



Investigating the Effective Geographic Factors on the Subsidence of Mashhad City using the OLS Model

Faeze Noroozi Moghadam¹ | Hadi Soleimani Moghadam^{2✉} | Elahe Akbari³

1. MSc. Department of Geography and urban planning, Faculty of Geography and Environmental Sciences, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran. E-mail: faezehnovrozi83@gmail.com
2. Corresponding author, Assistant Professor. Department of Geography and Urban planning, Faculty of Geography and Environmental Sciences, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran. E-mail: h.soleymani@hsu.ac.ir
3. Assistant Professor. Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Geography and Environmental Sciences, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran. E-mail: e.akbari@hsu.ac.ir

Article Info

ABSTRACT

Article type:

Research Article

Article history:

Received: 13 September 2024

Revised: 18 September 2024

Accepted: 18 February 2025

Published: 19 July 2025

Keywords:

Subsidence,
Mashhad City,
Geographic factors,
Ordinary Least Square
regression.

Objective: Land subsidence is one of the most important environmental hazards that has affected many plains of the country today. The purpose of this research is to predict the amount of ground subsidence in Mashhad city.

Methods: In order to achieve this goal, the D-InSAR technique of radar interferometry has been used. Sentinel 1 satellite data was done in the Snap8.1 software environment. Also, using the OLS model, the spatial analysis of factors affecting subsidence was done. In this research, an attempt has been made to carry out a spatial analysis of the subsidence of the city of Mashhad and to determine the extent and trend of its expansion during a period of 3 months in 2022. The effective factors of subsidence in this research include land use, distance from the fault, changes in the underground water level, distance from the river, elevation, slope and soil.

Results: The results of this method show that the rate of subsidence in Mashhad is increasing. In addition, during this period, the size of these areas has increased and the process of expansion towards the western areas is moving. Also, the results show that the highest amount of subsidence happened in the western and northwestern parts. The spatial comparison of subsidence with the level of underground water showed that in order to predict subsidence, the role and effect of other factors controlling subsidence should be obtained. According to the OLS model, which sig shows a significant relationship between 7 effective factors, the most influential factor in the subsidence of the underground water level and the least influential factor of the subsidence was the slope.

Conclusions: The subsidence event is due to excessive extraction of groundwater in most plains and cities of Iran, such as Mashhad. Given that the main and fundamental cause of the subsidence of Mashhad is the excessive use of groundwater and groundwater levels, proper management of groundwater extraction should be carried out by the relevant organizations.

Cite this article: Last Name, Initial., Last Name, Initial., & Last Name, Initial. (2024). Title of paper in lower case letters (except for initial letter of first word, initial of first word after a colon, and proper nouns). *Journal of Remote Sensing and GIS Applications in Environmental Sciences*, 4 (13), 1-20. <http://doi.org/0000000000000000>



© The Author(s).

DOI: <http://doi.org/0000000000000000>

Publisher: University of Tabriz.

Introduction: Subsidence is the lowering of the earth's surface in the vertical direction with a small horizontal displacement vector, and this phenomenon occurs under the influence of various factors such as oil, gas, underground water extraction, mines and tectonic issues. Changes in the earth's surface shape and the earth's geometry are among the most common visible outcrops caused by this phenomenon, due to the prevailing dry climatic conditions and the increasing exploitation of underground water sources in recent years, suitable conditions and capabilities have been provided for this phenomenon. The occurrence of this incident destroyed surface and subsurface structures due to cracks in the earth's surface. Due to climate change and a decrease in rainfall, an increase in population and an increase in water demand, the influx of humans into underground water aquifers to meet the water demand has increased and this has caused a drop in the level of underground water aquifers and, as a result, an increase in subsidence. Subsidence in urban areas will cause a lot of material and human damage, and considering that this phenomenon does not occur once and continuously and little by little, it affects residential and non-residential structures and environments. Urban areas are much more vulnerable to subsidence due to high population density, construction and important communication lines. The residents of Mashhad, located in the arid and semi-arid climates of northeastern Iran, have always depended on underground water for their livelihood. Deep wells, etc., have created issues and problems in the water resources of these aquifers. This indiscriminate use is due to the increase and development of the city's population and the increase of the pilgrims of Imam Reza, peace be upon him, along with the growth and expansion of the urban infrastructure, which has caused the occurrence of subsidence and its consequences in the studied area. Considering the consequences of subsidence, such as the subsidence of some buildings on the path of a Mashhad city train, as well as the subsidence of the ground in the four roads of Mashhad police station and the creation of financial and physical damages in several consecutive years in the nineties, it is necessary that the issue of subsidence, the factors affecting it and the consequences of this complication should be seriously studied in Mashhad.

Material and Methods: This research aims to evaluate the subsidence of Mashhad city using the radar interferometric method and to identify the geographical factors affecting the subsidence phenomenon of the city of Mashhad City using the OLS model. Ground data and remote sensing were used to carry out this scientific research. In the first step, to obtain the subsidence zoning, Sentinel 1 images are processed in Snap 8.1 software, and the final image is transferred to Arc GIS for output. Also, to obtain a map of 7 effective geographical factors from piezometric good statistics, DEM 30 meters, 100,000 geological layers, the slope of the fault file and River and Land use of the whole of Iran, then in the Arc map environment, underground water level maps, slope and height, The soil type, distance from the fault, distance from the river, land use are discussed and the significance level and influence of these factors are measured through the OLS model.

Results: The findings of the research show that the calculation of the subsidence rate by radar interferometric method during 3 months of 2022, an average of about 3 cm of subsidence has occurred in the city, and that there is more risk in the northwestern part of the aquifer, which is between It is 4 to 5 cm. Also, the results of the OLS model implementation showed that to identify the most effective influencing factor using 7 parameters which include soil, slope, land use, height, distance from river and fault and underground water level. The highest value with a significant coefficient of 0.0005 is related to the underground water level and the least effective factor is related to the slope of about 0.6. Also, the highest correlation coefficient in the first place is related to the underground water level is 0.8 and the second place is the distance from the fault is 0.78 and the weakest correlation coefficient was assigned to the slope with 0.25.

Conclusion: The results of subsidence zoning showed that the maximum amount of subsidence in the west and northwest parts of Mashhad cover about 83 square kilometers of the total area of 351 square kilometers of Mashhad city. According to the OLS model, the most fundamental cause of the subsidence of Mashhad City is the excessive use of underground water and the underground water level, so proper management by the relevant organizations should be done for the amount of groundwater withdrawal. By comparing the results of this research with similar research in Iran and the world, we conclude that most of the plains and cities of Iran, including the Yazd-Ardakan plain,

like the rest of the world, including the Aguascalientes Valley in Mexico, use radar interferometry to calculate subsidence, who reached similar results that the subsidence event is due to excessive withdrawal from the groundwater level. In this research, in addition to radar interferometry (DInSAR), the OLS model was used to better identify the factors influencing the subsidence of Mashhad City, which was not used in the above cases. In addition, our method is different from the methods of Shahbazi and Pour Khosravani, Lashkari et al. because these people used GPS stations to evaluate the subsidence.

Keywords: Subsidence, Mashhad city, geographical factors, ordinary least square regression.

