

Research Paper



Evaluation of Land Subsidence in the Gorgan Plain



Mohammad Hossain Motedayen¹, Mehrdad Esfandiari², Abolfazl Moeini³, Ali Mohammadi Torkashvand^{4*}



This paper is an open access and licenced under the CC BY NC licence.



DOI: 10.22034/HYD.2023.55996.1688

Reference to this article: Motedayen, MH; Esfandiari, M; Moeini, A; Mohammadi Torkashvand, A (2023). Evaluation of Land Subsidence in the Gorgan Plain. *Hydrogeomorphology*, 10(35): 102-119.

Keywords

Subsidence Causes, Radar Interferometry, Groundwater, Gorgan Plain.

Receive Date: 2023/04/14

Accept Date: 2023/06/20

Available: 2023/07/21

ABSTRACT

In recent years, the irreversible phenomenon of land subsidence has led to environmental hazards in various plains of Iran including Gorgan. In general, the most important activities causing this phenomenon are inappropriate groundwater withdrawal and geological factors. The research method consists of two sections: identifying subsidence areas and examining the effective factors and parameters and evaluating the impact of each. In identification section, radar interferometry technique was used to compare the phase taken from two radar sets from the same region at two different times and measurement of land surface changes over time can be achieved through interferogram, and in the effective factors analyzing section, the determination and analysis of effective parameters such as water level drop, texture and thickness of soil layers, especially fine-grained layers were investigated. The results of the satellite data analysis indicate that the region is steadily subsiding. The mean velocity map along the satellite line of sight obtained from time series analysis showed a subsidence rate of 14 mm / month (169 mm / year). The identified subsidence range is approximately eastern-western which is consistent with trends in structures such as the Caspian. Figures of water level and precipitation in this area during 2007 to 2009 show a decreasing trend despite of seasonal fluctuations, and analysis of effective parameters shows that the subsidence is due to the same drop in water level or the difference of same thickness of the fine-grained layer at different depths.

* **Corresponding Author: Ali Mohammadi Torkashvand**

E-mail: m.torkashvand54@yahoo.com

1. Ph.D. Student, Department of Soil Science, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

2. Assistant professor, Department of Soil Science, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

3. Assistant professor, Department of Nature Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

4. Full professor, Department of Soil Science, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Extended Abstract

1- Introduction

Inappropriate groundwater withdrawal and geological factors are very effective in the occurrence of subsidence (Tzampoglou and Loupasakis, 2017). All over the world, most subsidence occurs in areas with the highest water demand and density of groundwater wells (Jeanne et al., 2019). The porosity of soil layers aggregates (Zhou et al., 2019; Rezaei & Mousavi, 2019), density (Zhou et al., 2019), type (Zhou et al., 2019), texture and composition of layers (Rezaei & Mousavi, 2019), pumping mode (Jeanne et al., 2019), the regional geological structure (Rosen et al., 2000), hydraulic conductivity of hydrous layers (Zhou et al., 2019), precipitation, and temperature (Zhou et al., 2019) are all factors affecting land subsidence. The prediction and detection process is based on well data, geophysical tests, and engineering/ geotechnical data to predict and measure land subsidence, useful porosity, and its compressibility potential (Fazli et al., 2013). This study aimed to identify possible areas of subsidence in the west of Golestan province, especially in Gorgan City, the probable causes of subsidence, and identify areas most likely to have vertical displacement.

2- Methodology

Radar interferometry was used to investigate the subsidence of the study area, and the interferograms were observed and analyzed during the study period (26/1/2007 to 11/12/2010). Researchers from around the world have identified six key factors in the study of factors contributing to subsidence:

- Investigation of the layering profile and the floor stone
- Groundwater level changes
- Effective pressure changes and the effect of groundwater level drop on the stress applied to the substrates
- Volume compressibility coefficient
- Fine-grained layer thickness
- Fault

All the factors mentioned above, and the effects of subsidence processes on the Gorgan plain were investigated in this study.

3- Results and Discussion

The results of the satellite data analysis indicate that the region is steadily subsiding. The mean velocity map along the satellite line of sight obtained from time series analysis showed a subsidence rate of 14 mm/month. The identified subsidence range is approximately east-west, which is consistent with trends in structures such as the Caspian.

4- Conclusions

The phenomenon of subsidence in Gorgan City was studied in this research, and the extent of its subsidence was determined by radar interferometry over 34 months. Interestingly, the subsidence signal observed in the north of Gorgan has an almost east-west trend, which is consistent with trends in some of the region's formations, in particular the Caspian Fault and the mountain frontal boundary. This suggests that although waterlogging eventually led to subsidence, structural factors seem to have controlled the subsidence range. Coping with subsidence is based on three principles of prediction, detection, and monitoring. Therefore, the prerequisite for any geometric modeling to predict and control the phenomenon, as well as to identify the subsidence areas, is to apply existing geodetic techniques, in particular InSAR and Precise Leveling. On the other hand, because of the cost-effectiveness and spatial coverage that radar interferometry offers compared to the spatial coverage and the cost of accurate observation repetition, this technique is applied in addition to precision observations to control the accuracy of the results obtained from the interferometer.

