

Spatial Analysis of Ground Subsidence using Radar Interferometry (Case Study: Central Plain of Ghaen City)

Seyed Reza Hosseinzadeh^{a*}, Ebrahim Akbari^b, Mahdi Javanshiri^c, Zinat Mohammadpour Sangani^d

^a Associate Professor in Geomorphology, Department of Geography, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

^b MA in Remote Sensing and Geographic Information System, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

^c Postdoctoral Researcher in Geography and Rural Planning, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

^d MA in Remote Sensing, Tabriz University, Tabriz, Iran

Received: 5 February 2022 Revised: 15 June 2022 Accepted: 19 July 2022

Abstract

Land subsidence is one of the most important geomorphic hazards that has a slow motion but destructive effects in the long run. For the spatial analysis of the amount of displacement, the data on changes of the ground surface from Sentinel A1 for a period of 3 years (2017-2020) through the radar interferometric method and SNAP software were used. Field observations were also made to evaluate the research results. The results showed that the rate of land subsidence has increased from 2017 to 2020, from 2.6 cm in 2017 to 7.8 cm in 2020. Moreover, the groundwater hydrograph in the central plain of Ghaen has significantly decreased, so that the rate of water level drop in the plain level has been about 1.30 meters during 5 years (from 2014 to March 2020), i.e., about 26 cm per year. In addition, the analysis of spatial autocorrelation and Moran index (0.984) confirmed the clustering of subsidence event under the influence of water level changes in the study area. The correlation results also showed that there was a small correlation between the factor “changes in water level” and “land subsidence rate” ($p = -0.138$), which is an indirect relationship, i.e., the higher the groundwater abstraction (or the lower the water level), the higher the amount of subsidence. But due to the level of significance ($\text{sig} = 0.585$) this relationship is not significant.

Keywords: Geomorphic, Groundwater Level, Interferometry SNAP, Ghaen

*. Corresponding author: Seyed Reza Hosseinzadeh E-mail: srhosszadeh@um.ac.ir Tel: + 989153117325

How to cite this Article: Hosseinzadeh, S. R., Akbari, E., Javanshiri, M., & Mohammadpour, Z. (2023). Spatial analysis of ground subsidence using radar interferometry (Case study: Central plain of Ghaen city). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 11(4), 99-125.

DOI:10.22067/geoh.2022.75138.1169



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





Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

Geography and Environmental Hazards

Volume 11, Issue 4 - Number 44, Winter 2023

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

 <https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.75138.1169> 

جغرافیا و مخاطرات محیطی، سال یازدهم، شماره چهل و چهارم، زمستان ۱۴۰۱، صص ۹۹-۱۲۵

مقاله پژوهشی

ویژه نامه (چالش جهانی فرونشست زمین: مدیریت بحران یا بحران مدیریت)

تحلیل فضایی فرونشست سطح زمین با استفاده از تداخل سنجی راداری

(مورد مطالعه: دشت مرکزی شهرستان قاین)

سیدرضا حسین زاده^۱ - دانشیار ژئومورفولوژی، گروه جغرافیا، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.
ابراهیم اکبری - کارشناس ارشد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.
مهدی جوانشیری - پژوهشگر پسادکتری جغرافیا و برنامه‌ریزی روستایی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.
زینت محمدپور سنگانی - کارشناس ارشد سنجش از دور، دانشگاه تبریز، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۶ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۳/۲۵ تاریخ تصویب: ۱۴۰۱/۴/۲۸

چکیده

فرونشست زمین یکی از مخاطرات مهم ژئومورفیک است که دارای حرکتی کند بوده و در بلندمدت آثار مخربی برجای می‌گذارد. در این تحقیق به منظور تحلیل فضایی میزان جابجایی از داده‌های سنتینل A1 در بازه زمانی ۳ ساله (۲۰۲۰-۲۰۱۷) و روش تداخل سنجی راداری و نرم‌افزار (SNAP)، تغییرات سطح زمین را در بازه زمانی مذکور استخراج کرده‌ایم. همچنین مشاهدات میدانی برای صحت سنجی و بررسی نتایج تحقیق صورت گرفت. نتایج نشان داد که میزان فرونشست زمین از سال ۲۰۱۷ تا سال ۲۰۲۰ افزایش داشته است؛ به طوری که از ۲٫۶ سانتی‌متر در سال ۲۰۱۷ به ۷٫۸ سانتی‌متر در سال ۲۰۲۰ رسیده است. همچنین هیدروگراف معرف آب زیرزمینی در دشت مرکزی قاین نیز افت محسوسی داشته است؛ به طوری که میزان افت تراز آب در سطح دشت حدود ۱٫۳۰ متر در طول ۵ سال (از سال ۲۰۱۴ تا مارس ۲۰۲۰) بوده است؛ یعنی حدوداً سالی ۲۶ سانتی‌متر افت سطح آب‌های زیرزمینی را داشته‌ایم. ضمن اینکه

Email: srhosszadeh@um.ac.ir

انویسنده مسئول: ۰۹۱۵۳۱۱۷۳۲۵

نحوه ارجاع به این مقاله:

حسین زاده، سیدرضا؛ اکبری، ابراهیم؛ جوانشیری، مهدی؛ محمدپورسنگانی، زینت؛ ۱۴۰۱. تحلیل فضایی فرونشست سطح زمین با استفاده از تداخل سنجی راداری (مورد مطالعه دشت مرکزی شهرستان قاین). جغرافیا و مخاطرات محیطی. ۱۱(۴). صص ۹۹-۱۲۵
<https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.75138.1169>

تحلیل خودهمبستگی فضایی و شاخص موران (۹۸۴،)، خوشه‌ای بودن رخداد فرونشست تحت تأثیر تغییرات سطح آب در منطقه مورد مطالعه را تأیید کرد. نتایج همبستگی نیز نشان داد که بین عامل تغییرات تراز سطح آب و نرخ فرونشست زمین، همبستگی کمی وجود داشته ($p = -0.138$) که این ارتباط غیرمستقیم است؛ یعنی هر چه میزان برداشت آب زیرزمینی بیشتر باشد (یا سطح تراز آب کمتر شود)، میزان فرونشست نیز بیشتر می‌شود؛ اما با توجه به سطح معناداری ($sig = 0.585$) این ارتباط معنادار نیست.

کلیدواژه‌ها: ژئومورفیک، سطح تراز آب زیرزمینی، تداخل سنجی، SNAP، قاین.

۱- مقدمه

فرونشست به‌عنوان یکی از وقایع ژئومورفیک، شامل نشست تدریجی و یا ناگهانی سطح زمین است که تحت تأثیر عوامل طبیعی و همچنین به‌واسطه دخالت‌های انسانی روی می‌دهد. اثرات فرونشست به شکل شکاف‌هایی بر روی سطح زمین، فرو چاله‌ها، نشست منطقه‌ای و تشدید سیلاب شدگی نمایان می‌شود (مریخ پور و همکاران، ۱۳۹۱). فرونشست طبیعی به‌واسطه فعالیت‌های مختلفی نظیر معدنکاری، برداشت آب‌های زیرزمینی و یا استخراج نفت، روندی تشدید شده به خود می‌گیرد تا جایی که به یکی از مخاطرات مهم ژئومورفولوژی تبدیل می‌شود. ایران به‌عنوان یکی از مهم‌ترین کشورهای مواجه با فرونشست تشدید یافته در آینده‌ای نه‌چندان دور با خسارات مستقیم و غیرمستقیم جبران‌ناپذیری مواجه خواهد شد. در این بین، مناطق شهری به دلیل تراکم بالای جمعیت، ساخت‌وسازها و خطوط ارتباطی مهم، در برابر فرونشست بسیار آسیب‌پذیرتر می‌باشند (چترسیماب و همکاران، ۱۴۰۱). گرچه در کوتاه‌مدت ممکن است در مناطق در حال فرونشست، خرابی به میزان گسترده مشاهده نشود و حتی آثار سطحی حاصل از آن نیز به‌راحتی قابل تشخیص نباشد، اما باین وجود در درازمدت، به‌طورمعمول خسارت‌های ناشی از فرونشست‌ها و شکاف‌های زمین‌ترمیم‌ناپذیر، پرهزینه و مخرب هستند؛ از این رو برای تشخیص میزان فرونشست، اندازه‌گیری و پایش تغییر شکل سطح زمین از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در مطالعات مربوط به فرونشست مهم‌ترین مراحل عبارتند از: (۱) شناسایی پهنه‌های در حال فرونشینی و نرخ فرونشست در نقاط مختلف یک منطقه؛ (۲) شناسایی عوامل وقوع فرونشست؛ (۳) ارائه راهکارهای مناسب به‌منظور کاهش نرخ فرونشست و سپس مدیریت و جلوگیری از خسارات ناشی از آن (افضلی و همکاران، ۱۳۹۲؛ اسدزاده و همکاران، ۱۳۹۵).

برای اندازه‌گیری فرونشست زمین از روش‌های مختلفی از جمله استفاده از داده‌های GPS^۱، ترازبایی دقیق و تکنیک‌های سنجش‌ازدور به‌خصوص تداخل سنجی راداری^۲ استفاده می‌شود. تداخل سنجی راداری با دریچه

1 GPS (Global Positioning System)

2 Radar Interferometry

مصنوعی^۱ یکی از روش‌هایی است که در دو دهه اخیر انقلاب بزرگی در زمینه مطالعات تغییر شکل پوسته زمین ایجاد کرده است (قابریل^۲، ۱۹۸۹). گرچه تداخل سنجی راداری اغلب به‌عنوان یک تکنولوژی جدید برای پایش دگرریختی‌های سطح زمین شناخته شده، لیکن پتانسیل کامل کارایی‌های آن به‌وسیله مجامع علمی به‌طور دقیق مشخص نشده و نتایج حاصل از این روش متعدد و پیچیده است (فررتی^۳ و همکاران، ۲۰۰۷). تکنیک تداخل سنجی راداری با داشتن ویژگی‌هایی همچون پوشش زمینی پیوسته و قدرت تفکیک مکانی و زمانی مناسب به‌عنوان یکی از بهترین روش‌های سنجش‌ازدور در بررسی تغییرات سطحی زمین شناخته شده است (روت و رقتل^۴، ۲۰۰۶). در تداخل سنجی راداری، فاز تصاویری که در زمان‌های مختلف از یک منطقه برداشت شده‌اند، پیکسل به پیکسل مقایسه و سپس از هم کم می‌شود (فررتی و همکاران، ۲۰۰۷).

در حال حاضر این روش در میان سایر روش‌های اندازه‌گیری مستقیم و غیرمستقیم، به‌عنوان کارآمدترین روش برای اندازه‌گیری تغییرات سطح زمین با دقت و قدرت تفکیک مکانی بسیار بالا به‌شمار می‌رود (محمدی منش^۵ و همکاران، ۲۰۱۸). همچنین تا حد زیادی پی‌جویی فرونشست زمین در مناطق شهری را تسهیل کرده است (کاستلازی^۶ و همکاران، ۲۰۱۶). از جمله مزایای دیگر این روش می‌توان به پوشش وسیع، نداشتن نیاز به کار میدانی، مقرون‌به‌صرفه بودن و امکان دستیابی به اطلاعات در هر شرایط آب و هوایی و دسترسی به آن با دقتی معادل با دقت اندازه‌گیری‌های سیستم مکان‌یابی جهانی و ترازایی دقیق اشاره کرد. اولین تلاش‌ها برای نقشه‌برداری از فرونشست زمین در مساحت‌های بسیار بزرگ و در دوره‌های زمانی طولانی در چین صورت گرفته است (ژانگ^۷ و همکاران، ۲۰۱۶). در این مطالعه که فرونشست زمین در منطقه پکن-تیانجین-هبی طی سال‌های ۱۹۹۲ تا ۲۰۱۴ مورد بررسی قرار گرفته سه مجموعه داده SAR از چهار ماهواره شامل تصاویر ERS-1/2 SAR از ۱۹۹۲ تا ۲۰۰۰، تصاویر ASAR از ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ و تصاویر RADARSAT-2 از سال ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۴ مورد استفاده قرار گرفته است. در نهایت با بیش از ۱۲۰ اندازه‌گیری، سه نقشه از میزان فرونشست مربوط به سه دوره در منطقه مذکور تولید شد، که میزان فرونشست ۸٫۷ میلی‌متر در سال (طی دوره ۲۰۰۰-۱۹۹۲)، ۴٫۷ میلی‌متر در سال (۲۰۱۰-۲۰۰۲) و ۵٫۴ میلی‌متر در سال (۲۰۱۲-۲۰۱۴) به دست آمد. فرونشست زمین ناشی از استخراج آب‌های زیرزمینی در منطقه شهری پکن با استفاده از تداخل سنجی راداری گ، مقدار فرونشست تا بیش از ۱۰۰ میلی‌متر در سال را در مناطق شرقی این شهر تأیید می‌نماید (چن^۸ و همکاران، ۲۰۱۶). در این مطالعه، از تکنیک Small Baseline InSAR برای پردازش تصاویر

1 SAR Interferometry

2 Gabriel

3 Ferretti

4 Rott, and Nagler

5 Mohammadimanesh

6 Castellazzi

7 Zhang

8 Chen

Envisat ASAR به دست آمده بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ و تصاویر ماهواره‌ای TerraSAR-X جمع‌آوری شده از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۱ برای بررسی فرونشست زمین استفاده شده است. علاوه بر این، بین نقشه‌های نرخ فرونشست اینسار که از دو مجموعه داده مختلف (به‌عنوان مثال، Envisat و TerraSAR-X) حاصل می‌شود، همبستگی بالایی مشاهده شد.

