



Assessment of Land Subsidence Time Series in Kermanshah Plain using InSAR Methods

Masoumeh Rajabi¹ , Shahram Roostaei² , Sara Mataee³

1. Department of Geomorphology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, Tabriz University, Tabriz, Iran

Email: mrjabi@tabrizu.ac.ir

2. Department of Geomorphology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, Tabriz University, Tabriz, Iran

Email: roostaei@tabrizu.ac.ir

3. Department of Climatology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, Tabriz University, Tabriz, Iran

Email: saramataee69@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article History:

Received:

2 February 2023

Received in revised form:

31 March 2023

Accepted:

6 May 2023

Keywords:

Radar Interferometry,

Kermanshah Plain,

Land Subsidence,

PSI,

SBAS

ABSTRACT

Various natural phenomena have had a significant impact on the quality of human life since long ago. One of these types of natural phenomena is the deformation and displacement of the earth's surface, including subsidence. Subsidence is a morphological phenomenon that occurs under the influence of the downward movement of the earth. The salient features of radar images and the acceptable accuracy of the radar interferometric method have provided a powerful tool for researchers in investigating land subsidence. For this reason, 35 radar images of the Sentinel 1 sensor in the ascending orbit and transit 174 in the period from 2016 (June) to 2021 (January) were used to investigate the land subsidence in the Kermanshah plain. To analyze the time series of these images to prepare the average annual subsidence map in the plain, the radar interferometric technique was used under PSI and SBAS approaches. The results show the maximum land subsidence of 100 mm in the SBAS method and 10 mm in the PSI method in the west and northwest of the plain for 6 years. Finally, the maximum range was investigated in terms of geology and geo-hydrology. The results of the investigations showed that the land use of the maximum land subsidence area includes irrigated and rainfed agricultural lands, with the highest amount of water withdrawal in the agricultural sector, along with an average drop in the water level of 8 meters in 20 years in wells with a large thickness of fine-grained sediments. In general, land subsidence in the area is affected by human and natural factors.

Cite this article: Rajabi, M., Roostaei, Sh., & Mataee, S. (2023). Assessment of Land Subsidence Time Series in Kermanshah Plain using InSAR Methods. *Physical Geography Research Quarterly*, 55 (1), 19-37.

<http://doi.org/10.22059/JPHGR.2022.339960.1007685>



© The Author(s).

DOI: [10.22059/JPHGR.2022.339960.1007685](https://doi.org/10.22059/JPHGR.2022.339960.1007685)

Publisher: University of Tehran Press

Extended Abstract

Introduction

Studying and monitoring the displacement field caused by the changes in the shape of the earth's surface is one of the essential and practical studies in various topics such as geology, geomorphology, and geophysics. In the meantime, land subsidence is one of the destructive geological phenomena that can cause irreparable financial and human losses. In fact, land subsidence is a type of change in the shape of the earth's surface, which is associated with a vertical deformation or downward movement of the earth's surface so that the surface materials settle gradually or precipitately. This phenomenon is a problem and a danger threatening global societies. The phenomenon of subsidence can have surface morphological effects. For this purpose, identifying and reducing the consequences of the subsidence phenomenon requires a monitoring system. In order to evaluate and accurately measure this phenomenon, several methods have been presented, and the radar interferometry technique was introduced as one of the methods of processing radar images in active remote sensing, a useful tool in monitoring the displacements of the earth's surface. So that for several years, the salient features of radar images and the acceptable accuracy of radar interferometric methods have provided researchers with a powerful tool for investigating land subsidence. For this reason, 35 radar images of the Sentinel 1 sensor in the ascending orbit and transit 174 from 2016 (June) to 2021 (January) were used to investigate the land subsidence in the Kermanshah plain. In order to analyze the time series of these images to prepare the average annual subsidence map in the plain, radar interferometric technique was used under PSI and SBAS approaches.

Methodology

Artificial aperture radar interferometry is a remote sensing technique. Two or more radar images are used to produce a digital elevation model or prepare a land surface displacement map. In this technique, the phase difference between two waves is

measured, which is attributed to the change in the distance between the sensor and the ground target or the displacement of the ground surface. Currently, there are three general methods for limitations and analysis of interferometer time series, which are hybrid, small baseline length, and permanent scatterers. In the following article, the time series of the land subsidence phenomenon in Kermanshah Plain is monitored and measured using radar data, radar interferometry technique, and time series analysis of small baseline and persistent scatterers. In the small baseline method, only pairs of images are used whose vertical component is less than the critical value of the baseline. Also, their time baseline should be minimum at the same time. In this way, only interferograms with suitable quality are formed. In the method of persistent scatterer, the selection of permanent scattered pixels with constant scattering behavior in time can eliminate the limitations of the traditional radar interferometry method, and the possibility of measuring the displacement of the earth's surface even provided a few mm. Then, the results of these two methods, which are the average annual subsidence map in the desired time period, are examined in order to explain the connection and cause of the subsidence that occurred on the level of the plain, hydrogeological, and geological data.

Results and discussion

In order to investigate the behavior pattern of the earth's surface in the long term, time series analysis methods were used using a small baseline and persistent scatterer. To accomplish this task, among the many images and interferograms, 35 radar images from the Sentinel 1 sensor were selected in the period from 2016 (June) to 2021 (January), and 88 interferograms that had a suitable spatial and temporal baseline were selected using the lowest baseline method. Thirty-three interferometers were selected in the method of the persistent scatterer, and they were covered in the interferometry process. After obtaining the interferogram images, the noises in the interference mapping should be removed so that the remaining noise is only caused by the

earth's surface's displacements, resulting in the average map of the displacements of the earth's surface in the desired time period. The evaluation of the map obtained in the small baseline method indicates maximum subsidence of 100 mm per year and 10 mm in the persistent scatterer method in the western and northwestern parts of the plain. Finally, the hydrogeological data (number of wells allowed, type of consumption, amount of harvesting, drop in the level of piezometer wells) and geology (geological log of wells) and land-use of the plain were investigated in order to investigate the cause of subsidence in the plain. These surveys showed the impact of human and natural factors' impact on the subsidence in the plain.

Conclusion

In this research, the time series of land subsidence in Kermanshah plain was measured in 2016 (June)-2021 (January) with two approaches, small baseline, and persistent scatterer. The results of the two-time series show the maximum land subsidence of 100 mm per year in the SBAB method and 10 mm per year in the PS method in the western and northwestern parts of Kermanshah Plain. In the maximum range, the number of wells has a high density, and most of the wells' water extraction is for the agricultural sector. The

land use map of the region also confirms that the maximum land subsidence area has 62% (911 km) area of the plain. The selected wells evaluated in the maximum range of land subsidence also show the amount of water level drop 8 meters per year. From the point of view of geology, these wells have the thickness of sediments, which is about 20 to 37 meters. These cases express the conclusion that the area is affected by human factors (land use, indiscriminate extraction from the surface of the well, number of wells) as an aggravating factor and natural factors (reduction of atmospheric precipitation, continuation of drought, type of sediments on the plain) in next to each other has caused subsidence phenomenon.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

We are grateful to all the scientific consultants of this paper.

ارزیابی سرهای زمانی فرونشست زمین در دشت کرمانشاه با استفاده تکنیک InSAR

معصومه رجیبی^۱، شهرام روستایی^۲، سارا مطاعی^۳

۱- گروه ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، رایانامه: mrajabi@tabrizu.ac.ir

۲- گروه ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، رایانامه: roostaei@tabrizu.ac.ir

۳- نویسنده مسئول، گروه ژئومورفولوژی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، رایانامه: Saramataee69@gmail.com

چکیده

اطلاعات مقاله

پدیده‌های گوناگون طبیعی، از دیرباز، در کیفیت زندگی بشر تأثیر بسزایی داشته‌اند. یکی از این نوع پدیده‌های طبیعی پدیده تغییر شکل و جابه‌جایی سطح زمین، از جمله پدیده فرونشست، است. فرونشست پدیده‌ای موفولوژیکی است که تحت تأثیر حرکت فرو رو زمین پدید می‌آید. ویژگی‌های برجسته تصاویر راداری و دقت قابل قبول روش تداخل‌سنجی راداری در بررسی فرونشست زمین ابزار نیرومندی برای محققان فراهم آورده است. به همین سبب جهت بررسی فرونشست زمین در دشت کرمانشاه از ۳۵ تصاویر راداری سنجنده سنتینل ۱ در مدار صعودی و گذر ۱۷۴ در بازه زمانی ۲۰۱۶ (ژوئن) تا ۲۰۲۱ (ژانویه) استفاده شد. به منظور تحلیل سری زمانی این تصاویر جهت تهیه نقشه متوسط فرونشست سالانه در سطح دشت، تکنیک تداخل‌سنجی راداری تحت دو رویکرد PSI و SBAS به کار گرفته شد. نتایج نشان‌دهنده بیشینه ۱۰۰ میلی‌متر فرونشست زمین در روش SBAS و ۱۰ میلی‌متر در روش PSI در محدوده غرب و شمال غربی دشت برای یک دوره ۶ساله می‌باشد. در نهایت محدوده بیشینه از نظر زمین‌شناسی و ژئو هیدرولوژی بررسی شد. نتایج بررسی‌ها نشان داد که کاربری محدوده بیشینه فرونشست زمین شامل اراضی زراعی آبی و دیمی بوده، با بیشترین میزان برداشت آب در بخش کشاورزی، همراه با متوسط افت تراز سطح آب ۸ متر در بازه ۲۰ساله در چاه‌هایی با ضخامت زیاد رسوبات ریزدانه است. به‌طور کلی فرونشست زمین در سطح محدوده تحت تأثیر عوامل انسانی و طبیعی است.

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۱/۱۱/۱۳

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۱/۰۱/۱۱

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۱/۰۲/۱۶

واژگان کلیدی:

تداخل‌سنجی راداری،
دشت کرمانشاه،
فرونشست زمین
PSI
SBAS

استناد: رجیبی، معصومه؛ روستایی، شهرام و مطاعی، سارا. (۱۴۰۲). ارزیابی سرهای زمانی فرونشست زمین در دشت کرمانشاه با استفاده تکنیک InSAR. فصلنامه پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۵۵ (۱)، ۳۷-۱۹.