5-References

- Fazli, A., Sharifikia, M. & Shayan, S. (2013). Vulnerability Assessment of Structures and Settlements from Land Subsidence in Damghan Plain, Iranian Journal of Applied Geomorphology, 1, 1.
- Jeanne, P., G. Farr Tom., Rutqvist, J., W. & Vasco, D. (2019). Role of agricultural activity on land subsidence in the San Joaquin Valley, California. Journal of Hydrology. 569, 462-469 <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.11.077>.
- Rosen, P.A., Hensley, S., Joughin, I.R., Li, F.K., Madsen, S.N., Rodriguez, E. & Goldstein, R.M. (2000). Synthetic aperture radar interferometry. Proceedings of the IEEE, Bandung Hydrological Study. Main Report Annex 1: Surface water resources
- Rezaei, A. & Mousavi, Z. (2019). Characterization of land deformation, hydraulic head, and aquifer properties of the Gorgan confined aquifer, Iran, from InSAR observations Journal of Hydrology. 579, 124196. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124196>
- Tzampoglou, P. & Loupasakis, C. (2017). Land Subsidence Susceptibility and Hazard Mapping: The Case of Amyntaio Basin, Greece, International Society for Optics and Photonics.p. 104441L.<https://doi.org/10.1117/12.2277510>

مقاله پژوهشی



ارزیابی فرونشست زمین در دشت گرگان

محمدحسین متدین^۱، مهرداد اسفندیاری^۲، ابوالفضل معینی^۳، علی محمدی ترکشوند^{۴*}

این مقاله به صورت دسترسی باز و با لایسنس CC BY NC کریپتو کامنز قابل استفاده است.



ارجاع به این مقاله: متدین، محمدحسین؛ اسفندیاری، مهرداد؛ معینی، ابوالفضل؛ محمدی ترکشوند، علی (۱۴۰۲) ارزیابی فرونشست زمین در دشت گرگان. هیدروژئومورفولوژی، ۱۰ (۳۵): ۱۱۹-۱۰۲.

DOI: 10.22034/HYD.2023.55996.1688



چکیده

در سال‌های اخیر، پدیده بازگشت‌ناپذیر فرونشست زمین، باعث بروز مخاطره جدی محیطی در دشت‌های مختلف ایران از جمله دشت گرگان شده است. هدف از این پژوهش بررسی و تحلیل عوامل مؤثر در بروز فرونشست در دشت گرگان بود. روش تحقیق شامل دو بخش شناسایی مناطق فرونشست و بررسی عوامل و پارامترهای مؤثر و ارزیابی میزان تأثیر هر کدام بود. در بخش شناسایی، از تکنیک تداخل سنجی راداری استفاده شد که مبنای آن مقایسه فاز گرفته‌شده از دو مجموعه داده رادار از یک منطقه در دو زمان مختلف و با ایجاد اینترفروگرام است که قادر به اندازه‌گیری تغییرات سطح زمین در دوره زمانی است و در بخش بررسی عوامل مؤثر، نحوه تعیین و تحلیل پارامترهای مؤثر همچون میزان افت سطح آب، جنس و ضخامت لایه‌های خاک به‌خصوص لایه‌های ریزدانه خاک موردبررسی قرار گرفت. نتایج تحلیل داده‌های ماهواره‌ای بیانگر آن است که منطقه به‌طور پیوسته در حال نشست است. نقشه سرعت میانگین تغییر شکل در راستای خط دید ماهواره که از تحلیل سری زمانی به‌دست‌آمد، آهنگ فرونشست را ۱۴ میلی‌متر در ماه (۱۶۹ میلی‌متر در سال) نشان داد. محدوده فرونشست شناسایی شده تقریباً روند شرقی-غربی دارد که با روند ساختارهایی نظیر خزر همخوانی دارد. نمودارهای تراز سطح آب و میزان بارندگی این محدوده در سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۳۸۹ علیرغم نوسانات فصلی، روند نزولی نشان می‌دهند و تحلیل پارامترهای مؤثر، نشان می‌دهد که نشست، به دلیل افت یکسان آب و یا ضخامت یکسان لایه ریزدانه در اعماق مختلف، متفاوت می‌باشد. یافته اصلی این پژوهش نشان داد که بیشترین میزان فرونشست زمین در مناطقی قرار دارد که تقاضای آب برای کشاورزی و تراکم چاه‌های کشاورزی جهت پمپاژ آب زیرزمینی بیشترین میزان را دارد. از مقایسه نتایج به‌دست‌آمده در روش‌های ژئودتیکی و روش تداخل سنجی راداری چنین نتایجی حاصل می‌شود که مهمترین عامل در ایجاد فرونشست این منطقه، مصرف بی‌رویه آب‌های زیرزمینی و به تبع آن افت سطح آب زیرزمینی است که در طی سال‌های متوالی باعث بروز پدیده فرونشست گردیده است.