شارما و همکاران (۲۰۱۶) در مطالعه‌ای بر جزیره شرمن واقع در دلتای ساکرامنتو - سان واکین که یک منطقه غیر شهری با تغییرات کم زمانی است، نتایج حاصل از کاربرد تکنیک تداخل سنجی راداری برای اندازه‌گیری فرونشست آن منطقه را با استفاده از اطلاعات باندها L با طول موج ۲۳,۰۸ سانتی‌متر ماهواره UAVSAR انجام دادند. در این مطالعه از داده‌های جمع‌آوری شده از ژانویه ۲۰۰۹ تا اوت ۲۰۱۴ برای ارزیابی تغییرات زمانی و مکانی فرونشست جزیره شرمن استفاده شد و نرخ فرونشست به صورت مقادیر متغیر بین ۰-۵ سانتی‌متر در سراسر محدوده به دست آورده شد. همچنین میانگین نرخ فرونشست منطقه تا حدود ۰,۲ ± ۱,۳ سانتی‌متر برآورد شد. نتایج این مطالعه نشان داد که چندین عامل از جمله نوع خاک، عمق آب زیرزمینی، نوع کاربری زمین‌ها و ارتفاع زمین بر فرونشست منطقه مؤثر است (شارما^۱ و همکاران، ۲۰۱۶). مطالعات در نواحی مختلف ایران نشان می‌دهد در بیشتر دشت‌ها پدیده فرونشست در چند دهه اخیر فرونی یافته است. نرخ فرونشست در دشت اردبیل حدود ۸۰ تا ۱۵۴ میلی‌متر در سال محاسبه شده است (خلیفی و همکاران، ۱۳۹۶). در مطالعه دیگری با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری، بیشینه دامنه فرونشست دشت قزوین حدود ۳۰ تا ۳۵ میلی‌متر در سال ذکر گردیده است (بابایی و همکاران، ۱۳۹۵).

احمدی و همکاران (۱۳۹۷) در پژوهشی به مطالعه فرونشست دشت خرمد به استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری و بررسی مخاطرات آن پرداختند. برای این منظور از تصاویر ماهواره ENVISAT اخذ شده در بازه زمانی ۲۰۰۳-۲۰۰۵ و تصاویر Sentinel S ۱ اخذ شده در بازه زمانی ۲۰۱۷-۲۰۱۴ استفاده شد. میدان جابجایی، بیانگر پیشینه تغییر شکل برابر با ۳۵ میلی‌متر بر سال، در راستای دور شدن از ماهواره را نشان می‌دهد. نتایج به دست آمده از فرونشست با استفاده از سیستم اطلاعات مکانی (GIS) با لایه‌های کاربری اراضی نیز چاه‌های بهره‌برداری در منطقه مورد مطالعه نشان دهنده بالا بودن تراکم کاربری اراضی کشاورزی و نیز چاه‌های بهره‌برداری در منطقه است. همچنین با استفاده از تحلیل‌های مکانی، مخاطرات احتمالی فرونشست در منطقه مورد مطالعه نیز، بیانگر تأثیرپذیری قسمتی از مسیر خطوط راه‌آهن، راه‌های اصلی و بزرگراه از فرونشست است.

تورانی و همکاران (۱۳۹۷) با مطالعه فرونشست در شهر گرگان با استفاده از روش تداخل سنجی راداری دریافتند که در دوره زمانی بین بهمن ۱۳۸۵ تا آذر ۱۳۸۸ محدوده شمال گرگان متحمل فرونشست شده است. این محدوده تقریباً روند شرقی- غربی دارد و میزان فرونشست در آن چیزی حدود ۴/۸ سانتی‌متر محاسبه شد. نمودارهای تراز

سطح آب و میزان بارندگی گرگان در سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۳۸۹ علیرغم نوسانات فصلی روند نزولی نشان می‌دهند. پیامد این افت سطح آب زیرزمینی می‌تواند منجر به فرونشست زمین در شهر گرگان شده باشد.

مهرابی (۱۳۹۷) در پژوهشی به شناسایی شواهدی بر وجود گنبد نمکی مدفون و جدید در ناحیه زاگرس با استفاده از روش تداخل‌سنجی تصاویر راداری سنتینل-۱ و ایسار پرداخت. بدین منظور از تصاویر راداری ایسار (ASAR) مربوط به سال‌های ۲۰۰۷ و ۲۰۱۲ و سنتینل-۱ (Sentinel-1) مربوط به سال‌های ۲۰۱۴ و ۲۰۱۷ استفاده شد. جهت تعیین میزان تغییرات پوسته زمین ضمن انجام فرایند واپیچش فاز بر روی تصاویر، تداخل نگاشت هر یک از تصاویر استخراج شد. با توجه به نتایج به دست آمده از تحلیل تصاویر ایسار نرخ رشد گنبد نمکی مذکور بین سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۲ به میزان ۱,۶ سانتی‌متر در سال بوده است. طبق تصاویر تداخل نگاشت به دست آمده از تصاویر سنتینل-۱ سرعت صعود این گنبد نمکی در بین سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۷ افزایش داشته است و به ۲,۹ سانتی‌متر در سال رسیده است. نتایج تحقیق نشان داد که گنبد نمکی احتمالی فعال است.

مقصودی و همکاران (۱۳۹۸) در پژوهشی به بررسی رفتار فرونشست زمین در منطقه غرب تهران با استفاده از تصاویر سنجنده سنتینل-۱ و تکنیک تداخل‌سنجی راداری مبتنی بر پراکنش گرهای دائمی پرداختند. در این مقاله یک سری زمانی دو ساله شامل ۳۰ تصویر سنجنده سنتینل-۱، با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری مبتنی بر پراکنش‌گرهای دائمی در دو ناحیه مطالعاتی مورد پردازش قرار گرفت. نتایج، جابجایی سالانه ۱۱ سانتی‌متری در جنوب منطقه مورد مطالعه را نشان داد، اما جابجایی تنها محدود به مناطق دشتی و غیر شهری نبوده بلکه به مناطق صنعتی و شهری نیز گسترش یافته است. ارزیابی نسبی نتایج در منطقه اول با استفاده از داده‌های مسیر پایین‌گذر ۳۱ انجام گرفت که با توجه به اختلاف ناچیز برآورد دو مسیر ۷۹ و ۳۱، نواحی مذکور جابجایی افقی بسیار کمی داشته و عمده بردار جابجایی را حرکت قائم تشکیل می‌دهد. همچنین، جابجایی قائم با استفاده از دو مدار بالاگذر و پایین‌گذر برای منطقه مطالعاتی دوم برآورد گردید که با بهره‌گیری از داده‌های یک ایستگاه GPS صحت‌سنجی شد.

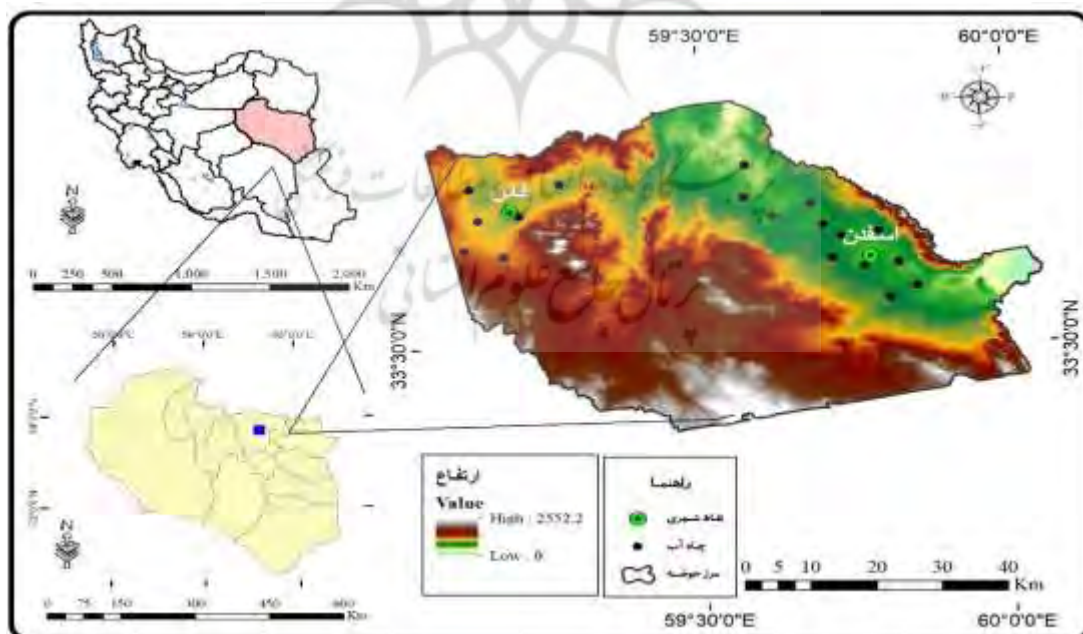
آروین و همکاران (۱۳۹۸) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای راداری Sentinel-1 سال‌های ۱۳۹۳ و ۱۳۹۷ و روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری و سیستم اطلاعات جغرافیایی به مدل‌سازی مکانی فرونشست زمین در جنوب حوزه آبخیز میناب پرداختند. نتایج پردازش‌های انجام‌شده بر روی این تصاویر نشان داد که در دوره مطالعاتی، حدود ۱۳ سانتی‌متر فرونشست داشته است. بعد از صحت‌سنجی پهنه‌بندی انجام‌شده با واقعیت‌های زمینی (شهریور ۱۳۹۷)، به‌منظور تشخیص رابطه فرونشست با میزان تغییرات و افت سطح آب زیرزمینی، ارتفاع سطح زمین و شیب، تحلیل‌های فضایی انجام و میزان همبستگی هر یک از فاکتورهای مذکور با تراکم رخدادهای فرونشست محاسبه گردید.

به نظر می‌رسد از مجموع ۶۰۰ دشت کشور، بیش از نیمی از آن‌ها در معرض نشست باشند. اگر زمانی این پدیده تنها در برخی استان‌ها مانند کرمان و یزد به وقوع می‌پیوست امروزه این پدیده در دشت‌ها و شهرهایی نظیر مشهد،

تهران، کاشمر، کاشان، خراسان جنوبی و ... روی داده است (شریفی کیا، ۱۳۹۰: ۵۸) این مطالعه سعی در تهیه نقشه پهنه‌بندی و بررسی نرخ فرونشست با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری در دشت مرکزی شهرستان قائنات دارد که برای انجام آن، از داده‌های تصاویر ماهواره‌ای سنتینل A1 در نرم‌افزار (SNAP) استفاده شده است.

۲- منطقه مورد مطالعه

دشت مرکزی قائنات در یک حوضه آبریز بسته بین ۵۹ درجه و ۳ دقیقه تا ۶۰ درجه و ۳ دقیقه طول شرقی و ۳۳ درجه و ۲۱ دقیقه تا ۳۳ درجه و ۵۴ دقیقه عرض شمالی واقع شده است (شکل ۱). دشت قائنات یک دشت بسته آبرفتی بوده که توسط رسوبات دوران چهارم به صورت کامل پوشیده شده است. از نظر توپوگرافی سطح دشت نسبتاً ناهموار است که با یک شیب بسیار کم (۱,۹ درصد تا ۳,۳ درصد) به نواحی کم ارتفاع شرق دشت ختم می‌شود. حداکثر ارتفاع در کوهستان‌های منتهی به دشت ۲۵۵۲ متر در جنوب آن و حداقل آن ۸۹۰ متر در شرق دشت است. حوضه آبریز دشت مرکزی قاین در وسعتی معادل ۳۵۶۸ کیلومتر مربع دارد که از این مقدار حدود ۱۶۰۰ کیلومتر مربع مربوط به ارتفاعات و بقیه قلمرو دشت را در برمی‌گیرد. کمبود بارش سال‌های اخیر و تداوم خشکسالی در استان خراسان جنوبی به ویژه در شرق استان، کاهش سطح آب‌های زیرزمینی، به عنوان منبع اصلی تأمین آب شرب شهر قاین و روستاهای محدوده مورد مطالعه را به دنبال داشته است. برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی، باعث افت ممتد سطح آب و در نتیجه موجب ایجاد و گسترش فرونشست در استان و به ویژه در منطقه مطالعاتی شده است.