مقدمه

فرونشست، پایین آمدن سطح زمین در جهت عمودی با بردار جابجایی افقی کوچک است و این پدیده تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند نفت، گاز، استخراج آب های زیرزمینی، معادن و مسائل زمین ساختی رخ می دهد (جنت، قاضی فرد و روستایی، ۱۳۸۸). امروزه به دلیل حاکم بودن شرایط اقلیمی خشک و بهره برداری روزافزون از منابع آب زیرزمینی، قابلیت و شرایط مناسبی برای این پدیده فراهم شده است و بروز این حادثه، باعث تخریب سازه های سطحی و زیر سطحی در اثر شکاف در سطح زمین می گردد (گالوی و همکاران^۱، ۱۹۹۸). هو و همکاران عنوان نموده اند که فرونشست در بیش از ۱۱۵ شهر جهان گزارش شده است (هو و همکاران^۲، ۲۰۰۴). کشور ایران جز ۱۰ کشور بلاخیز جهان است که از ۴۰ نوع مخاطراتی که برای جهان تعریف شده است، ۳۰ نوع آن در کشور ایران حادث می شود. فرونشست در نواحی شهری باعث ایجاد خسارات مادی و جانی فراوانی خواهد شد.

منطقه های شهری به دلیل تراکم جمعیت بالا، ساخت و سازها و خط های ارتباطی مهم، در مقابل فرونشست بسیار آسیب پذیرتر هستند. آثار زیان بار پدیده ی فرونشست بر ساخت و ساز شهری، شامل تخریب سازه های زیر سطحی و سطحی در اثر ایجاد شکاف در زمین است. بدینگونه می توان به فرونشست زمین در اثر پمپاژ آب در ۳۵ سال گذشته در شهر بانکوک در تایلند اشاره کرد که با حداکثر نشست سالانه ۱۲۰ میلی متر در اوایل دهه در ۱۹۸۰ گزارش گردیده است (پینو و همکاران^۳، ۲۰۰۶). در ایران نیز نشانه های از شکاف و درزه به دلیل پدیده ی فرونشست در منطقه خین عرب در حاشیه شهر مشهد مشاهده شده است (صالحی متعهد، حافظی مقدس و لشکری پور، ۱۳۹۸). با عنایت به خشکسالی سرتاسری کشور در طی دهه های اخیر و با توجه به حجم جمعیتی زیاد ساکن در شهر مشهد و نیاز به مصرف روزانه بالای آب برای شهروندان مشهدی و زائران بارگاه رضوی، مسأله اصلی ما فرونشست دشت بزرگ مشهد در آینده نزدیک و مسائل و تبعات ناشی از آن خواهد بود. بنابراین این پژوهش بدنبال بررسی عوامل مؤثر بر فرونشست شهر مشهد می باشد.

ساکنین شهر مشهد که در اقلیم های خشک و نیمه خشک شمال شرقی ایران قرار گرفته اند، همواره برای تأمین معاش به آب زیر زمینی وابسته بوده اند، در مقطع کنونی عواملی از جمله بالا بودن تبخیر، کاهش و توزیع نامناسب بارش، برداشت بی رویه توسط چاه های عمیق و..، مسائل و مشکلاتی در منابع آبی این آبخوان ها به وجود آورده است. این استفاده بی رویه، به دلیل افزایش و توسعه جمعیت شهر و افزایش زائران امام رضا علیه السلام، در کنار رشد و گسترش زیر ساخت های شهری می باشد که باعث وجود آمدن رخداد فرونشست و پیامدهای ناشی از آن در محدوده مورد مطالعه گردیده است. با توجه به پیامدهای فرونشست از قبیل نشست برخی ساختمانها در مسیر یک قطار شهری مشهد و نیز نشست زمین در چهار راه کلاتر مشهد و ایجاد خسارات مالی و جسمانی در چند سال متوالی در دهه نود، ضرورت دارد که مسأله فرونشست، عوامل مؤثر بر آن در سطح شهر مشهد بطور جدی مطالعه گردد.

عموما پژوهشگران رخداد فرونشست در ابعاد گوناگون ارزیابی کردند از جمله: صالحی متعهد و همکاران (۱۳۹۸) در مقاله ای با عنوان "نسبت به ارزیابی فرونشست زمین در شهر مشهد با کمک تلفیق دو روش تداخل سنجی راداری و اندازه گیری میدانی" اقدام کردند، در این پژوهش مشخص شد دو کاسه فرونشستی در شمال غرب و جنوب شرق وارد حریم شهر مشهد شده است، آنها میزان فرونشست سال ۲۰۱۰ دشت مشهد را ۲۰ سانتی متر به ازای هر سال برآورد کرده اند. خرمی، مقصودی و ابریشمی (۱۳۹۸) در پژوهشی تحت عنوان "تعیین فرونشست شهر مشهد به روش تداخل سنجی راداری پراکنشگر دائمی" و بین سال- های ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۷ با استفاده از ادغام ۶۹ تصویر راداری از مدارهای بالا گذر و پایین گذر ماهواره A-Sentinel 1، نتایج تحلیل های انجام شده در این تحقیق را مورد بررسی قرار دادند. میزان فرونشست در نواحی شمال غرب زیاد بوده و شمال شهر

1. Galloway et al

2. Hu et al

3. Pino Partners

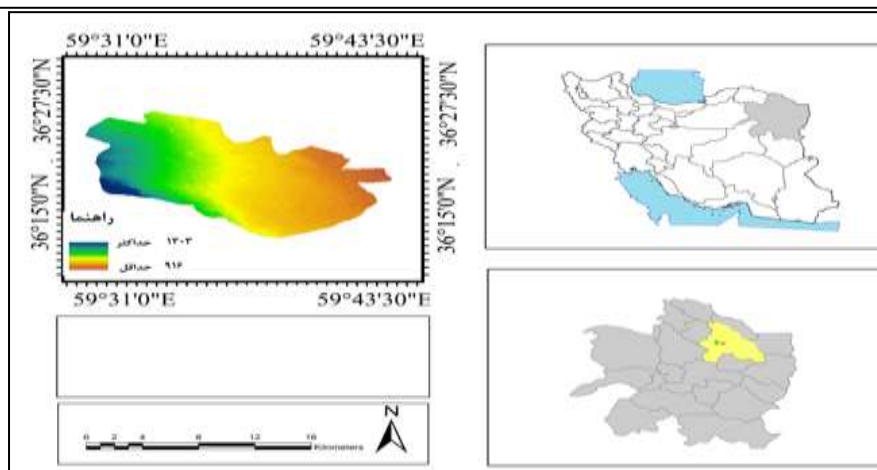
مشهد را با حداکثر حدود ۱۴ سانتی متر در سال نشان می دهد. شفیعی و همکاران (۱۳۹۹) در پژوهشی خود با عنوان "بررسی عوامل موثر بر فرونشست حوضه نور آباد ممسنی" در آبخوان دشت نورآباد ممسنی استان فارس، نسبت به تحلیل فضایی نقش افت آب های زیر زمینی در مقدار فرونشست با کمک روش رگرسیون خطی چند متغیره اقدام کردند، در این پژوهش از روش درون یابی جهت تهیه ی نقشه های سطح آب های زیر زمینی استفاده شد. نتایج حاصل از پژوهش نشان داد در بین عوامل تاثیرگذار، برداشت آب از منابع زیرزمینی بیشترین نقش را فرونشست منطقه دارد. سينا و تاپت (2021) در اثری با نام "بررسی ماهواره ای InSar از فرونشست زمین تحت کنترل ساختاری ناشی از بهره برداری از آب های زیرزمینی در دره آگواسکالینتس مکزیک" انجام داده و نتیجه گرفتند برای رفع نیازهای آب در شهرهای در حال گسترش مکزیک، بسیاری از سفره های آب، بیش از حد مورد بهره برداری قرار گرفته و این برداشت اضافی سبب فرونشست زمین شده و این پدیده اغلب با شکاف، شکستگی زمین و آسیب به زیرساخت ها ترکیب می شود. نصیری و همکاران (۱۳۹۸) در مقاله خود با عنوان "تحلیل فضایی عوامل موثر بر فرونشست زمین با استفاده از مدل OLS" به منظور بررسی وضعیت فرونشست در آبخوان دشت فهلان از داده های سنینل A1 جهت تعیین تغییرات سطح زمین و همچنین از ماهواره گریس جهت تغییرات نوسانات آب زیر زمینی در آبخوان استفاده گردید، با استفاده از مدل OLS تحلیل فضایی پارامترهای موثر بر فرونشست صورت پذیرفت و نتایج حاصل نشان داد عوامل متعدد از جمله آب زیرزمینی، ارتفاع، پوشش گیاهی، در بروز فرونشست زمین تاثیرگذار هستند. با بررسی عمده مطالعات داخلی و خارجی، سطح آب زیر زمینی را عامل فرونشست دانسته اند.

