

Original Research Article

Detecting land subsidence using Sentinel 1 satellite images (Case study: Northern basin of Yazd-Ardakan plain)

Kamal Omidvar¹  Maryam Sadat Tabatabaei²  Hajar Toofani Koopaei³ 

¹ Professor of Climatology and Faculty Member, Department of Geography, Yazd University, Yazd, Iran

² Master's degree, Yazd University, Yazd, Iran

³ PhD student in Climatology, Yazd University, Yazd, Iran



10.22034/GRD.2026.23972.1680

Received:

2025 November 16

Accepted:

2026 January 27

Keywords:

Land subsidence,
groundwater depletion,
Sentinel-1 satellite, northern
Yazd-Ardakan plain

Abstract

Land subsidence is the gradual or sudden lowering of the land surface that occurs due to various factors such as tectonic activities, mining, oil and gas fields, and excessive groundwater extraction, and it is one of the issues that has put the plains of the country at risk in recent years. The present study aimed to investigate land subsidence due to excessive groundwater extraction in the northern basin of the Yazd-Ardakan plain. To achieve this goal, Sentinel-1 radar satellite data, Landsat satellite data, and data from piezometric wells were used for the period 2005–2020. The results show that the study area has subsided by 8 cm over a 15-year period, which is a significant figure. The spatial analysis of the subsidence indicates that the highest amount of subsidence has occurred in the areas of Meybod, Farouyeh, Ardakan, and Ahmadabad, which are facing a decrease in groundwater levels. Accordingly, one of the reasons for the subsidence has been the decrease in groundwater resources, but the abnormal behavior of the deep Roknabad well has not only shown no decrease in water level, but also an 81 cm annual rise in water level, to an extent that is in line with the slope of the land. Also, the correlation index has been used to investigate the effect of the decrease in groundwater levels on land subsidence, and the results obtained show that no significant correlation has been identified between these two variables. The lack of correlation between groundwater changes and land subsidence can be due to geological and hydrogeological factors, measurement methods, or other factors.

E-ISSN: 2588-7009 /© 2023. Published by Yazd University. This is an open access article under the CC BY 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



Extended Abstract

1. Introduction

Land subsidence is the gradual or sudden lowering of the earth's surface, which occurs due to various factors such as tectonic activities, mining, oil and gas fields, and excessive groundwater extraction, and it is one of the issues that has put the country's plains at risk in recent years. The northern basin of the Yazd-Ardakan plain is also among the plains that are at risk of land subsidence. The Sentinel-1 satellite is capable of imaging in any atmospheric and ground conditions, and it makes it possible to provide high-quality images at night, in fog and dust, and even under clouds. This satellite provides useful information for the remote monitoring of various areas such as agriculture, forests, climate, earthquakes, and land subsidence.

2. Research Methodology

The present study was conducted with the aim of investigating land subsidence due to excessive groundwater extraction in the northern basin of the Yazd-Ardakan plain. To achieve this goal, Sentinel-1 radar satellite data, Landsat satellite data, and data from piezometric wells were used for the period 2005–2020.

3. Results and discussion

In this study, a 15-year statistical period (2005–2020) was used to analyze land subsidence. The results show that most of the wells (13 wells) have a decreasing trend in water level. This general decrease is due to excessive withdrawal beyond the natural recharge limit of the aquifer. The most severe decrease rate is related to the Turkabad Desert Well (-144 cm per year) and the Ardakan Railway Station Well (-79.6 cm per year). The deep Roknabad Well, with an increasing trend of about +80 cm per year, shows a completely opposite and unusual behavior. Given the location of this well in a subsidence area, this phenomenon requires more detailed investigation to verify the accuracy of the data or identify specific local hydrogeological factors. Although a sharp drop in water level is considered the main condition for subsidence in alluvial plains, based on the data from these 13 wells, a simple linear correlation was not observed between the rate of water loss and the measured subsidence rate. This is probably due to the inherent heterogeneity of the earth's layers in terms of thickness, material, and mechanical properties in different parts of the plain. The different behavior of the Roknabad Well is a warning of the complexity and extreme heterogeneity of the aquifer system in the region, which makes generalizing the results from one point to the entire plain fraught with error.

4. Conclusion

The results show that the study area has subsided by 8 cm over a 15-year period, which is a significant figure. The spatial analysis of the subsidence indicates that the highest amount of subsidence has occurred in the areas of Meybod, Farouyeh, Ardakan, and Ahmadabad, which are facing a decrease in

groundwater levels. Accordingly, one of the reasons for the subsidence has been the decrease in groundwater resources, but the abnormal behavior of the deep Roknabad well shows that not only has the water level not decreased, but it also rises by 81 cm every year, to an extent that is in line with the slope of the land.

Also, the correlation index has been used to investigate the effect of the decrease in groundwater levels on land subsidence, and the results obtained show that no significant correlation has been identified between these two variables. The lack of correlation between groundwater changes and land subsidence can be due to geological and hydrogeological factors, measurement methods, or other factors.

آشکارسازی فرونشست زمین با استفاده از تصاویر ماهواره ای سنتینل ۱ (مورد مطالعه: حوضه شمالی دشت یزد-اردکان)

کمال امیدوار*^۱، مریم سادات طباطبائی^۲، هاجر طوفانی کوپائی^۳

^۱استاد اقلیم شناسی گروه جغرافیا دانشگاه یزد، یزد، ایران
^۲دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشگاه یزد، یزد، ایران
^۳دانشجوی دکتری اقلیم شناسی دانشگاه یزد، یزد، ایران

doi 10.22034/GRD.2026.23972.1680

چکیده

فرونشست زمین عبارت است از پایین رفتن تدریجی یا ناگهانی سطح زمین که در اثر عوامل مختلفی از قبیل فعالیت‌های تکتونیکی، استخراج معادن، میدان نفت و گاز و برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی به وقوع می‌پیوندد و از جمله مسائلی است که در سال‌های اخیر دشت‌های کشور در معرض مخاطره قرار داده است. پژوهش حاضر با هدف واکاوی فرونشست زمین بر اثر برداشت زیاد آب‌های زیرزمینی در حوضه شمالی دشت یزد-اردکان انجام شده است. برای دستیابی به این هدف، از ماهواره‌ای راداری سنتینل ۱، ماهواره لندست و داده‌های مربوط به چاه‌های پیژومتری در بازه زمانی (۲۰۰۵-۲۰۲۰) استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد محدوده مطالعاتی در طی دوره زمانی ۱۵ ساله، ۸ سانتی‌متر فرونشست داشته که رقم قابل توجهی می‌باشد. آنالیز مکانی فرونشست رخ داده بیانگر این است که بیشترین میزان فرونشست مربوط به مناطق (مبید، بفرئویه، اردکان و احمدآباد) بوده است که این مناطق با افت سطح آب‌های زیرزمینی مواجه است، براین اساس، یکی از دلایل فرونشست رخ داده، افت منابع آب زیرزمینی بوده است اما رفتار ناهنجار چاه رکن آباد عمیق نه تنها افت آب نداشته بلکه هر سال ۸۱ سانتی متر آب بالا می‌آید تا حدی که همگام با شیب زمین است. همچنین در بررسی تاثیر افت سطح آب‌های زیرزمینی بر فرونشست زمین از شاخص همبستگی استفاده شده است که نتایج به دست آمده نشان می‌دهد همبستگی معناداری بین این دو متغیر شناسایی نشده است. عدم همبستگی بین تغییرات آب‌های زیرزمینی و فرونشست زمین می‌تواند ناشی از عوامل زمین شناسی، هیدروژئولوژیکی یا روش‌های اندازه‌گیری و موارد دیگری باشد.

تاریخ دریافت:

۲۵ آبان ۱۴۰۴

تاریخ پذیرش:

۷ بهمن ۱۴۰۴

کلیدواژه‌ها:

فرونشست زمین، افت آب زیرزمینی، ماهواره سنتینل ۱، شمال دشت یزد-اردکان

E-ISSN: 2588-7009 /© 2023. Published by Yazd University. This is an open access article under the CC BY 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



Email: komidvar@yazd.ac.ir

* نویسنده مسئول: کمال امیدوار
آدرس: گروه جغرافیا دانشگاه یزد، یزد، ایران

۱ مقدمه

فرونشست زمین تحت شرایط متعددی به وجود می‌آید که از جمله آن‌ها می‌توان به فرونشست در اثر بهره‌برداری زیاد از آب‌های زیرزمینی، فرونشست ناشی از احداث سدهای بزرگ و فرونشست ناشی از تکتونیک گنبد‌های نمکی اشاره کرد (امیدوار، ۱۳۹۰). برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی برای مصارف مختلف شهری، موجب فرونشینی زمین‌ها می‌شود. مثلاً در مرداب ونیز، سیاست شدید صنعت گراپی در قطعه اصلی جزیره، به برداشت بیش از حد آب‌های زیرزمینی انجامید که این وضعیت هم به فرونشینی موثر شهرهای جزیره کمک کرد. رشد و توسعه شهر بانکوک در سراسر دشت دلتای چائوفیا نیز چنان سریع بوده است که آبرسانی نامناسب و غیر کافی شهر، به اجبار و به طور کاملاً گسترده‌ای، با برداشت غیر قانونی آب‌های زیرزمینی توسط بخش خصوصی انجام می‌شود. الگو و میزان فرونشینی ناشی از پمپاژ را تا اندازه‌ای می‌توان از طریق تجدید فعالیت گسل‌ها در مواد تشکیل دهنده دلتا تشخیص داد (زمریدیان، ۱۳۷۶).