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در تقسیمات سیاسی کشوری

۳- مواد و روش

۳-۱- داده‌های مورد استفاده در تحقیق

روش کار در این تحقیق تحلیلی و میدانی است. در این تحقیق از داده‌های راداری که شامل تصاویر سنتینل ۱ جهت محاسبه نرخ فرونشست در بازه زمانی یک ماه برای سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۰ استفاده شده است و پس از محاسبه نرخ جابجایی سطح زمین برای منطقه مورد مطالعه به منظور بررسی بیشتر تأثیر افت تراز آب زیرزمینی بر فرونشست سعی شد که علاوه بر نوسانات تراز آب پیژومترها، پراکندگی چاه‌های بهره‌برداری، میزان برداشت آب، نقشه پهنه‌بندی میزان تخلیه سالانه آب زیرزمینی نیز مورد بررسی قرار بگیرد مطالعات تداخل سنجی راداری در این تحقیق توسط ۲۴ تصویر سنتینل و به کمک نرم‌افزار SNAP انجام گرفته است. برای کاهش نویز و افزایش همبستگی زمانی ایترفرگرام‌ها تا حد امکان سعی شده، از زوج تصاویر راداری با بازه زمانی کوتاه (حدود ۹۰ روز) استفاده شود. ترکیب داده‌های راداری از مدارهای صعودی و نزولی نیز می‌تواند جهت بهبود مدل‌های رقومی زمین با به دست آوردن جابجایی‌ها در جهات مختلف و با استفاده از ایترفرمتری مورد استفاده قرار گیرد. با عنایت به اینکه در این تحقیق هدف پایش میزان جابجایی‌های سطح زمین است، تنها از داده‌های صعودی استفاده شده است؛ بنابراین اساس از تعداد ۲۴ تصویر مربوط به دوره زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۰ مورد استفاده قرار گرفت که در جدول ۱ اطلاعات ثبت شده است.

جدول ۱- مشخصات عمومی تصاویر استفاده شده در تداخل سنجی راداری

Acquisition Date	Beam mode	path	Ascending/Descending	Polarization	Absolute Orbit	Frequency	Mission
2017/04/10	IW	86	Ascending	VV-HV	16083	C-Band	Sentinel-1
2017/06/09	IW	86	Ascending	VV-HV	16958	C-Band	Sentinel-1
2017/07/03	IW	86	Ascending	VV-HV	17308	C-Band	Sentinel-1
2017/09/25	IW	86	Ascending	VV-HV	18533	C-Band	Sentinel-1
2017/10/7	IW	86	Ascending	VV-HV	18708	C-Band	Sentinel-1
2017/12/30	IW	86	Ascending	VV-HV	19933	C-Band	Sentinel-1
2018/01/11	IW	86	Ascending	VV-HV	20108	C-Band	Sentinel-1
2018/03/24	IW	86	Ascending	VV-HV	21158	C-Band	Sentinel-1
2018/04/05	IW	86	Ascending	VV-HV	21333	C-Band	Sentinel-1
2018/06/28	IW	86	Ascending	VV-HV	22558	C-Band	Sentinel-1
2018/07/10	IW	86	Ascending	VV-HV	22733	C-Band	Sentinel-1
2018/09/20	IW	86	Ascending	VV-HV	23783	C-Band	Sentinel-1
2018/10/02	IW	86	Ascending	VV-HV	23958	C-Band	Sentinel-1
2018/12/25	IW	86	Ascending	VV-HV	25183	C-Band	Sentinel-1
2019/01/06	IW	86	Ascending	VV-HV	25358	C-Band	Sentinel-1
2019/03/31	IW	86	Ascending	VV-HV	26583	C-Band	Sentinel-1
2019/04/24	IW	86	Ascending	VV-HV	26933	C-Band	Sentinel-1
2019/06/23	IW	86	Ascending	VV-HV	27808	C-Band	Sentinel-1
2019/07/05	IW	86	Ascending	VV-HV	27983	C-Band	Sentinel-1
2019/09/27	IW	86	Ascending	VV-HV	29208	C-Band	Sentinel-1

Acquisition Date	Beam mode	path	Ascending/Descending	Polarization	Absolute Orbit	Frequency	Mission
2019/10/09	IW	86	Ascending	VV-HV	29383	C-Band	Sentinel-1
2019/12/20	IW	86	Ascending	VV-HV	30433	C-Band	Sentinel-1
2020/01/01	IW	86	Ascending	VV-HV	30608	C-Band	Sentinel-1
2020/01/06	IW	86	Ascending	VV-HV	31133	C-Band	Sentinel-1

۳-۲- روش تحقیق

برای پردازش تصاویر ماهواره‌ای در محیط نرم‌افزار SNAP از روش تداخل سنجی راداری با دریچه مصنوعی و تکنیک تداخل سنجی راداری (In SAR) استفاده شده است. در تداخل سنجی راداری، فاز تصاویر اخذ شده از موقعیت‌های تصویربرداری و یا زمان‌های تصویربرداری مختلف، پیکسل به پیکسل مقایسه گردید. از تفاضل‌گیری بین این مقادیر، تصویر اینترفروگرام تولید شد.

پس از تشکیل تداخل نگارها، یک شبکه از تصاویر ایجاد شد و با استفاده از روش کمترین مربعات، مقدار جابجایی هر پیکسل تخمین زده شد. رابطه فاز اینترفرومتری طبق رابطه (1) محاسبه گردید.

رابطه (1)

$$y_1 = |y_1| \exp(i\varphi_1)$$

$$y_2 = |y_2| \exp(i\varphi_2)$$

$$y_1 y_2^* = |y_1| |y_2| \exp(i(\varphi_1 - \varphi_2))$$

در این رابطه؛ y_1 و y_2 سیگنال‌های دو پیکسل متناظر است که اولی تصویر اصلی (master) و دومی تصویر فرعی (slave) است. پس از ضرب مختلط این دو سیگنال، رابطه دیگری به دست می‌آید که در این رابطه $|y_1| |y_2|$ دامنه $\varphi_1 - \varphi_2$ و برابر فاز اینترفروگرام است. در این رابطه، تغییر فاز به اندازه $\pi/2$ معادل جابجایی به اندازه نصف طول موج مورد استفاده توسط ماهواره است که نشان‌دهنده یک فرینج کامل در اینترفروگرام است (اکبری و همکاران، ۱۳۹۹).

فاز اینترفروگرام ایجاد شده ناشی از مؤلفه‌هایی نظیر مؤلفه مداری، توپوگرافی، جابجایی، اتمسفر و نویز است که هر یک از این پارامترها سبب تغییر فاز می‌شود. ارتباط اختلاف فاز ایجاد شده در تداخل سنجی راداری و مؤلفه‌های ذکر شده، به وسیله رابطه زیر تعیین می‌شود.

رابطه (۲)

$$+ \Delta\varphi_{\text{Deformation}} + \Delta\varphi_{\text{Atmosphere}} + \text{noise}$$

$$\Delta\varphi_2 = \varphi_{21} - \varphi_2 = \Delta\varphi_{\text{Geometry}} + \Delta\varphi_{\text{Topography}}$$

موقعیت نسبی تعدادی از عوارض زمینی در بازه زمانی بین دو تصویربرداری SAR به صورت جزئی تغییر می‌کند. این تغییرات ناشی از پدیده‌هایی نظیر فرونشست، زمین‌لرزه، زمین‌لغزش و یا حرکت گسل‌ها است. این اثر تغییر فازی را مستقل از خط مبنا ایجاد می‌کند که از رابطه زیر تعیین می‌شود.

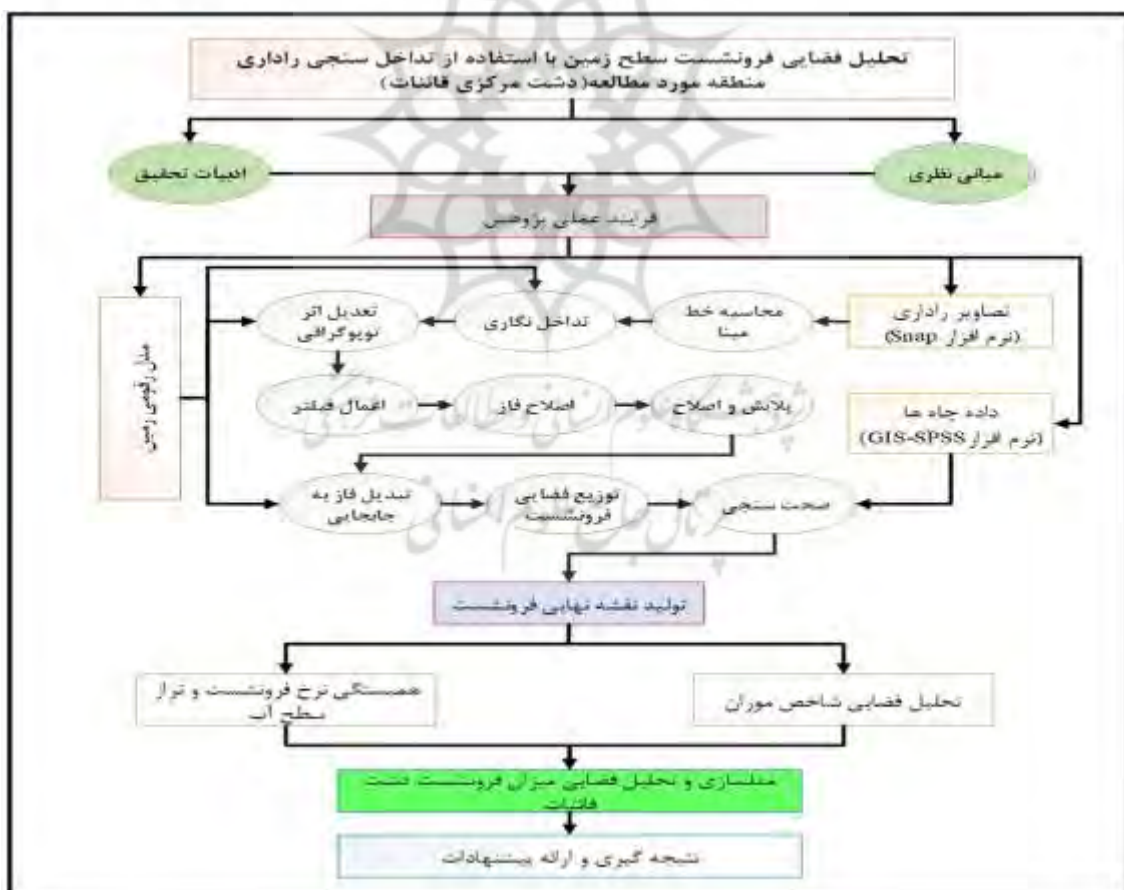
رابطه (۳)

$$\Delta\varphi_d = \frac{4\pi}{\lambda} d$$

در این رابطه؛ d تصویر جابجایی نسبی عارضه در راستای رنج مایل است. پس از مسطح سازی اینترفروگرام، فاز تداخل سنجی شامل هر دو اثر ارتفاعی و جابجایی خواهد بود؛ بنابراین تداخل سنجی در این حالت مطابق رابطه زیر تعیین می‌شود (زندی و همکاران، ۱۳۹۹).