<http://doi.org/10.22059/JPHGR.2022.339960.1007685>

مقدمه

فرونشست زمین، نوعی از تغییر شکل سطح زمین است که با دگرشکلی عمودی و یا حرکت روبه‌پایین سطح زمین همراه است به طوری که مواد سطحی به صورت تدریجی یا دفعی (فروریزی) نشست می‌کند (Glopper, 1989:49). به عبارتی فرونشست زمین نتیجه بهم‌خوردن تعادل بین فشار هدایت شده به سوی پایین در جهت قائم و یا کاهش مقاومت درونی مواد (استحکام) و یا ترکیبی از این دو حالت می‌باشد (عابدینی، ۱۳۹۶: ۳۷). اما رخ داد این پدیده از هر نوعی (دفعی یا تدریجی) می‌تواند با دخالت عوامل طبیعی و یا انسانی ایجاد شود (رهنما و همکاران، ۱۳۹۳: ۶۳۰). امروزه این پدیده به صورت معضل و مخاطره‌ای است که جوامع انسانی را در سرتاسر جهان تهدید می‌کند. پدیده فرونشست می‌تواند اثرات مورفولوژیک سطحی را به دنبال داشته باشد (Chen et al., 2010: 123). به طور کلی نشست زمین می‌تواند موجب وارد آمدن خسارات سنگین اقتصادی در مناطق مستعد شود. در حالی که به واسطه حرکت بسیار کند و بطئی زمین در اغلب موارد درک و اندازه‌گیری آن به درستی میسر نیست به همین دلیل رویداد این پدیده در اغلب نواحی فقط زمانی شناسایی می‌شود که در مورفولوژی سطحی تأثیرگذار باشد و تخریب و خسارت به بار آورد (جبرایی، ۱۳۹۷: ۲۰). اما به طور کلی در مقیاس جهانی رخداد این پدیده در اثر افت سطح آب در بین سال‌های ۱۹۷۰-۱۹۵۰ هم زمان با صنعتی شدن و رشد شهرنشینی به مراتب بیشتر شده است. در دهه‌های اخیر در ایران نیز قریب به نیمی از دشت‌های کشور در معرض فرونشست قرار دارد (عزتی، ۱۳۹۴: ۱۰). بنابراین با توجه به اهمیت و گستردگی وقوع و خطرات اقتصادی ناشی از فرونشست زمین، به بررسی جنبه‌های مختلف این موضوع پرداخته‌اند که عمده این مطالعات شامل: kamali و همکاران (۲۰۲۲) فرونشست سطح زمین را در منطقه ریماح در کشور امارات متحده عربی با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری پیش کردند. نتایج حاصل از این پژوهش که با استفاده از تصاویر راداری سنتینل ۱ در بازه زمانی ۲۰۱۵-۲۰۱۹ و استفاده از سری زمانی PS است، نشان‌دهنده بیشینه فرونشست ۴۰ میلی‌متر در سال و انحراف معیار کمتر از ۲ میلی‌متر است. همچنین Darvish و همکاران (۲۰۲۱) در پژوهشی دقت تصاویر سنتینل ۱ (باند c) و آلوپس پلسار (باند L) را از نظر تخمین میزان فرونشست در منطقه شهر اسکندریه مصر بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان‌دهنده میزان جابه‌جایی عمودی تجمعی، حدود ۶۰- میلی‌متر در سال با استفاده از سری زمانی خط مبنای کوتاه برای بازه زمانی ۲۰۲۰-۲۰۱۷ می‌باشد. در ایران نیز با توجه به رویداد این بحران در بیش از نیمی از دشت‌ها پژوهش‌هایی صورت گرفته است از جمله؛ حجازی و همکاران (۱۴۰۱) از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۱ و ۲ به منظور، اندازه‌گیری فرونشست زمین با استفاده از سری زمانی خط مبنای کوتاه و پرائش‌کننده‌های دائمی برای بازه زمانی ۴ ساله در دشت هریس تبریز استفاده نموده‌اند. به طور کلی نتایج حاصل از برآورد هر دو روش در منطقه نشان‌دهنده میزان جابه‌جایی بین ۰ تا ۱۵ سانتی‌متر در سال در منطقه مورد مطالعه بوده است. همین‌طور رنجبر باروق و همکاران (۱۴۰۰) فرونشست زمین را در شهر کرج با استفاده از سری زمانی تصاویر راداری سنتینل ۱ در بازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۱ و روش خط مبنای کوتاه بررسی کردند. نتایج آنالیز سری زمانی این تصاویر مورد استفاده حاکی از مقدار تغییرات سطح زمین بین ۱۴۵- تا ۱۵+ میلی‌متر می‌باشد. متأسفانه، تداوم خشکسالی‌ها و هم‌زمان افزایش میزان وابستگی به آب زیرزمینی در دهه‌های گذشته سبب شده که دامنه نواحی واقع در معرض فرونشست به نواحی به نسبت مرطوب‌تر غرب و شمال غرب کشور مانند دشت کرمانشاه گسترش یابد. به همین منظور در این پژوهش سعی شده است سری‌های زمانی فرونشست دشت کرمانشاه، در بازه زمانی (ژوئن) ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۱ (ژانویه) با استفاده از تصاویر سنجنده ماهواره‌ای سنتینل ۱^۱ و با به‌کارگیری تکنیک تداخل سنجی راداری تحت دو رویکرد طول خط مبنای کوتاه و پراکنش‌کننده‌های دائمی برآورد شود. جهت پیش‌فرونشست زمین در منطقه مورد مطالعه، ۳۶ تصویر راداری ماهواره سنتینل ۱ در مدار صعودی در گذر ۱۷۴ پردازش شد.

¹ Sentinel-1

روش پژوهش

به منظور بررسی فرونشست زمین در دشت کرمانشاه از ۳۵ تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۱ (جدول ۱)، در بازه زمانی ۲۰۱۶ (ژوئن) تا ۲۰۲۱ (ژانویه) در مدار گذر ۱۶۷ مسیر صعودی استفاده شده است. از آن جایی که منطقه مورد مطالعه پوشش گیاهی متراکمی ندارد از اینترفروگرام‌ها با خط مبنای زمانی کوتاه و حساسیت کمتر استفاده شد. همچنین جهت ارزیابی علل فرونشست ایجاد شده در سطح دشت داده‌های هیدرولوژی و ژئوهیدرولوژی بررسی شدند.

جدول ۱. تاریخ تصاویر مورد استفاده

ردیف	تاریخ تصویر	خط مبنای زمانی	خط مبنای مکانی	ردیف	تاریخ تصویر	خط مبنای زمانی	خط مبنای مکانی
۱	۲۰۱۶/۰۸/۰۶	-۸۶۵	۲۷	۱۹	۲۰۱۸/۱۰/۲۰	.	.
۲	۲۰۱۶/۰۷/۲۶	-۸۱۷	-۲۶	۲۰	۲۰۱۸/۱۲/۰۷	۴۷	۵۴
۳	۲۰۱۶/۰۹/۱۲	-۷۶۹	-۱۴	۲۱	۲۰۱۹/۰۱/۱۲	۸۳	۵
۴	۲۰۱۶/۱۰/۳۰	-۷۲۱	۶۵	۲۲	۲۰۱۹/۰۳/۲۵	۱۵۵	-۵۲
۵	۲۰۱۶/۱۲/۱۷	-۶۷۳	۵۰	۲۳	۲۰۱۹/۰۵/۱۲	۲۰۳	-۹
۶	۲۰۱۷/۰۲/۲۷	-۶۲۵	۱۴	۲۴	۲۰۱۹/۰۶/۲۹	۲۵۲	۱۳
۷	۲۰۱۷/۰۳/۲۳	-۵۷۷	۴۶	۲۵	۲۰۱۹/۰۸/۱۶	۳۰۰	۲۰
۸	۲۰۱۷/۰۵/۱۰	-۵۲۹	-۱۹	۲۶	۲۰۱۹/۱۱/۲۰	۳۹۶	-۳۳
۹	۲۰۱۷/۰۶/۲۷	-۴۸۸	۲۱	۲۷	۲۰۱۹/۰۱/۱۹	۴۵۶	۳۲
۱۰	۲۰۱۷/۰۸/۱۴	-۴۳۳	۶۲	۲۸	۲۰۲۰/۰۳/۰۷	۵۰۴	۱۲
۱۱	۲۰۱۷/۱۰/۱۳	-۳۷۳	۶۴	۲۹	۲۰۲۰/۰۴/۲۴	۵۵۲	-۳۷
۱۲	۲۰۱۷/۱۱/۳۰	-۳۲۵	۷۹	۳۰	۲۰۱۹/۰۶/۱۱	۶۰۰	۱۷
۱۳	۲۰۱۸/۰۱/۰۵	-۲۸۹	۷۰	۳۱	۲۰۲۰/۰۷/۲۹	۶۴۸	-۷۴
۱۴	۲۰۱۸/۰۲/۲۲	-۲۴۱	۸	۳۲	۲۰۲۰/۰۹/۱۵	۶۹۶	۱۹
۱۵	۲۰۱۸/۰۴/۱۱	-۱۹۳	۲۵	۳۳	۲۰۲۰/۱۱/۰۲	۷۴۴	۶۲
۱۶	۲۰۱۸/۰۵/۲۹	-۱۴۵	۴۴	۳۴	۲۰۲۰/۱۲/۲۰	۷۹۲	-۲۴
۱۷	۲۰۱۸/۰۷/۱۶	-۹۷	۲۳	۳۵	۲۰۲۱/۰۱/۰۱	۸۰۴	۴۵
۱۸	۲۰۱۸/۰۹/۰۲	-۴۹	-۸۱				

اندازه‌گیری میزان فرونشست در سال‌های نخستین اغلب بر اساس مشاهدات محلی و از روی مقادیر پدیدار شده لوله‌های چاه تخمین زده شده‌اند (شریفی کیا و همکاران، ۱۳۹۱: ۵۸). به مرور روش‌های مختلف ژئودتیکی و غیرژئودتیکی جهت اندازه‌گیری این پدیده گسترش پیدا کرد. در نتیجه پژوهشگران به منظور مطالعه و رصد این پدیده از روش‌های گوناگونی استفاده کرده‌اند. در این پژوهش نیز به منظور اندازه‌گیری میزان فرونشست زمین منابع موجود شامل تصاویر راداری (سنتینل ۱)، هیدرولوژی (تراز سطح آب چاه‌های پیزومتر، تعداد چاه‌ها در سطح دشت، میزان برداشت آب در سطح چاه، لوگ زمین‌شناسی چاه‌ها) اخذ گردیده است. سپس به منظور بررسی داده‌های مرتبط با آب زیرزمینی و نیز تصاویر ماهواره‌ای از نرم‌افزارهایی (نرم‌افزارهای ساراسکیپ^۱، ۵، استمپس^۲) استفاده گردیده است.

1. SARscape5.3
2. StaMPS

تداخل‌سنجی راداری

تکنیک تداخل‌سنجی راداری از میان تمام روش‌های زمینی و فضایی بهترین روش اندازه‌گیری تغییر سطح زمین معرفی شده است. اساس کار روش تداخل‌سنجی راداری استفاده از اطلاعات فاز امواج راداری بازتابی از عوارض سطح زمین است به نحوی که تغییرات ایجاد شده در سطح باعث اختلاف‌فاز در دو تصویر SAR می‌شود. عدم همبستگی زمانی و مکانی بین تصاویر سبب می‌شود تا تقریباً هر تداخل‌نگار شامل مناطق بزرگی باشد که در آن همبستگی پایین است و اندازه‌گیری انجام شده در این مناطق قابل اطمینان نباشد. به همین دلیل می‌بایست چندین تصویر در بازه زمانی متفاوت از آن منطقه در دسترس بوده و چندین تداخل‌نگاشت بین بازه‌های زمانی متفاوت برای محاسبه نرخ تغییر شکل وارد گردد (روزبان و همکاران، ۱۳۹۵:۱). در حال حاضر سه روش کلی جهت محدودیت‌ها و تحلیل سری زمانی تداخل‌نگار وجود دارد که عبارت‌اند:

❖ ترکیبی^۱

❖ طول خط مبنای کوتاه^۲

❖ پراکنش‌کننده‌های دائمی^۳

در پژوهش حاضر جهت تحلیل سری زمانی جابه‌جایی در زمان‌های تصویربرداری از دو روش SBAS و PSI استفاده شده که در ذیل هر یک از روش‌های مذکور به تفصیل توضیح داده شده است. در سری زمانی PS از الگوریتم StaMPS که توسط هوپر در سال ۲۰۰۶ و با ایده گرفتن از دو روش قدیمی PS و SBAS توسعه یافته است، استفاده شده است.