در کشور ایران پس از زلزله، سیلاب و خشکی، پدیده فرونشست را می‌توان یکی از مهم‌ترین و شایع‌ترین مخاطرات به شمار آورد (منتظریون و اصلانی، ۱۳۹۸). وقوع فرونشست در مناطق مختلف دنیا منجر به بروز خسارات جدی به ساختارهای انسان‌ساخت و طبیعی شده است (مختاری و همکاران، ۱۳۹۸). امروزه پدیده فرونشست معضل و مخاطره‌ای است که جوامع ساکن بر آن را در سطوح بین الملل تهدید می‌کند. بر اساس برآورد کارشناسان، بیش از ۱۵۰ شهر از شهرهای بزرگ دنیا با گستره‌ای از کشورهای توسعه یافته تا در حال توسعه در معرض این پدیده قرار دارند (هیو و همکاران، ۲۰۰۴)^۱. فرونشست زمین یک مخاطره زمینی است که در اثر عوامل طبیعی و فعالیت‌های انسانی ایجاد می‌شود. این مخاطره، عمدتاً در دشت‌های آبرفتی و دلتایی جهان با درجات مختلفی در حال رخداد است (چن و همکاران، ۲۰۱۸)^۲. در این میان، پدیده فرونشست زمین که حاصل فشرده شدن آرام و تدریجی نهشته‌های زیر سطحی در دشت‌ها است که به صورت جابه‌جایی بخشی از پوسته زمین به سمت پایین رخ می‌دهد. این مخاطره نگرانی‌های بسیاری نیز به ویژه در مراکز حساس و راهبردی برانگیخته، برآیند فعالیت‌های انسان‌ساز مانند انواع استخراج معادن مختلف، برداشت آب و نفت و گاز، حفاری و کندوکاوهای زیرزمینی اعم از تونل، مترو و سدها، و فرآیندهای محیطی از قبیل؛ فعالیت‌های آتشفشان و فوران گدازه، فرآیندهای انحلالی، ذوب و تراکم برف و یخچال‌ها، حرکات گسل و گاهی هر دو عامل هستند. عوامل انسانی و تغییر کاربری زمین، محرک‌های اصلی فرونشست هستند و بین افزایش نرخ فرونشست و برداشت از منابع آب زیرزمینی ارتباط مستقیمی وجود دارد (باقری و همکاران، ۲۰۲۱). از همه مهم‌تر تحرک مواد مایع یا جامد زیرزمینی از دلایل اصلی وقوع فرونشست است (هررا-گارسیا و همکاران، ۲۰۲۱)^۳.

تحقیقات و مطالعات زیادی در خصوص فرونشست زمین بر اثر برداشت زیاد آب‌های زیرزمینی انجام گرفته است که در زیر به برخی از آنها اشاره شده است.

دیو و همکاران (۲۰۱۷)^۴، به ارزیابی میزان فرونشست شبه جزیره لیژاو در چین با استفاده از تصاویر راداری پرداخته‌اند. در این تحقیق از روش تداخل سنجی راداری و تصاویر سال‌های ۱۹۹۲ تا ۲۰۱۰ استفاده شده است. نتایج تحقیق بیانگر این است که حداکثر میزان فرونشست با ۳۲- میلی متر در نوار خط ساحلی بوده است، در حالی که میزان فرونشست در زمین‌ها داخلی بین ۱۰ تا ۱۹ میلی متر در سال برآورد شده است. دکلاک و همکاران (۲۰۱۷)^۵، به بررسی میزان جابه‌جایی زمین در بروکسل در طی یک دوره ۲۵ ساله پرداختند. در این تحقیق از روش تداخل سنجی Sentinel-1 و TerraSAR-XERS، تصاویر راداری استفاده شده است. نتایج تحقیق بیانگر این است که محدوده مطالعاتی در طی سال‌های ۱۹۹۲ تا ۲۰۱۷ حدود ۴ سانتی متر افت داشته است. همچنین نتایج تداخل سنجی تصاویر سنتینل ۱ بیانگر این است که این محدوده در طی سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۷ حدود ۰/۵ تا ۱۰ سانتی متر فرونشست دارد. فیاچی و همکاران (۲۰۱۹)^۶، با استفاده از تحلیل داده‌های سنجنده سنتینل ۱ با روش پراکنده ساز دائمی به آشکار سازی حرکات سطح زمین در مناطق اقیانوسی با پوشش ابر همیشگی در جمهوری ایرلند به دست آمده است. میلانکووا و همکاران (۲۰۲۰)^۷، به روش تداخل سنجی راداری پراکنده‌سازهای پایدار و همچنین پردازش هر دو سری تصاویر ماهواره سنتینل ۱ دریافتند که فعالیت معدن کروی باعث فرونشست قابل توجهی در معادن سنگ مس و انیدریت در معدن Konrad لهستان با نرخ ۱/۴ متر شده است. براون و همکاران (۲۰۲۱)^۸، به روش تداخل سنجی راداری پراکنش گره‌های دائمی و همچنین پردازش هر دو سری تصاویر ماهواره سنتینل ۱ مشخص شد که تغییرات ارتفاعی جزیره Bhasan char واقع در خلیج بنگال ± 2.0 میلی متر در سال است. امیدوار و همکاران (۱۳۹۵)، در پژوهشی به عنوان تاثیر خشکسالی‌های اخیر بر منابع آب‌های زیرزمینی دشت یزد-اردکان پرداختند در این پژوهش با استفاده از شاخص استاندارد بارش و شاخص سطح آب استاندارد زیرزمینی تاثیر خشکسالی بر منابع آب زیرزمینی دشت یزد-اردکان طی سال‌های ۱۳۸۱-۸۲ تا ۱۳۹۰-۹۱ برای کلیه چاه‌های موجود و امار بیست ساله برای ۸ چاه منتخب حوضه مورد بررسی قرار گرفت نتایج به دست آمده نشان می‌دهد خشکسالی‌های اخیر، باعث افت سطح ایستابی و سطح آب‌های زیرزمینی کلیه چاه‌های مورد مطالعه در دشت یزد-اردکان شده

¹ Hua

² chen

³ Herrera-Garcia

⁴ Du et al

⁵ Declercq

⁶ Fiaschi

⁷ -Malinowska

⁸ Braun

است. در نهایت با تعیین ضریب همبستگی بین عمق سطح ایستایی چاه ها و بارندگی در مقیاس زمانی سالیانه، بالاترین ضریب همبستگی مربوط به چاه شحنه و چرخاب بود.