رابطه (۴)

$$\Delta\varphi = -\frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_n q}{R \sin \theta} + \frac{4\pi}{\lambda} d$$



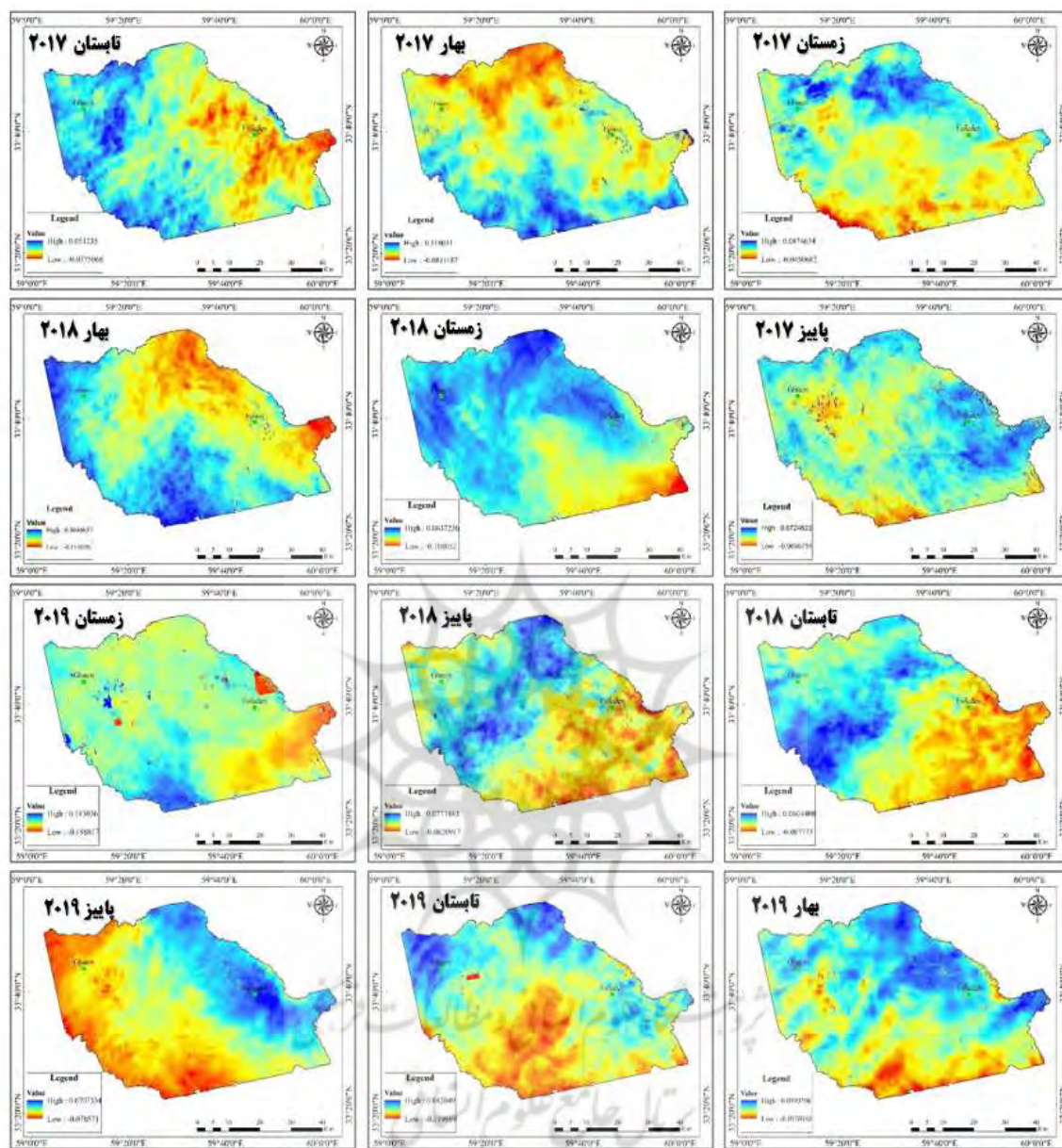
شکل ۲- فلوچارت مراحل انجام تحقیق

۴- نتایج و بحث

۴-۱- پایش فرونشست زمین

استخراج آب زیرزمینی و افت سطح آب‌های زیرزمینی به میزان فوق سبب کاهش فشار هیدرواستاتیک و خروج آب از خاک‌های سطح مخروطی دشت که مشتمل بر لایه‌های ریز و درشت است، منجر به تحکیم و کاهش حجم خاک و در نهایت رویداد نشست تدریجی زمین است؛ بنابراین علی‌رغم وجود علت‌های مختلف قابل مطالعه در ایجاد نشست؛ در تحلیل نمودار و نیز با تعیین افت سطح آب می‌توان صحت فرض این پژوهش را در دشت قائنات تأیید نمود. در این تحقیق با روش تداخل سنجی تفاضلی داده‌های راداری، میزان و دامنه جابجایی سطح زمین برای دشت مرکزی قائنات تبیین شده است. برای منظور تولید نقشه‌های نشان دهنده الگوی فضایی میزان و دامنه نشست از زوج تصویر سنجنده‌های راداری در بازه زمانی ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۰ (زمستان ۱۳۹۵ تا زمستان ۱۳۹۸) جهت انجام عملیات تداخل سنجی استفاده شده است.

بررسی الگوی فصلی فرونشست زمین در این بازه زمانی مشخص کرد که میزان فرونشست زمین در دشت مرکزی قائنات، در فصول مختلف سال و پهنه‌های مختلف، متفاوت بوده است. بر همین اساس در سال ۲۰۱۷، بیشترین میزان فرونشست (۰,۰۸۱۱ متر یا ۸ سانتی‌متر) مربوط به فصل بهار بوده که در نواحی شمالی دشت قائنات اتفاق افتاده است و کمترین میزان فرونشست مربوط به فصل زمستان است. در سال ۲۰۱۸ نیز بیشترین مقدار فرونشست در فصل بهار و برابر با ۱۱,۴ سانتی‌متر بوده که در نواحی شمالی دشت قائنات اتفاق افتاده است، اما در سایر فصول بیشترین فرونشست در نواحی جنوب غربی دشت اتفاق افتاده است. در سال ۲۰۱۹ نیز میزان فرونشست در حال افزایش است. در این سال نیز بیشترین میزان فرونشست زمستان اتفاق افتاده که برابر با ۰,۱۹۹ متر (۱۹,۹ سانتی‌متر) بوده که در نواحی جنوب شرقی دشت قائنات اتفاق افتاده است. میزان فرونشست فصل تابستان نیز بالا و برابر با ۱۱,۹ سانتی‌متر بوده که در نواحی جنوبی دشت مورد مطالعه اتفاق افتاده است.

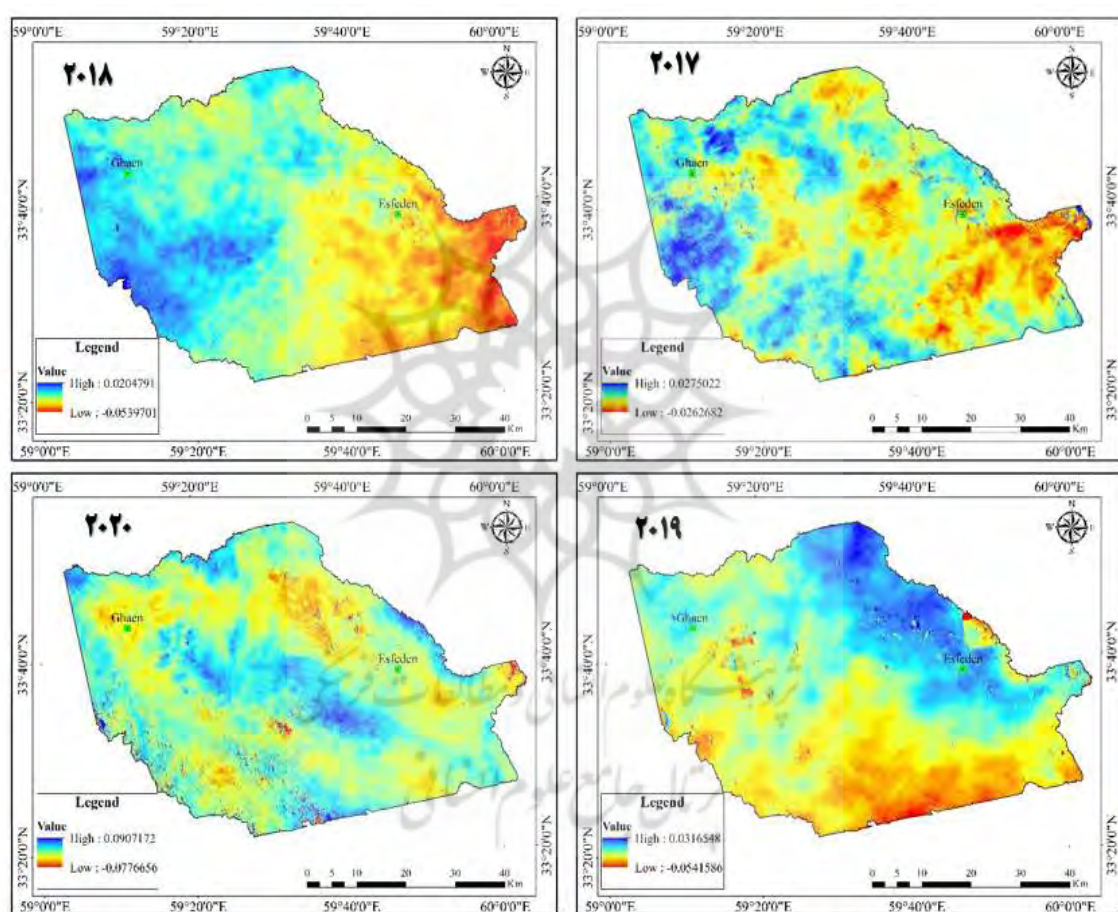


شکل ۳- الگوی فصلی فرونشست دشت مرکزی قائنات طی سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۰

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱۳۹۹

در ادامه روند سالانه فرونشست دشت قائنات طی دوره مورد مطالعه نیز مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به شکل (۴) الگوی فرونشست برای منطقه مورد مطالعه در جهت شمال غربی-جنوب شرقی قرار دارد. طبق نقشه مورد نظر بیشترین نرخ فرونشست در بازه زمانی یک‌ساله برای سال ۱۳۹۷ حاصل از داده‌های Sentinel ۰,۰۰۲۶ متر (۰,۲۶)

سانتیمتر) و در قسمت جنوب شرقی منطقه مورد مطالعه است. همچنین میزان $0,083$ متر ($0,83$ سانتیمتر) بالآمدگی سطح زمین در بازه زمانی مورد نظر در قسمت غرب و شمال غربی منطقه مورد مطالعه نیز برآورد شده است. مقدار فرونشست سالانه از 2017 تا 2020 در حال افزایش است که از $0,026$ متر در سال 2017 به $0,0539$ متر در سال 2018 ، $0,0542$ متر در سال 2019 و در سال 2020 به $0,078$ متر ($7,8$ سانتی متر در سال) می رسد. پهنه های در معرض فرونشست سالانه بیشتر منطبق بر نواحی جنوب شرقی دشت قائنات یعنی نهای پیرامونی شهر اسفدن است اما نواحی شمال غربی دشت و نواحی پیرامونی شهر قاین نیز با فرونشست همراه است.



شکل ۴- الگوی سالانه فرونشست دشت مرکزی قائنات در سالهای ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۰

۴-۲- شرایط هیدروژئولوژی منطقه

برای مشاهده ارتباط فرونشست با برداشت آب زیرزمینی در منطقه هیدروگراف های معرف آب زیرزمینی دشت مرکزی شهرستان قائنات ارائه شده است.

با توجه به وجود شواهدی مانند: (۱) بردارهای GPS و مشاهده میزان تغییر شکلی که این بردارها نمایش می‌دهند، (۲) حذف تصاویری نزدیک به تاریخ وقوع زمین‌لرزه که عامل اصلی جابه‌جایی در بازه زمانی خیلی کوتاه هستند و (۳) تطابق بیشترین نرخ فرونشست با محدوده آبخوان‌های آبرفتی، می‌توان گفت که عامل اصلی رخ دادن فرونشست زمین در منطقه مورد مطالعه، برداشت بی‌رویه منابع آب زیرزمینی و افت شدید تراز آب است. نشست‌هایی که تحت تأثیر پدیده تحکیم بر اثر خروج آب از لایه‌لای ذرات خاک‌های ریزدانه (رس و سیلت) حاصل می‌شود و وقوع آن تدریجی و تابع زمان است را نشست غیرالاستیک گویند (رحیمی، ۱۳۸۴)؛ یعنی در این حالت برخلاف نشست الاستیک، تغییر شکل بلافاصله بعد از اعمال نیرو به وقوع نمی‌پیوندد، بلکه تدریجاً و با پیشرفت زمان رخ می‌دهد. واحدهای رسی و سیلتی به علت ریزدانه بودن، تخلخل بالا و ضریب نفوذپذیری قابل ملاحظه، نقش کلیدی در مناطق فرونشست بر عهده دارند؛ زیرا نشست حاصل از برداشت آب از این لایه‌ها غیرقابل بازگشت و دائمی خواهد بود (ون جی^۱ و همکاران، ۲۰۱۳) و سبب کاهش ضریب ذخیره آبخوان و در موارد بحرانی سبب نابود شدن آبخوان برای همیشه می‌شود. چاه‌های بهره‌برداری در منطقه مهم‌ترین عامل تخلیه آب از دشت‌ها هستند و از آنجاکه هر چاه، با تخلیه آب منفذی محدوده شعاعی اطراف خودش سبب کاهش فشار آب منفذی می‌شود، تعادل نیروها به هم می‌خورد و تنش مؤثر در محدوده اطراف چاه افزایش می‌یابد. برای جبران کاهش فشار آب منفذی آبخوان متراکم می‌شود و این امر به نشست غیرالاستیک در لایه‌های ریزدانه می‌انجامد. به منظور بررسی ارتباط فرونشست با برداشت آب زیرزمینی در منطقه، در این بخش هیدروگراف‌های معرف آب زیرزمینی دشت مرکزی قائنات به همراه تغییرات تراز بلندمدت آب زیرزمینی پیژومترهای مختلف ارائه خواهد شد، زیرا رفتار پیژومترها به خوبی بیانگر روند کاهش فشار آب منفذی در آبخوان است. اندازه‌گیری تراز آب، از سطح زمین تا سطح آب موجود در چاه صورت می‌گیرد و بنابراین، هرچه میزان بیشتر باشد، در حقیقت افت سطح آب چاه را نشان می‌دهد. در شکل ۵ مشاهده می‌شود که هیدروگراف معرف آب زیرزمینی در دشت مرکزی قائنات افت محسوس‌تری در طی چندین سال اخیر داشته، به طوری که عمق آب‌های زیرزمینی به میزان ۱,۳۰ متر افزایش یافته است. این مسئله بیانگر این است که میزان افت تراز آب در دشت حدود ۱,۳۰ متر در طول ۵ سال (از سال ۱۳۹۳ تا اسفند ۱۳۹۸) بوده است، یعنی حدوداً سالی ۲۶ سانتی‌متر افت سطح آب‌های زیرزمینی را داشته‌ایم.