کلیدواژه‌ها

علل فرونشست، تداخل سنجی راداری، آب‌های زیرزمینی، دشت گرگان.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۳۰

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۴/۳۰

* نویسنده مسئول: علی محمدی ترکشوند

رایانامه: m.torkashvand54@yahoo.com

۱- محمدحسین متدین، دانشجوی دکتری خاکشناسی، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، ایران.

۲- مهرداد اسفندیاری، استادیار، گروه خاکشناسی، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، ایران.

۳- ابوالفضل معینی، استادیار، گروه جنگل، مراتع و آبخیزداری، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، ایران

۴- علی محمدی ترکشوند، استاد، گروه خاکشناسی، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، ایران

۱- مقدمه

مقدمه محیط طبیعی، که بطور قابل ملاحظه‌ای با فعالیت‌های انسانی قابل تغییر است می‌تواند به اشکال مختلف منجر به تخریب سطح زمین گردد (ژانگ^۱ و همکاران، ۲۰۱۴؛ جی^۲ و همکاران، ۲۰۰۷؛ امانوئل^۳ و همکاران، ۲۰۲۰) و از آنجا که جمعیت شهری روبه رشد است ادامه این فرآیند موجب تخریب سطح زمین شده و بطور قابل ملاحظه‌ای در زندگی ساکنین تاثیر گذار خواهد بود (آبدین^۴ و همکاران، ۲۰۱۵؛ لی^۵ و همکاران، ۲۰۱۷). در بعضی از مناطق زمین که جهت تأمین آب مورد نیاز از منابع آب‌های زیرزمینی استفاده می‌شود، پدیده فرونشست یک رخداد طبیعی و شایع است (مق^۶ و همکاران، ۲۰۰۸؛ هوآنگ^۷ و همکاران، ۲۰۱۲؛ پاچکو مارتینز^۸ و همکاران، ۲۰۱۳؛ هاگو^۹ و همکاران، ۲۰۱۶؛ مق^{۱۰} و همکاران، ۲۰۱۷).

فرونشست‌ها و پیامدهای ناخوشایند آن، سرشتی بازگشت‌ناپذیر دارند و به‌سختی می‌توان آن‌ها را مهار کرد. شالوده هر طرح ملی برای رویارویی با خطر فرونشست بر سه اصل پیش‌بینی، تشخیص و پایش (Monitoring) استوار است که مدیریت درست منابع آب‌های زیرزمینی، نقش کلیدی در جلوگیری از رخداد این پدیده دارد (سامسونو^{۱۱} و همکاران، ۲۰۱۱؛ میلر^{۱۲} و همکاران، ۲۰۱۵؛ هاموند^{۱۳} و همکاران، ۲۰۱۶؛ کاستلازی^{۱۴} و همکاران، ۲۰۱۷؛ لی^{۱۵} و همکاران، ۲۰۱۷؛ فرزین کیا^{۱۶} و همکاران، ۲۰۱۹).

در ایجاد پدیده فرونشست، اثر برداشت نامناسب آب زیرزمینی و عوامل زمین‌شناسی بسیاری مؤثرند (استاموس و گیانولوپولوس^{۱۷}، ۲۰۱۰؛ لوپاساکیس^{۱۸} و همکاران، ۲۰۱۴؛ تزامپوگلو و لوپاساکیس^{۱۹}، ۲۰۱۶، ۲۰۱۷). در تمامی نقاط دنیا، اکثر فرونشست‌ها در مناطقی با بیشترین میزان تقاضای آب و تراکم چاه‌های آب زیرزمینی رخ می‌دهد (سیویتسکی^{۲۰} و همکاران، ۲۰۰۹؛ جین^{۲۱} و همکاران، ۲۰۱۹). تخلخل مصالح تشکیل‌دهنده لایه‌های خاک (ژو^{۲۲} و همکاران، ۲۰۱۹؛ رضایی و موسوی^{۲۳}، ۲۰۱۹)، تراکم (گونگیو و وانفانگ^{۲۴}، ۱۹۹۹؛ هافمن^{۲۵} و همکاران، ۲۰۰۳؛ ژو و همکاران، ۲۰۱۹)، نوع (ژو و همکاران، ۲۰۱۹)، جنس و ترکیب لایه‌ها (ژو و همکاران، ۲۰۱۹؛ رضایی و موسوی^{۲۶}، ۲۰۱۹)، نحوه پمپاژ (جین^{۲۷} و همکاران، ۲۰۱۹)، ساختار زمین‌شناسی منطقه (روزن^{۲۸} و همکاران، ۲۰۰۰؛ باکر^{۲۹} و همکاران، ۲۰۰۸؛ آما^{۳۰} و همکاران، ۲۰۱۹؛ ژو و همکاران، ۲۰۱۹)، هدایت هیدرولیکی لایه‌های آبدار (ژو و همکاران، ۲۰۱۹)، بارندگی و دما (ژو و همکاران، ۲۰۱۹)، همگی از عوامل مؤثر در فرونشست زمین به‌شمار می‌روند. فرآیند پیش‌بینی و تشخیص بر پایه داده‌های حاصل از چاه پیمایی، آزمون‌های ژئوفیزیکی و داده‌های زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک برای پیش‌بینی و اندازه‌گیری میزان نشست خاک، تخلخل مفید و پتانسیل تراکم‌پذیری آن است (فخری و کالیولا^{۳۱}، ۲۰۱۵؛ فضلی^{۳۲} و همکاران، ۲۰۱۳؛ ژو و همکاران، ۲۰۱۹).