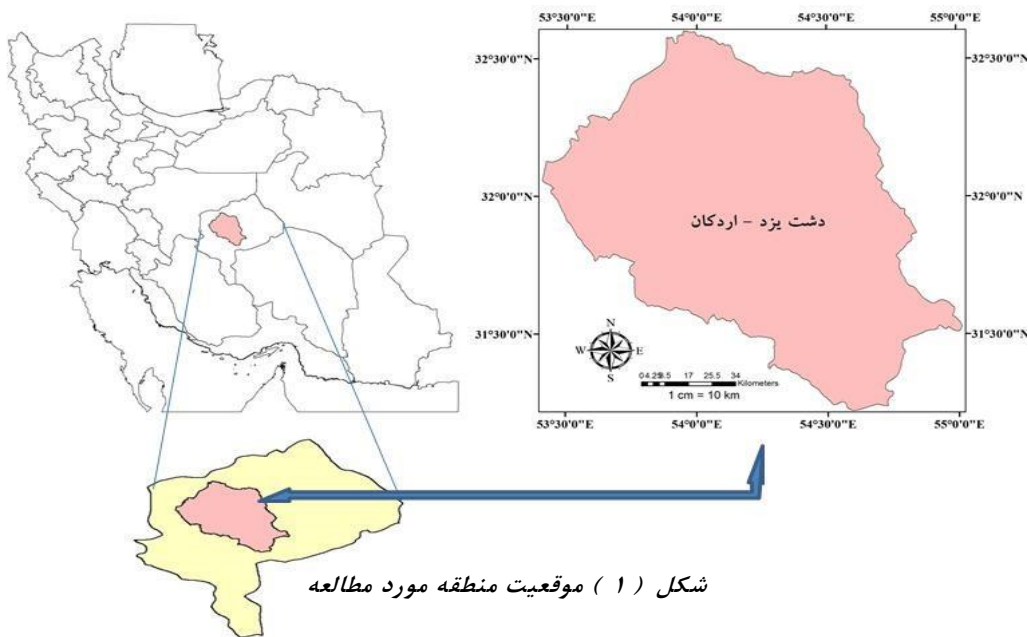
قره چلو و همکاران (۱۴۰۰)، با استفاده از تصاویر راداری آلوس و سنتینل ۱ میزان فرورنشست سالانه را در دشت مشهد پرداختند. نتایج حاصل از فرآیند تداخل سنجی راداری برای ماهواره آلوس در این تحقیق، بیانگر مقدار فرورنشست ۸/۳ تا ۷/۴ سانتی متر برای تصاویر آلوس و برای ماهواره سنتینل ۱ بین ۴/۱۷ تا ۳/۲۰ سانتی متر و ۳/۲۰ سانتی متر در بازه زمانی ۲۰۰۷ تا ۲۰۰۸ بوده است که نشان دهنده روند افزایش پدیده فرورنشست در منطقه بوده است. توجه به نتایج فاجعه بار فرورنشست مطالعات متعددی در مورد علل و پیامدهای این پدیده صورت گرفته است که هرکدام با توجه به روش بکارگرفته شده و زاویه بررسی نتایج ارزنده‌ای در پی داشته است. این بررسی‌ها نشان دهنده این است که علل و میزان جابجایی در سال با توجه به شرایط محلی و میزان بهره‌برداری غیراصولی بسیار متفاوت است (بیاتی‌خطیبی و همکاران، ۱۴۰۳؛ کریم زاده و ماتوسکا، ۲۰۲۲؛ عمادالدین و همکاران، ۱۴۰۳).

می توان گفت بیشتر محققین از روش‌های مختلفی چون تصاویر ماهواره ای سنتینل و رادار به محاسبه فرورنشست پرداخته اند. اکثر آنها دلایل فرورنشست زمین به دلیل فعالیت های انسانی نظیر برداشت بیش از حد از سفره آب زیرزمینی می باشد که آثار آن به صورت گسیختگی و کج‌شدگی لوله‌های جدار چاه‌ها و یا حتی دلایل طبیعی نظیر فعالیت آتشفشانی و خشکی رسوبات دانه ریز نمایان شده است. در این پژوهش با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۱ به واکاوی فرورنشست و چاه‌های پیژومتری در حوضه شمالی دشت یزد-اردکان پرداخته شده است.

۲ داده‌ها و روش‌ها

۲-۱- محدوده و قلمرو پژوهش

دشت یزد-اردکان یکی از وسیع‌ترین دشت‌های استان یزد می باشد که در طول ۵۳ درجه ۱۵ دقیقه تا ۵۴ درجه و ۵۰ دقیقه شرقی و در عرض جغرافیایی ۳۱ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۳۲ درجه و ۱۵ دقیقه شمالی قرار دارد و از جهت غرب و جنوب غرب به کوه های شیرکوه و از سمت شرق به کوه‌های خرانق منتهی می شود. مساحت حوضه دشت یزد-اردکان ۱۱۷۷۵ کیلومترمربع است. گستره این دشت رسوبی از دامنه های شیرکوه (در جنوب) آغاز می شود و با شیبی ملایم و در بستری دره مانند تا کویر سیاه‌کوه (در شمال) بیش از ۱۲۰ کیلومتر ادامه می یابد. بدین ترتیب جهت جریان آب در این دشت، از جنوب خاوری به شمال باختری است. سطح ایستایی در پاره‌ای از نواحی جنوبی دشت به بیش از ۱۰۰ متر و در نواحی شمالی به کمتر از ۱۰ متر می‌رسد. این دشت در سال‌های اخیر با افت چشمگیر سطح آب زیرزمینی مواجه شده است (خسروی و همکاران، ۱۳۹۴). شکل (۱) موقعیت دشت یزد-اردکان نشان می دهد.



شکل (۱) موقعیت منطقه مورد مطالعه

۲-۲- روش ها

پژوهش حاضر با هدف تحلیل فرو نشست زمین در حوضه شمالی دشت یزد- اردکان انجام شده است. دستیابی به این هدف، از ماهواره لندست و داده‌های مربوط به چاه‌های پیژومتری در بازه زمانی (۲۰۰۵-۲۰۲۰) استفاده گردید. در بخش بعدی از تصاویر ماهواره ای Sentinel-1 به منظور بررسی تغییرات یا اندازه‌گیری فرونشست زمین استفاده شد، به شکلی که برای پردازش تصاویر ماهواره‌ای در محیط نرم‌افزار Snap از تکنیک تداخل سنجی راداری (InSAR) استفاده شده است. ماهواره سنتینل ۱ در تاریخ ۳ آوریل ۲۰۱۴ مأموریت خود را آغاز کرد. ماهواره مدار قطبی است که به صورت راداری تصویر برداری را انجام می‌دهد و قادر است که پدیده‌ها و عوارض را در شب و روز بدون در نظر داشتن شرایط آب‌وهوایی جمع‌آوری و اخذ کند. همچنین می‌تواند در بدترین شرایط آب‌وهوایی نیز به جمع‌آوری اطلاعات از سطح زمین بپردازد. این ماهواره در محدوده طول موج ماکروویو و باندهای تصویربرداری می‌کند و در چهار حالت مختلف (VV, VH, HH, HV)، تصویربرداری با وضوح قابل قبول تا حد ۱۰ متری و پوششی در عرض ۴۰۰ کیلومتری را فراهم می‌آورد. در نهایت رابطه بین تغییرات سطح آب زیرزمینی و فرونشست زمین با استفاده از همبستگی در محیط نرم‌افزار SPSS استخراج شد. پس از تهیه امار و اطلاعات مورد نیاز با استفاده از نرم‌افزارهای Arc GIS، به تجزیه و تحلیل اطلاعات پرداخته شده است.