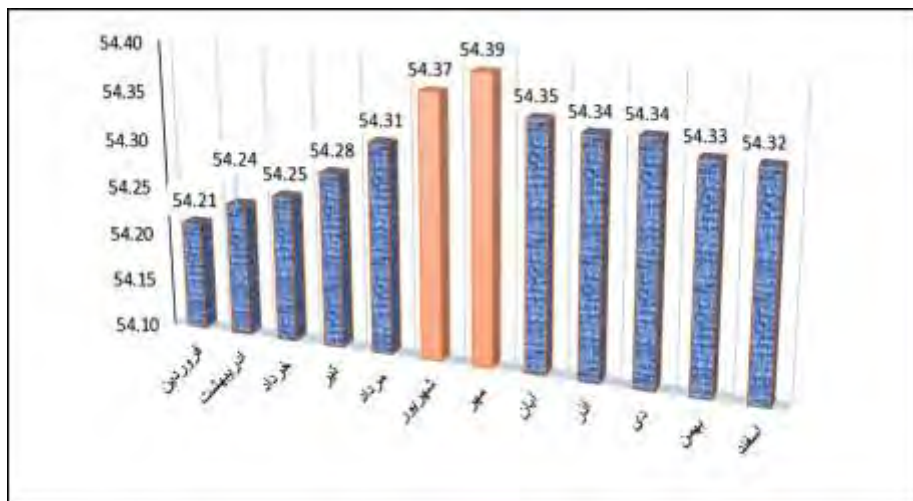
هیدروگراف واحد منطقه نیز که با استفاده از داده‌های مربوط به چاه‌های مشاهده‌ای طی دوره مورد مطالعه ترسیم شده است، اگرچه چندین بالاآمدگی سطح تراز آب زیرزمینی را (از جمله در آذر ۱۳۹۵ تا خرداد ۱۳۹۶) نشان می‌دهد اما روند سینوسی نمودار حکایت از کاهش قابل توجه سطح آب زیرزمینی است. همان‌طور هم که در شکل ۵ مشخص است روند افزایش سالانه برداشت آب تا ماه شهریور و مهر ادامه دارد و از مهرماه یا آبان که بارندگی‌ها

افزایش یافته، مجدد میزان برداشت آب با روند کاهشی روبه‌رو شده است که دلیل این امر هم می‌تواند کاهش نیاز آبی، شروع بارندگی‌های پاییز و زمستان و توقف روند برداشت آب از چاه باشد. بر اساس بررسی انجام شده طی دوره مورد مطالعه، سطح تراز آب زیرزمینی در حال افزایش است و سال ۱۳۹۸ بیشترین افزایش سطح تراز آب (افت سطح آب) را داشته است همچنین بیشترین شیب مشاهده شده مربوط به اسفند ۱۳۹۷ تا فروردین ۱۳۹۸ است.



شکل ۵- میزان برداشت آب از چاه‌های نمونه واقع در دشت مرکزی قائنات از فروردین ۱۳۹۳ تا اسفند ۱۳۹۸

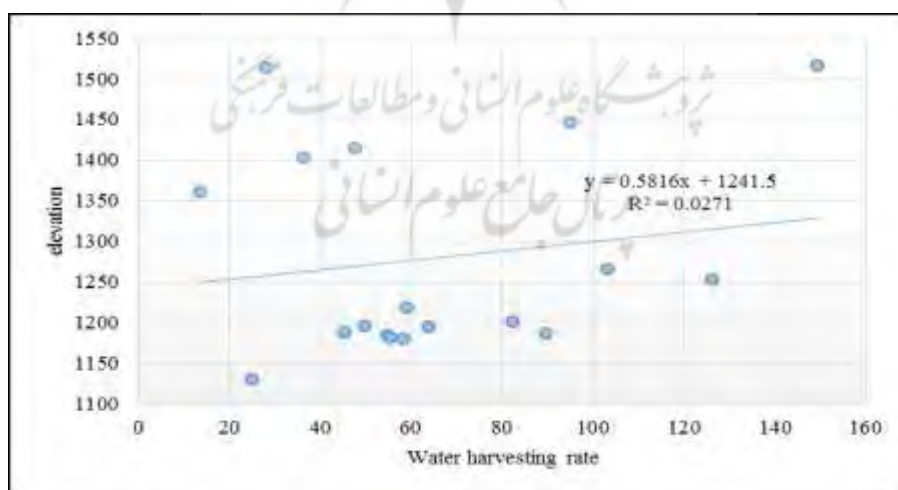
شکل ۶ روند افزایش عمق دسترسی به آب زیرزمینی برای هرماه ارائه شده با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که بیش‌ترین مقدار روند کاهشی در ماه مهر و شهریور و کم‌ترین مقدار در ماه فروردین است. به‌طوری‌که از شکل نیز می‌توان استنباط کرد میانه شیب‌های خط روند تغییرات تراز آب زیرزمینی در تمام ماه‌های سال منفی و ما بین ۰٫۲۱ تا ۰٫۳۹ متر در سال تغییر می‌کند؛ به‌عبارت‌دیگر سطح ایستابی آبخوان دشت قائنات به‌طور متوسط در طول ۶ سال بین ۰٫۲۱ در فروردین‌ماه و ۰٫۳۹ متر در آبان کاهش پیدا می‌کند؛ که یکی از عوامل افت سطح آب زیرزمینی را بهره‌برداری غیراصولی از چاه‌های حفر شده می‌توان معرفی کرد.



شکل ۶- روند تغییرات تراز آب زیرزمینی دشت مرکزی قائنات از سال ۲۰۱۴ تا سال ۲۰۲۰

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱۳۹۹

برای این که ملاحظه شود چه رابطه‌ای بین میزان برداشت آب و ارتفاع برقرار بوده، ضریب همبستگی بین متغیرهای مذکور مورد محاسبه قرار گرفته؛ به این ترتیب که ضریب همبستگی بین ارتفاع به عنوان متغیر مستقل و سطح برداشت آب در سطح دشت مورد مطالعه به عنوان متغیر وابسته محاسبه شده است (شکل ۷). ضریب به دست آمده بر این اساس برابر با $I=0/164$ بوده که همبستگی ضعیف و معنی داری را بین دو متغیر مذکور نشان می‌دهد؛ به عبارت دیگر در نواحی با ارتفاع بیشتر، افزایش سطح تراز آب زیر زمینی نیز به نسبت بیشتر بوده است.



شکل ۷- میزان همبستگی بین متغیرها (مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱۳۹۹)

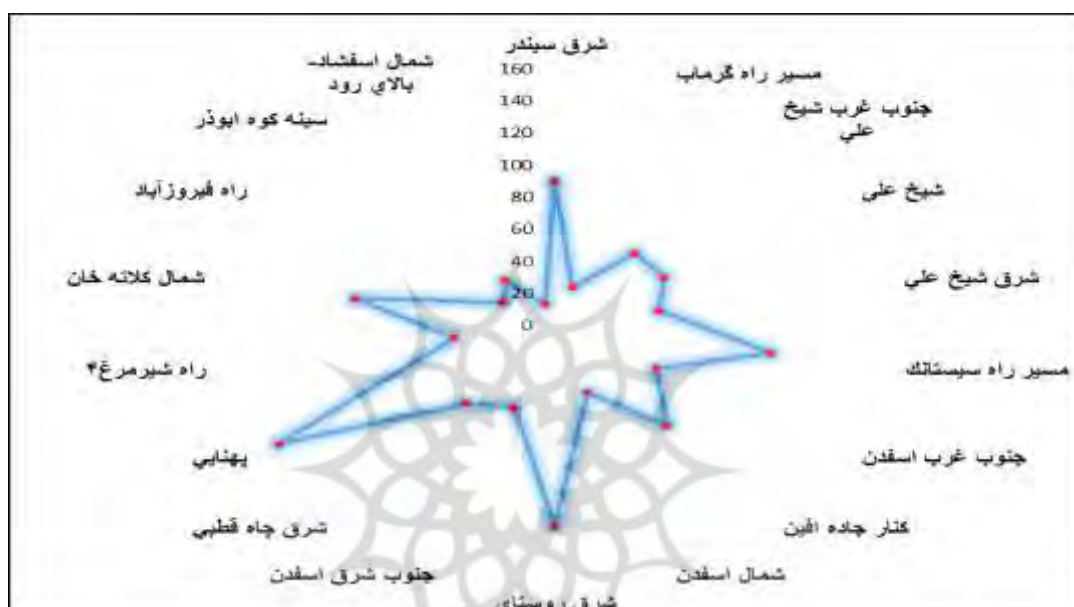
مشخصات آماری چاه‌های مورد مطالعه و میزان میانگین سالانه تراز آب در دوره آماری سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۰ برای چاه‌های مورد بررسی در جدول ۲ درج شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود ایستگاه یا چاه پهنایی با میانگین افت سطح تراز ۱۴۹,۳۹ متر در طول دوره مورد مطالعه، شدیدترین روند منفی را داشته است که در غرب منطقه مورد مطالعه واقع شده است.

جدول ۲- متوسط سطح تراز آب زیرزمینی آبخوان ابرفتی چاه‌های نمونه در محدوده مورد مطالعه