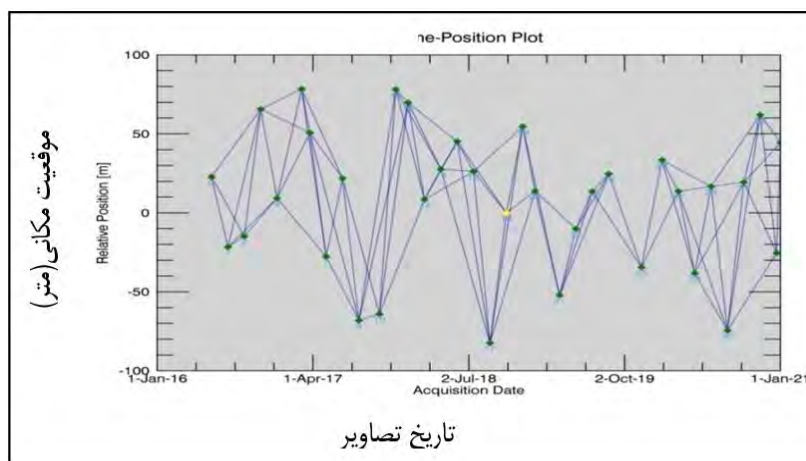
تداخل‌سنجی راداری بر مبنای خط مبنای کوتاه

روش SBAS برای تحلیل سری زمانی تداخل‌سنجی توسط براردینو و همکاران در سال ۲۰۰۲ پیشنهاد شد. روش SBAS یکی از مهم‌ترین روش‌ها برای پایش جابه‌جایی در یک منطقه در طول یک سری زمانی می‌باشد. این تکنیک متکی است بر ترکیب مناسب از اینترفروگرام‌های به وجود آمده از زوج تصاویر (SAR) که مشخصه آن خط مبنای کوتاه است. این کوتاهی باعث کاهش نا هم‌بستگی‌ها در تصاویر می‌گردد (Zhou, 2013:5). در روش مذکور تنها زوج تصاویری مورد استفاده قرار می‌گیرند که مؤلفه قائم خط مبنای آن‌ها کمتر از مقدار بحرانی خط مبنای باشد. همچنین خط مبنای زمانی آن‌ها نیز هم‌زمان کمینه باشد. به این ترتیب، فقط تداخل‌نگارهایی تشکیل می‌شوند که کیفیت مناسب داشته باشد. پس از تشکیل تداخل‌نگارها، یک شبکه از تصاویر ایجاد می‌شود، سپس با استفاده از روش کمترین مربعات، مقدار جابه‌جایی هر پیکسل تخمین زده می‌شود. پردازش تصاویر سنتینل^۴ برای اجرای مدل خط مبنای کوتاه در افزونه ساراسکیپ^۵، در نرم‌افزار انوی^۶، انجام شده است. فرایند پردازش در چندین مرحله انجام گرفته است که در زیر شرح داده خواهد شد.

تصاویر راداری^۷ دریافت شده قابل‌بارگذاری در نرم‌افزار مذکور نبوده به همین دلیل در ابتدا بایستی تصاویر دانلود شده به فرمت قابل‌پردازش توسط نرم‌افزار تبدیل شود. سپس با توجه به حجم بالای تصاویر سنتینل و پوشش‌دهی این

1. Stacking
2. SBAS(Small baseline subset)
3. PSI(Persistent Scatterer Interferometric)
4. SENTINEL/1
5. SARscape5.2
6. ENVI5.3
7. SLC

تصاویر با ابعاد زیاد، تصاویر باتوجه به محدوده مورد مطالعه برش داده می‌شوند. یکی از پارامترهای مهم در هندسه اینترفرومتری راداری تعیین خط مبنا می‌باشد. در واقع بردار جابه‌جایی بین دو ایستگاه تصویربرداری در صفحه آنتن، بردار خط مبنا تعریف می‌شود (نصیری‌خانقاه و همکاران، ۱۳۹۸: ۶۴). جهت انجام این پژوهش خط مبنای زمانی و مکانی به ترتیب ۱۰۰ و ۱۵۰ در نظر گرفته شده است (شکل ۱). بعد از تعیین خط مبنای زمانی و مکانی برای پردازش اینترفرومتری به یک تصویر با یک تاریخ مشخص به‌عنوان تصویر اصلی^۱ نیازمندیم تا بقیه تصاویر نسبت به آن پردازش شود. در اینجا انتخاب تصویر اصلی توسط نرم‌افزار اسنپ ۹ صورت گرفته است و باتوجه به شرایط کمترین مقدار خط مبنای عمودی، زمانی و داپلر، تصویر با تاریخ (۲۰۱۸/۱۰/۲۰) به‌عنوان تصویر اصلی انتخاب شده است. پس از انجام این مراحل در نهایت یک شبکه‌بندی از اینترفروگرام تشکیل شده و با در نظر گرفتن خط مبناها از میان اینترفروگرام‌ها تنها ۸۸ اینترفروگرام انتخاب شده که هر دو معیار مکانی و زمانی مناسب را داشته باشد.



شکل ۱. طول خط مبنای زمانی و مکانی روش SBAS

سپس با توجه شبکه‌بندی ایجاد شده به ترتیب اقدام به تشکیل اینترفروگرام، تصحیح فازی و بازیابی فاز می‌کنیم. از آنجاکه اینترفروگرام‌های اولیه علاوه بر مؤلفه فاز جابه‌جایی دارای مولفه‌های دیگری از جمله مؤلفه فاز توپوگرافی، مؤلفه نویز، مؤلفه اتمسفر، مؤلفه خطاهای مداری می‌باشد. باید به‌منظور دستیابی به فاز جابه‌جایی و در نتیجه برآورد میزان جابه‌جایی سطح زمین تمامی این مؤلفه‌ها حذف یا حداقل کسر شود تا فاز نهایی که تنها حاصل از تغییرات جابه‌جایی زمین به دست آید. بدین منظور با استفاده مدل رقومی استرجی دم‌آفاز توپوگرافی حذف می‌شود و اثر نویز نیز با اعمال فیلتر گلدشتاین که یک فیلتر تطبیقی است و مقادیر فاز را تغییر نمی‌دهد، حذف شود.

پس از حذف سایر مؤلفه‌ها از اینترفروگرام و تصحیح فاز، قبل از اندازه‌گیری میزان جابه‌جایی عملیات بازیابی فاز انجام گردد. بازیابی فاز فرایندی است که طی آن مقدار فاز مطلق با بیشترین دقت از مقدار اصلی فاز بازیابی می‌شود که به زبان ساده بازیابی فاز، ابهام فاز را به 2π می‌رساند. برای انجام این مرحله از الگوریتم جریان با کمترین هزینه^۳ به‌منظور بازیابی فاز استفاده شد.

1. Super master
2. Aster GDEM
3. MCF

در مرحله بعد بایستی اینترفروگرام‌ها کنترل مجدد و مسطح شوند، در این مرحله تمامی خروجی‌ها یک‌بار دیگر فراخوانده می‌شود تا تمام خروجی‌ها این بار هم چک شوند. سپس اثر فاز ناشی از انحنای بیضوی زمین از تداخل نما حذف می‌شود و فقط فرینج‌های مربوط به جابه‌جایی باقی می‌ماند، به این عمل مسطح ساختن تداخل نما می‌گویند. یکی از پارامترهای مهم برای اجرای این مرحله معرفی نقاط کنترل زمینی^۱ است که در آن نقاطی را به‌عنوان نقاط مبنا جهت تعیین میزان جابه‌جایی انتخاب می‌کنیم با فرض اینکه این نقاط هیچ‌گونه جابه‌جایی ندارند.

پس از کنترل و مسطح ساختن اینترفروگرام‌ها بر اساس نقاط کنترل زمینی مقادیر مطلق فاز بازیابی و مسطح شده در مرحله قبل، به جابه‌جایی تبدیل می‌شود و نقشه سرعت و سری زمانی متوسط جابه‌جایی سالیانه برحسب میلی‌متر در سال به‌دست‌آمده است که با اعمال فیلترهای بالاگذر و پایین‌گذر تصحیحات اتمسفری بر روی آن‌ها انجام می‌شود.

اما نقشه به‌دست‌آمده هنوز زمین مرجع نشده است به عبارتی مختصات صحیح زمینی به آن نسبت داده نشده است و جابه‌جایی به‌دست‌آمده در راستای دید سنجنده می‌باشد به همین سبب در مرحله آخر نقشه جابه‌جایی به‌دست‌آمده بر اساس طول و عرض جغرافیایی هر نقطه زمین مرجع شده و جابه‌جایی‌های آن به جابه‌جایی عمودی تبدیل می‌شود که نتیجه آن نقشه جابه‌جایی با سیستم مختصات جغرافیایی می‌باشد.

پردازش سری زمانی بر مبنای پراکنش‌کننده‌های دائمی

این روش، نخستین بار توسط فریتی و همکاران در سال ۲۰۰۰ و ۲۰۰۱ ارائه شد، به دلیل انتخاب پیکسل‌های پراکنش‌کننده دائمی با رفتار پراکنشی ثابت در زمان، می‌توان محدودیت‌های روش تداخل‌سنجی راداری سنتی را از بین برد و امکان اندازه‌گیری مقدار جابه‌جایی سطح زمین را حتی به میزان چند میلی‌متر فراهم آورد (صادقی و همکاران، ۱۳۹۱: ۹۸). اغلب عدم همبستگی مکانی و زمانی مانع می‌شود که تداخل‌سنجی SAR یک ابزار اجرایی برای پایش جابه‌جایی باشد. همچنین تأثیرات اتمسفر به‌شدت دقت نتایج را کاهش می‌دهد. میزان همبستگی سیگنال‌های رادار، وابسته به توزیع پراکنده‌ساز است که به‌صورت نقطه‌ای عمل می‌کند و ناهمبستگی را کاهش می‌دهد. هدف روش PS-InSAR شناسایی پیکسل‌هایی از تصویر است که از این پس آن‌ها را PS می‌نامیم که در بازه زمانی اخذ داده‌ها هم‌دوس باقی می‌مانند. اگر ابعاد PS کوچک‌تر از ابعاد سلول تفکیک باشد که معمولاً نیز این چنین است، میزان هم‌دوسی این پیکسل‌ها، حتی برای تداخل‌نگاره‌ای با طول خط مبنای بزرگ‌تر از مقدار بحرانی مناسب است. به‌این ترتیب مجموعه داده‌های بیشتری را می‌توان جهت تداخل‌سنجی استفاده کرد و در مرحله آخر با حذف تأثیر اتمسفری می‌توان نتایج دقیق‌تری به دست آورد و تا حدودی بر محدودیت‌های روش متداول تداخل‌سنجی غلبه نمود و امکان اندازه‌گیری جابه‌جایی سطح زمین را حتی به میزان چند میلی‌متر دارد (بابایی و همکاران، ۱۳۹۵: ۹۸).