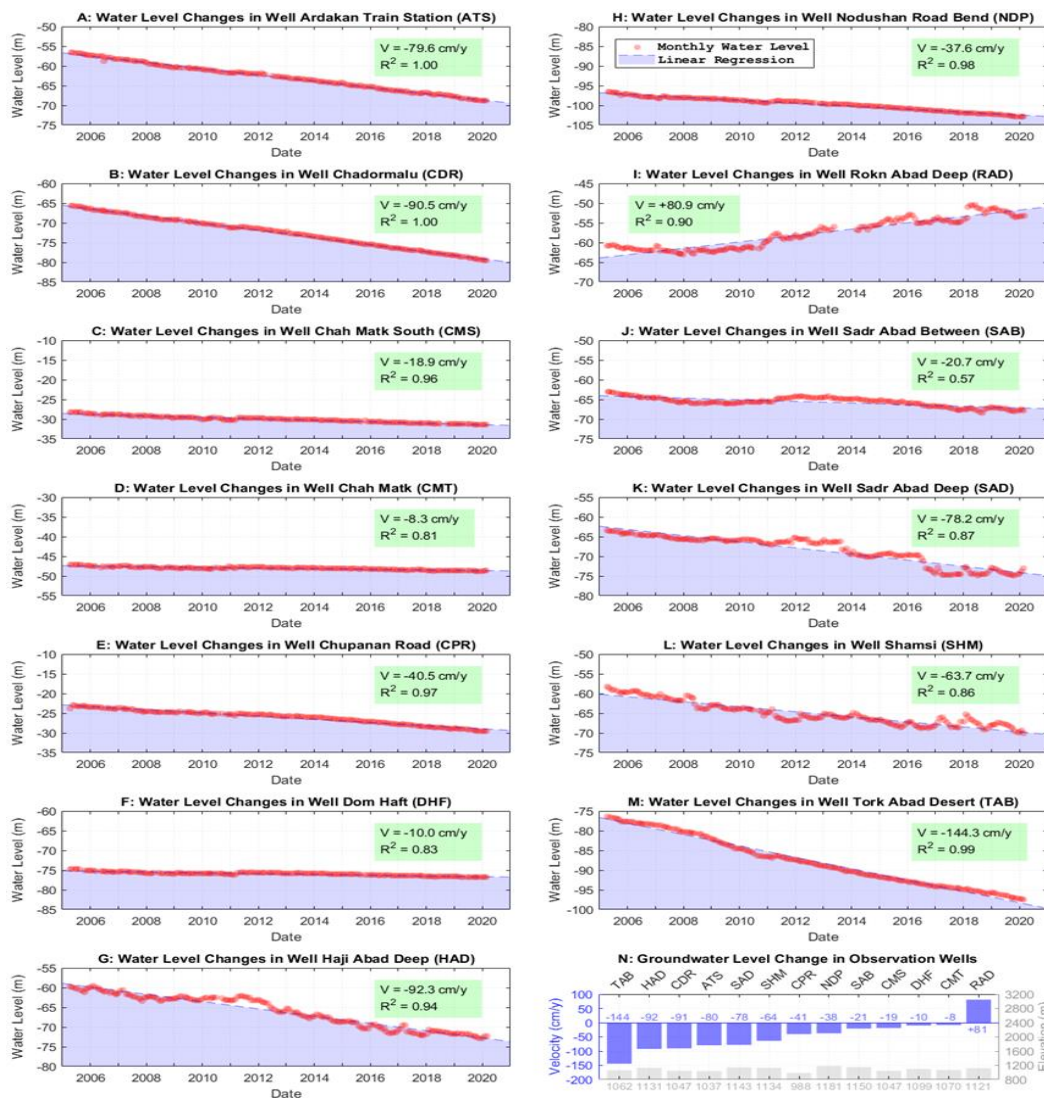
۳ یافته ها و بحث

به منظور ارائه ی دقیق تر داده ها و تسهیل درک نتایج پژوهش، اطلاعات گردآوری شده در قالب جدول شماره (۱) تنظیم شده است.

ردیف	نام ایستگاه	Utm X	Utm Y	ارتفاع از سطح دریا	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	سرعت تغییر سطح آب به سانتی متر در سال	سرعت فرونشست به میلی متر در سال
۱	رکن آباد عمیق	۲۲۱۶۰۸	۳۵۶۵۳۵۸	۱۱۲۳	۵۴/۰۴۷۱۱۱	۳۲/۱۹۰۳۳۳	۸۰/۹	-۳۰/۸
۲	۳ کیلومتری شمال غرب جاده جویانان	۲۲۴۲۷۰	۳۵۹۸۳۶۰	۹۹۲	۵۴/۰۶۵۷۲۲	۳۲/۴۸۸۳۳	-۴۰/۵	-۰/۶
۳	سطحی صدرآباد	۲۲۵۷۸۹	۳۵۵۰۶۹۹	۱۱۴۷	۵۴/۰۹۵۶۱۱	۳۲/۰۵۹۳۰۶	-۴۸/۲	.
۴	صدرآباد عمیق	۲۲۵۷۹۰	۳۵۵۰۶۹۹	۱۱۴۷	۵۴/۰۹۵۶۱۱	۳۲/۰۵۹۳۰۶	-۷۸/۲	-۲۷/۴
۵	بین صدرآباد	۲۲۵۸۷۵	۳۵۴۸۳۱۴	۱۱۵۱	۵۴/۰۹۷۱۹۴	۳۲/۰۳۷۸۳۳	-۲۰/۷	-۱۹/۶
۶	اکتشافی شمسی	۲۲۶۸۹۵	۳۵۵۶۷۹۷	۱۱۳۶	۵۴/۱۰۵۵۸۳	۳۲/۱۱۴۵۰۰	-۶۳/۷	-۷۸/۴
۷	جنوب چاه متک	۲۲۷۲۴۹	۳۵۷۵۹۱۹	۱۰۵۲	۵۴/۱۰۲۸۶۱	۳۲/۲۸۶۸۸۹	-۱۸/۹	-۰/۱
۸	چاه متک	۲۲۹۵۲۳	۳۵۸۲۴۱۲	۱۰۷۲	۵۴/۱۲۶۱۳۹	۳۲/۳۴۵۹۴۴	-۸/۳	-۰/۱
۹	سطحی حاجی آباد	۲۳۲۳۳۱	۳۵۵۵۴۸۲	۱۱۳۶	۵۴/۱۶۳۵۰۰	۳۲/۱۰۳۹۷۲	-۲۸/۹	.
۱۰	حاجی آباد عمیق	۲۳۲۳۳۲	۳۵۵۵۴۸۲	۱۱۳۷	۵۴/۱۶۳۵۰۰	۳۲/۱۰۳۹۷۲	-۹۲/۳	-۱۶/۱
۱۱	دمهفت اردکان	۲۳۲۳۳۷	۳۵۷۸۴۸۳	۱۱۰۲	۵۴/۱۵۷۱۱۱	۳۲/۳۱۱۲۲۲	-۱۰/۰	۰/۱
۱۲	ایستگاه راه آهن اردکان	۷۷۱۳۸۳	۳۵۸۷۹۳۳	۱۰۴۰	۵۳/۸۸۵۰۵۶	۳۲/۳۹۵۴۴۴	-۷۹/۶	-۰/۸
۱۳	چادرملو	۷۷۲۴۴۲	۳۵۸۵۰۳۰	۱۰۵۰	۵۳/۸۹۵۴۷۲	۳۲/۳۶۹۰۵۶	-۹۰/۵	-۰/۸
۱۴	ترک آباد بیابانی	۷۷۵۲۰۰	۳۵۷۹۷۰۴	۱۰۶۱	۵۳/۹۲۲۲۲۲	۳۲/۳۲۰۳۸۹	-۱۴۴/۳	-۱/۳
۱۵	پیچ ندوشن	۷۸۳۰۰۲	۳۵۵۱۳۶۷	۱۱۷۹	۵۳/۹۹۷۶۱۱	۳۲/۰۶۳۱۳۹	-۳۷/۶	-۰/۵

جدول (۱): موقعیت ۱۵ چاه مورد مطالعه در شمال دشت یزد- اردکان

با توجه به جدول شماره (۱)، موقعیت ۱۵ چاه مورد مطالعه در شمال دشت یزد-اردکان نشان می‌دهد که دو چاه از مجموعه‌ی چاه‌های مورد مطالعه، که در بازه زمانی اواخر سال ۱۳۸۴ تا ۱۳۹۸ خشک شده‌اند، توسط چاه‌های مجاور (چاه سطحی صدرآباد عمیق و چاه سطحی جاجی‌آباد عمیق) که در فاصله‌ای حدود یک متری از آنها قرار دارد تغذیه می‌کنند. که اکثر چاه‌ها سرعت منفی تغییر سطح آب دارند، یعنی سطح آب زیرزمینی در حال افت است. بیشترین میزان سرعت افت آب در چاه ترک‌آباد بیابانی با مقدار ۱۴۴- سانتی‌متر در سال است اما چاه رکن آباد عمیق دارای سرعت مثبت تغییر سطح آب است، یعنی سطح آب در این چاه با مقدار ۸۱ سانتی‌متر در سال افزایش داشته است.



شکل (۲): نمودار سرعت تغییر سطح آب چاه‌ها (۲۰۰۶-۲۰۲۰) و نمودارهای تغییر سطح آب زیرزمینی در ۱۳ چاه شمال دشت یزد-اردکان

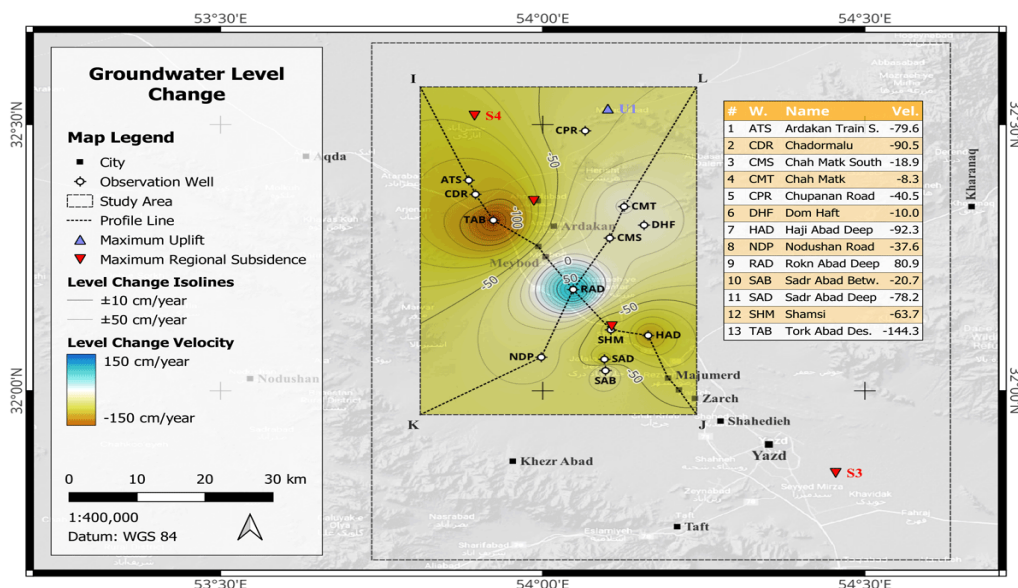
داده‌های ماهانه سطح آب در چاه‌های پیژومتریکی (چاه‌های مشاهده‌ای) است که در شکل (۲) با نقاط قرمز نشان داده شده‌اند. از این داده‌ها یک رگرسیون خطی گرفته شده تا روند تغییرات سطح آب در طول زمان مشخص شود. شیب خط حاصل، سرعت تغییر سطح آب (بر حسب سانتی‌متر در سال) را نشان می‌دهد. شیب منفی به معنای افت سطح آب (کاهش ذخیره آبخوان) و شیب مثبت به معنای بالا آمدن سطح آب است. سرعت تغییر سطح آب در اکثر چاه‌های مورد مطالعه در شمال دشت یزد-اردکان منفی است، که نشان‌دهنده افت کلی سفره آب زیرزمینی در این مناطق است. در چاه‌های راه‌آهن اردکان، سطح آب از عمق ۵۵ متر در سال ۱۳۸۵ به عمق ۷۰ متر