چاه	۲۰۱۷				۲۰۱۸				۲۰۱۹				۲۰۲۰
	زمستان	بهار	تابستان	پاییز	زمستان	بهار	تابستان	پاییز	زمستان	بهار	تابستان	پاییز	زمستان
شرق سیندر	۸۹,۷	۸۹,۶	۸۹,۸	۸۹,۸	۸۹,۷	۸۹,۷	۸۹,۸	۸۹,۸	۸۹,۷	۸۹,۷	۸۹,۸	۸۹,۸	۸۹,۷
مسیر راه گرماب	۲۴,۸	۲۴,۸	۲۴,۸	۲۴,۸	۲۴,۸	۲۴,۸	۲۴,۹	۲۴,۹	۲۴,۹	۲۴,۹	۲۴,۹	۲۴,۹	۲۴,۹
جنوب غرب شیخ علی	۵۸	۵۸	۵۸,۱	۵۸,۱	۵۸,۱	۵۸,۱	۵۸,۲	۵۸,۲	۵۸,۲	۵۸,۲	۵۸,۳	۵۸,۲	۵۸,۲
شیخ علی	۵۸,۹	۵۸,۹	۵۹	۵۹	۵۹	۵۹	۵۹	۵۹,۱	۵۹	۵۹	۵۹,۱	۵۹,۱	۵۹
شرق شیخ علی	۴۹,۵	۴۹,۶	۴۹,۶	۴۹,۷	۴۹,۷	۴۹,۸	۴۹,۸	۴۹,۹	۴۹,۹	۵۰	۵۰	۴۹,۹	۴۹,۹
مسیر راه سیستانک	۱۰۲,۷	۱۰۲,۸	۱۰۲,۸	۱۰۲,۹	۱۰۲,۹	۱۰۳	۱۰۳	۱۰۳,۱	۱۰۳,۲	۱۰۳,۲	۱۰۳,۳	۱۰۳,۱	۱۰۳,۲
جنوب غرب اسفدن	۵۴,۶	۵۴,۶	۵۴,۷	۵۴,۷	۵۴,۸	۵۴,۸	۵۴,۹	۵۵	۵۵	۵۵,۱	۵۵,۱	۵۵	۵۵
کنار جاده افین	۸۲	۸۲	۸۲,۱	۸۲,۲	۸۲,۲	۸۲,۳	۸۲,۴	۸۲,۴	۸۲,۴	۸۲,۵	۸۲,۶	۸۲,۵	۸۲,۴
شمال اسفدن	۴۴,۶	۴۴,۶	۴۴,۸	۴۵	۴۴,۹	۴۵	۴۵,۲	۴۵,۳	۴۵,۳	۴۵,۴	۴۵,۷	۴۵,۴	۴۵,۳
شرق روستای خطیبی	۱۲۵,۹	۱۲۵,۹	۱۲۶	۱۲۶	۱۲۶	۱۲۶,۱	۱۲۶,۱	۱۲۶,۱	۱۲۶,۱	۱۲۶,۱	۱۲۶	۱۲۶,۱	۱۲۶,۱
جنوب شرق اسفدن	۵۴,۹	۵۴,۹	۵۵,۲	۵۵,۲	۵۵,۱	۵۵,۲	۵۵,۳	۵۵,۴	۵۵,۲	۵۵,۵	۵۵,۷	۵۵,۵	۵۵,۲
شرق چاه قطبی	۶۳,۴	۶۳,۴	۶۳,۶	۶۳,۷	۶۳,۷	۶۳,۷	۶۳,۸	۶۳,۹	۶۳,۹	۶۳,۹	۶۴,۱	۶۳,۹	۶۳,۹
پهنایی	۱۴۷,۳	۱۴۷,۶	۱۴۸,۴	۱۴۸,۹	۱۴۹	۱۴۹,۲	۱۴۹,۷	۱۵۰,۲	۱۴۹,۸	۱۵۰	۱۵۰,۸	۱۵۰,۳	۱۴۹,۸
راه شیر مرغ ۴	۴۷,۷	۴۷,۷	۴۷,۷	۴۷,۷	۴۷,۷	۴۷,۶	۴۷,۶	۴۷,۶	۴۷,۵	۴۷,۶	۴۷,۵	۴۷,۶	۴۷,۵
شمال کلاته خان	۹۴,۹	۹۴,۹	۹۴,۹	۹۵	۹۵	۹۵	۹۵	۹۵,۱	۹۵,۱	۹۵,۱	۹۵,۲	۹۵,۱	۹۵,۱
راه فیروزآباد	۲۸,۲	۲۷,۷	۲۸,۳	۲۸,۴	۲۸,۱	۲۸,۱	۲۸,۴	۲۸,۵	۲۷,۹	۲۷,۵	۲۷,۸	۲۸,۴	۲۷,۹
سینه کوه ابوذر	۳۳,۷	۳۳,۷	۳۳,۹	۳۴,۱	۳۳,۷	۳۳,۷	۳۳,۷	۳۳,۸	۳۳,۶	۳۹,۳	۳۹,۲	۳۹,۵	۳۹,۴
شمال اسفشاد	۱۴	۱۳,۵	۱۳,۸	۱۴	۱۳,۸	۱۳,۶	۱۳,۸	۱۴	۱۳,۶	۱۲,۹	۱۲,۹	۱۳,۸	۱۳,۶

مأخذ: سازمان آب منطقه‌ای استان خراسان جنوبی

همچنین نتایج آزمون همگنی روند تراز آب زیرزمینی دشت مورد مطالعه نشان می‌دهد که مقدار X^2 محاسبه شده برای ایستگاه‌ها بزرگ‌تر از X^2 متناظر جدول با درجه آزادی ۱۷ است؛ بنابراین، ایستگاه‌ها از نظر داشتن روند تغییرات تراز آب زیرزمینی در سطح ۰.۵٪ همگن نیست. نتایج به دست آمده در شکل زیر قابل مشاهده است؛ به طوری که چاه پهنایی، شرق روستای خطیبی و مسیر راه سیستانک بیشترین افت سطح تراز آب را داشته و چاه‌های شمال اسفند و مسیر راه گرماب کمترین میزان افت را در سطح تراز آب داشته است.



شکل ۸- مقایسه میزان افت سطح تراز آب در چاه‌های مورد مطالعه

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱۳۹۹

برای اطمینان از صحت نتایج حاصل از تداخل سنجی راداری نمونه‌هایی از شواهد صحرایی این فرونشست در

شکل ۹ ارائه شده است.



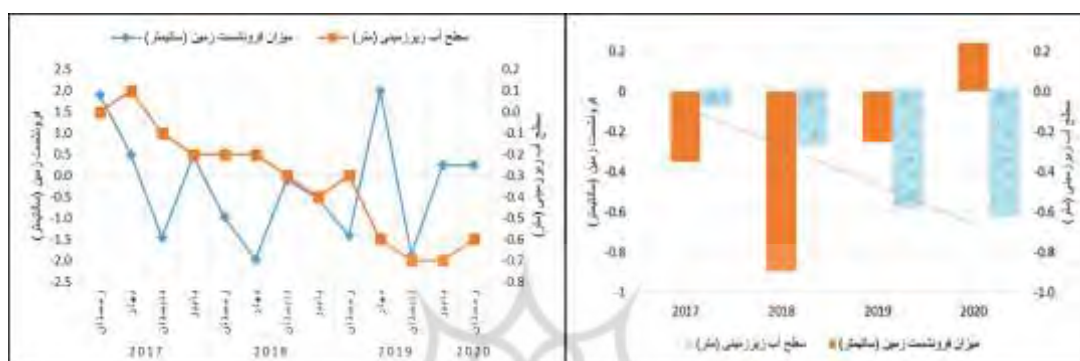
شکل ۹- مشاهدات میدانی نویسندگان از بررسی فرونشست دشت مرکزی قائنات

۴-۳- تأثیر هیدروژئولوژی منطقه بر روی فرونشست

به منظور درک بهتر تأثیر هیدروژئولوژی منطقه بر روی فرونشست، نتایج حاصل از تداخل سنجی راداری به صورت نمودارهای سری زمانی ترسیم شد و با نمودارهای تغییرات سطح آب زیرزمینی در پیزومترهایی که در همان نقاط قرار داشتند، مقایسه شد (شکل ۱۰). منحنی‌های آبی سطح آب زیرزمینی را بر حسب متر و منحنی‌های نارنجی نرخ میانگین فرونشست سالانه را بر حسب سانتی‌متر بر سال در کل منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهند. بر طبق این مقایسه مشاهده می‌شود که روند فرونشست، تطابق قابل ملاحظه‌ای با روند کاهش سطح آب زیرزمینی در مناطق مختلف داشته و در مناطقی که فرونشست بیشتری رخ داده است، بیشترین میزان افت سطح آب زیرزمینی نیز مشاهده می‌شود؛ اما نکته قابل توجه این بوده که بیشترین میزان فرونشست در مناطقی رخ داده است که علاوه بر افت شدید تراز آب، لایه‌های ضخیم رس و سیلت با قابلیت فشردگی دائم بالا نیز وجود دارند. همچنین در برخی مناطق با وجود افت شدید تراز آب، هیچ نشیست قابل ملاحظه‌ای رخ نداده است که بررسی اطلاعات دانه‌بندی لایه‌های زیرین نشان

می‌دهد در این مناطق لایه‌های ریزدانه ضخیم (رس و سیلت) وجود ندارد؛ بنابراین می‌توان به این نتیجه رسید که احتمال وقوع فرونشست در مکان‌هایی با لایه‌های ریزدانه بالاست.

نکته قابل توجه این است که از سال ۲۰۱۷ به بعد، تراز آب زیرزمینی افت شدیدی داشته که این امر با نرخ فرونشست بیشتر در منطقه همراه است. دلیل این امر به خشکسالی‌های شدید سال‌های اخیر مربوط می‌شود که منجر به افزایش تقاضا برای آب و اضافه برداشت شدید آب زیرزمینی در منطقه شده است.



شکل ۱۰- روند سالانه و فصلی سطح آب زیرزمینی و فرونشست زمین در دشت قائنات (سال‌های ۲۰۱۷ تا

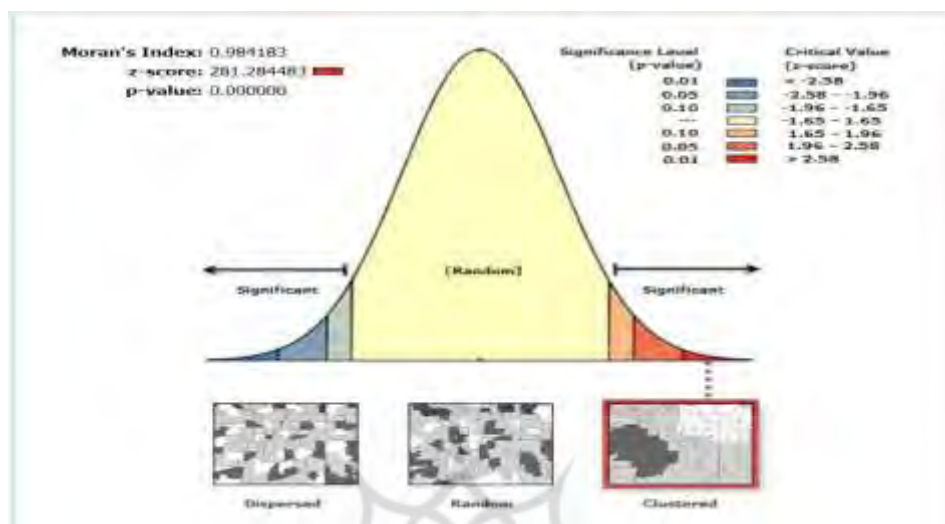
۲۰۲۰)

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱۳۹۹

تحلیل خودهمبستگی فضایی و شاخص موران نیز خوشه‌ای بودن رخداد فرونشست تحت تأثیر تغییرات سطح آب در منطقه مورد مطالعه را تأیید کرد. خودهمبستگی به رابطه بین مقادیر باقیمانده در طول خط رگرسیون مربوط می‌شود و زمانی خودهمبستگی قوی رخ می‌دهد که مقادیر باقیمانده شدیداً باهم در ارتباط باشند، به عبارت دیگر تغییراتشان به صورت سیستماتیک رخ دهد. شاخص موران ابزاری در تحلیل خودهمبستگی فضایی است که به تحلیل الگوی توزیع عوارض در فضا با ملاحظه هم زمان موقعیت مکانی و مقدار خصیصه مورد نظر می‌پردازد. نتایج حاصل از این تحلیل نشان می‌دهد که آیا عوارض به صورت تصادفی، پراکنده یا خوشه‌ای در فضا توزیع شده‌اند. هر چه میزان شاخص موران به یک نزدیک‌تر باشد نشان دهنده قوی‌تر بودن الگوی خوشه‌ای است (بلیانی و حکیم دوست، ۱۳۹۳؛ عسگری، ۱۳۹۰: ۱۴).

بر اساس این آزمون شاخص موران 0.984183 است و از آنجاکه مقدار آن مثبت، بالای صفر و نزدیک به یک است، می‌توان نتیجه گرفت که الگوی فرونشست زمین در دشت مرکزی قائنات دارای خود همبستگی فضایی و دارای الگوی خوشه‌ای است. با توجه به بالا بودن امتیاز استاندارد $Z = 281.28$ و مقدار P-Value صفر است،

می‌توان همبستگی و خوشه‌ای بودن الگوی داده‌ها یا شاخص فرونشست زمین را در منطقه‌ی مورد مطالعه تأیید نمود؛ که به معنی نامتوازن بودن سطح برداشت آب‌های زیر زمینی و ... است (شکل ۱۱).



شکل ۱۱- تحلیل الگوی نرخ فرونشست زمین با شاخص خودهمبستگی فضایی در منطقه مورد مطالعه

به‌منظور پیش‌بینی رخداد پدیده فرونشست در آینده، از پارامترهای تغییرات سطح آب، ارتفاع سطح زمین، شیب و ناهمواری‌ها استفاده شد. خلاصه مشخصات آماری پارامترهای مورد مطالعه در جدول ۳ نشان داده شده است. نتایج جدول نشان می‌دهد که، ناهمواری‌های محدوده مطالعاتی دامنه‌ای بین ۱ تا ۳۳ متر داشته و بیشینه شیب منطقه، حدود ۲۶ درجه است. با توجه به برداشت‌های صورت گرفته، تغییرات تراز آب زیرزمینی و میزان افت آن از ۰٫۶۲ متر تا بیش از ۳۰ متر در منطقه مشاهده می‌شود. میانگین این افت، حدود ۱۴ متر است. بیشترین تراکم مشاهده شده فرونشست زمین در منطقه نیز بود.