این تکنیک اولین بار توسط فریتی و همکاران در سال ۲۰۰۰ و ۲۰۰۱ ارائه شد که در آن پژوهشی جهت انتخاب نقاط کاندید، از شاخص پراکنندگی دامنه (ADI) رابطه زیر استفاده شد و براین اساس، پیکسل‌های PS واقعی آن پیکسل‌هایی بودند که نرخ جابه‌جایی و تاریخچه فاز آن با یک مدل جابه‌جایی که از قبل معلوم بوده، تطابق داشته باشد شاخص پراکنندگی دامنه، D_A به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$D_A = \frac{\sigma_A}{\mu_A} \leq 0.4 \text{ or } 0.42 \quad \text{رابطه (۱)}$$

که σ_A و μ_A به ترتیب انحراف معیار استاندارد و مقادیر میانگین دامنه در یک پنجره هستند که در پژوهش‌های مختلف معمولاً حد آستانه ۰,۴ یا ۰,۴۲ را در نظر می‌گیرند که باعث می‌شود تمام نقاط کاندیدای انتخاب شده، در مجموعه نقاط PS قرار نگرفته و فقط نقاطی که مقدار شاخص پراکندگی دامنه آن‌ها بیشتر از حد آستانه است انتخاب شوند.

برای پیاده‌سازی این الگوریتم PS ابتدا تداخل‌نگارها را نسبت به یک تصویر که اصطلاحاً تصویر اصلی نامیده می‌شود، تشکیل می‌دهیم. انتخاب این تصویر بر این اساس صورت می‌گیرد که کمترین مقدار ناهمبستگی را داشته باشد یعنی تصویر انتخاب شده نسبت به بقیه تصاویر دارای کمترین مقدار خط مناهای عمودی (B_{\perp})، زمانی (T) و داپلر (F_{DC}) باشد.

$$\rho_{Total} = \rho_{Temporal} + \rho_{Spatial} + \rho_{doppler} + \rho_{thermal}$$

$$\approx \left[1 - f\left(\frac{T}{Tc}\right) \right] \left[1 - f\left(\frac{B_{\perp}}{B_{\perp}c}\right) \right] \left[1 - f\left(\frac{F_{DC}}{F_{DC}c}\right) \right] \rho_{thermal}$$

$$f(x) = \begin{cases} x, & \text{for } x \leq 1 \\ 1, & \text{for } > 1 \end{cases} \quad \text{رابطه (۲)}$$

در این فرمول‌ها ρ میزان همبستگی و اندیس C نشان‌دهنده مقدار بحرانی هر یک از پارامترها می‌باشد. باتوجه به مجموعه داده‌های انتخابی مقادیر ثابت و مشخصی هستند؛ بنابراین تصویری به‌عنوان تصویر اصلی انتخاب می‌شود که مقدار $\sum_i^N = \rho_{total}$ به‌ازای N تصویر موجود، بیشترین مقدار باشد (بابایی و همکاران، ۱۳۹۵).

پس از انتخاب تصویر اصلی، تمامی تصویر پیرو نسبت به آن ثبت هندسی و باز نمونه‌برداری می‌شوند و N اینترفروگرام نسبت به تصویر اصلی تشکیل می‌شود در این روش از ۳۴ تصویر سنتینل ۱ استفاده شد و ۳۳ اینترفروگرام باتوجه به تصاویر انتخاب شده در روند پردازش به کار گرفته شد. جهت انتخاب تصویر اصلی در این پژوهش از نرم‌افزار اسنپ استفاده شد و باتوجه به میزان هم‌دوسی تجمعی ذکر شده تصویر با تاریخ ۲۰۱۸/۱۰/۲۰ به‌عنوان تصویر اصلی انتخاب شد.

انجام این پردازش با استفاده از الگوریتم StaMPS می‌باشد که از روش‌های بادقت بالا برای برآورد تغییرات سطح زمین است. اما نقطه ضعف این الگوریتم عدم توانایی پردازش تصاویر راداری سنتینل می‌باشد. به همین دلیل برای استفاده از نتایج سری زمانی تداخل‌سنجی راداری با این تصاویر ابتدا می‌بایست پیش‌پردازش‌هایی با نرم‌افزارهایی مانند GMTSAR، SNAP انجام داد. سپس از خروجی این نرم‌افزارها در نرم‌افزار استمپس برای انجام سری‌های زمانی استفاده نمود.

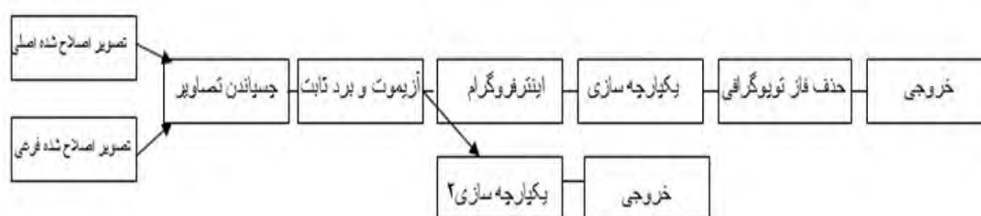
پیش‌پردازش پراکنش‌کننده‌های دائمی

پس از تهیه تصاویر، با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری اقدام به اندازه‌گیری میزان جابه‌جایی در سطح دشت شد. بدین منظور باتوجه به اینکه تصاویر سنتینل در نرم‌افزار استمپس قابل‌پردازش نیست، بایستی این تصاویر در نرم‌افزارهای دیگری پیش‌پردازش شود. برای انجام این پیش‌پردازش در این پژوهش از نرم‌افزار اسنپ استفاده شده است. بدین منظور ابتدا بایستی دو تصویر اصلی و پیرو در این محیط به‌منظور کاهش زمان پردازش و حجم زیاد این تصاویر بر اساس محدوده مطالعاتی برش داده شود^۱. سپس تصحیح مداری این تصاویر در مرحله بعد انجام می‌گیرد^۲. این مرحله در واقع زمان حرکت سنجنده را نشان می‌دهد. این دو مرحله بر روی هر دو تصویر به‌صورت جداگانه انجام می‌-

1. SPLIT
2. APPLY ORBIT FILE

گیرد. در مرحله بعد با استفاده از عملگر چسباندن^۱ دو تصویر اصلی و پیرو ادغام شده و به یک تصویر تبدیل می‌شود، بدون آنکه هیچ‌گونه تغییری در آن به وجود بیاید. در ادامه یک آزمایش و برد ثابت برای کل تصویر^۲ به کار گرفته می‌شود. پس از انجام این تصحیحات تصویر اینترفروگرام تشکیل می‌شود. این تصویر حاصل اختلاف فاز دو تصویر اصلی و پیرو است. (زندى و همکاران، ۱۰۰:۱۳۹۸).

پس از تکمیل اینترفروگرام‌ها با توجه به اینکه تصاویر سنتینل ۱ از چند گذر و به راست تشکیل شده است در حداقل هر به راست یک فضای سیاه‌رنگ وجود دارد که فاقد اطلاعات می‌باشد. برای رفع این مشکل در مرحله بعد دستور یکپارچه‌سازی اجرا می‌شود که با اجرای آن ابتدا و انتهای به راست‌ها و فضای سیاه‌رنگ آن‌ها از بین رفته و تصویر یکدستی به دست می‌آید. سپس به منظور حذف اثر توپوگرافی از روی اینترفروگرام‌ها، عملگر حذف اثر توپوگرافی^۴ بر روی تصاویر تداخل‌سنجی اعمال شده است. تصویر زیر گراف مراحل انجام پیش‌پردازش تصاویر در نرم‌افزار اسنپ را نمایش می‌دهد (شکل ۲).



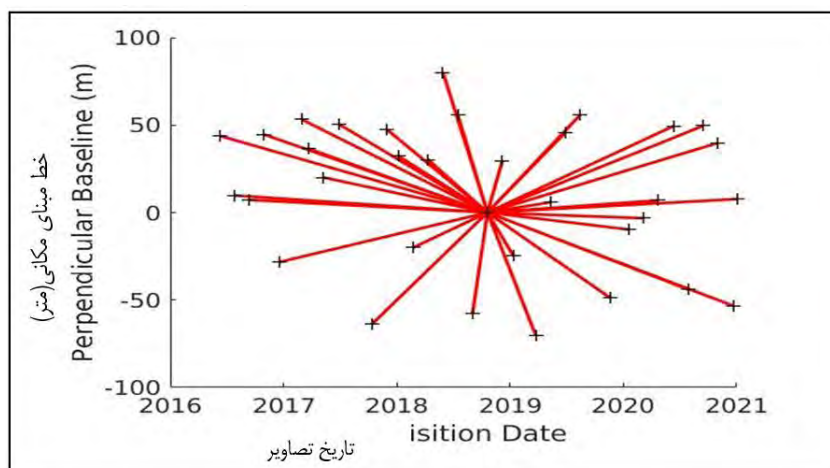
شکل ۲. گراف مراحل پیش‌پردازش تصاویر سنتینل

پس از انجام این مراحل بایستی از تمامی تصاویر در نرم‌افزار اسنپ خروجی گرفته تا به فایل قابل‌پردازش توسط نرم‌افزار استمپس تبدیل شود. خروجی این تصاویر، وارد نرم‌افزار استمپس می‌شود.

در محیط نرم‌افزاری استمپس در ابتدا بایستی تصاویر ورودی در نرم‌افزار چند منظر شود به این معنی که آنتن مجازی سیستم SAR از چند آنتن کوچک‌تر ساخته شده است که به هریک از آن‌ها یک منظر گفته این چند منظرسازی میزان قدرت تفکیک مکانی تصاویر را کاهش می‌دهد، در عوض نویز تصاویر کاهش و قدرت رادیومتریک تصاویر افزایش می‌یابد (حسینعلی و همکاران، ۱۳۹۸، ۵۵). به همین منظور تصاویر موجود به ۴ بخش یعنی ۲ بخش در راستای آزیموت و ۲ بخش در راستای رنج تبدیل می‌شود و همبستگی پیکسل‌ها در راستای رنج ۵۰ و در راستای آزیموت برابر ۲۰۰ در نظر گرفته خواهد شد. در مرحله تعیین پارامترها در انتخاب پراکنش‌کننده‌های دائمی حد آستانه شاخص پراکنندگی دامنه را ۰/۴. در نظر گرفته می‌شود. در این مرحله پیکسل‌های نامزد پراکنش‌کننده دائمی انتخاب می‌شود و در ادامه مراحل پردازشی سایر پیکسل‌ها در نظر گرفته نمی‌شود. در نهایت شبکه‌بندی تداخل نگارها با توجه به تصویر اصلی به دست می‌آید (شکل ۳).

از این مرحله به بعد پردازش‌ها در محیط نرم‌افزاری استمپس در متلب انجام می‌شود. به‌طور کلی مراحل پردازش سری زمانی در نرم‌افزار استمپس در ۸ مرحله انجام می‌شود. نتیجه این مراحل نقشه سری زمانی مبتنی بر پراکنش‌کننده‌های دائمی می‌باشد.