در سال ۱۳۹۹ رسیده که نشان‌دهنده افت قابل توجه است. شیب خط رگرسیون (سرعت تغییر) برای این چاه ۷۹٫۶- سانتی‌متر در سال محاسبه شده که نشان‌دهنده افت آب است. همبستگی داده‌ها با خط روند بسیار بالا و خطی گزارش شده است. سطح آب در رکن‌آباد عمیق در طول دوره ۱۵ سال مطالعه از ۶۵ به ۵۰- متر بالا آمده است. سرعت تغییر در این چاه ۸۰٫۹+ سانتی‌متر در سال (مثبت) محاسبه شده است. این در حالی است که این چاه در کانون زون‌های فرونشست زمین قرار دارد و آب به جای اینکه پایین رود آب بالا می‌آید که علت آن ممکن است خطای انسانی در برداشت داده‌ها یا خطای دستیابی دستگاه اندازه‌گیری باشد. سریع‌ترین افت سفره‌ی آب زیرزمینی در چاه‌ها مربوط به چاه ترک‌آباد بیابانی است که ۱۴۴- سانتی‌متر در سال است حاجی‌آباد عمیق، چادرملو، ایستگاه راه‌آهن اردکان تا جنوب چاه متک ۱۹ سانتی‌متر در سال است و چاه متک ۸ سانتی‌متر می‌باشد.

تغییر سطح آب زیرزمینی در شمال دشت یزد- اردکان

شکل (۳) و جدول همراه آن، که نشان‌دهنده تغییرات سطح آب زیرزمینی در ۱۳ چاه پیرومتر منتخب در محدوده مطالعاتی شمال دشت یزد- اردکان است، تفسیر نقشه براساس راهنمای رنگی آن مقادیر مثبت (افزایش سطح آب) با رنگ آبی و مقادیر منفی (کاهش سطح آب) با رنگ قرمز مشخص شده‌اند. طیف ۱۵۰+ تا ۱۵۰- سانتی‌متر در سال حاکی از تسلط کامل رنگ قرمز بر پهنه دشت است. این موضوع نشان‌دهنده یک روند نزولی و افت گسترده در سطح ایستابی در بخش عمده‌ای از سفره آب زیرزمینی منطقه می‌باشد. چنین الگویی عمدتاً پیامد مستقیم برداشت مستمر و فراتر از حد توان تغذیه آبخوان، در کنار تأثیرات دوره‌های خشکسالی است. نمونه شاخص این شرایط، چاه پیرومتر «ترک‌آباد بیابانی» با ثبت نرخ فرونشست ۱۴۴- سانتی‌متر در سال است که بیانگر وضعیت بحرانی در برخی کانون‌های دشت است. اما

داده‌های چاه «رکن‌آباد عمیق» یک رفتار کاملاً متضاد را نشان می‌دهد. نرخ تغییر سطح آب در این چاه حدود ۸۰+ سانتی‌متر در سال (افزایش) اندازه‌گیری شده است. این پدیده، به‌عنوان یک ناهنجاری مکانی و هیدرودینامیکی بارز در منطقه‌ای با افت فاحش، قابل توجه بوده و منطق متعارف حاکم بر سیستم جریان منطقه‌ای را به چالش می‌کشد. توجیه این رفتار مستلزم فرضیه‌پردازی فراتر از تحلیل‌های کلی و در نظر گرفتن عوامل تأثیرگذار محلی یا خطا در فرآیند اندازه‌گیری یا ثبت داده است. با توجه به نقشه می‌توان گفت که نقاط ۱۳ چاه مورد مطالعه در شمال دشت یزد- اردکان و سرعت تغییر سطح آب در آن‌ها با روش درون‌یابی وزن معکوس فاصله (IDW) استفاده شد. علت اصلی انتخاب این روش ساده، کمبود تعداد نقاط داده (۱۳ چاه) برای اعمال روش‌های زمین‌آماري پیشرفته‌تر مانند کریجینگ ذکر شده است. روش کریجینگ برای برآورد بهینه واریانس خط نیاز به تعداد نمونه کافی و بررسی ساختار فضایی داده‌ها دارد.



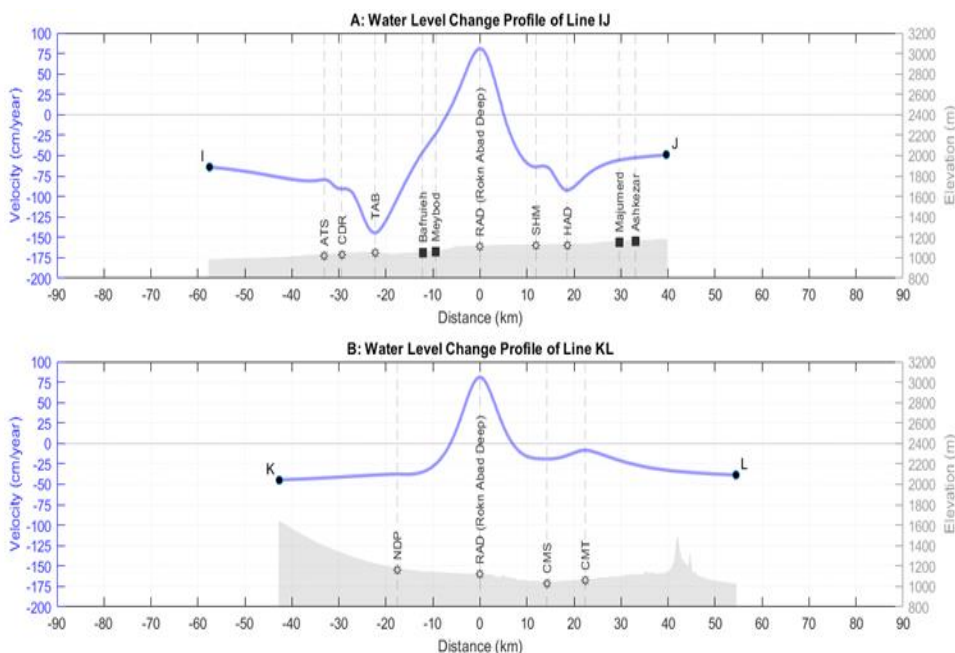
شکل (۳): نقشه تغییر سطح آب زیرزمینی و جدول ۱۳ چاه مورد مطالعه در شمال دشت یزد- اردکان

نمودار پروفیل تغییر سطح آب در خطوط II و KI

با توجه به شکل (۴)، نمودار II نشان می دهد اکثر چاه‌های ییزومتر مورد مطالعه، روند تغییرات سطح آب زیرزمینی منفی است. به عنوان مثال، چاه‌های ایستگاه راه‌آهن اردکان (۷۵-سانتی‌متر در سال) و چادر ملو و ترک آباد بیابانی (۱۴۴-سانتی‌متر در سال) نرخ‌های افت قابل توجهی را ثبت کرده‌اند. این افت مستمر و گسترده سطح آب، اصلی‌ترین پیش‌نیاز و محرک پدیده فرونشست زمین در دشت‌های آبرفتی محسوب می‌شود. کاهش فشار آب در منافذ خاک و سنگ (فشار موثر) منجر به تحکیم و فشرده‌شدگی لایه‌های آبخوان و در نتیجه نشست تدریجی سطح زمین می‌گردد. اما نمودار KI نشان می دهد در همه چاه‌ها حدود ۵۰- سانتی‌متر در سال (۰/۵ متر در سال) این چاه‌ها افت آب داشته است اما چاه رکن آباد عمیق به عنوان یک ناهنجاری آشکار با نرخ افزایش سطح آب حدود ۸۰+ سانتی‌متر در سال خودنمایی می‌کند. وجود این ناهنجاری، دو پیام مهم در زمینه مطالعه فرونشست دارد:

تأیید مکانیزم اصلی فرونشست: رفتار متضاد این چاه، به صورت غیرمستقیم، رابطه مستقیم و علی بین افت سطح آب زیرزمینی و رخداد فرونشست را تقویت می‌کند. در جایی که سطح آب افت می‌کند (اکثر چاه‌ها)، شرط لازم برای فرونشست فراهم است و در نقطه‌ای که سطح آب افزایش می‌یابد (رکن آباد)، انتظار می‌رود که یا فرونشستی رخ ندهد یا نرخ آن بسیار کندتر باشد.

