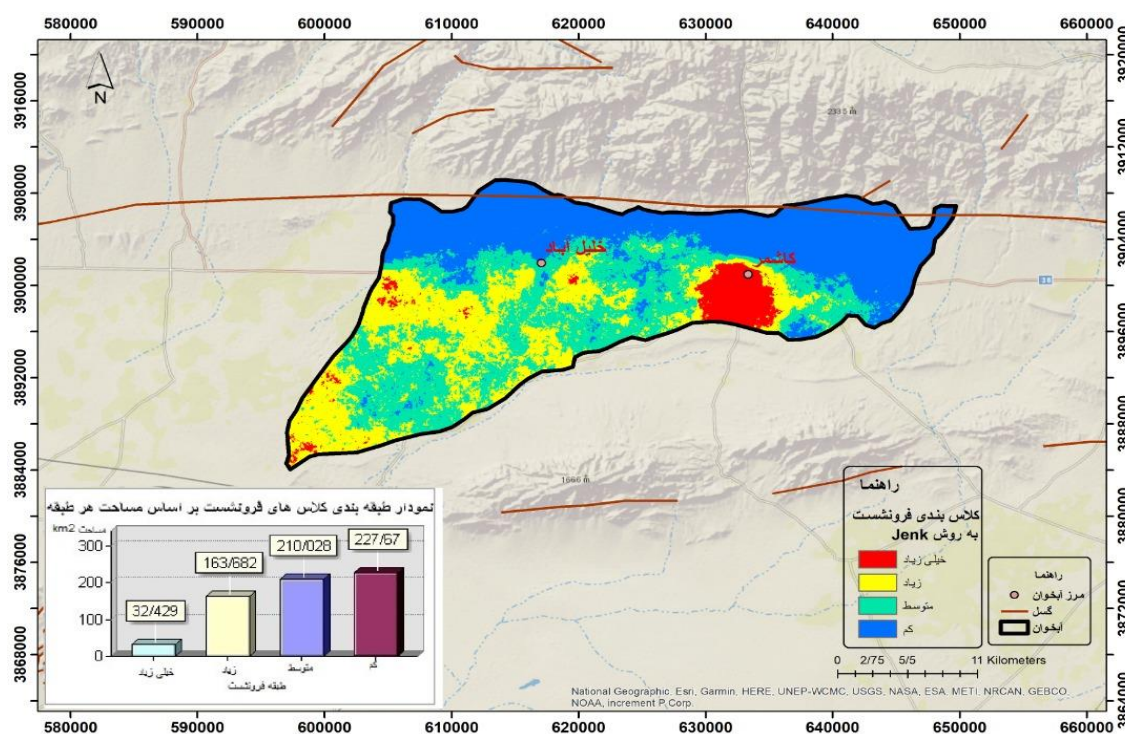
لشگری پور و همکاران (۱۳۹۸) در مطالعه ای با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری، اطلاعات فرونشست دشت کاشمر- بردسکن را بررسی کرده که ناحیه ی غربی دشت خصوصاً جنوب بردسکن گسترده ترین مناطق به لحاظ فرونشست می باشند. در این نواحی بیشترین میزان فرونشست تجمعی در طی سال های ۲۰۱۰-۲۰۰۳ در راستای دید ماهواره ۱،۸ متر است. بر این اساس حداکثر مقدار نشست سالیانه طی دوره ی ۷ ساله، ۲۶ سانتی متر در سال بوده است. کوه بنانی و همکاران (۱۳۹۷)، در پژوهش خود از تصاویر جدید Sentinel-1 مربوط به سال های ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۷ برای بررسی نرخ فرونشست استفاده کرد. منطقه مورد مطالعه دشت کاشمر و خلیل آباد است که نتایج آنان نشان داد که دشت کاشمر و خلیل آباد در بیشترین حالت ۱۷ سانتیمتر در سال فرونشست دارد. یافته های مطالعات اندرسون و همکاران (۲۰۰۸) نیز حاکی از وجود فرونشست در طول ضلع غربی- شرقی دشت کاشمر بوده که در طی بازه زمانی مورد بررسی (۲۰۰۳-۲۰۰۶)، فرونشست محدوده ۷۵۰-۸۰۰ کیلومتر مربع را با نرخ فرونشست ۱۵ سانتیمتر در سال ثبت کرده اند. نتایج به

دست آمده در تحقیق حاضر بین سال های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۱ با نتایج این محققان از لحاظ میزان فرونشست و مناطق درگیر مشابهت بسیاری دارد. برای صحت سنجی محاسبات انجام شده در نقشه فرونشست از تصویر کوهرنسی (شکل ۴) استفاده شد که نشان دهنده تطابق نسبی سیگنال های دو تصویر master و slave و دقت محاسبات در مناطقی است که دچار فرونشست حداکثر شده اند.