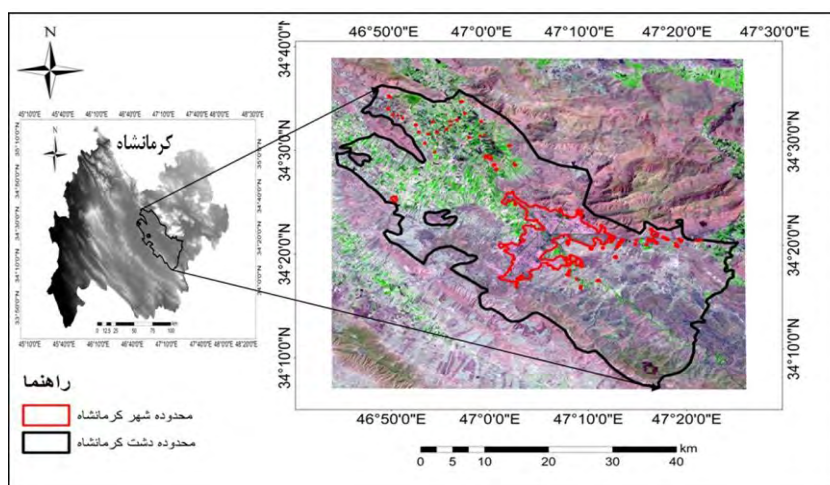
1. STACKING
2. Enhanced Spectral Diversity
3. TOPS Deburst
4. Topographic Phase Removal



شکل ۳. طول خط مبنای زمانی و مکانی مبتنی بر روش پراکنش کننده‌های دائمی

محدوده مورد مطالعه

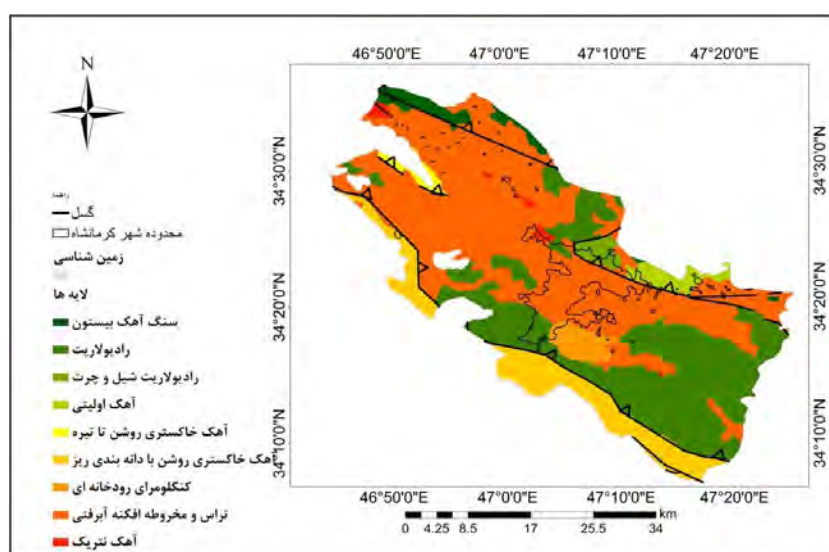
منطقه مورد مطالعه با مختصات $47^{\circ}10'$ درجه $47^{\circ}40'$ درجه، طول و عرض جغرافیایی در شمال و $47^{\circ}50'$ درجه و 34° درجه در جنوب، دارای مساحتی در حدود 1653 کیلومترمربع است. دشت کرمانشاه با مورفولوژی کشیده در میان مجموعه‌ای از کوهستان‌ها کشیده شده است. شمال منطقه سیستم کوهستانی پراو - بیستون است که جنس این سیستم از آهک توده‌ای یکپارچه متعلق به ژوراستیک و کرتاسه است که مملو از درز و شکاف و شکستگی است (علائی، ۱۳۸۲: ۱۴۴). این توده کوهستانی دارای شیب عمومی 50% و نقاط ارتفاعی بالای 2000 متر می‌باشد. در جنوب منطقه رشته کوهستانی کوه سفید واقع است جنس این توده در قسمت‌هایی از آن رادیولاریت‌های ناحیه عمیق دریایی و در برخی از نقاط از ماسه‌سنگ، شیل، آهک تشکیل شده است. دشت کرمانشاه در بین ارتفاعات یاد شده واقع شده، جنس کف دشت از رادیولاریت است که به وسیله رسوبات دوره کواترنر که ضخامت آن در شمال دشت به 200 متر می‌رسد پوشیده شده است. طول دشت با ساختاری آبرفتی و تقریباً مسطح در حدود 40 کیلومتر با روندی شمال غرب به جنوب شرقی کشیده شده است (علایی و همکاران، ۱۳۸۹: ۲۲). در سطح دشت دو رودخانه قره‌سو در بخش مرکزی و رودخانه رازآور در بخش شمال غربی واقع شده است. ارتفاع متوسط دشت 1313 متر نسبت به سطح دریا می‌باشد. (شکل ۴).



شکل ۴. منطقه مورد مطالعه

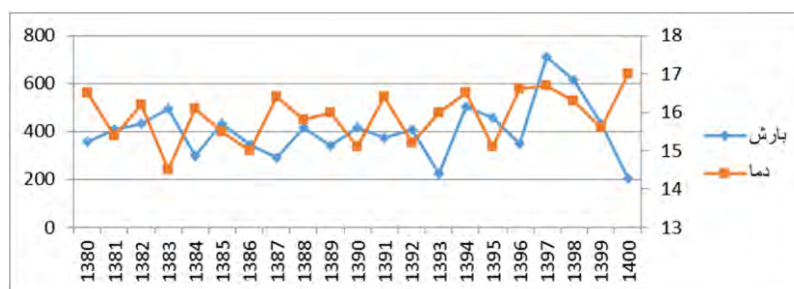
ویژگی‌های تکتونیکی و اقلیمی دشت کرمانشاه

از لحاظ زمین‌شناسی محدوده مطالعاتی در زون ساختاری زاگرس رورانده و تا حدودی در بخش جنوبی در زاگرس چین‌خورده قرار گرفته است. بخش شمالی عمدتاً از آهک‌های موسوم به سازند بیستون تشکیل شده است و جزء زاگرس رورانده محسوب می‌گردد. بخش جنوبی منطقه در بخش زاگرس چین‌خورده قرار دارد (غلامی، ۱۳۹۴: ۱۶). قسمت عمده‌ای از سطح دشت توسط نهشته‌های کواترنری که شامل ذخایر تراسی و مخروطه افکنه‌های کم‌ارتفاع کوهپایه‌ای (Q2) می‌باشد، تشکیل شده است. در سطح دشت گسل فعالی وجود ندارد. اما گسل غیرفعال رورانده در سطح دشت وجود دارد (نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰). علاوه بر آن دشت کرمانشاه تحت تأثیر جابه‌جایی‌ها و زلزله‌های ناشی از دو گسل فعال گسل زاگرس مرتفع و گسل جبهه کوهستانی می‌باشد. در شکل زیر سازندهای زمین‌شناسی و گسل‌های موجود در سطح دشت نشان داده شده است (شکل ۵)



شکل ۵. نقشه سازندهای زمین‌شناسی

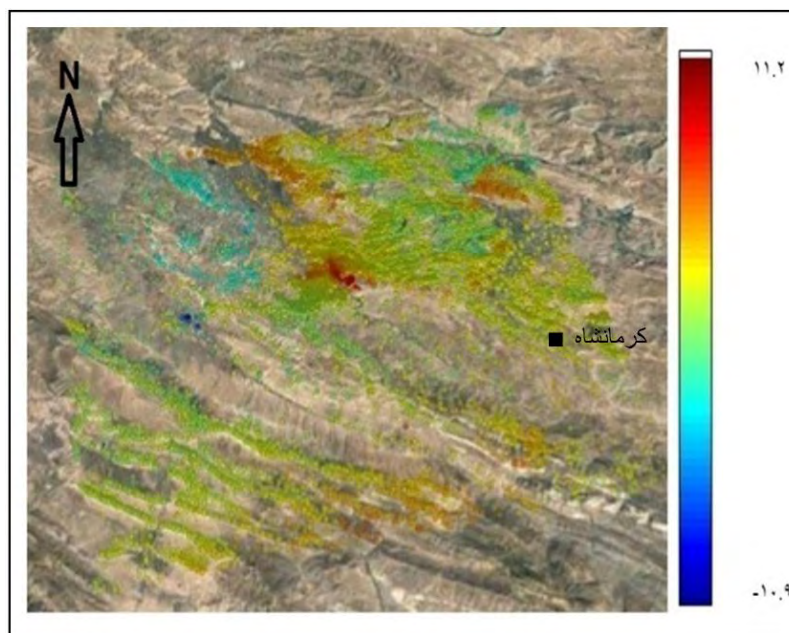
از نظر اقلیم‌شناسی دشت کرمانشاه، در معرض جبهه‌های مرطوب مدیترانه‌ای قرار دارد. برخورد این جبهه‌ها با ارتفاعات زاگرس سبب بارش برف و باران در سطح محدوده می‌شود. محدوده مورد بررسی دارای آب‌وهوایی نیمه‌خشک تا کوهستانی بوده است. بر اساس داده‌های ایستگاه سینوپتیک کرمانشاه حداقل و حداکثر بارش طی یک دوره ۲۰ ساله برای محدوده کرمانشاه به ترتیب ۲۰۵ و ۶۱۵ میلی‌متر می‌باشد. متوسط دمای سطح کرمانشاه نیز برای دوره ۲۰ ساله بین ۱۴٫۵ تا ۱۷ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شده است. در نمودار زیر روند افزایش دما و کاهش بارندگی به خوبی نمایان است.



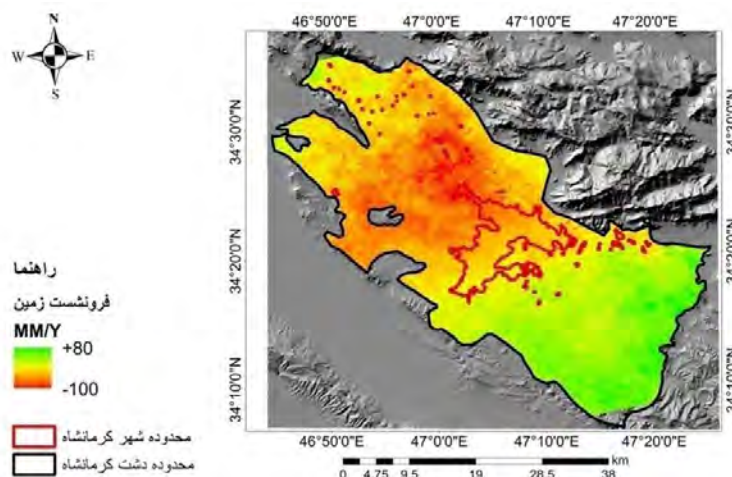
شکل ۶. متوسط دما و بارش دشت کرمانشاه بازه زمانی ۲۰ سال

یافته‌ها

جهت تحلیل رفتار فرونشست زمین در بازه زمانی موردنظر از دو رویکرد تحت عنوان سری زمانی خط مبنای کوتاه و پراکنش کننده‌های دائمی استفاده شد. نقشه متوسط فرونشست سالانه حاصله از دو روش مذکور نشان‌دهنده بیشینه فرونشست ۱۰۰ میلی‌متر در سال در روش خط مبنای کوتاه (شکل ۸) و بیشینه ۱۰ میلی‌متر در سال با روش پراکنش کننده دائمی (شکل ۷) می‌باشد. نتایج این دو روش تطبیق کاملی با هم از نظر میزان فرونشست رخ داده در سطح دشت ندارد. این اختلاف ناشی از استفاده از روش و نرم‌افزار متفاوت برای اجرای دو مدل موردنظر می‌باشد. هر دو روش سری زمانی الگوی رفتاری مشابهی را برای فرونشست منطقه نشان می‌دهد. به طوری که محدوده بیشینه فرونشست رخ داده در سطح دشت در هر دو روش مذکور منطبق بر بخش غربی و شمال غربی دشت می‌باشد و این میزان از سمت غربی به سمت شرقی دشت کاهش می‌یابد و کاملاً منطبق برهم می‌باشد. میزان فرونشست در محدوده دشت بیشتر از محدوده شهر و مناطق مرتفع بوده است. بررسی این ناحیه با استفاده از گوگل ارث نشان‌دهنده این موضوع است که این محدوده بیشینه دارای کاربری کشاورزی بوده است؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که میزان فرونشست از بخش‌های غربی و شمال غربی به سمت شرق و نواحی مرتفع حاشیه دشت کاهش می‌یابد. در نواحی مرتفع، بالآمدگی در حدود ۸۰+ میلی-متر در سال در روش خط مبنای کوتاه و ۱۱٫۲ میلی‌متر در سال در روش پراکنش کننده‌های دائمی مشاهده می‌شود که احتمالاً تحت‌تأثیر فعالیت تکتونیکی گسل‌های نواحی اطراف محدوده مطالعاتی می‌باشد. در نتیجه به‌منظور اعتبارسنجی نتایج به‌دست‌آمده و همچنین بررسی دلایل فرونشست رویداد در سطح منطقه به بررسی عوامل مؤثر بر فرونشست پرداخته شد.