هشدار درباره پیچیدگی و ناهمگونی سیستم: این ناهنجاری نشان می‌دهد که سیستم هیدروژئولوژیک منطقه، حتی در مقیاس یک دشت، می‌تواند کاملاً ناهمگن باشد. تعمیم نتایج فرونشست از یک نقطه به کل دشت می‌تواند گمراه‌کننده باشد. ممکن است در محدوده رکن آباد، به دلیل عوامل محلی، فرونشست با نرخی کمتر از مناطق اطراف با افت شدید آب (مانند ترک آباد) در حال رخدادن باشد.

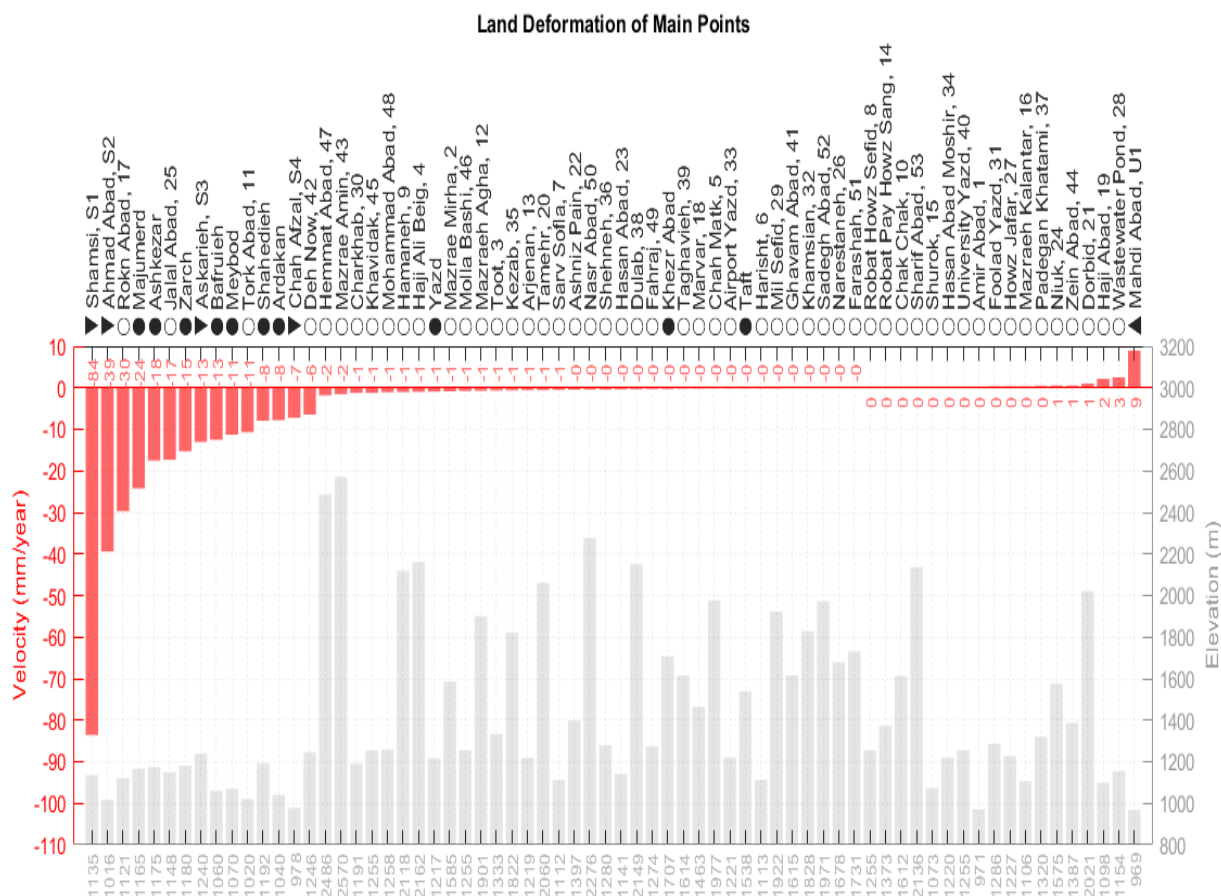


شکل (۴): نمودار پروفیل تغییر سطح آب در خطوط II و KI

سرعت فرونشست نقاط دشت یزد-اردکان:

این نمودار شامل ۵۳ نقطه مربوط به روستاها و ۱۰ نقطه شهری در استان بوده و زون‌های سرعت فرونشست همراه با ارتفاع از سطح دریا را نمایش می‌دهد. نماد مثلث رو به پایین نشان‌دهنده فرونشست و مثلث رو به بالا نشان‌دهنده برآمدگی سطح زمین است. نقاط شهری به رنگ سیاه و نقاط روستایی با رنگ‌های دیگر مشخص شده‌اند. ترتیب نقاط بر اساس سرعت فرونشست، از نزولی به صعودی مرتب شده است محور عمودی (y) ارتفاع یا مدل رقومی ارتفاع (DEM) و محور افقی (Velocity) سرعت تغییرات را نشان می‌دهد. بیشترین سرعت فرونشست مربوط به زون S1 شمسی با مقدار ۸۴- میلی‌متر در سال است که در ارتفاع ۱۱۳۵ متری از سطح دریا قرار

دارد (ستون‌قمرزنگ). بیشترین برآمدگی پس از زون U1، در منطقه دریاچه پساب تصفیه‌خانه یزد با ۹ میلی‌متر در سال ثبت شده است. این امر نشان‌دهنده تأثیر تغذیه آبخوان بر افزایش تراز سطح زمین است که در صورت حفظ تخلخل خاک، می‌تواند موجب جبران فرونشست شود: داده‌های ارتفاعی ارائه‌شده نشان می‌دهند که بیشترین نرخ‌های فرونشست در مناطق دشتی متمرکز شده‌اند بر اساس داده‌ها در مطالعه فرونشست دشت یزد-اردکان مشاهده می‌شود به این نتیجه رسیدند با افزایش ارتفاع از سطح دشت، از شدت فرونشست کاسته می‌شود. این الگو حاکی از آن است که فرونشست زمین پدیده‌ای وابسته به فعالیت‌های انسانی در مناطق دشتی بوده و ارتباط مستقیمی با ارتفاع منطقه ندارد.

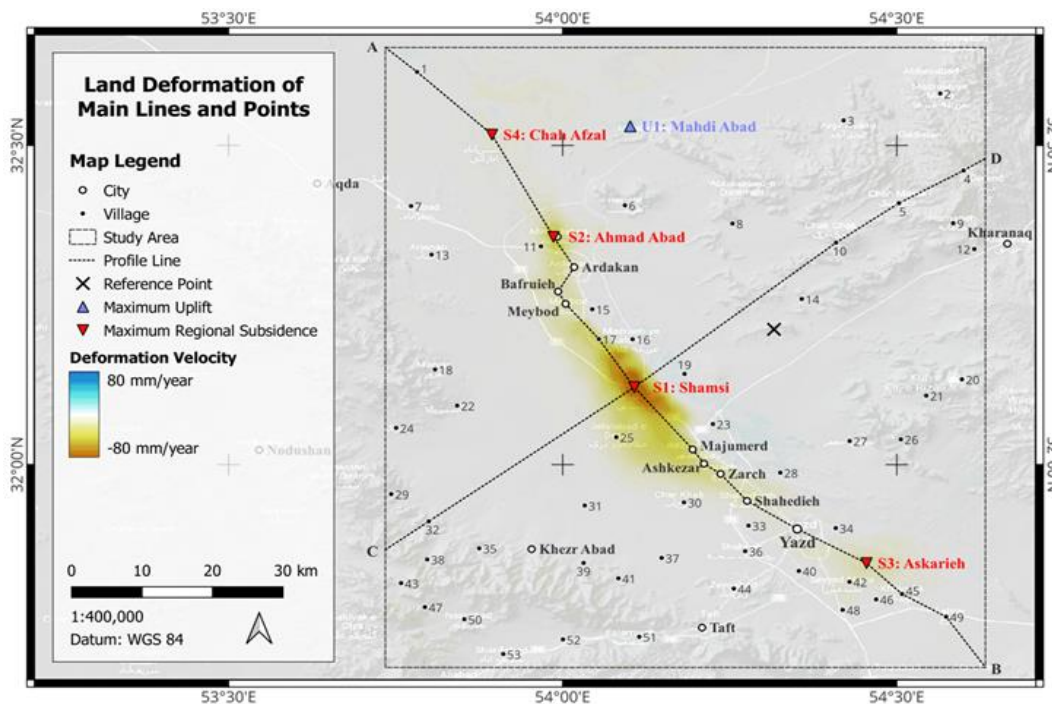


شکل (۵): نمودار سرعت فرونشست نقاط حوضه شمالی دشت یزد-اردکان

نقشه فرونشست نقاط در حوضه شمالی دشت یزد-اردکان:

با توجه به شکل (۶)، دو خط تعریف شد:

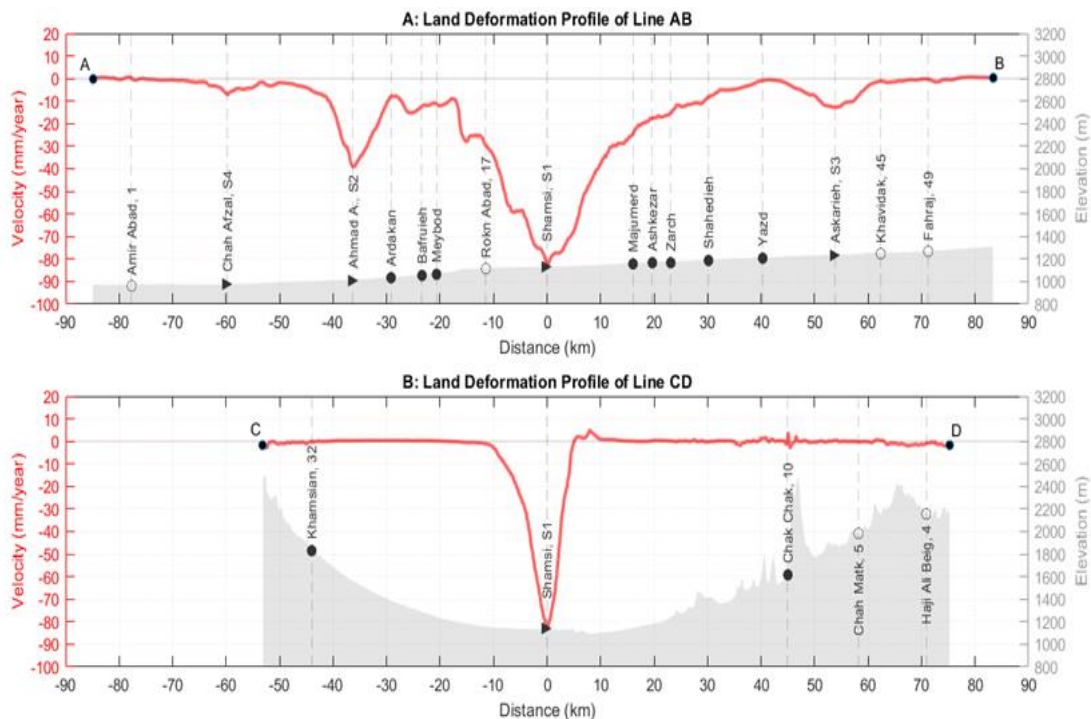
خط AB این خط به گونهای ترسیم شده که از کف دشت عبور میکند و به نحوی انتخاب شده که از بیشترین شهرهای موجود در مسیر و همچنین نقاط مهم فرونشست گذر کند. در این مسیر، هشت شهر (یزد، شاهدهیه، زارج، اشکندر، مجومرد، میبید، بفرئویه و اردکان)، چهار زون فرونشست (عسکریه، شمسی، احمدآباد و چاه‌افضل) و چندین روستا قرار گرفته‌اند. خط CD این خط به صورت عمود بر خط AB طراحی شده است. خط CD چون عمود بر خط القعر دشت خط عبور کرده است مقطع دشت را نشان می‌دهد.



شکل (۶): نقشه فرونشست نقاط در حوضه شمالی دشت یزد-اردکان

با توجه به شکل (۷)، نمودار ارائه شده بر اساس فاصله (با واحد کیلومتر) ترسیم شده است که نقطه مبدأ آن (صفر کیلومتر) منطبق بر منطقه شمسی می باشد و فواصل به سمت راست و چپ این نقطه محاسبه شده اند.

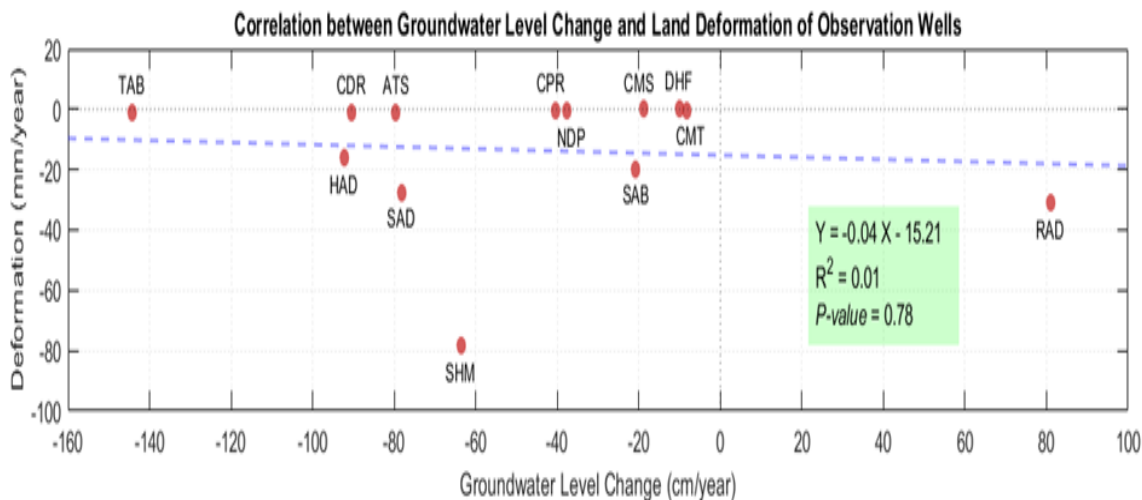
طبق نمودار A پروفیل مربوط به خط AB که از کف دشت عبور می کند، نشان دهنده نرخ سرعت فرونشست است. محور عمودی سمت چپ، سرعت فرونشست را نمایش می دهد و محور عمودی سمت راست، ارتفاع از سطح دریا (DEM) را نشان می دهد. روند تغییرات ارتفاع حاکی از کاهش تدریجی آن از سمت کرمان به سمت اصفهان است. در این پروفیل، منطقه شمسی با نرخ فرونشست ۸۰- میلی متر در سال، نقطه اوج فرونشست محسوب می شود. طبق نمودار B پروفیل خط CD که به صورت عمود بر خط القعر (کف) دشت ترسیم شده، مقطع عرضی دشت را نمایش می دهد. این خط از مناطق روستایی شمسی (با فرونشست ۸۰- میلی متر در سال)، چک چک (با فرونشست ۶۰- میلی متر در سال)، چاه متک (با فرونشست ۴۰- میلی متر در سال) و حاج علی (با فرونشست ۳۰- میلی متر در سال) عبور کرده است.



شکل (۷): نمودار پروفیل فرونشست خطوط AB و CD در حوضه شمالی دشت یزد-اردکان

همبستگی بین تغییر سطح آب زیرزمینی و فرونشست زمین

با توجه به شکل (۸)، ارتباط بین سطح آب‌های زیرزمینی و پدیده فرونشست زمین می‌پردازد. در مناطقی که برداشت آب‌های زیرزمینی بیشتر است، فرونشست زمین نیز افزایش می‌یابد. با این حال، ارتباط بین میزان افت سطح آب و فرونشست زمین همواره از یک الگوی خطی و مستقیم پیروی نمی‌کند. بر اساس داده‌های گردآوری شده، در این ۱۳ نقطه چاه، همبستگی معناداری بین این دو متغیر شناسایی نشده است. عدم همبستگی بین تغییرات آب‌های زیرزمینی و فرونشست زمین می‌تواند ناشی از عوامل زمین‌شناسی، هیدروژئولوژیکی یا روش‌های اندازه‌گیری و موارد دیگری باشد.