فرآیند استخراج بی‌رویه آب زیرزمینی باعث افت سطح آب زیرزمینی، کاهش فشار سیال و در نتیجه افزایش فشار میان ذره‌ای می‌شود که منجر به ایجاد تراکم و پدیده فرونشست ناموزون زمین می‌شود (آبریشماچی^{۳۳} و همکاران، ۲۰۲۰). افت ناموزون سطح آب زیرزمینی، ناهمگنی بافت و ویژگی آبرفت‌های منطقه نیز موجب فرونشست ناموزون سطح زمین می‌شود و شکاف‌هایی در پوسته زمین به وجود می‌آورد، چرخه فصلی تخلیه و تغذیه ناهمگن آبخوان‌ها، موجب فشردگی و انبساط می‌شود (محمدپور^{۳۴} و همکاران، ۲۰۱۶).

کشور ایران دارای آب‌وهوای خشک و نیمه‌خشک است و نرخ بارش نزولات جوی در آن از متوسط جهانی نیز کمتر است (عمیق‌پی و عربی^{۳۵}، ۲۰۱۶؛ مق^{۳۶} و همکاران، ۲۰۱۷). از این‌رو برای گسترش شهرها، استفاده کشاورزی و صنعتی، نیاز به منابع آب‌های زیرزمینی دارد. امروزه با ازدیاد جمعیت، آب استحصال‌شده از قنات و ذخیره‌شده در سدها دیگر جوابگوی نیازهای مختلف مردم نبوده و لزوماً با حفر چاه‌های عمیق، نیمه عمیق و استخراج آب از سفره‌های آب‌های زیرزمینی، آب موردنیاز تأمین می‌گردد. برداشت بدون مطالعه و بی‌رویه آب از سفره‌های آب زیرزمینی علت اصلی پدیده فرونشست در ایران است (عمیق‌پی و همکاران ۲۰۱۶؛ متاق و همکاران ۲۰۱۷؛ شایان^{۳۷} و همکاران، ۲۰۱۷).

- 1- Zhang
- 2- Gee
- 3- Emmanuel
- 4- Abidin
- 5- Li
- 6- Motagh
- 7- Huang
- 8- Pacheco-Martinez
- 9- Haque
- 10- Motagh
- 11- Samsonov
- 12- Miller
- 13- Hammond
- 14- C-astellazzi
- 15- Li
- 16- Farzinkia
- 17- Stamos and Giannouloupoulos
- 18- Loupasakis
- 19- Tzampoglou and Loupasakis

- 20- Syvitski
- 21- Jeanne
- 22- Zhou
- 23- Rezaei and Mousavi
- 24- Gongyu and Wanfang
- 25- Hoffmann
- 26- Rezaei and Mousavi
- 27- Jeanne
- 28- Rosen
- 29- Baker
- 30- Amato
- 31- Fakhri and Kalliola
- 32- Fazli
- 33- Abrishamchi
- 34- Mahmoudpour
- 35- Amighpey and Arabi
- 36- Motagh
- 37- Shayan