جدول ۳. خلاصه مشخصات آماری پارامترهای مورد مطالعه

شاخص	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف معیار
نرخ فرونشست زمین	-۰٫۰۰۵۳	۰٫۰۰۱۵	-۰٫۰۰۱۳۹	۰٫۰۰۲۱
سطح برداشت آب زیرزمینی	۱۳٫۶۲	۱۴۹٫۳۹	۶۵٫۶۷	۳۵٫۷۷
ارتفاع	۱۱۳۰٫۳	۱۵۱۶٫۷۷	۱۲۷۹٫۶۷	۱۲۶٫۴۹
شیب	۱٫۴	۱۷٫۰۸	۶٫۶۲	۴٫۱۰۷

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱۳۹۹

به منظور شناخت ارتباط بین این عوامل، ماتریس همبستگی محاسبه شد که نتایج آن در جدول ۴ نشان داده شده است. یافته‌های همبستگی بین شاخص‌ها نشان داد که بین عامل تغییرات تراز سطح آب و نرخ فرونشست زمین، همبستگی کمی وجود داشته ($p = 0,138$) که این ارتباط غیرمستقیم است؛ یعنی هر چه میزان برداشت آب زیرزمینی بیشتر باشد (یا سطح تراز آب کمتر شود)، میزان فرونشست نیز بیشتر می‌شود لازم به ذکر است که با توجه به سطح معناداری ($\text{sig} = 0,05$) این ارتباط معنادار نیست؛ اما بین نرخ فرونشست زمین و شیب و ارتفاع زمین همبستگی معناداری وجود دارد، که با توجه به مقدار آماریه پیرسون، همبستگی بین عوامل، معکوس بوده است؛ به عبارت دیگر هر چه میزان ارتفاع و شیب کمتر شده است، میزان فرونشست زمین بیشتر شده است.

جدول ۴- ماتریس همبستگی تراکم رخداد فرونشست (متغیر وابسته) با سایر پارامترهای مستقل

نتیجه	نرخ فرونشست زمین		متغیر وابسته متغیر مستقل
	Sig. (2-tailed)	Pearson Correlation	
عدم ارتباط معنادار	۰,۵۸۵	-۰,۱۳۸	سطح برداشت آب زیرزمینی
ارتباط معنادار	۰,۰۳۴	-۰,۴۴۵*	ارتفاع
ارتباط معنادار	۰,۰۴۷	-۰,۴۷۴*	شیب

مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱۳۹۹

۵- نتیجه گیری

اندازه‌گیری میزان و دامنه جابجایی سطح زمین از طریق اطلاعات ماهواره‌ای روشی نوین در پایش این پدیده است که طی دهه قبل مطرح شده است. تداخل سنجی راداری تا کنون یکی از دقیق‌ترین و کم‌هزینه‌ترین روش‌های سنجش‌ازدور برای شناسایی و نمایش جابجایی به وجود آمده در سطح زمین است. همچنین این روش به واسطه بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای و قابلیت تکرارپذیری آن پایش این پدیده در مکان موردنظر با سهولت و کوتاه‌ترین زمان امکان اجرا دارد. این روش بررسی میزان جابجایی سطح زمین را در تمام محدوده موردبررسی امکان‌پذیر کرده است و امکان پایش آن را برای تمام نقاط برای دوره‌های زمانی مختلف فراهم نموده است. در این تحقیق از روش تداخل سنجی راداری برای تحلیل و اندازه‌گیری میزان جابجایی سطح زمین برای دشت مرکزی شهرستان قائنات استفاده شده است. نتایج این بررسی نشان داد که بیشترین فرونشست در بازه زمانی یک‌ساله و فصلی طی سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۰ برای منطقه مورد مطالعه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که میزان فرونشست زمین از سال ۲۰۱۷ تا سال ۲۰۲۰ افزایش داشته است؛ به طوری که از ۰,۰۲۶ متر در سال ۲۰۱۷ به ۰,۰۵۳۹ متر در سال ۲۰۱۸، ۰,۰۵۴۲ متر در سال ۲۰۱۹ و در سال ۲۰۲۰ به ۰,۰۷۸ متر (۷,۸ سانتی‌متر در سال) می‌رسد. پهنه‌های در معرض

فرونشست سالانه بیشتر منطبق بر نواحی جنوب شرقی دشت قائنات یعنی نحای پیرامونی شهر اسفدن است؛ اما نواحی شمال غربی دشت و نواحی پیرامونی شهر قاین نیز با فرونشست همراه است. پژوهش‌های پیشین، بر نقش و اهمیت استفاده از تصاویر راداری سنجنده‌های مختلف در شناسایی دقیق این پدیده تأکید داشته‌اند. تحقیق حاضر همانند مطالعات امام اوغلو^۱ و همکاران (۲۰۱۸)، بای لین^۲ و همکاران (۲۰۱۶)، لیو^۳ و همکاران (۲۰۱۸)، اوسمانو^۴ و همکاران (۲۰۱۶) و کیو^۵ و همکاران (۲۰۱۴)، از سازگاری بسیار بالای نتایج تداخل سنجی راداری با مشاهدات زمینی را نشان می‌دهد و مناسب بودن این روش در اندازه‌گیری تغییر شکل سطح زمین را تأیید می‌کند. منطقه مورد مطالعه در دهه‌های اخیر رشد جمعیت را در کنار توسعه کشاورزی تجربه کرده است. بارش کم سال‌های اخیر و خشک‌سالی‌های متوالی، محدودیت منابع آب سطحی، روش‌های نادرست آبیاری در بخش کشاورزی در منطقه مطالعاتی، به همراه الگوی کشت نامناسب، موجب حفر بی‌رویه چاه‌های آب در منطقه شده است. برداشت بی‌رویه از این چاه‌ها و منابع آب زیرزمینی، موجب عدم تعادل آبخوان منطقه شده و پایین رفتن سطح آب زیرزمینی را به دنبال داشته است.

به‌منظور بررسی ارتباط فرونشست با برداشت آب زیرزمینی در منطقه، اندازه‌گیری تراز آب، از سطح زمین تا سطح آب موجود در چاه انجام شد که هیدروگراف معرف آب زیرزمینی در دشت مرکزی قائنات افت محسوسی در طی چندین سال اخیر داشته، به طوری که عمق آب‌های زیرزمینی به میزان ۱,۳۰ متر افزایش یافته است. این مسئله بیانگر این است که میزان افت تراز آب در دشت حدود ۱,۳۰ متر در طول ۵ سال (از سال ۱۳۹۳ تا اسفند ۱۳۹۸) بوده است، یعنی حدوداً سالی ۲۶ سانتی‌متر افت سطح آب‌های زیرزمینی را داشته‌ایم. نتایج حاصل از این بخش مطالعه، در راستای مطالعات از سوی سایر پژوهشگران از جمله نادریان فر و همکاران (۲۰۱۱) در دشت نیشابور، اکرامی و همکاران (۲۰۱۱) در منابع آب زیرزمینی دشت یزد- اردکان، مطالعه فلاح و همکاران (۲۰۱۲) بر روی منابع آب زیرزمینی دشت داراب استان فارس و بهمنش و همکاران (۱۳۹۴) در بررسی روند تغییرات تراز آب زیرزمینی دشت ارومیه است. تحلیل خودهمبستگی فضایی و شاخص موران نیز خوشه‌ای بودن رخداد فرونشست تحت تأثیر تغییرات سطح آب در منطقه مورد مطالعه را تأیید کرد. با توجه به بالا بودن امتیاز استاندارد $Z = (281, 28)$ و مقدار P -Value صفر است، می‌توان همبستگی و خوشه‌ای بودن الگوی داده‌ها یا شاخص فرونشست زمین را در منطقه مورد مطالعه تأیید نمود؛ که به معنی نامتوازن بودن سطح برداشت آب‌های زیرزمینی و ... است. نتایج همبستگی بین شاخص‌ها نشان داد که بین عامل تغییرات تراز سطح آب و نرخ فرونشست زمین، همبستگی کمی وجود داشته

1 Imamoglu

2 Bai lin

3 Liu

4 Osmanoglu

5 Qu

($p = -0.138$) که این ارتباط غیرمستقیم است؛ یعنی هر چه میزان برداشت آب زیرزمینی بیشتر باشد (یا سطح تراز آب کمتر شود)، میزان فرونشست نیز بیشتر می‌شود لازم به ذکر است که با توجه به سطح معناداری ($\text{sig} = 0.0585$) این ارتباط معنادار نیست که با یافته‌های حاصل از به‌کارگیری این روش با دیدگاه افت سطح آب زیرزمینی که توسط پژوهشگران مختلف مانند گالوی^۱ و همکاران (۲۰۱۱)، متاگ^۲ و همکاران (۲۰۰۸)، فین^۳ و همکاران (۲۰۰۶) همسو نیست؛ اما نتایج به دست آمده با تحقیقاتی که توسط آروین و همکاران (۱۳۹۸)، حاجب و همکاران (۱۳۹۸)، دهقانی (۱۳۹۴)، جادا^۴ و همکاران (۲۰۰۹)، شوجون^۵ و همکاران (۲۰۱۶)، توماس^۶ و همکاران (۲۰۱۰)، وونگ^۷ و همکاران (۲۰۰۹)، انجام شد، مطابقت دارد. همچنین بر اساس نتایج پژوهش حاضر بین نرخ فرونشست زمین و شیب و ارتفاع زمین همبستگی معناداری وجود دارد، که با توجه به مقدار آماریه پیرسون، همبستگی بین عوامل، معکوس بوده است؛ به عبارت دیگر هر چه میزان ارتفاع و شیب کمتر شده است، میزان فرونشست زمین بیشتر شده است.

لازم به یادآوری است که کاهش بارندگی، بروز خشکسالی‌های پیوسته در چند سال اخیر و برداشت‌های بی‌رویه و غیرمجاز، در کاهش حجم ذخایر سفره و بروز روند منفی عمق دسترسی به آب زیرزمینی آبخوان دشت قائنات بی‌تأثیر نبوده است. همچنین در دهه‌های گذشته روند منفی برای تراز آب زیرزمینی در نقاط مختلف جهان و ایران گزارش شده است که با توجه به شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک کشور که ایران را کشوری دارای تنش آبی زیاد معرفی کرده است.

در نتیجه، این محدوده نه تنها از نظر کمی در وضعیت نامناسبی قرار دارد، از نظر کیفی هم در معرض خطر خواهد بود. به همین دلیل، برای کنترل این پدیده و کاهش اثرات منفی آن، به مدیریت درست و برنامه‌ریزی مناسب‌تر نیاز خواهد بود؛ و اگر برداشت بی‌رویه آب به همین ترتیب ادامه یابد بدون شک در آینده عواقب نامطلوب در مورد منابع آب زیرزمینی دشت قائنات و به تبع آن بحران‌های اجتماعی، اقتصادی و سیاسی در منطقه اتفاق خواهد افتاد. تغذیه مصنوعی سفره آب زیرزمینی دشت مرکزی قائنات و تجدیدنظر در میزان بهره‌برداری از آبخوان مربوطه، جلوگیری از حفر چاه‌های غیرمجاز، افزایش راندمان آبیاری، جلوگیری از کشت محصولات نیازمند به آب فراوان، پوشش انهار و صرفه‌جویی در مصرف آب و آموزش کشاورزان، می‌تواند تا حدودی از افت بی‌رویه سطح آب این دشت جلوگیری شود.