شکل (۸): نمودار همبستگی بین تغییر سطح آب زیرزمینی و فرونشست زمین

۴ نتیجه‌گیری

در این پژوهش برای تحلیل فرونشست زمین از دوره آماری ۱۵ ساله (۲۰۰۵-۲۰۲۰) استفاده شد نتایج نشان می‌دهد اکثر چاه‌ها (۱۳ چاه) دارای روند کاهشی سطح آب هستند. این افت عمومی ناشی از برداشت بی‌رویه و فراتر از حد تغذیه طبیعی آبخوان است. شدیدترین نرخ افت مربوط به چاه ترک‌آباد بیابانی (۱۴۴-سانتی‌متر در سال) و چاه ایستگاه راه‌آهن اردکان (۷۹.۶-سانتی‌متر در سال) می‌باشد. چاه رکن آباد عمیق با روند افزایشی حدود ۸۰+ سانتی‌متر در سال، رفتاری کاملاً متضاد و غیرعادی نشان می‌دهد. با توجه به قرارگیری این چاه در منطقه فرونشست، این پدیده نیازمند بررسی دقیق‌تر برای احراز صحت داده‌ها یا شناسایی عوامل هیدروژئولوژیک محلی ویژه است. اگرچه افت شدید سطح آب شرط اصلی وقوع فرونشست در دشت‌های آبرفتی به شمار می‌رود، اما بر اساس داده‌های این ۱۳ چاه، همبستگی خطی ساده‌ای بین میزان افت آب و میزان فرونشست اندازه‌گیری شده مشاهده نشد. این امر احتمالاً ناشی از ناهمگونی ذاتی لایه‌های زمین از نظر ضخامت، جنس و ویژگی‌های مکانیکی در نقاط مختلف دشت است. رفتار متفاوت چاه رکن‌آباد، هشداردهنده پیچیدگی و ناهمگونی شدید سیستم آبخوان منطقه است که تعمیم نتایج از یک نقطه به کل دشت را با خطا مواجه می‌سازد.

References

- Ahmadi, S., & Soodmand Afshar, R. (2010). Monitoring the subsidence of the Qorveh and Chahar Doli plains of Hamadan and Kurdistan provinces due to excessive extraction of groundwater resources using permanent diffuser technology. *Environment and Water Engineering*, 6(3), 219–233. [In Persian]
- Agustan, A., Sulaiman, A., & Ito, A. (2016). Measuring deformation in Jakarta through long term synthetic aperture radar (SAR) data analysis. *2nd International Conference of Indonesian Society for Remote Sensing (ICOIRS)*. DOI: [10.1088/1755-1315/47/1/012022](https://doi.org/10.1088/1755-1315/47/1/012022).
- Bayati khatibi, M., Mohammadzadeh, R., & Karimzadeh, S. (2024). Modeling of land subsidence of Salmas plain by using adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 13(4), 48-73. DOI: [10.22067/GEOEH.2024.75157.1171](https://doi.org/10.22067/GEOEH.2024.75157.1171) [In Persian]
- Braun, A., Höser, T., & Delgado Blasco, J. M. (2021). Elevation changes of Bhasan Char measured by persistent scatterer interferometry using Sentinel-1 data in a humanitarian context. *European Journal of Remote Sensing*, 54(sup1), 109–126. DOI: [10.1080/22797254.2020.1789507](https://doi.org/10.1080/22797254.2020.1789507).
- Calo, F., Notti, D., Galve, J. P., Abdikan, S., Gorum, T., Pepe, A., & Balik Sanli, F. (2017). DInSAR-based detection of land subsidence and correlation with groundwater depletion in Konya Plain, Turkey. *Remote Sensing*, 9(1), 83. doi:<https://doi.org/10.3390/rs9010083>.
- Chen, G., Zhang, Y., Zeng, R., Yang, Z., Chen, X., Zhao, F., & Meng, X. (2018). Detection of land subsidence associated with land creation and rapid urbanization in the Chinese loess plateau. *Remote Sensing*, 10(2), 270. <https://doi.org/10.3390/rs10020270>.
- Declercq, P., Walstra, J., Gerard, P., Pirard, E., Perissin, D., Meyvis, B., & Devleeschouwer, X. (2017). A study of ground movements in Brussels (Belgium) monitored by persistent scatterer interferometry over a 25-year period. *Geosciences*, 7(4), 115. DOI: <https://doi.org/10.3390/geosciences7040115>.
- Dinh Ho, T. M., Le, V. T., & Thuy, L. T. (2015). Mapping ground subsidence phenomena in Ho Chi Minh City through the radar interferometry technique using ALOS PALSAR data. *Remote Sensing*, 7(7), 8543–8562. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs70708543>.
- Du, Y., Feng, G., Peng, X., & Li, Z. (2017). Subsidence evolution of the Leizhou Peninsula, China, based on InSAR observation from 1992 to 2010. *Applied Sciences*, 7(5), 466. doi:[10.3390/app7050466](https://doi.org/10.3390/app7050466).

- Emadodin, S., Shahi, V., Arekhi, S., & Agh Atabay, M. (2022). Determining the amount of land subsidence in Jajrood alluvial fan using differential radar interferometry technique. *Physical Geography Research*, 54(2), 169-183. DOI:10.22059/JPHGR.2022.319591.1007596 [In Persian]
- Gao, M., Gong, H., Chen, B., Li, X., Zhou, C., Shi, M., Si, Y., Chen, Z., & Duan, G. (2018). Regional land subsidence analysis in eastern Beijing plain by InSAR time series and wavelet transforms. *Remote Sensing*, 10(3), 365. doi:https://doi.org/10.3390/rs10030365.
- Helali, L., Bagheri, R., & Momeni, A. (2024). [Title of the article in English]. *Hydrogeology*, 9(1), 86-100. doi.org/10.22034/hydro.2024.56752.1290 [In Persian]
- Jamour, R., Elbeigi, M., & Morsali, M. (2019). Assessment of land subsidence crisis and sea salt water advance in the Minab Plain aquifer. *Journal of Ecohydrology*, 6(1), 223-23. [In Persian]
- Karimzadeh, S., & Matsuoka, M. (2020). Remote sensing X-band SAR data for land subsidence and pavement monitoring. *Sensors*, 20(17), 4751. DOI: 10.3390/s20174751 [In Persian]
- Khorami, M. (2017). *Estimating Mashhad subsidence using radar interferometry technique and its evaluation according to geotechnical specifications* [Master's thesis, Ferdowsi University of Mashhad]. [In Persian]
- Khosravi, H., Nakhaei, N. S., & Mesbahzadeh, T. (2016). Investigation of spatial structure of groundwater quality using geostatistical approach in Mehran Plain, Iran. *Pollution*, 2(1), 57-65. [In Persian]
- Liosis, N., Marpu, P. R., Pavlopoulos, K., & Ouarda, T. B. M. J. (2018). Ground subsidence monitoring with SAR interferometry techniques in the rural area of Al Wagan, UAE. *Remote Sensing of Environment*, 216, 276-288. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.07.001
- Malinowska, A. A., Witkowski, W. T., Guzy, A., & Hejmanowski, R. (2020). Satellite-based monitoring and modeling of ground movements caused by water rebound. *Remote Sensing*, 12(11), 1786. DOI: https://doi.org/10.3390/rs12111786
- Miller, M. M., & Shirzaei, M. (2019). Land subsidence in Houston correlated with flooding from Hurricane Harvey. *Remote Sensing of Environment*, 225, 368-378. https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.03.022.
- Mokhtari, D., Ebrahimi, H., & Salmani, S. (2019). Land subsidence risk modeling using the random forest algorithm (case study: Tasuj plain watershed). *Journal of Remote Sensing and Geographic Information Systems in Natural Resources*, 10(3), 1-13. [In Persian]
- Montazeriou, M., & Aslani, F. (2019). Land subsidence risk assessment using geographic information system in Tehran and Alborz provinces. *Science of Prevention and Crisis Management*, 9(1), 35-47. DOI: http://dpmk.ir/article-1-238-fa.html [In Persian]
- Mousavi Maddah, S. M., Ghafouri, M., Lashkaripour, G., & Afshar, S. (2013). Investigation of the phenomenon of land subsidence and its effect on the rupture of water well wall pipes in the city of Mashhad using zoning of changes in the grain size of the soil layers. *Scientific Research Quarterly of Irrigation and Water Engineering*, 4(13). [In Persian]
- Omidvar, K. (2013). *Book of natural hazards*. Yazd University Publications. [In Persian]

Omidvar, K., Zare, M., & Ebrahimi, R. (2016). The impact of recent droughts on groundwater resources of Yazd-Ardakan plain. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 5(10), 622-635. [In Persian]

Piri, H., & Rahmani, A. (2016). Investigation of the subsidence rate of the northern part of Lake Urmia using the InSAR interferometry method (case study: Tasuj Plain). *International Conference on Geographical Consequences and Environmental Impacts of Lake Urmia Conditions*. [In Persian]

Zomordian, M. J. (1997). *Application of physical geography in urban and rural planning*. Payam Noor University Publications. [In Persian]