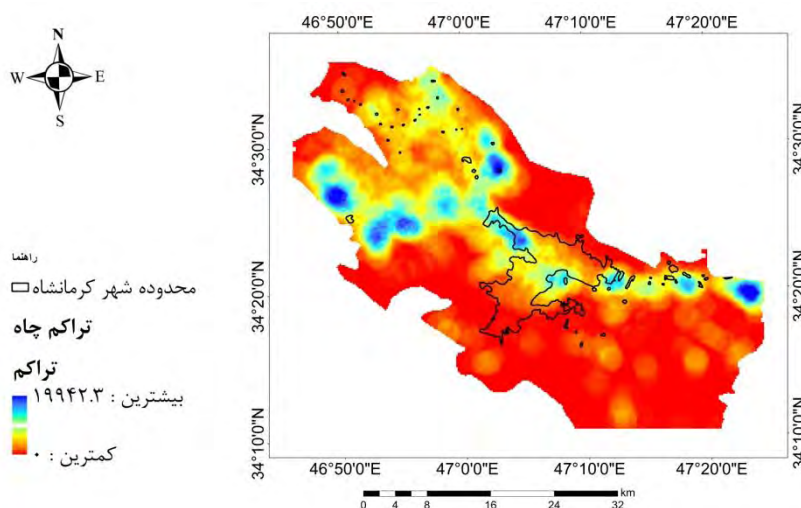


شکل ۷. نقشه فرونشست زمین برای دوره ۶ سال مدل سری زمانی پراکنش کننده‌های دائمی



شکل ۸. نقشه فرورانشست زمین برای دوره ۶ سال مدل سری زمانی خط مبنای کوتاه

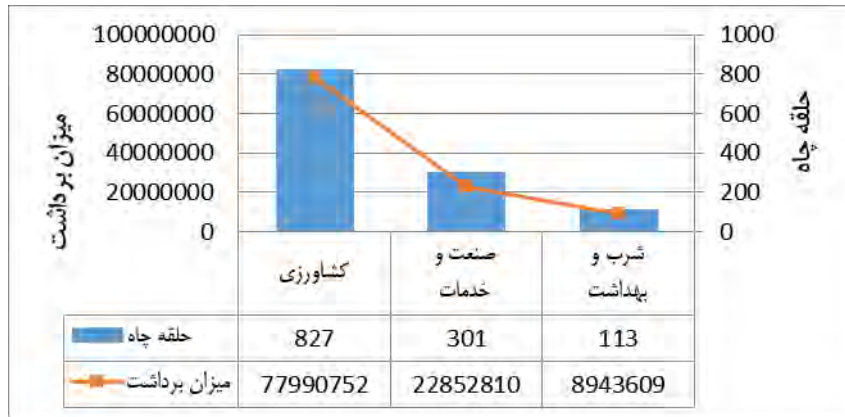
به منظور بررسی علت فرورانشست رویداد در محدوده اقدام به اخذ داده‌های زمین‌شناسی و ژئوهیدرولوژی موجود در سطح دشت، از سازمان آب منطقه‌ای شد. با استفاده از داده‌های اخذ شده سعی شد وضعیت لایه‌های زمین‌شناسی و برداشت آب زیرزمینی از سطح دشت و در نهایت میزان افت سطح تراز آب بررسی و اندازه‌گیری شود. به همین جهت ابتدا پس از تهیه داده‌ها از سازمان آب منطقه‌ای با استفاده از نرم‌افزار GIS نقشه تراکم تعداد چاه‌ها در سطح تهیه شد (شکل ۹). ارزیابی این نقشه نشان‌دهنده بیشترین میزان تراکم در محدوده بیشینه فرورانشست زمین می‌باشد.



شکل ۹. نقشه تراکم تعداد چاه

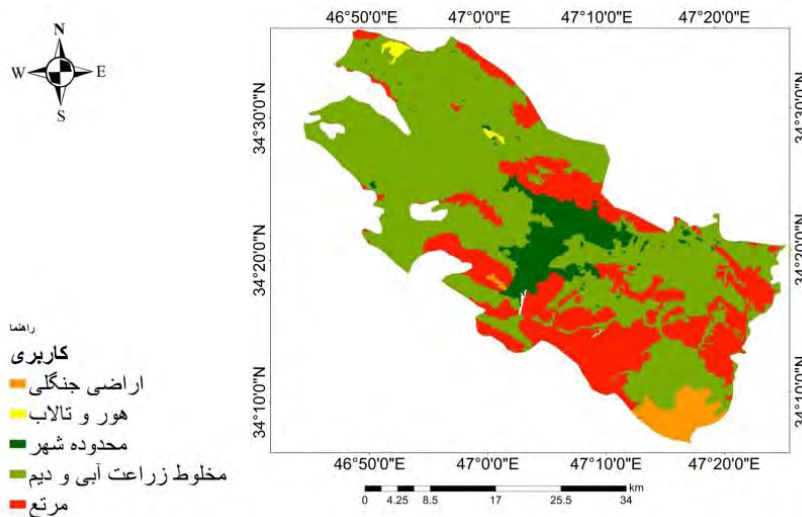
همچنین با بررسی آمار مربوط به چاه‌های مجاز اخذ شده از سازمان آب منطقه‌ای کرمانشاه، این نتیجه حاصل شد که تعداد ۱۲۴۲ حلقه چاه مجاز از سال ۱۳۸۰ تا سال ۱۴۰۱ در سطح دشت حفر شده است. از این تعداد ۵۴۸ حلقه آن مربوط به ۶ سال اخیر است. همچنین تعداد چاه‌ها در بازه زمانی بیست‌ساله (۱۳۸۰ تا ۱۴۰۰) از ۱۰۵۱ حلقه به ۲۲۹۳ حلقه افزایش یافته است. از میان این چاه‌ها تعداد ۸۲۷ حلقه چاه به بخش کشاورزی اختصاص داده شده است. همچنین بررسی میزان برداشت آب نشان‌دهنده این موضوع است که بیشترین میزان برداشت آب در سطح چاه متعلق به بخش

کشاورزی با ۷۱,۰۶ درصد از کل برداشت آب از سطح چاه‌ها مجاز است. نمودار زیر نشان‌دهنده تعداد چاه‌ها و میزان برداشت آب در سه بخش کشاورزی، صنعت و خدمات می‌باشد.



شکل ۱۰. میزان برداشت و تعداد چاه مجاز در سطح دشت (منبع: سازمان آب منطقه‌ای کرمانشاه)

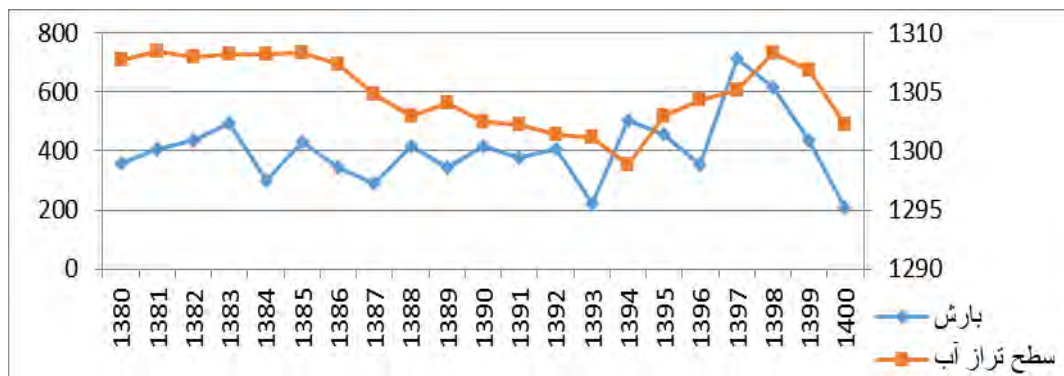
باتوجه به این مهم که بیشترین تعداد چاه و بیشترین میزان برداشت آب در سطح چاه مربوط به بخش کشاورزی می‌باشد. نقشه کاربری محدوده مطالعاتی تهیه شد. این نقشه نیز تأییدکننده این موضوع می‌باشد که بیشینه فرونشست زمین در کاربری زراعی مخلوط آبی و دیمی می‌باشد. که در کنار سایر عوامل زمین‌شناسی و انسانی این ناحیه را مستعد فرونشست کرده است. این کاربری مساحتی حدود ۶۲ درصد (۹۱۱ کیلومترمربع) مساحت دشت را در برمی‌گیرد.



شکل ۱۱. نقشه کاربری اراضی

همچنین باتوجه به اینکه یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در فرونشست دشت‌ها افزایش بهره‌برداری از آب‌های زمینی است. آمار درازمدت چاه‌های پیژومتر موجود در سطح دشت (۵۴ حلقه چاه پیژومتر) به منظور اندازه‌گیری میزان افت سطح تراز آب در بازه زمانی ۲۰ ساله ارزیابی شد. سطح تراز آب در سطح دشت در بازه درازمدت ۲۰ سال حدود ۶ متر افت داشته است. متوسط سالانه افت در سطح دشت برابر با ۰,۳ متر در سال می‌باشد. این افت نتیجه کاهش بارندگی حدود

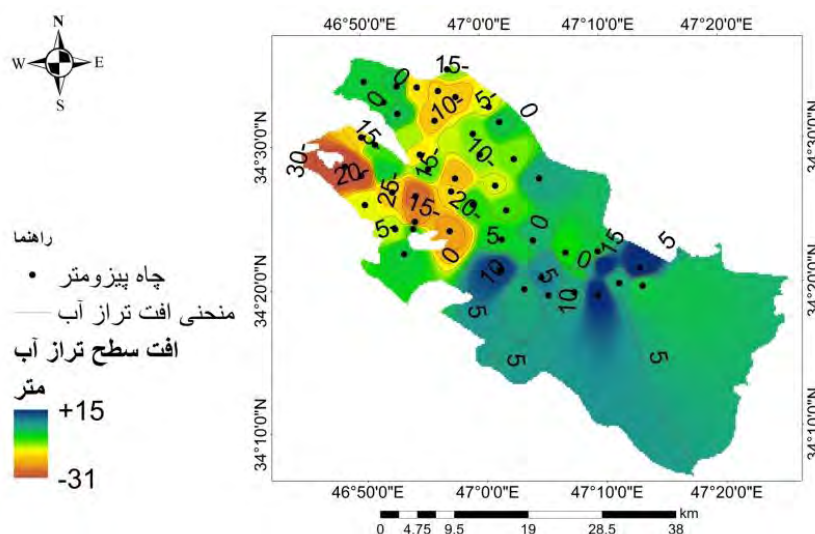
۱۰۲ میلی‌متر بوده و به دنبال آن برداشت بی‌رویه از سطح چاه‌ها می‌باشد. نمودار زیر این موضوع را به خوبی نمایش می‌دهد.