جنبه نوآوری این پژوهش از دو منظر قابل تامل است: نخست اینکه برای اولین بار بر خلاف دیگر مطالعات، بطور همزمان از روش رگرسیون کمترین مربعات معمولی (OLS) و روش تداخل سنجی راداری استفاده شده است و دومین تفاوت آن با سایر مطالعات این است که روش مطالعه بکار گرفته شده این پایان نامه جهت بررسی عوامل مؤثر در وقوع فرونشست، تابحال در منطقه شهری مشهد استفاده نشده است. از جمله اهداف این پژوهش ارزیابی فرونشست شهر مشهد با استفاده از روش تداخل سنجی راداری و شناسایی عوامل جغرافیایی موثر بر پدیده ی فرونشست شهر مشهد با استفاده از مدل OLS می باشد.

روش پژوهش

منطقه مورد مطالعه

شهر مشهد مرکزیت استان خراسان رضوی با ۳۵۱ کیلومتر مربع وسعت در شمال شرقی ایران در طول جغرافیایی ۵۹ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۶۰ درجه و ۳۶ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۳ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۸ دقیقه و در حوضه کشف رود بین رشته کوه بینالود و هزار مسجد قرار گرفته است (شکل ۱). ارتفاع شهر مشهد از سطح دریا حدود ۱۰۵۰ متر حداکثر ۱۱۵۰ متر و حداقل ۹۵۰ متر می باشد. شهر مشهد با ۳۰۰۱۱۸۴ نفر جمعیت دومین شهر پرجمعیت ایران به شمار می رود. شهر مشهد دارای آب وهوای متغیر، اما معتدل متمایل به سرد و خشک است. از تابستان های گرم و خشک و زمستان های سرد و مرطوب برخوردار است. بیشترین درجه حرارت در تابستان ها ۴۳ درجه بالای صفر و کمترین درجه حرارت در زمستان ها ۲۲ درجه زیر صفر است.

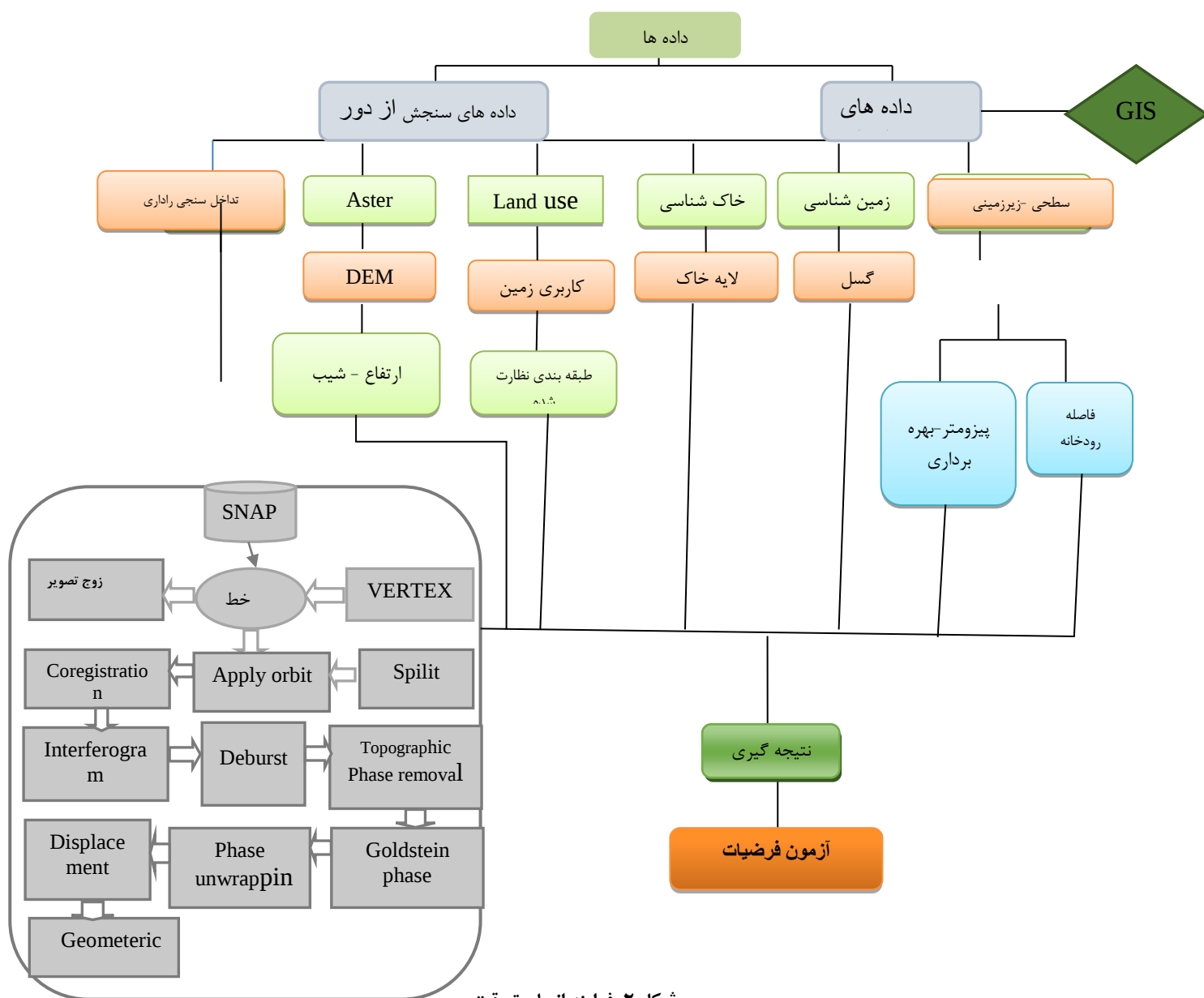


شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

Fig 1. Geographical location of the study area

داده‌های مورد استفاده

برای انجام این پژوهش علمی از داده‌های زمینی و سنجش از دوری استفاده گردید. در قدم نخست برای بدست آوری پهنه بندی فرونشست تصاویر سنتینل ۱ در نرم افزار Snap 8.1 مورد پردازش قرار می‌گیرد و تصویر نهایی جهت گرفتن خروجی به Arc GIS انتقال داده می‌شود. همچنین برای بدست آوری نقشه ۷ عامل مؤثر جغرافیایی از آمار چاه‌های پیژومتری، DEM ۳۰ متر، لایه یک صد هزار خاک‌شناسی، شیب فایل گسل و River و Land use کل ایران تهیه، سپس در محیط Arc map نقشه‌های سطح آب زیرزمینی، شیب و ارتفاع، نوع خاک، فاصله از گسل، فاصله از رودخانه، کاربری زمین پرداخته می‌شود و از طریق مدل OLS سطح معناداری و میزان تاثیرگذاری این عوامل سنجیده می‌شود (شکل ۲).