در دهه‌های گذشته، استفاده از سنجش از راه دور و در پوشش مکانی وسیع، فرصت خوبی جهت تشخیص اولیه فرونشست زمین در مناطق شهری را به وجود آورده است (ومپن^۱، ۲۰۲۰؛ امانوئل و چیدی^۲، ۲۰۲۰). سنجش‌از‌دور (تداخل سنجی راداری) به دلیل توانایی پایش در یک سطح مکانی پیوسته با قدرت تفکیک مکانی بالا به‌عنوان کارآمدترین روش در مطالعه فرونشست شناخته‌شده است (هوآلی^۳ و همکاران، ۲۰۲۰). روش تداخل سنجی راداری (Insar) درزمینه‌های بسیاری از جمله اندازه‌گیری تغییر شکل سطح زمین استفاده می‌شود (های-مننگ^۴ و همکاران، ۲۰۱۷). در برخی مطالعات، از روش تداخل سنجی راداری به‌منظور شناسایی و اندازه‌گیری فرونشست زمین استفاده‌شده است (متق و همکاران، ۲۰۰۶، عمیق پی و همکاران، ۲۰۱۶). این روش با مقایسه فازهای برگشتی دو سری داده‌های رادار که از یک منطقه در دو زمان مختلف اخذ شده‌اند، قادر به تعیین تغییرات سطح زمین در آن بازه زمانی می‌باشد. این روش ضمن ارائه پوشش زمینی وسیع، نیاز به اندازه‌گیری زمینی را مرتفع می‌سازد و همچنین تغییرات کوچک سطح زمین با دقت زیر سانتیمتر (۲۸ میلی‌متر) را امکان‌پذیر می‌سازد (گویسلین^۵ و همکاران، ۲۰۱۹). روش در میان روش‌های زمینی و فضایی به‌عنوان کارآمدترین روش برای اندازه‌گیری تغییرات سطح زمین با دقت و قدرت تفکیک مکانی بسیار بالا به شمار می‌رود (رات و ناگلر^۶، ۲۰۱۶). در تداخل سنجی راداری، فاز تصاویر اخذ شده از موقعیت‌های تصویربرداری و یا زمان‌های تصویربرداری مختلف، پیکسل به پیکسل مقایسه می‌شود (گویسلین^۷ و همکاران، ۲۰۱۹) و از تفاضل گیری بین این مقادیر، تصویر جدیدی حاصل می‌شود که تداخل‌سنج نام دارد، تشکیل تداخل‌سنج یا اینترفروگرام اساس پردازش‌های راداری است (های-مننگ^۸ و همکاران، ۲۰۱۷).

در شیوه تداخل سنجی راداری با پردازش دوتنگاره رادار در مقطع زمانی موردنظر تداخل‌نگاشت تولید می‌شود. در این نگاشت‌ها مناطقی که دچار جابجایی شده باشند با ایجاد باندهای طیف رنگی از آبی به قرمز نسبت به مناطق باثبات تفکیک می‌گردند (های-مننگ^۹ و همکاران، ۲۰۱۷). از آنجایی که آثار تخریبی این پدیده آنی نیست و مانند زلزله اثرات آن به‌سرعت آشکار نمی‌شود، این پدیده کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در سال‌های اخیر در دشت گرگان نیز همانند سایر نقاط ایران، کاهش نزولات آسمانی باعث برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی شده است (رضایی و موسوی^{۱۰}، ۲۰۱۹). شواهد مختلف در دشت گرگان حاکی از بروز پدیده فرونشست در آن است؛ در برخی نقاط در دشت پدیده لوله‌زایی مشاهده شده که خود شاهدی بر وجود فرونشست در این دشت می‌باشد (آنوفوآ و همکاران^{۱۱}، ۲۰۱۳؛ فضل^{۱۲} و همکاران، ۲۰۱۳؛ ابطحی و تورانی^{۱۳}، ۱۹۷۹؛ رضایی و موسوی^{۱۴}، ۲۰۱۹). در این تحقیق، هدف شناسایی مناطق محتمل فرونشست در غرب استان گلستان و بخصوص محدوده شهر گرگان، دلایل احتمالی فرونشست و تعیین مناطقی است که بیشترین میزان جابجایی قائم را متحمل می‌شوند.

۲- مواد و روش

۲-۱- مشخصات منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در شرق حوضه خزر جنوبی قرار گرفته است و در شمال رشته‌کوه‌های البرز شرقی واقع شده است. در غرب استان گلستان، گستره دشت گرگان به‌عنوان یک پهنه انتقالی بین پهنه در حال برپایی کپه داغ و پهنه در حال فرونشینی سریع خزر جنوبی معرفی شده است و از جنوب توسط گسل خزر از پهنه البرز جدا می‌شود و از شمال در راستای گسل کپه داغ با فرونشستگی قره باغز و صحرای غرب ترکمنستان همسایه است (آرتیوشکوی، ۲۰۰۷).

مجموعه سازندهای پالئوزوئیک، مجموعه دگرگونی گرگان، مجموعه شیست‌ها و سنگ‌آهک‌های ژوراسیک و سنگ‌آهک‌های کرتاسه پایانی از مهم‌ترین واحدهای سنگ چینه‌ای در منطقه مورد مطالعه هستند. در این میان سازندهای لار و مزدوران با سن ژوراسیک بالایی بیشترین برون‌زد را در منطقه مورد مطالعه دارند. واحدهای سنگ چینه‌ای سنوزویک دارای گسترش محدودی در این منطقه است که در این میان نهشته‌های نئوژن شامل شیل، مارن، ماسه‌سنگ و سنگ جوش دارای بیشترین گسترش سطحی است. نهشته‌های لسی از گسترده‌ترین رسوبات دوران چهارم است که به گونه تپه-ماهوری برون‌زد دارند.