شکل ۱۳. بارش و سطح تراز آب دشت (منبع: سازمان آب منطقه‌ای کرمانشاه)

در این تحقیق به جهت برآورد میزان افت سطح آب‌های زیرزمینی و میزان فرونشست حاصل از آن در محدوده مطالعاتی از اطلاعات مربوط به ۵۴ چاه پیژومتر موجود در سطح دشت در بازه زمانی ۱۳۸۰-۱۴۰۰ استفاده می‌کنیم. بدین صورت که پس از جمع‌آوری اطلاعات مربوط به تراز سطح آب‌های زیرزمینی، این اطلاعات از لحاظ کمی مورد بررسی قرار می‌گیرند. بدین منظور داده‌های سطح تراز آب ۵۴ چاه پیژومتر موجود در سطح دشت از سازمان آب منطقه‌ای اخذ شد. جهت تهیه نقشه افت سطح تراز آب در بازه زمانی بیست‌ساله (۱۳۸۰-۱۴۰۰) ابتدا نقشه تراز سطح آب برای سال ۱۳۸۰ با استفاده مدل کرجینگ^۱ ساده (آرام اس ای: ۱,۰۶) و نقشه تراز سطح آب سال ۱۴۰۰ با استفاده از وزن‌دهی معکوس فاصله با توان ۵ (آرام اس ای: ۹,۱۲) درون‌یابی شده است و در نهایت با تفاضل بین این دو نقشه در محیط جی‌آی‌اس نقشه میزان افت سطح تراز آب برای بازه زمانی ۲۰ ساله تهیه شد (شکل ۱۴). بیشتر چاه‌های بخش غربی و شمال غربی مقداری از افت سطح آب را در دوره‌های زمانی مختلف تجربه کرده‌اند. بیشترین میزان افت سطح تراز آب نیز در چاه‌های موجود در بخش غربی و شمال غربی دشت می‌باشد. به طوری که ناحیه بیشینه فرونشست بر منطقه افت منطبق است. در بخش شرقی دشت به سبب تغییر کاربری اراضی در سال‌های اخیر از مناطق کشاورزی به مسکونی بیشتر چاه‌ها موجود در این ناحیه سطح تراز آب آن‌ها بالاتر آمده است.

1. Kriging
2. RMSE

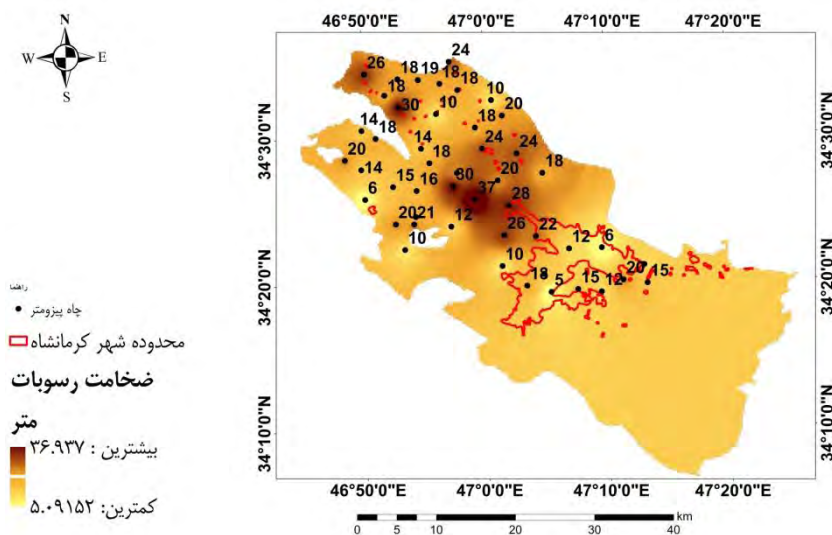


شکل ۱۴. نقشه متوسط فرونشست مدل SBAB و منحنی افت سطح تراز آب در بازه ۲۰ ساله

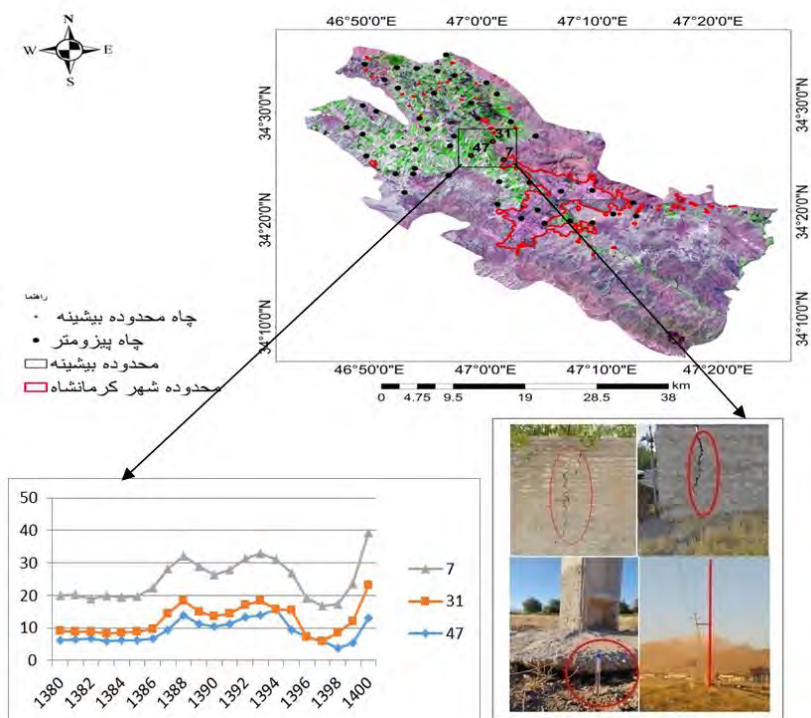
پس از مشاهده نتایج حاصل از نشست و بررسی ارتباط آن با میزان افت سطح آب می‌توان دریافت که لزوماً در هر نقطه‌ای که افت شدید سطح تراز آب وجود دارد به معنای وجود فرونشست بیشتری نیست. به همین دلیل بایستی به دنبال پارامتر مؤثر دیگری گشت که از جمله مهم‌ترین آن جنس زمین می‌باشد. رسوبات ریزدانه از جمله رس و سیلت نسبت به عبور آب نفوذناپذیری شدیدی دارد و معمولاً حجمی از رطوبت را برای دهه‌های زیادی نگهداری می‌کنند و در صورت خشک‌شدن منقبض می‌شوند که موجب افزایش استعداد پذیری نشست سطح می‌شود. به همین منظور لوگ زمین‌شناسی چاه‌ها بررسی و ضخامت رسوبات ریزدانه با درجه خلوص (۸۵ تا ۱۰۰ درصد) تعیین شد. سپس با استفاده از معیار کمترین مقدار میانگین مربع خطاها روش وزن‌دهی معکوس فاصله با توان ۲ (میانگین مربع خطاها: ۶,۴۹) به عنوان بهترین روش جهت درونیابی انتخاب شده است. با تهیه لوگ زمین‌شناسی چاه‌های پیزومتر نقشه ضخامت رسوبات ریزدانه چاه‌های پیزومتر موجود در سطح دشت مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۱۵). در نقشه تهیه شده بخش غربی و شمال غربی با بیشترین میزان ضخامت رسوبات ریزدانه مشخص شده است. این نقشه نشان‌دهنده این موضوع است که ارتباط معناداری بین میزان رسوبات ریزدانه و فرونشست در سطح دشت وجود دارد. نواحی حاشیه غربی دشت که علی‌رغم اینکه دارای افت سطح تراز آب بوده است میزان فرونشست در آن نواحی کم بوده است که با بررسی عامل ضخامت رسوبات ریزدانه این موضوع مشخص شد که افت سطح تراز آب در کنار رسوبات ریزدانه سبب تشدید پدیده فرونشست شده است.

در نهایت به منظور بررسی تأثیر افت سطح آب و ضخامت رسوبات ریزدانه در میزان فرونشست رویداد در سطح دشت کرمانشاه، چاه‌های موجود در محدوده بیشینه فرونشست ارزیابی شد. در منطقه بیشینه فرونشست سه حلقه چاه پیزومتر با شماره چاه ۷,۳۱ و ۴۷ وجود دارد که این چاه‌ها از نظر ژئوهیدرولوژی و زمین‌شناسی بررسی شدند (شکل ۱۶). نتایج این بررسی نشان‌دهنده این موضوع بود که چاه‌های انتخابی علاوه بر افت سطح تراز آب، از نظر زمین‌شناسی نیز ضخامت رسوبات ریزدانه (رس و سیلت) با درجه خلوص ۸۵-۱۰۰ درصد در آن‌ها زیاد می‌باشد. در نمودار زیر میزان افزایش عمق آب این سه چاه نشان داده شده است. در هر سه حلقه چاه در بازه زمانی ۲۰ ساله عمق سطح آب حدود ۸ متر افزایش یافته است. از نظر ضخامت رسوبات ریزدانه نیز با بررسی لوگ زمین‌شناسی چاه‌های پیزومتر، میزان ضخامت رسوبات ریزدانه چاه شماره ۷ (۲۸ متر)، چاه شماره ۳۱ (۲۰ متر)، چاه شماره ۴۷ (۳۷ متر) می‌باشد. این میزان ضخامت نشان‌دهنده ضخامت

زیاد رسوبات ریزدانه در چاه‌های محدوده بیشینه می‌باشد. در نهایت به‌منظور صحت سنجی نتایج به‌دست‌آمده با مشاهدات میدانی در سطح محدوده بیشینه فرونشست، در حوالی چاه‌های پیژومتر موجود در این بخش شاهد علایم وجود فرونشست در این محدوده بوده‌ایم (شکل ۱۲). همه این موارد تأییدکننده این موضوع می‌باشند که در منطقه بیشینه فرونشست عوامل انسانی (برداشت بی‌رویه از سطح آب، کاربری اراضی) و عوامل طبیعی (ضخامت رسوبات ریزدانه و کاهش نزولات جوی) در کنار یکدیگر موجب رویداد پدیده فرونشست در سطح منطقه بوده است.