شکل ۲. فرایند انجام تحقیق

Fig 2. Research process

روش تداخل سنجی راداری (DInSAR)

تداخل سنجی راداری به عنوان ابزاری کارآمد در پایش جابه جایی سطح زمین ناشی از پدیده های مختلف از جمله فرونشست شناخته شده است از جمله مزیت های این روش می شود به پوشش فضای وسیع و پیوسته با قدرت تفکیک مکانی بالا یک روش کارآمد و داده ها و فراوانی نسبتا خوب زمانی، در مقایسه با سایر روش ها، مقرون به صرفه و سهولت دسترسی به داده ها با دقت اندازه گیری معادل سیستم مکان یابی جهانی و تراز یابی دقیق اشاره نمود (صالحی و همکاران، ۱۳۹۱: ۲۸). روش DInSAR وسعت و گوناگونی یک بخش را از نظر پوشش زمین (خشکی) و پستی و بلندی نمایان می کند. در این روش از معلومات فاز دو تصویر راداری بهره وری می کند و با ارزیابی اختلاف فاز، جابجایی پوسته زمین را حساب می کند. این تصویرها

امکان دارد از محل تصویربرداری متفاوت و در زمان های گوناگون اخذ شده باشد. در روش تداخل سنجی راداری به منظور دست یابی اختلاف فاز، پیکسل های مربوطه در دو تصویر شناسانده شده و معادلات مرتبط به هر یک از آنها با هم مخلوط می شوند. به تصاویر اختلاف فاز اینترو فروگرام می گویند. اینترفروگرام یک الگوی تداخلی از حاشیه ها است که به علت اختلاف فاز نسبی به وجود می آید در حقیقت مثل منحنی میزان است که تغییرات مسافت بین زمین تا سنجنده را نشان می دهد (ماسونت و فیگل^۱؛ ۱۹۹۸).

مدل رگرسیون کمترین مربعات معمولی

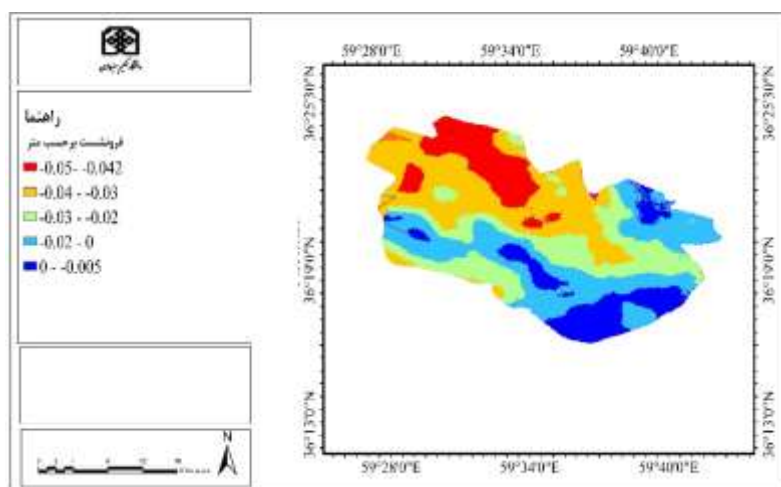
در بین مدل های رگرسیون راجع، روش حداقل مربعات معمولی ساده ترین و رایج ترین روش است. طراحی اولیه این روش معمولاً توسط OLS نشان داده می شود. مبنای فکری روش حداقل مربعات معمولی این است که ضرایب مدل مقادیری را انتخاب می کند که مدل رگرسیونی نمونه نزدیک ترین آنها را به مشاهدات دارد، به عبارت دیگر کمترین انحراف را از مشاهدات فوق نشان می دهد. در مدلسازی فضایی با روش OLS فرض بر این است که ضرایب یا پارامترهای مدل آماری نسبت به مکان (مختصات جغرافیایی) ثابت هستند. بنابراین مقدار متغیر وابسته ای که توسط این مدل تخمین زده می شود برای کل منطقه مورد مطالعه است و مقدار یکسانی را در قسمت های مختلف حوضه تخمین می زند که نقطه ضعف این روش در مدل سازی فضایی محسوب می شود. مدل رگرسیون خطی ساده یک متغیر است (نصیری و همکاران، ۲۰۲۱).

نتایج و بحث

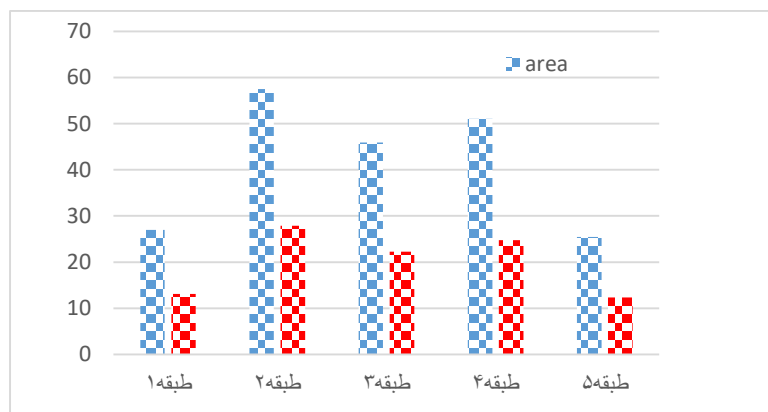
اندازه گیری فرونشست شهر مشهد به روش تکنیک تداخل سنجی راداری (DInSAR)

براساس مقصود این پژوهش که شناخت عوامل جغرافیایی تاثیرگذار در نشست شهر مشهد است. نخست بعد از گردآوری ۲ تصویر، تصاویر راداری به منظور ویرایش خطاهای تصویربرداری و برآورد مقیاس فرونشست در مشهد به روش DInSAR پردازش شد. همانگونه که در بخش روش DInSAR توضیح داده شد، بعد از شکل گیری تداخل نگاشت های (اینترفروگرام) مورد نظر، نقشه رصدی یا واقعی فرونشست در مدت زمانی تابستان ۲۰۲۲ بدست آمد. میانگین فرونشست در دوره مورد تحقیق ۳ سانتی متر بود. با این حال بالاترین نشست در شهر از این روش تبعیت نمی کند و بیشترین فرونشست نقطه ای که در شهر اتفاق افتاده ۰،۰۴۲ تا ۰،۰۵ متر است. همچنین با توجه به شکل ۳، بیشترین میزان فرونشست شهر مشهد بر اساس مساحت و درصد محاسبه شده طبقه دوم یعنی محدوده شمال غربی این شهر می باشد. گوناگونی میانگین و بیشترین فرونشست در شهر مشهد نشان دهنده یکنواخت نبودن عوامل تاثیر گذار بر فرونشست در این آبخوان می باشد.