شکل (۴) نقشه کوهرنسی دشت کاشمر

در نهایت با استفاده از روش طبقه بندی شکست های طبیعی هیستوگرام (Jenks) که شیوه ای است برای بهینه سازی دسته بندی مجموعه ای از مقادیر درون کلاس های «طبیعی»، مناطق دچار فرونشست در شکل ۵ به چهار طبقه نشست خیلی زیاد، زیاد، متوسط و کم طبقه بندی شد. این روش از طریق کمینه کردن انحراف متوسط از میانگین کلاس ها با بیشینه کردن انحراف از میانگین دیگر گروه ها انجام می شود.



شکل (۵) نقشه و نمودار طبقه بندی فرونشست زمین در دشت کاشمر

باتوجه به شکل (۵) می توان گفت که ۵ درصد از منطقه دچار فرونشست خیلی زیاد، ۲۶ درصد در کلاس زیاد، ۳۳ درصد در کلاس متوسط و ۳۶ درصد در طبقه کم قرار می گیرند. مناطقی که در طبقه فرونشست خیلی زیاد قرار دارند شامل شهر کاشمر و اطراف آن و برخی مناطق در غرب دشت کاشمر (بسمت دشت بردسکن)، قسمت هایی که در طبقه زیاد قرار می گیرند شامل مناطق غربی و جنوب غربی هستند (عمدتاً رسوبات ریزدانه دشت سر پوشیده و مناطق کشاورزی) و مناطقی که در طبقه کم و متوسط قرار دارند عموماً مناطق شمالی و شرقی (دشت سر اپانداژ و فرسایشی) می باشند.

۴- نتیجه گیری و جمع بندی

نتایج بدست آمده از این پژوهش نشان داد که در مناطق مختلف دشت کاشمر در بازه زمانی ۴ ساله (۲۰۱۷ تا ۲۰۲۱)، ۴۶ تا ۸۴ سانتیمتر فرونشست در زمین به وقوع پیوسته است. روند فرونشست شرقی- غربی و شمالی- جنوبی و بیشترین مقدار در اطراف شهر کاشمر قابل رؤیت است.

باتوجه به اینکه گسل درونه از جمله ساخت های مهم زمین شناسی منطقه است و آب زیر زمینی به سمت این گسل متمایل شده به نحوی که در غرب آن جهت جریان به طور محلی از غرب به سمت شرق است. لذا در حاشیه جنوبی گسل درونه و محل شکاف ها در غرب دشت، محدوده ای وجود دارد که سهم ورودی آب زیر زمینی به آن بسیار کم است. بنابراین حتی بهره برداری کم از سفره در این محدوده می تواند سبب افت شدید در سطح آب زیرزمینی شود که جهت و میزان زیاد فرونشست را در این بخش توجیح خواهد کرد. توسعه سریع کشاورزی همراه با افزایش جمعیت و افزایش شهرنشینی طبیعتاً به دنبال آن افزایش نیاز آبی و دخالت در طبیعت باعث استفاده بیشتر از منابع آب زیرزمینی در این منطقه شده است. بنابراین بهره برداری بی رویه باعث افت شدید سطح آب زیرزمینی شده و در نتیجه با تشدید خشکسالی آب زیرزمینی، فرونشست زمین در این دشت بسیار قابل ملاحظه است.

با توجه به نقشه کوهرنسی که به صحت سنجی نقشه فرونشست می پردازد و با مقایسه نتایج این پژوهش با نتایج سایر محققین می توان گفت نتیجه برآورد فرونشست با الگوریتم DInSAR، قابل قبول است. با استناد به نتایج حاصل از این پژوهش می توان گفت طبیعت روند قانون مندی دارد و عواملی که این چرخه را بر هم بزنند، سرزمین را برای بروز حوادث مختلف مانند فرونشست مستعد می کنند. در این زمینه تأثیر تغییر کاربری اراضی بر افزایش تبخیر و تعرق، برداشت های ممنوعه از جریان های سطحی و ذخیره بی هدف در استخرها و مخازن، اثر برداشت آب زیرزمینی بر سطح آن و تشدید خشکسالی آب زیرزمینی را می توان موثر بر کاهش تغذیه سفره آب زیرزمینی در منطقه و دلیلی بر وقوع فرونشست دانست.

۵- تشکر و قدردانی

این مقاله از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد مصوب و دفاع شده در دانشگاه بیرجند استخراج شده است. نویسندگان بر خود لازم می دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از اساتید و مسئولان پژوهشی دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست دانشگاه بیرجند و هیئت داوران که ما را در انجام و ارتقای کیفی این پژوهش یاری دادند، اعلام کنند.