مهم‌ترین گسل‌های فعال استان که شامل گسل‌های خزر و شمال البرز می‌باشد، با روند شمال شرقی- جنوب غرب تا شمال غرب- جنوب شرق و سازوکار عمقی راندگی باکمی سامانه راستالغز چپ بر در پهنه ساختاری البرز گزارش شده است (نعمتی^{۱۵} و همکاران، ۲۰۱۱؛ سلیمانی آزاد^{۱۶} و همکاران، ۲۰۱۹). گسل خزر با راستای خم‌داری در حاشیه جنوبی دریای خزر قرار گرفته است. بخشی از گسل خزر، بین طول‌های جغرافیایی تا $53^{\circ} 75'$ تا $55^{\circ} 75'$ ، در نیمه شمالی نقشه‌ی زمین‌شناسی گرگان واقع شده است و به‌عنوان مهم‌ترین گسل لرزه‌ای استان گلستان، از چندین

1 -Wempen
2 -Emmanuel and Chidi
3 -Huali
4 - Hay-ManNg
5 -Guislain
6 -Rott and Nagler
7-Guislain
8 -Hay-ManNg

9- Hay-ManNg
10 -Rezaei and Mousavi
11 -Anuphoa
12- Fazli
13 -Atabai and Turani
14- Rezaei and Mousavi
15 -Nemati
16- Solaymani Azad

پاره گسل تشکیل شده است. فرونشست گودال خزر در شمال و برپایی کوه‌های البرز و راندگی آن بر روی جنوب حوضه‌ی خزر جنوبی، در راستای این گسل صورت می‌گیرد. در محدوده گرگان سامانه گسلی خزر را می‌توان به‌عنوان راندگی‌هایی با شیب رو به جنوب در نظر گرفت که به‌طور محلی شیب‌های گرگان را در مقابل نهشته‌های کواترنری قرار می‌دهد. گسل شمال البرز نیز گسلی معکوس است که با طولی حدود ۴۰۰ کیلومتر و راستای خم‌دار با انحنای کلی به سمت جنوب یک ساختار عمده در منطقه می‌باشد. شیب گسل البرز زیاد بوده و به سمت جنوب تا جنوب شرق است (سلیمانی آزاد^۱ و همکاران، ۲۰۱۹).

در این تحقیق ارتباط افت سطح آب زیرزمینی، جنس و ضخامت لایه‌های خاک به‌خصوص لایه‌های ریزدانه، گسل‌ها، زمین‌شناسی و چینه‌شناسی منطقه با فرونشست دشت گرگان مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور از لوگ چاه‌های کشاورزی جهت تعیین جنس و ضخامت لایه‌های خاک و از نقشه‌های زمین‌شناسی منطقه جهت بررسی چینه‌شناسی، شناسایی گسل منطقه و نیز جهت بررسی سطح آب زیرزمینی آبخوان از آمار چاه‌های مشاهده‌ای سازمان مدیریت منابع آب کشور (۱۲ چاه) در طی دوره ۱۰ ساله ۱۳۸۳ الی ۱۳۹۳ مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

۲-۲- روش ارزیابی و محاسبه فرونشست

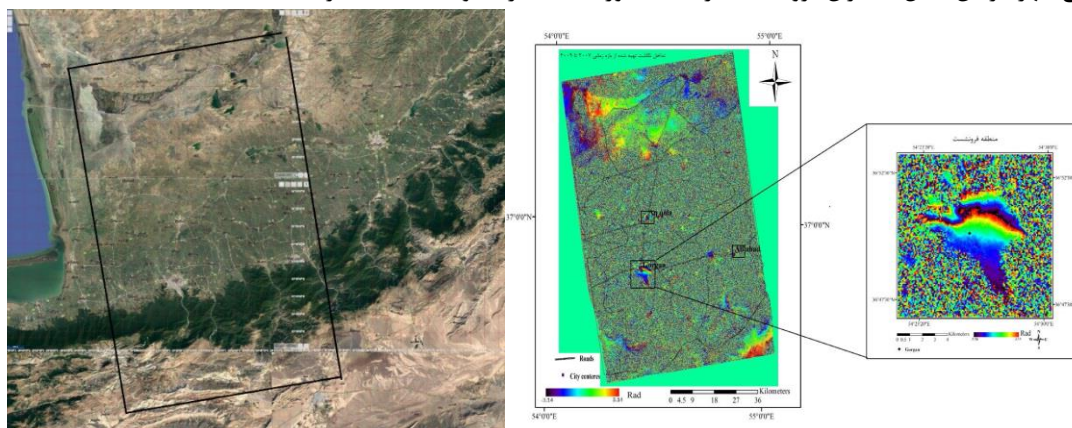
به‌منظور بررسی فرونشست منطقه مورد مطالعه از روش تداخل سنجی راداری استفاده شد و تداخل‌نگاشت‌ها در بازه زمانی (۱۳۸۵/۱۱/۰۶ - ۲۰/۰۹/۱۳۸۸) مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در جدول شماره ۱، تصاویر ماهواره‌ای (راداری) تهیه شده از ماهواره ENVISAT به‌منظور پردازش داده‌های مرتبط با آب زیرزمینی و جنس و ضخامت لایه‌های خاک به‌خصوص لایه‌های ریزدانه خاک قابل مشاهده می‌باشد.