¹. Mason and Figel



شکل ۳. نقشه فرونشست در شهر مشهد
Fig 3. Subsidence map in Mashhad city



شکل ۴. نمودار مساحت و درصد فرونشست
Fig 4. Diagram of area and subsidence percentage

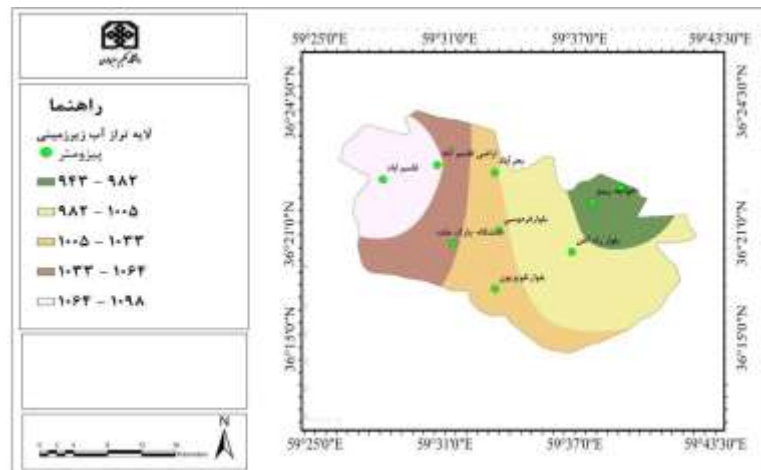
گردآوری موارد تاثیر گذار بر فرونشست در شهر مشهد

عوامل مؤثر شامل، کاربری زمین، فاصله از گسل، طبقه بندی ارتفاعی، شیب، میزان سطح آب زیر زمینی، نوع خاک، فاصله از رودخانه شهر مشهد می باشد. نقشه های عوامل تاثیرگذار بر نشست در قالب نقشه های درجه بندی شده بدست آمده که در ادامه به بررسی هر یک می پردازیم.

ارزیابی سطح آب زیرزمینی

در این بخش از کار با بهره برداری از داده های چاه مشاهده ای بدست آمده از اداره آب منطقه ای، سطح آب مشاهده شده و ترازابی آب سالانه، روال مشابهی را می پیماید. همان گونه که در تصویر نظاره می شود، در این دوره، رویه متناسبی میان میانگین نشست سطح زمین و کاهش سطح آب رویت می شود و فرونشست سطح زمین نیز سنجش شده است. همچنین میزان سطح آب زیرزمینی در این دوره خراسان رضوی و ایجاد تغییرات و ترمیم در قسمتی از آنها، اندازه سطح آب در یک دوره ۳ ماهه حساب شده و هیدروگراف معرف شکل ۴ در این دوره و برای ۹ پیژومتر تعیین شده نگاشته شده است. اندازه نشست ارزیابی شده

و به روش تداخل سنجی راداری تفاضلی در دوره ۳ ماهه با میانگین ۳ ماهه نیز ارزیابی شده است. حداقل ۹۴۳ و حداکثر ۱۰۹۸ متر و در شکل ۵ نمایان شده است.

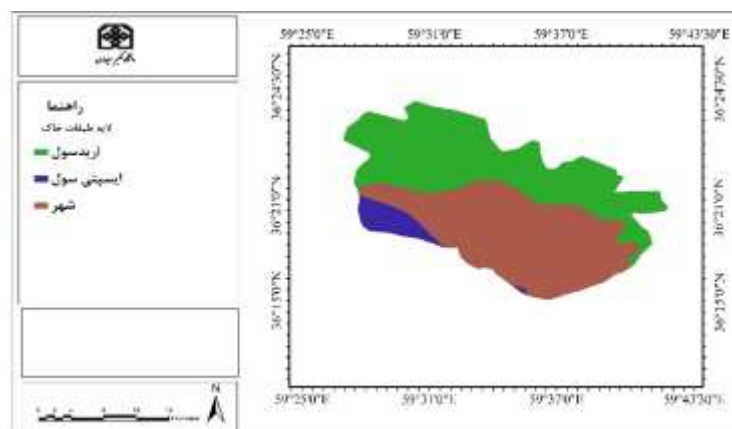


شکل ۵. تغییرات تراز آب زیرزمینی در بازه اندازه گیری فرونشست

Fig 5. changes in the underground water level in the period of subsidence measurement

ارزیابی نوع خاک

همان طور که در شکل ۶، نمایان می شود حداکثر ضخامت خاک، تعلق گرفته به شهر مشهد از گونه اریدسل می باشد و این به درستی بنابر رابطه مستقیم این موارد، با مقدار فرونشست مطابقت دارد. اریدیسول ها خاک های متداول مناطق خشک و بیابانی هستند. در این اراضی میزان نزولات آسمانی اعم از باران و... کمتر از میزان تبخیر و تعرق است و در جایی که اریدیسول وجود دارد، بالاترین میزان فرونشست اتفاق افتاده است. همچنین در منطقه شهری فرونشست کمتری وجود دارد. رتبه دوم فرونشست در مناطقی است که ایسپتی سول ها وجود دارند. لازم به ذکر است که نقشه نوع خاک باتوجه به داده های ژئوفیزیکی و لاگ-های حفاری تهیه و بعد در GIS درون یابی شده است.

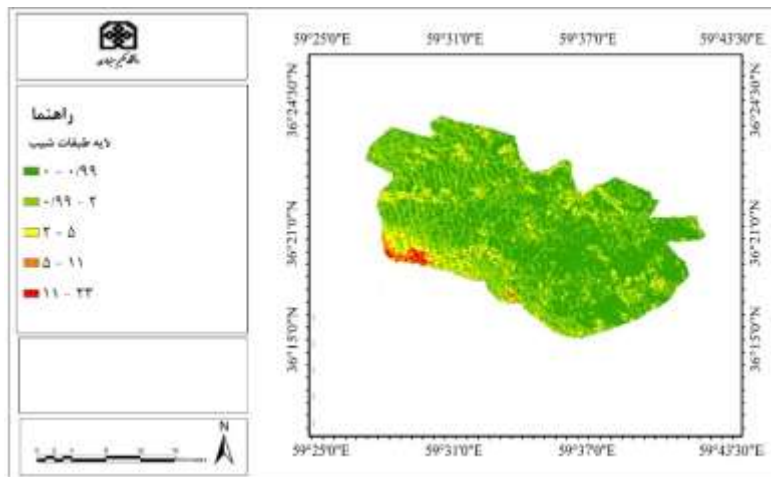


شکل ۶. نوع خاک شهر مشهد

Fig 6. Soil type of Mashhad city

ارزیابی شیب منطقه

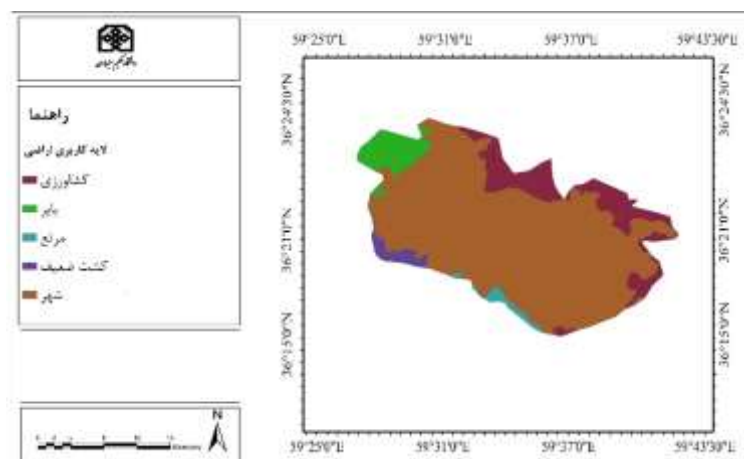
با توجه به شکل 7، نقشه شیب منطقه مورد بررسی قرار گرفته است. شهر مشهد، بیشتر شامل مناطقی با شیب کم می باشد. پارامتر شیب از طریق ویژگی های مورفولوژیکی بر نرخ فرسایش شکل زمین اثر می گذارد. شیب در جمع آوری منابع آب زیرزمینی نقش تاثیر گذاری دارد و در قسمت های جنوبی جای گرفته و زمین را برای برداشت منابع آبی در دسترس قرار می دهد. هرچه به سمت بخش خروجی حوضه آبخیز پیش می رویم میزان شیب کاهش می یابد.