شکل ۱۵. نقشه ضخامت رسوبات ریزدانه



شکل ۱۶. چاه محدوده بیشینه فرونشست زمین و نمودار عمق سطح آب چاه (۷، ۳۱، ۴۷) (منبع: سازمان آب منطقه‌ای کرمانشاه) و عکس محدوده چاه پیژومتر

نتیجه گیری

امروزه با توجه اهمیت و فراگیری مخاطره فرونشست زمین بسیاری از تحقیقات در زمینه علوم زمین و ژئومورفولوژی به این موضوع اختصاص داده شده است. به همین سبب در تحقیق حاضر نیز سعی شده است میزان فرونشست زمین با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری محاسبه شود. بدین منظور سری زمانی فرونشست زمین در بازه زمانی ۲۰۱۶ (ژوئن) - ۲۰۲۱ (ژانویه) با دو رویکرد خط مبنای کوتاه و پراکنش کننده‌های دائمی اندازه‌گیری شد. نتایج حاصل از دو سری‌های زمانی نشان‌دهنده بیشینه فرونشست ۱۰۰ میلی‌متری در روش SBAS و ۱۰ میلی‌متر در سال در روش PS در بخش غربی و شمال غربی دشت کرمانشاه می‌باشد. در محدوده بیشینه تعداد چاه‌ها از تراکم بالایی برخوردار بوده و بیشترین برداشت آب چاه‌ها مختص به بخش کشاورزی می‌باشد. این میزان فرونشست از سمت غربی دشت به سمت شرق دشت کاهش یافته است. نقشه کاربری اراضی منطقه نیز تأییدکننده این موضوع می‌باشد که منطقه بیشینه فرونشست زمین دارای کاربری زراعی آبی و دیم با مساحت ۶۲ درصد (۹۱۱ کیلومتر مربع) مساحت دشت بوده است. با بیشترین میزان برداشت آب در بخش کشاورزی بوده است. چاه‌های انتخابی مورد ارزیابی در محدوده بیشینه فرونشست زمین نیز میزان افت سطح تراز آب حدود ۸ متر را در سال نشان می‌دهند. از نظر زمین‌شناسی نیز این چاه‌ها دارای ضخامت رسوبات زیاد می‌باشد که در حدود ۲۰ تا ۳۷ متر می‌باشد. این موارد بیان‌کننده این نتیجه است که محدوده تحت‌تأثیر عوامل انسانی (کاربری اراضی، برداشت بی‌رویه از سطح چاه، تعداد چاه‌ها) به‌عنوان یک عامل تشدیدکننده و عوامل طبیعی (کاهش نزولات جوی، تداوم خشکسالی، جنس رسوبات سطح دشت) در کنار یکدیگر سبب بروز پدیده فرونشست شده است. این پژوهش نشان‌دهنده آغاز این مخاطره در سطح دشت می‌باشد. به همین سبب به مدیریت و برنامه‌ریزی صحیح در جهت برداشت از آب‌های زیرزمینی و کاهش کشت محصولات آبی در سطح دشت و ممنوعه اعلام نمودن دشت کرمانشاه بیش‌ازپیش نیازمند است.

تقدیر و تشکر

بنا به اظهار نویسنده مسئول، این مقاله حامی مالی نداشته است.

منابع

- ۱) بابایی، سید ساسان؛ موسوی، زهرا و روستایی، مه آسا. (۱۳۹۵). آنالیز سری زمانی تصاویر راداری با استفاده از روش طول خط مبنای کوتاه (sbas) و پراکنش کننده‌های دائمی (ps) در تعیین نرخ فرونشست دشت قزوین. نشریه علوم و فنون نقشه‌برداری، ۵(۴)، ۹۵-۱۱۱.
- ۲) جیریایی، حسین. (۱۳۹۵). پایش فرونشست سطح زمین با تکنیک تداخل‌سنجی راداری در دشت میناب. به راهنمایی بختیاری-کیا، مرادی، عباس، توکلی، محمد، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه هرمزگان، رشته جغرافیا.
- ۳) حجازی، اسدالله؛ رضائی مقدم، محمدحسین؛ ولی‌زاده کامران، خلیل و موسوی کجباباد، ندا. (۱۴۰۱). آشکارسازی فرونشست زمین جهت پایداری دشت هریس با استفاده از تصاویر راداری و روش‌های ps و sbas. جغرافیا و پایداری محیط، ۴۳، ۸۹-۱۰۳. <https://doi.org/10.22126/ges.2022.6909.2446>
- ۴) حسینی، مسعود و شامی، سیاوش. (۱۳۹۸). پردازش تصاویر راداری با نرم‌افزار stamps. تهران: انتشارات دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی.
- ۵) رنجبر باروق، زهرا و فتح‌اله‌زاده، محمد. (۱۴۰۰). بررسی فرونشست زمین با استفاده از سری زمانی تصاویر راداری و ارتباط آن با تغییرات آب‌های زیرزمینی (مطالعه موردی: کلان‌شهر کرج)، پژوهش‌های ژئو کمپی، ۱۰ (۴)، ۱۳۸-۱۵۵.

10.22034/gmpj.2022.313426.1313

- ۶) رهنما، حسین و میراث، سهراب. (۱۳۹۳). آب‌های زیرزمینی و مخاطره فرونشست سطح زمین در دشت‌های ایران. پنجمین کنفرانس بین‌المللی مدیریت جامع بحران‌های طبیعی، ۶۲۹-۶۵۱.
- ۷) روزبان، علی. (۱۳۹۵). بررسی فرونشست زمین با استفاده از روش تداخل سنجی تفاضلی راداری (*d-insar*) و با به‌کارگیری تصاویر سنجنده جدید سنتینل. با راهنمایی اسماعیلی، علی، معتق، مهدی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان، رشته نقشه‌برداری.
- ۸) زندی، رحمان؛ فرزین کیا، فرزانه و شفیعی، نجمه. (۱۳۹۸). فرونشست زمین و تداخل‌سنج راداری، انتشارات ماهواره، چاپ اول.
- ۹) شریفی‌کیا، محمد. (۱۳۹۱). تعیین میزان و دامنه فرونشست زمین به کمک روش تداخل‌سنجی راداری (*insar*) در دشت نوق-بهرمان، برنامه‌ریزی و آمایش فضا، ۱۶ (۳)، ۱-۱۲. <https://doi.org/10.22067/geo.v0i0.77132>
- ۱۰) صادقی، زهرا؛ ولدان زوج، محمدجواد و دهقانی، م. (۱۳۹۱). تلفیق دو روش متفاوت تداخل سنجی راداری بر پایه پراکنش‌کننده‌های دائمی به منظور پایش فرونشست. علوم زمین، ۲۲ (۹۰)، ۴۵-۵۴. <http://dx.doi.org/10.29252/jgit.2.2.37>
- ۱۱) عابدینی، موسی. (۱۳۹۶). مبانی فرونشست زمین (مخاطرات هیدروژئومورفوزی و مدیریت محیط). اردبیل: انتشارات دانشگاه محقق اردبیلی.
- ۱۲) عزتی، سودابه. (۱۳۹۴). بررسی فرونشست زمین در اثر برداشت از آب‌های زیرزمینی به روش تداخل‌سنجی راداری، مطالعه موردی: دشت شستر - صوفیان. به راهنمایی ولیزاده کامران، رسولی، علی‌اکبر، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تبریز، رشته سنجش‌ازدور.
- ۱۳) علایی طالقانی، محمود. (۱۳۸۲). ژئومورفولوژی ایران. تهران: نشر قومس.
- ۱۴) علایی طالقانی، محمود؛ سنجری، فرشید و جلیلیان، آذر. (۱۳۸۹). مکان‌یابی بهینه برای دفع بهداشتی پسماندهای جامد شهری کرمانشاه به روش تجربی بر اساس روش ژئومورفولوژی منطقه، مطالعات و پژوهش‌های شهری و منطقه‌ای، ۲ (۶)-۳۴-۱۹.
- ۱۵) غلامی، محمدعلی. (۱۳۹۴). پیش‌بینی مکان‌های فرونشست احتمالی در دشت کرمانشاه. به راهنمایی امجد ملکی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه رازی، دانشکده ادبیات و علوم انسانی.
- ۱۶) نصیری‌خانقاه، علیرضا و شریفیان عطار، رضا. (۱۳۹۸). کاربرد تداخل‌سنجی رادار در مطالعه فرونشست. انتشارات مهر جالینوس.

Reference

- 1) Alaei Taleghani, M. (2003). *Geomorphology of Iran*. first edition, Tehran: Nashraqoms. [In Persian].
- 2) Alaei Taleghani. M., Senjari, F. & Jalilian, A., (2010). Optimum location for sanitary disposal of urban solid waste in Kermanshah using an experimental method based on regional geomorphology, urban and regional studies and researches. *Shall II*, 6, 1-12. [In Persian].
- 3) Chen, C., Wang, C., & Chen Kuo, L. (2010). Correlation between groundwater level and altitude variations in land subsidence area of the Choshuichi Alluvial Fan. *Taiwan Engineering Geology*, 115, 122-131. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.05.011>
- 4) Darwish. N., Kaiser. M., Koch. M., & Gaber. A. (2021). Assessing the Accuracy of ALOS/PALSAR-2 and Sentinel-1 Radar Images in Estimating the Land Subsidence of Coastal Areas: A Case Study in Alexandria City, Egypt. *Remote Sens*, 13, 1838. <https://doi.org/10.3390/rs13091838>
- 5) Ezzati, S. (2014). *Investigating ground subsidence due to groundwater withdrawal using radar interferometric method, case study: Shabestar-Sofian plain*. under the guidance of Valizadeh Kamran, Rasouli, Ali Akbar, master's thesis, Tabriz University, field Remote Sensing. [In Persian].

- 6) Gholami, M. (2014). *Prediction of possible subsidence places in Kermanshah Plain*. under the guidance of Maleki, Amjad, Master's thesis, Razi University, Faculty of Literature and Humanities. [In Persian].
- 7) Gloppe, R.J. (1989). *Land subsidence and soil ripening*. *Flevovericht* 306. Rijkswaterstaat, Directie Flevoland, Lelystad.
- 8) Hijazi, A., Rezaei Moghadam, M. H., Valizadeh-Kamran, Kh. & Mousavi-Kajabad, N. (2022), detection of land subsidence for the stability of Harris Plain using radar images and IPS and SBS methods. *Geography and Environmental Sustainability*, 43, 89-103. [In Persian].
- 9) Jirayi, H. (2015). *Land surface subsidence monitoring with radar interferometric technique in Minab Plain*. under the guidance of Bakhtiari-Kia, Moradi, Abbas, Tavakoli, Mohammad, Master's Thesis, Hormozgan University, Department of Geography. [In Persian].
- 10) Kamali, M., Abuelgasim, A., Papoutsis, I., Loupasakis, C., & Kontoes, Ch., (2020). A reasoned bibliography on SAR interferometry applications and outlook on big interferometric data processing, 19, 100358. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100358>
- 11) Rahnema, H., & Heritage, S. (2013). Groundwater and the risk of ground subsidence in the plains of Iran. *5th International Conference on Comprehensive Management of Natural Disasters*, 629-651. [In Persian].
- 12) Ranjbar Barouq, Z., & Fethullah Zadeh, M. (2021). Investigating land subsidence using time series of radar images and its relationship with underground water changes (case study: Karaj metropolis). *Geochemical Research*, 10 (4), 138-155. [In Persian].
- 13) Rozban, A. (2015). *Investigating land subsidence using the differential radar interferometric method (d-insar) and using the new Sentinel sensor images*. with the guidance of Esmaili, Ali, Mo'taq, Mahdi, Master's thesis, Kerman University of Technology and Advanced Technology. [In Persian].
- 14) Sadeghi, Z., Voldan Zoz, M.J., & Dehghani, M. (2011). Integration of two different radar interferometry methods based on permanent scatterers to monitor subsidence. *Earth Sciences*, 22 (90), 45-54. [In Persian].
- 15) Sharifi Kia, M., Afzali, A., & Shayan, S. (2014). Extraction and evaluation of geomorphological phenomena caused by subsidence in Damghan Plain. *Quantitative Geomorphological Researches*, 4(2), 1-12. [In Persian].
- 16) Zhou, Z. (2013). *The applications of InSAR time series analysis for monitoring long term surface change in peatlands*, University of Glasgo. <https://eleanor.lib.gla.ac.uk/record=b3008141>