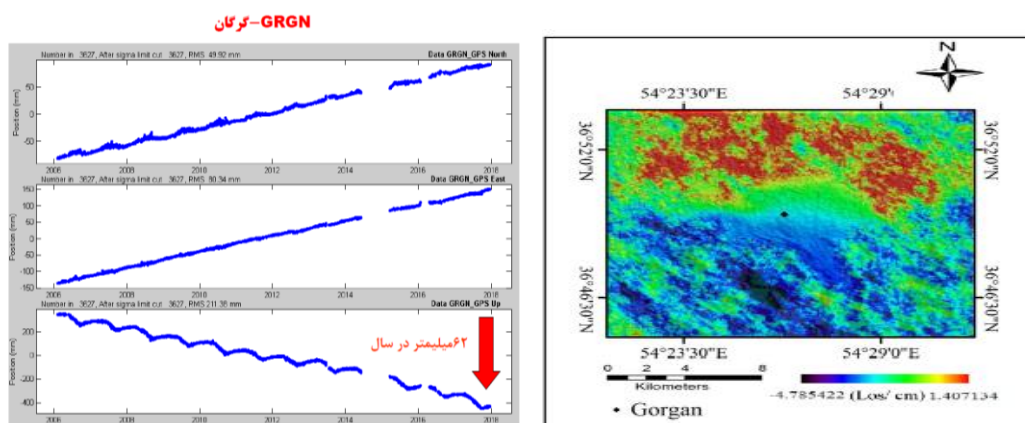
جدول (۱): جدول مشخصات فنی تصاویر ماهواره ENVISAT

Table (1): Technical Specifications of ENVISAT Satellite Images

Mission	Sensor	Track	Pass	Swath	Date	Orbit
Envisat	ASAR/IM	۵۶	Ascending	۱۶	۲۰۰۷-۰۱-۲۶	۲۵۶۶۱
Envisat	ASAR/IM	۵۶	Ascending	۱۶	۲۰۰۹-۱۲-۱۱	۴۰۶۹۱

در تداخل‌نگاشت حاصل از پردازش تصاویر ماهواره‌ای در بازه زمانی ۲۰۰۷ تا ۲۰۰۹ به مدت ۳۴ ماه و ۱۵ روز، در بخش‌های شمالی شهر گرگان باندهای طیف رنگی (از آبی به قرمز) نسبت به مناطق اطراف؛ تفکیک شده است که این مسئله وقوع پدیده فرونشست را تأیید می‌کند. با ترسیم نقشه میزان جابجایی شهر گرگان شکل ۱ میزان فرونشست در منطقه مورد مطالعه در حدود ۴/۸ سانتیمتر به دست آمد





شکل (۱): نقشه میزان جابجایی بر روی مدل رقومی ارتفاعی دشت گرگان در بازه زمانی ۲۰۰۷ تا ۲۰۰۹ جابجایی در راستای دید ماهواره
Fig (1): The digital elevation model from 2007 to 2009

جدول ۲- آخرین نتایج فرونشست در منطقه شرق و شمال شرق ایران بر اساس مشاهدات ایستگاه‌های دائمی GPS

Table (1): Latest subsidence results in East and Northeast of Iran based on GPS permanent station observation

ردیف	نام ایستگاه	نام چهارحرفی	محدوده بازه زمانی	مدت مشاهده	میزان جابجایی ارتفاعی mm	نرخ جابجایی ارتفاعی mm/year
۱	گرگان	GRGN	۲۰۰۶-۲۰۱۸	۱۲.۱ سال	۷۴۴	۶۲
۲	گرگان	GRGN	۲۰۰۶-۲۰۰۸	۲.۸ سال	۱۳۵	۴۷

همان‌گونه که از اطلاعات جدول نرخ جابجایی ارتفاعی در محدوده مدنظر به دست می‌آید، میزان فرونشست در ۳۴ ماه ابتدایی از ۴۷ میلی‌متر در سال به ۶۲ میلی‌متر در سال افزایش یافته است.