شکل ۷. نقشه شیب مناطق شهر مشهد
Fig 7. Slope map of Mashhad city areas

ارزیابی کاربری زمین های شهر مشهد

همانطور که از شکل ۸، مشخص است بیشتر کاربری شهر مشهد شامل مناطق شهری و پس از آن مربوط به زمین های کشاورزی و بایر است.

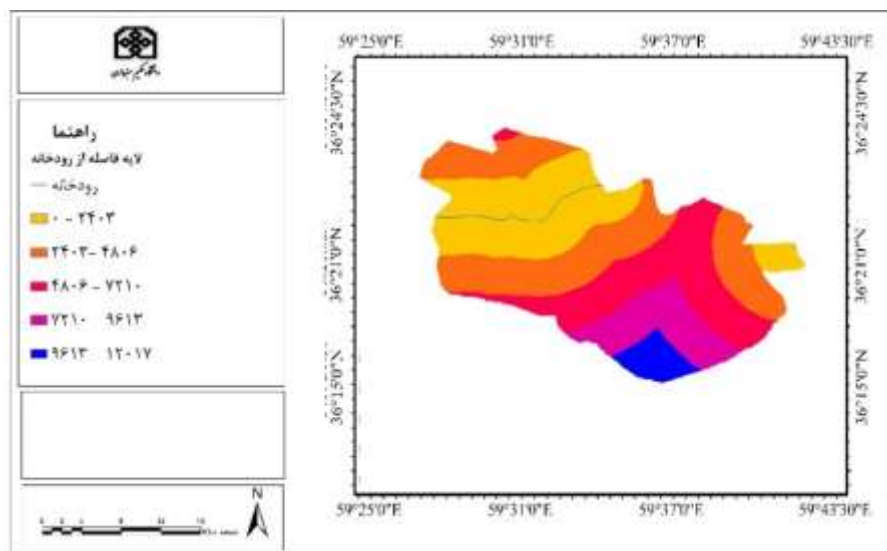


شکل ۸. نقشه کاربری زمین های شهر مشهد
Fig 8. land use map of Mashhad city

ارزیابی فاصله لایه از رودخانه و گسل

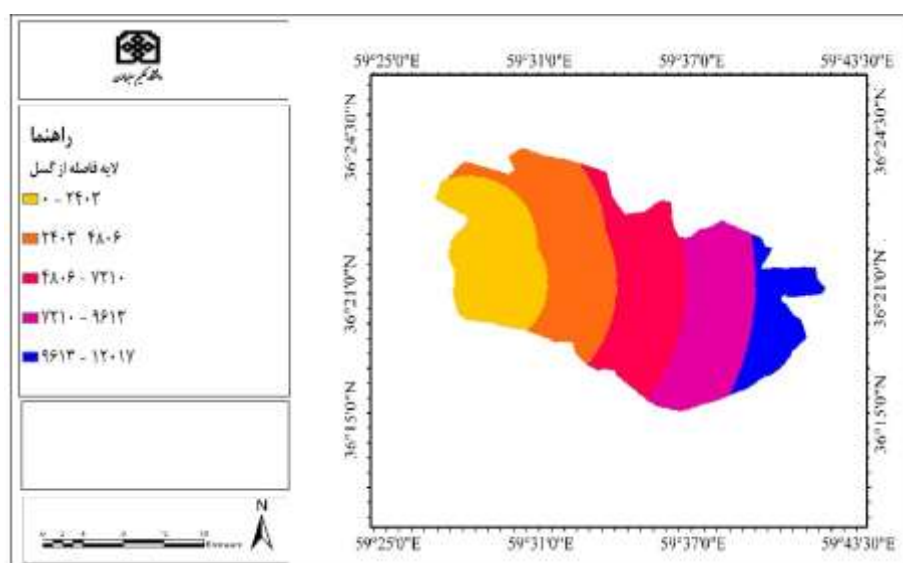
در شکل ۹، لایه های فاصله از رودخانه آورده شده است. در مناطقی که بیشترین فرونشست وجود دارد، فاصله کمتری از رودخانه وجود دارد. این ممکن است خود عاملی بر فرونشست زمین به علت نفوذ نکردن آب به لایه های زمین و خروج آب به صورت آب

جاری باشد. بیشترین مقدار فاصله از رودخانه ۱۲۰۱۷ متر در سمت جنوب شهر مشهد است. همچنین در مناطقی که بیشترین فرونشست وجود دارد، فاصله کمتری از گسل مشاهده می شود (شکل ۱۰).



شکل ۹. نقشه فاصله لایه های مختلف شهر مشهد از رودخانه

Fig 9. Distance map of different layers of Mashhad city from the river

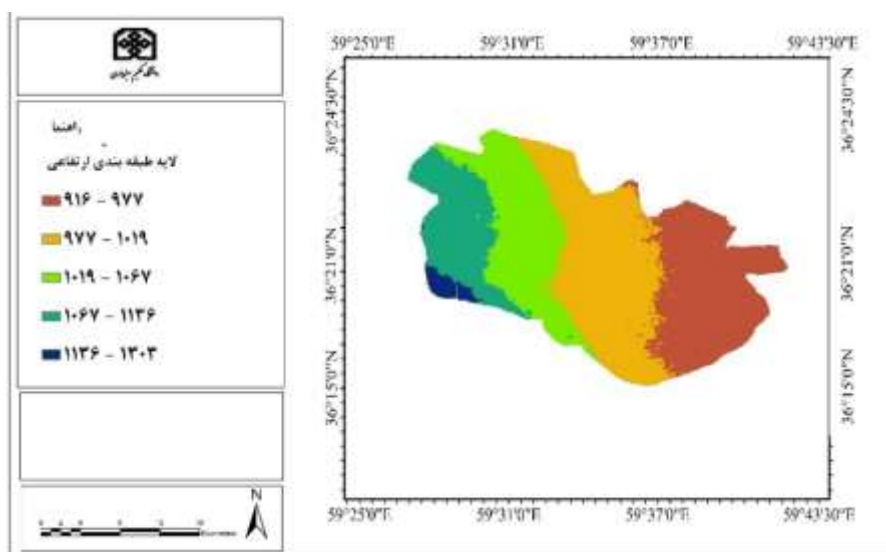


شکل ۱۰. نقشه فاصله لایه های مختلف شهر مشهد از گسل

Fig 10. Distance map of different layers of Mashhad city from the fault

ارزیابی طبقه بندی ارتفاعی

ارتفاع یک پارامتر تاثیر گذار در بررسی فرونشست به شمار می رود. همان طور که از غرب شهر مشهد به سمت شرق پیش روی می کنیم، ارتفاع کمتر شده و به عبارتی، فرونشست زمین کاهش می یابد.