1 Galloway

2 Motagh

3 Phien

4 Jadda

5 Shujun

6 Tomas

7 Wang

کتابنامه

- احمدی، نعیمه؛ موسوی، زهرا؛ معصومی، زهره؛ ۱۳۹۷. مطالعه فرونشست دشت خرمدره با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری و بررسی مخاطرات آن. *سنجش/زدور و GIS/ایران*. دوره ۱۰. شماره ۳. صص ۵۲-۳۳.
https://gisj.sbu.ac.ir/article_96591.html
- آروین، عبدالخالق؛ وهابزاده کبریا، قربان؛ موسوی، سید رمضان؛ بختیاری کیا، مسعود؛ ۱۳۹۸. مدل سازی مکانی فرونشست زمین در جنوب حوزه آبخیز میناب با استفاده از سنجش ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی. *سنجش/زدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی*. دوره ۱۰ شماره ۳، صص ۱۹-۳۴.
https://girs.bushehr.iau.ir/article_668468.html
- اسدزاده، فرخ؛ کاکي، مهري؛ شکیبا، سینا؛ راعي، بیژن؛ ۱۳۹۵. تأثیر خشکسالی بر کیفیت و سطح آب زیرزمینی دشت قروه چهاردولی. *تحقیقات منابع آب ایران*. دوره ۱۲. شماره ۳۷. صص ۱۶۵-۱۵۳.
http://www.iwrr.ir/article_32629.html
- افضلی، عباسعلی؛ شریفی کیا، محمد؛ شایان، سیاوش؛ ۱۳۹۲. ارزیابی آسیب پذیری زیرساخت ها و سکونتگاه ها از پدیده فرونشست زمین در دشت دامغان. *دو فصلنامه ژئومورفولوژی کاربردی ایران*. دوره ۱. شماره ۱، صص ۶۱-۷۳.
<https://civilica.com/doc/793719>
- اکبری، ابراهیم؛ جوانشیری، مهدی؛ محمدپور، زینت؛ ۱۳۹۹. بررسی فرونشست سطح زمین در دشت اسفدن. *همایش محیط زیست جغرافیا و گردشگری دانشگاه بزرگمهر قائنات*.
- اکرامی، محمد؛ شریفی، ذبیح اله؛ ملکی نژاد، حسین؛ اختصاصی، محمدرضا؛ ۱۳۹۰. بررسی روند تغییرات کیفی و کمی منابع آب زیرزمینی دشت یزد- اردکان در دهه ۸۸-۱۳۷۹. *طلوع بهادشت*. دوره ۱۰. شماره ۳ و ۳-۴. صص ۸۲-۹۱.
<https://tbj.ssu.ac.ir/article-1-1803-fa.html>
- بابایی، سید ساسان؛ موسوی، زهرا؛ روستایی، مه آسا؛ ۱۳۹۵. آنالیز سری زمانی تصاویر راداری با استفاده از روش های طول خط مبنای کوتاه (SBAS) و پراکنش کننده های دائمی (PS) در تعیین نرخ فرونشست دشت قزوین. *علوم و فنون نقشه برداری*. دوره ۵. شماره ۴. صص ۹۵-۱۱۱.
<http://jgst.issge.ir/article-1-417-fa.html>
- بهمنش، جواد؛ صمدی، رقیه؛ و رضایی، حسین؛ ۱۳۹۴. بررسی روند تغییرات تراز آب زیرزمینی (مطالعه موردی: دشت ارومیه). *مجله پژوهش های حفاظت آب و خاک*. دوره ۲۲. شماره ۴. صص ۶۷-۸۴.
https://jwsc.gau.ac.ir/article_2691.html
- تورانی، مرجان؛ آق آتابای، مریم؛ روستایی، مه آسا؛ ۱۳۹۷. مطالعه فرونشست در شهر گرگان با استفاده از روش تداخل سنجی راداری. *مجله آمایش جغرافیایی فضا*. دوره ۸. شماره ۲۷. صص ۱۱۷-۱۲۸.
http://gps.gu.ac.ir/article_65973.html
- چترسیماب، زهرا؛ آل شیخ، علی اصغر؛ وثوقی، بهزاد؛ مدیری، مهدی؛ پاکدامن، محمدصادق؛ ۱۴۰۱. بررسی فرونشست سطح زمین در اثر برداشت بی رویه آب زیرزمینی با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری-آبخوان مرودشت. *مهندسی و مدیریت آبخیز*. دوره ۱۴. شماره ۱. صص ۱۱۴-۱۲۵.

https://jwem.areeo.ac.ir/article_119561.html

حاجب، زهرا؛ موسوی، زهرا؛ معصومی، زهره؛ رضایی، ابوالفضل؛ ۱۳۹۸. مطالعه فرونشست دشت قم با استفاده از تداخل سنجی راداری و ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی آبخوان. فصلنامه علمی علوم زمین. دوره ۲۹. شماره ۱۱۴. صص

https://www.gsjournal.ir/article_102902.html ۲۵۸-۲۵۱

حکیم دوست، سید یاسر؛ بلیانی، یدالله؛ ۱۳۹۳. اصول و مبانی پردازش داده‌های مکانی (فضایی) با استفاده از روش‌های تحلیل فضایی. انتشارات آزادپیما.

خلیفی، پری؛ اسفندیار نوین پور، عباس؛ ندیری، عطااله؛ قره‌خانی، مریم؛ ۱۳۹۶. بررسی فرونشست دشت اردبیل با استفاده از GIS. دومین کنفرانس ملی هیدرولوژی ایران، شهرکرد. <https://civilica.com/doc/661626>

دهقانی، مریم؛ ۱۳۹۴. ارائه الگوریتمی جدید بر مبنای تکنیک تداخل سنجی راداری به منظور پایش فرونشست سطح زمین ناشی از استخراج آب‌های زیرزمینی. مهندسی فناوری اطلاعات مکانی. دوره ۲. شماره ۲. صص ۶۱-۷۳.

<https://jgit.kntu.ac.ir/article-1-135-fa.html>

زند، رحمان؛ شفیعی، نجمه (۱۳۹۹). بررسی فرونشست سطح زمین در دشت جوبین. همایش محیط‌زیست جغرافیا و گردشگری دانشگاه بزرگمهر قاننات

علی، عسگری؛ ۱۳۹۰. تحلیل آمار فضایی با Arc Gis. تهران: سازمان فناوری اطلاعات و ارتباطات شهرداری تهران. فلاح، سیف‌اله؛ قبادی‌نیا، مهدی؛ شکرگزار دارابی، محسن؛ قربانی دشتکی، شجاع؛ ۱۳۹۱. بررسی پایداری منابع آب زیرزمینی دشت داراب استان فارس. پژوهش آب در کشاورزی (علوم خاک و آب). دوره ۲۱. شماره ۲. صص

https://wra.areeo.ac.ir/article_118963.html ۱۷۲-۱۶۱

مریخ پور، محمدحسین؛ موسوی، مرتضی؛ صفری کمیل، مصطفی؛ ۱۳۹۱. بررسی پدیده فرونشست زمین و فرو چاله در اثر افت سطح آب زیرزمینی در دشت کبودرآهنگ همدان. همایش ملی علوم مهندسی آب و فاضلاب، کرمان.

<https://civilica.com/doc/209139>

مقصودی، یاسر؛ امانی، رضا؛ احمدی، حسن؛ ۱۳۹۸. بررسی رفتار فرونشست زمین در منطقه غرب تهران با استفاده از تصاویر سنجنده سنتینل-۱ و تکنیک تداخل سنجی راداری مبتنی بر پراکنش گره‌های دائمی. تحقیقات منابع آب

ایران. دوره ۱۵. شماره ۱. صص ۲۹۹-۳۱۳. http://www.iwrr.ir/article_80494.html

مهرابی، علی؛ ۱۳۹۷. شناسایی شواهدی بر وجود گنبد نمکی مدفون و جدید در ناحیه زاگرس با استفاده از روش تداخل سنجی تصاویر راداری سنتینل-۱ و ایسار. سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی. دوره ۴.

شماره ۴. صص ۹۰-۱۰۱. https://girs.bushehr.iau.ir/article_663409.html

نادریان فر، محمد؛ انصاری، حسین؛ ضیائی، علی نقی؛ داوری، کامران؛ ۱۳۹۰. بررسی روند تغییرات نوسانات سطح آب‌زیرزمینی در حوضه آبریز نیشابور تحت شرایط اقلیمی مختلف. مهندسی آبیاری و آب ایران. دوره ۱. شماره ۳.

صص ۲۲-۳۷. <https://www.sid.ir/paper/247384/fa>

- Bai, L., Jiang, L., Wang, H., & Sun, Q., 2016. Spatiotemporal characterization of land subsidence and uplift (2009–2010) over wuhan in central china revealed by terrasar-X insar analysis. *Remote Sensing*, 8(4), 350. <https://doi.org/10.3390/rs8040350>
- Castellazzi, P., Arroyo-Domínguez, N., Martel, R., Calderhead, A. I., Normand, J. C., Gárfias, J., & Rivera, A., 2016. Land subsidence in major cities of Central Mexico: Interpreting In SAR-derived land subsidence mapping with hydrogeological data. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 47, 102-111. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.12.002>
- Chen, M., Tomás, R., Li, Z., Motagh, M., Li, T., Hu, L., ... & Gong, X., 2016. Imaging land subsidence induced by groundwater extraction in Beijing (China) using satellite radar interferometry. *Remote Sensing*, 8(6), 468. <https://www.mdpi.com/2072-4292/8/6/468>
- Ferretti, A., Savio, G., Barzaghi, R., Borghi, A., Musazzi, S., Novali, F., ... & Rocca, F., 2007. Submillimeter accuracy of InSAR time series: Experimental validation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(5), 1142-1153.
- Gabriel, A. K., Goldstein, R. M., & Zebker, H. A., 1989. Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 94(B7), 9183-9191. <https://doi.org/10.1029/JB094iB07p09183>
- Galloway, D. L., & Burbey, T. J., 2011. Regional land subsidence accompanying groundwater extraction. *Hydrogeology Journal*, 19(8), 1459-1486. <https://pubs.er.usgs.gov/publication/70034646>
- Imamoglu, M., Kahraman, F., & Abdikan, S., 2018, July. Preliminary results of temporal deformation analysis in Istanbul using multi-temporal InSAR with Sentinel-1 SAR data. In IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (pp. 1352-1355). IEEE.
- Jadda, M., Shafri, H. Z., Mansor, S. B., Sharifikia, M., & Pirasteh, S., 2009. Landslide susceptibility evaluation and factor effect analysis using probabilistic-frequency ratio model. *European Journal of Scientific Research*, 33(4), 654-668.
- Liu, C., Ji, L., Zhu, L., & Zhao, C., 2018. InSAR-constrained interseismic deformation and potential seismogenic asperities on the Altyn Tagh fault at 91.5–95 E, Northern Tibetan Plateau. *Remote Sensing*, 10(6), 943. <https://doi.org/10.3390/rs10060943>
- Mohammadimanesh, F., Salehi, B., Mahdianpari, M., Brisco, B., & Motagh, M., 2018. Wetland water level monitoring using interferometric synthetic aperture radar (InSAR): A review. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 44(4), 247-262. <https://doi.org/10.1080/07038992.2018.1477680>
- Motagh, M., Walter, T. R., Sharifi, M. A., Fielding, E., Schenk, A., Anderssohn, J., & Zschau, J., 2008. Land subsidence in Iran caused by widespread water reservoir overexploitation. *Geophysical Research Letters*, 35(16). <https://doi.org/10.1029/2008GL033814>
- Osmanoğlu, B., Sunar, F., Wdowinski, S., & Cabral-Cano, E., 2016. Time series analysis of InSAR data: Methods and trends. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 90-102. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.003>
- Phien-Wej, N., Giao, P. H., & Nutalaya, P., 2006. Land subsidence in bangkok, Thailand. *Engineering geology*, 82(4), 187-201. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2005.10.004>
- Qu, F., Zhang, Q., Lu, Z., Zhao, C., Yang, C., & Zhang, J., 2014. Land subsidence and ground fissures in Xi'an, China 2005–2012 revealed by multi-band InSAR time-series analysis. *Remote Sensing of Environment*, 155, 366-376. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.09.008>

- Rott, H., & Nagler, T., 2006. The contribution of radar interferometry to the assessment of landslide hazards. *Advances in Space Research*, 37(4), 710-719. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.06.059>
- Shamshiri, R., Nahavandchi, H., Motagh, M., & Haghghi, M. H., 2016. Multi-sensor in SAR analysis of surface displacement over coastal urban city of Trondheim. *Procedia Computer Science*, 100, 1141-1146.
- Sharma, P., Jones, C. E., Dudas, J., Bawden, G. W., & Deverel, S., 2016. Monitoring of subsidence with UAVSAR on Sherman Island in California's Sacramento-San Joaquin Delta. *Remote sensing of environment*, 181, 218-236. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.04.012>
- Shujun, S., Xue, Y., Wu, J., Yan, X., & Yu, J., 2016. Progression and mitigation of land subsidence in China. *Hydrogeology Journal*, 24(3), 685-693. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2016HydJ...24..685Y/abstract>
- Tomas, R., Herrera, G., Lopez-Sanchez, J. M., Vicente, F., Cuenca, A., & Mallorquí, J. J., 2010. Study of the land subsidence in Orihuela City (SE Spain) using PSI data: Distribution, evolution and correlation with conditioning and triggering factors. *Engineering Geology*, 115(1-2), 105-121. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.06.004>
- Wang, G. Y., You, G., Shi, B., Yu, J., & Tuck, M., 2009. Long-term land subsidence and strata compression in Changzhou, China. *Engineering Geology*, 104(1-2), 109-118. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.09.001>
- Zhang, Y., Wu, H. A., Kang, Y., & Zhu, C., 2016. Ground subsidence in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 1992 to 2014 revealed by multiple sar stacks. *Remote Sensing*, 8(8), 675. <https://doi.org/10.3390/rs8080675>