۶- منابع

- جلیلی، خ، و مرادی، ح، ر، (۱۳۹۱): تحلیل بیلان آب زیرزمینی مبتنی بر دیدگاه کشاورزی پایدار در دشت اسلام آباد، نشریه علمی پژوهشی آبیاری و آب های ایران، ۱۱، ۴۰-۱۵.
- حسین زاده، م، م و نوحه گر، ا، (۱۳۹۰): بررسی تأثیر خشکسالی های دو دهه اخیر بر منابع آب زیرزمینی دشت میناب و وقوع پدیده فرونشستی، دانشگاه شهید بهشتی، چاپ نهم، از صفحه ۷۵ تا صفحه ۹۷.
- رستمی بارانی، ح، ر؛ لشکری پور، غ، ر کهندل، ا، ترشیزی، ح، (۱۳۸۵): "افت سطح آب زیر زمینی و نشست زمین در دشت کاشمر"، دهمین همایش انجمن زمین شناسی ایران، دانشگاه تربیت مدرس.
- زندی، ر، فرزین کیا، ر، شریفی، ن، (۱۳۹۸): کتاب فرونشست زمین و تداخل سنجی راداری، انتشارات ماهواره، فصل ۳ چاپ اول.
- شرکت سهامی آب منطقه ای خراسان رضوی. آمار سال های ۱۳۶۰ تا ۱۴۰۰ بانک اطلاعات معاونت مطالعات پایه منابع آب.
- سعیدی ح، لشکری پور، غ، ر، غفوری م، (۱۳۹۸): ارزیابی درز و شکاف های حاصل از فرونشست زمین در دشت کاشمر- بردسکن در شمال شرق ایران. نشریه مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، بهار ۱۳۹۸، دوره ۹، شماره ۳۵، از صفحه ۷۴ تا صفحه ۸۸.
- عنابستانی، ع، ا، (۱۳۸۷): "گسل درونه و استقرار سکونتگاه های انسانی در منطقه کاشمر"، نشریه پژوهش های جغرافیایی، دوره ۴۱، شماره ۶۳، صفحات ۱۹۳ - ۲۰۲.
- کوه بنانی ح، رضا، یزدانی م، ر، حسینی س، ک، (۱۳۹۷): پهنه بندی گستره خطر فرونشست زمین با بهره گیری از تداخل سنجی راداری (مطالعه موردی: دشت کاشمر و خلیل آباد). نشریه مدیریت بیابان، بهار و تابستان ۱۳۹۸، دوره ۷، شماره ۱۳، از صفحه ۶۵ تا صفحه ۷۶.
- نادریانفر، م و انصاری، ح، (۱۳۹۰): ارزیابی اثرات شدت -مدت خشکسالی ها در مقیاس زمانی مختلف بر نوسانات سطح آب زیرزمینی، مطالعه موردی: دشت نیشابور"، مهندسی منابع آب. سال ۳، شماره ۹، صفحات ۱۱۰-۱۲۷، ۱۳۹۵.
- نجف زاده، ه، ناصری، ن، هاشمی نسب، س، آ، (۱۳۹۳): بررسی مشکلات منابع ابدشت کاشمر و نقش عملیات آبخوانداری در بهبود وضعیت منطقه. انتشار سومین همایش بین المللی سامانه های سطوح آبگیر باران.

- Akbari, M., Neamatollahi, E., Neamatollahi, P., (2019): *Evaluating land suitability for spatial planning in arid regions of eastern Iran using fuzzy logic and multi-criteria analysis*. Ecol Indic 98: 587-598. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.11.035>
- Anderssohn, J, and Wetzel, H.U: Land subsidence pattern controlled by old alpine basement faults in the Kashmar Valley, northeast Iran: Results from InSAR and levelling. Geophysical Journal International, Volume 174, Issue 1, July 2008, Pages 287–294,
- Guo, L., (2014): *Evaluation of PS-DInSAR technology for subsidence monitoring caused by repeated mining in mountainous area* Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Volume 24, Issue 10, October 2014, Pages 3309-3315.
- Mousavi, S.M, Shamsai, A., El Naggar, M.H., & Khamsehchian, M. (2001). A GPS-based monitoring program of land subsidence due to groundwater withdrawal in Iran. Can. J. Civ. Eng. 28:452–464.
- Leyin,h., et al (2019): Land subsidence in Beijing and its relationship with geological faults revealed by Sentinel-1 InSAR observations, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*,82. <https://doi:10.1016/j.jag.2019.05.019>
- Nur Khakim, M.Y, Tsuji,T, (2014)): How to research and write effective case studies in meteorology, Electronic J. Severe Storms Meteor., 5 (2): 1–18.