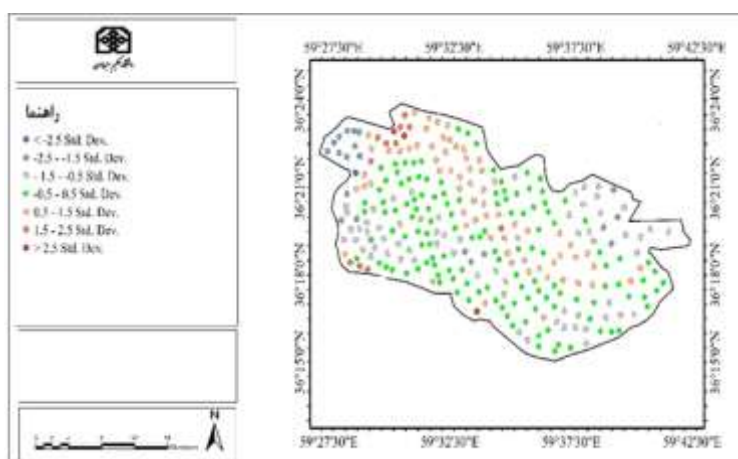


شکل ۱۱. نقشه طبقه بندی ارتفاعی شهر مشهد

Fig 11. Altitude classification map of Mashhad city

تهیه نقشه پیش بینی فرونشست

در امتداد از طریق فرونشست ارزیابی های که از مدل رگرسیون حداقل مربعات معمولی در مرحله آخر بدست آمد. مدل OLS یک روش همبستگی جهت ارتباط بین پارامترهای مؤثر در فرونشست می باشد. در این روش از ۷ پارامتر مؤثر در پدیده فرونشست استفاده گردید و نتایج حاصل از خروجی در شکل (۱۲) نشان داده شده است. خروجی حاصل از انحراف معیار مدل OLS نشان دهنده ی پایین بودن خطا (Std.Error) که حدود 0.001 تا 0.0001 گویا دقت بالا و تاثیر گذاری پارامترهای مذکور در میزان فرونشست زمین می باشد و کم بودن انحراف معیار پارامترها در حدود $+0.5$ و -0.5 می باشد و این گویای دقت بالا و ارتباط بالا بین فرونشست و پارامترهای تاثیر گذار بر آن می باشد. سطح آب زیرزمینی که در بخش های مرکز و شمال آبخوان رخ داده است بیشترین ارتباط را با فرونشست زمین در این منطقه دارد.



شکل ۱۲. لایه تحلیل فضایی مدل OLS

Fig 12. Spatial analysis layer of the model

نتایج حاصل از مدل OLS

بر اساس نتایج موجود در جدول ۱، r تمام متغیرها از ۰,۷۸ کمتر است و بر این اساس نیازی نیست که هیچ متغیری حذف شوند و تمام متغیرها مستقل اصلی هستند. Std. Error میزان خطا در متغیرها را نشان می‌دهد که هرچه میزان این خطا کمتر باشد نشان دهنده دقت بالا می‌باشد.

مدل OLS یک روش همبستگی جهت ارزیابی معنی داری ارتباط بین پارامترهای مؤثر با فرونشست می‌باشد. در این روش از ۷ پارامتر مؤثر در پدیده فرونشست استفاده گردید و نتایج حاصل از خروجی جدول (۱) نشان می‌دهد که سطح آب زیرزمینی، فاصله از گسل، کاربری اراضی، از بین ۷ فاکتور تاثیر گذار، بیشترین میزان ضریب معناداری را دارد که مقدار آن به ترتیب برابر با ۰/۰۰۰۵، ۰/۰۰۷، ۰/۰۰۳ می‌باشد این نشان دهنده سطح معنادارای پارامترهای مذکور در فرونشست شهر مشهد می‌باشد. همچنین ۲ که ضریب همبستگی نشان می‌دهد بیشترین ضریب همبستگی بین عوامل در مرتبه اول مربوط به سطح آب زیرزمینی در مرتبه دوم فاصله از گسل است و کم اثر ترین عامل شیب می‌باشد.

جدول ۱. توضیحات مدل OLS
Table 1. Description of the ols model

متغیر	Std.Error	Sig	r
سطح آب زیرزمینی	۰/۰۰۱	*۰/۰۰۰۵	۰/۸
شیب	۰/۱۰	۰/۶	۰/۲۵
ارتفاع	۰/۱۶	۰/۰۲	۰/۳۶
فاصله از رودخانه	۰/۰۸	۰/۰۰۴	۰/۵۰
فاصله از گسل	۰/۰۰۴	*۰/۰۰۷	۰/۷۸
کاربری زمین	۰/۰۸	*۰/۰۰۳	۰/۷۵
نوع خاک	۰/۰۸	۰/۰۱	۰/۵۸

نتیجه گیری

فرونشست زمین یک پدیده گسترده در پهنه جهان و ایران می‌باشد. این پدیده با توجه به استخراج بی رویه ی منابع آب زیر زمینی به وفور مشاهده می‌شود. در این پژوهش نتایج حاصل از محاسبه نرخ فرونشست با روش تداخل سنجی راداری نشان داد که طی بازه زمانی ۳ ماهه ۲۰۲۲ به طور میانگین حدود ۳ سانتی متر نشست در سطح شهر رخ داده است که در بخش شمال غرب آبخوان خطر پذیری بیشتری رخ داده که این میزان بین ۴ تا ۵ سانتی متر است. در این منطقه به علت نیازهای آبی جامعه سکونتگاهی، ساخت و ساز و همچنین تأمین نیاز آبی و دست اندازی به منابع آبی، قنوات بسیار بوده و برداشت آب زیرزمینی بیش از حد است، احتمال آسیب به لوله های آب و گاز، استخراج بی اندازه و غیرقانونی از منابع آب زیرزمینی بر همین اساس مقدار پایین رفتن سطح آب زیاد بوده است و کمترین میزان خطر پذیری که حدوداً می‌باشد مربوط به محدوده جنوب شرقی و شمال شرق و محدوده ناچیزی را در جنوب غربی شامل می‌شود. نتایج حاصل از اجرای مدل OLS جهت شناسایی بیشترین عامل تاثیر گذار مؤثر با استفاده از ۷ پارامتر که شامل خاک، شیب، کاربری زمین، ارتفاع، فاصله از رودخانه و گسل و سطح آب زیرزمینی می‌باشد، نشان داد که بیشترین ارزش با ضریب معناداری ۰/۰۰۰۵، مربوط به سطح آب زیرزمینی و کم اثر ترین

عامل مربوط به شیب حدود ۰/۶ می باشد همچنین بیشترین ضریب همبستگی در رتبه اول مربوط به سطح آب زیرزمینی ۰/۸ و در رتبه دوم فاصله از گسل ۰/۷۸ و ضعیف ترین ضریب همبستگی به شیب با ۰/۲۵ اختصاص پیدا کرد. از این رو، پهنه بندی فرونشست نشان داد بیشترین میزان فرونشست در بخش غرب و شمال غرب حدود ۸۳ کیلومتر مربع از کل مساحت ۳۵۱ کیلومتر مربع شهر مشهد را در بر می گیرد. با توجه به اینکه علت مهم و اساسی فرونشست شهر مشهد، استفاده بی رویه از آب زیرزمینی و سطح آب زیر زمینی می باشد بنابراین باید مدیریت صحیح از سوی سازمان های ذیربط برای میزان برداشت از آب های زیر زمینی صورت گیرد.

از مقایسه نتایج این پژوهش با پژوهش های مشابه در ایران و دنیا به این نتیجه می رسیم که اغلب دشت ها و شهرهای ایران از جمله دشت یزد - اردکان و شهر مشهد هم مانند مابقی مناطق جهان از جمله دره آگواسکالینتس مکزیک و شهر موریسا در اسپانیا برای محاسبه فرونشست از روش تداخل سنجی راداری استفاده کردند که به نتایج مشابهی دست یافتند که واقعه فرونشست به علت برداشت بی رویه از سطح آب های زیرزمینی می باشد. در این پژوهش علاوه بر تداخل سنجی راداری (Dinsar) از مدل *ols* جهت شناسایی هر چه بهتر عوامل تاثیرگذار در فرونشست شهر مشهد به کار برده شده که در موارد فوق استفاده نشده است. در ضمن روش ما با روش های شهسازی و پور خسروانی، لشکری و همکاران، حقیقت مهر و همکاران تفاوت دارد زیرا این افراد برای ارزیابی فرونشست از ایستگاه های جی پی اس استفاده کردند.

مشارکت نویسندگان

مشارکت نویسندگان در مقاله مستخرج از پایان نامه تقریباً به شکل زیر باشد:

نویسنده اول (فائزه نوری مقدم): تهیه و آماده سازی نمونه ها، انجام آزمایش و گردآوری داده ها، انجام محاسبات، تجزیه و تحلیل آماری داده ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیش نویس مقاله

نویسنده دوم (هادی سلیمانی مقدم): استاد راهنمای پایان نامه، طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی سازی مقاله

نویسنده سوم (الهه اکبری): استاد مشاور پایان نامه، مشارکت در طراحی پژوهش، نظارت بر پژوهش، مطالعه و بازبینی مقاله

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

منابع

- جنت، کبری، قاضی فرد، علی، روستایی، مه آسا، (۱۳۸۸)، پایش فرونشست زمین در دشت گلپایگان با استفاده از روش تداخل سنجی راداری و شکاف سنج، *ششمین کنفرانس زمین شناسی و مهندسی و محیط زیست ایران*، مهر ۸۸، دانشگاه تربیت مدرس.
- خرمی، محمد، مقصودی، یاسر، ابریشمی، سعید، (۱۳۹۸)، تعیین فرونشست شهر مشهد به روش تداخل سنجی راداری پراکنشگر دائمی، *نشریه مهندسی عمران/امیرکبیر*، دوره ۵۱ شماره ۶، ۱۳۹۸. 10.22060/ceej.2018.14300.5617.
- شفیعی، نجمه، گلی مختاری، لیلا، امیراحمدی، ابوالقاسم، زندی، رحمان، (۱۳۹۸)، بررسی فرونشست آبخوان دشت نورآباد با استفاده از روش تداخل سنجی راداری (منطقه مورد مطالعه: دشت نورآباد). *پژوهشهای ژئومورفولوژی کمی*. (۴) ۸، صص ۱۱۱-۹۳. 10.22034/GMPJ.2020.106424.

صالحی متعهد، فهیمه، حافظلی مقدس، ناصر، لشکری پور، غلامرضا، (۱۳۹۸)، ارزیابی فرونشست زمین به کمک تلفیق روش تداخل سنجی راداری و اندازه گیری های میدانی و بررسی دلایل و اثرات آن بر شهر مشهد، نشریه زمین شناسی مهندسی، جلد سیزدهم، شماره ۳ پاییز، صص ۴۶۳-۴۳۵. Doi: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.435.

صالحی، رضا، غفوری، محمد، لشکری پور، دهقانی، مریم، (۱۳۹۱)، بررسی فرونشست دشت مهبیار جنوبی با استفاده از مدل تداخل سنجی راداری، فصلنامه مهندسی آبیاری و آب، سال سوم، شماره ۱۱، صص ۴۷-۵۷.

نصیری خانقاه، علیرضا، شریفان عطار، رضا، (۱۳۹۸)، کاربرد تداخل سنجی رادار در مطالعه فرونشست، انتشارات الینوس.

References

References (in Persian)

- Jannat, Kobra, Ghazifard, Ali, Roustaei, Mah-Asa, (2009), Monitoring land subsidence in the Golpayegan Plain using radar interferometry and fractometer methods, *6th Iranian Conference on Geology, Engineering and Environment*, Mehr 2009, Tarbiat Modares University. [In Persian].
- Khorrami, M., Abrishami, S. and Maghsoudi, Y. (2020). Mashhad Subsidence Monitoring by Interferometric Synthetic Aperture Radar Technique. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 51(6), 1187-1204. doi: 10.22060/ceej.2018.14300.5617. [In Persian].
- Nasiri Khanaghah, Alireza, Sharifan Attar, Reza, (2019), *Application of Radar Interferometry in Subsidence Studies*, Illinois Publications. [In Persian].
- Salehi Moteahd F, Hafezi Moghaddas N, Lashkaripour3 G, Dehghani4 M. (2019). Land Subsidence and its Consequences in Mashhad City by Integrating Radar Interferometry and Field Measurements. *Journal of Engineering Geology*; 13 (3) :435-462 URL: <http://jeg.khu.ac.ir/article-1-2686-fa.html>. Doi: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.435. [In Persian].
- Salehi, R., Ghafoori, M., Lashkaripour, G. R. and Dehghani, M. (2013). Evaluation of land Subsidence in Southern Mahyar Plain Using Radar Interferometry. *Irrigation and Water Engineering*, 3(3), 47-57. [In Persian].
- Shafiei, N., GoliMokhtari, L., amir ahmadi, A. and Zandi, R. (2020). Investigation of subsidence of Noorabad plain aquifer using radar interferometry method. *Quantitative Geomorphological Research*, 8(4), 93-111. doi: 10.22034/gmpj.2020.106424. [In Persian].

References (in English)

- Cina., Francesca, Deodato Tapete. (2021). Satellite InSAR survey of structurally-controlled land subsidence due to groundwater exploitation in the Aguascalientes Valley, Mexico, *Remote Sensing of Environment*, 254. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112254>.
- Galloway, D. L., Hudnut, K. W., Ingebritsen, S. E., Phillips, S. P., Peltzer, G., Rogez, F. & Rosen, P. A. (1998). Detection of aquifer system compaction and land subsidence using interferometric synthetic aperture radar, Antelope Valley, Mojave Desert, California. *Water Resources Research*, 34 (10), 2573-2585. <https://doi.org/10.1029/98WR01285>.
- Hu, R.L., Yue, Z.Q., Wang, L.C., & Wang, S.J. (2004). Review on current status and challenging issues of and subsidence in China. *Engineering Geology*. 76 (1-2). 65-77. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.06.006>.
- Massonnet, D., Feigl, K. L. (1998). Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface. *Reviews of Geophysics*, Vol. 36(4), pp. 441-500. <https://doi.org/10.1029/97RG03139>.
- Pino, O., Guiler, G., Gómez, J., Rojo, J. E., Vallejo, J., & Purdon, S. E. (2006). Escala breve para evaluar el deterioro cognitivo en pacientes psiquiátricos. *Psicothema*, 18(3), 447-452.