۲-۳- بررسی برخی عوامل ایجاد فرونشست

محققان سراسر جهان از مطالعات انجام‌شده در خصوص عوامل مؤثر در ایجاد فرونشست، به شش عامل اصلی در این خصوص دست‌یافته‌اند که عبارت‌اند از:

- بررسی پروفیل لایه بندی و سنگ کف
- تغییرات سطح آب زیرزمینی
- تغییرات فشار موثر و اثر افت سطح آب زیرزمین بر تنش اعمالی به لایه های زیرین
- ضریب تراکم پذیری حجمی
- ضخامت لایه ریزدانه
- گسل

که در این تحقیق به بررسی تمامی عوامل فوق الذکر و میزان اثرگذاری فرآیند فرونشست دشت گرگان پرداخته شده است.

۳- یافته‌ها و بحث

برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی سبب تقلیل فشار در لایه‌های زیرین و به‌تناسب فشار سربار ناشی از لایه‌های بالایی موجب کاهش حجم در لایه‌های پایینی و نشست وسیع در سطح زمین می‌گردد. کاهش بلندمدت سطح آب زیرزمینی در اثر آبیاری در سامانه‌های آبخوان دارای لایه‌های سیلت و رس نیمه تحکیم یافته آبخوان‌های ناتراوا و باضخامت تراکمی مناسب، می‌تواند منجر به رهاسازی یک‌باره آب آبخوان‌های ناتراوای متراکم گردد که به‌صورت فرونشست زمین ظاهر می‌شود. رس‌ها با دارا بودن خاصیت انقباضی و نفوذناپذیری زیاد معمولاً حجمی از رطوبت را برای دهه‌های

مختلفی در خود نگهداری می‌کنند، خشک شدن سبب انقباض خاک رسی و رطوبت (جذب آب) مجدد باعث انبساط خاک می‌شود. این مسئله به هنگام منقبض و متورم شدن فصلی موجب شکاف برداشتن خاک مجاور سازه‌ها می‌گردد (میرائی^۱ و همکاران، ۲۰۱۲).

۳-۱- بررسی پروفیل لایه‌بندی و سنگ کف

بر اساس داده‌های صحیح به‌دست‌آمده از لوگ‌های چاه‌های آبیاری و پیژومتری موجود در دشت گرگان (شرکت‌های حفاری آب منطقه‌ای استان گلستان)، عمق بستر سنگی و لایه‌بندی خاک مشخص شده است. نمونه‌ای از لوگ‌های حفاری مربوط به چاه‌های کشاورزی در شکل زیر نشان داده شده است. بر اساس داده‌های چاه‌ها، پروفیل تغییرات وضعیت لایه‌بندی، جنس لایه‌ها و عمق سن بستر ترسیم شده است. به دلیل ضخامت زیاد آبرفت اکثر چاه‌ها به سنگ‌بستر برخورد نکرده‌اند. در شکل ۲ مشاهده می‌شود تا عمق حدود ۳۰ متر لایه‌های رسی (در بعضی نقاط همراه با سیلت و ماسه) قرار دارند و پس از آن با حرکت به سمت عمق از میان ذرات ریزدانه کاسته می‌شود و لایه‌های شنی، ماسه‌ای و قلوه‌سنگ پدیدار می‌شوند.



شکل (۲): پروفیل لایه‌بندی خاک در گرگان - برش زمین‌شناسی از نهشته‌های آبرفتی دشت گرگان. این برش با راستایی شمالی-جنوبی از شهر گرگان تا رودخانه قره‌سو بر پایه اطلاعات ۵ حلقه چاه آب اکتشافی و بهره‌برداری رسم شده است
اقتباس از نقشه سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور

Fig (2): Soil stratification profile in Gorgan - Geological section of alluvial deposits of Gorgan plain. This section is plotted along north-south from Gorgan city to the Qarasu River based on information from five exploration and exploitation wells



شکل (۳): چهار مختصات دقیق چاه‌های مشاهده‌ای

Fig. 3- Four exact coordinates of observation wells

جدول ۳- نمونه‌ای از لوگ‌های حفاری چاه‌های کشاورزی (شرکت آب منطقه‌ای استان گلستان)

Tab. 3- An example of agricultural well drilling logs (Regional Water Company of Golestan Province)

1-Depth(m)	System chart	Description
0-40		Clay
50-120		Sequence of clay layers and fine sandstones
130-150		Small to medium sand
160-200		Small to medium silty sand
2-Depth(m)	System Chart	Description
0-40		Clay
50-80		Sequence of fine clay layers and fine sandstones
90-120		Gravel sand with clay
130-140		Very fine silty sand alteration
150-160		Gravel sand with clay
170-200		Very fine silty sand alteration
		Gravel sand with clay
		Small to medium silty sand
3-Depth(m)	System Chart	Description
0-40		Clay
50-80		Sequence of clay layers and alternation of silty sand
90-120		Very fine silty sand alternation
130-140		Fine sandy clay
150-160		Gravel. Sand with clay
170-200		Frequency of very fine sand

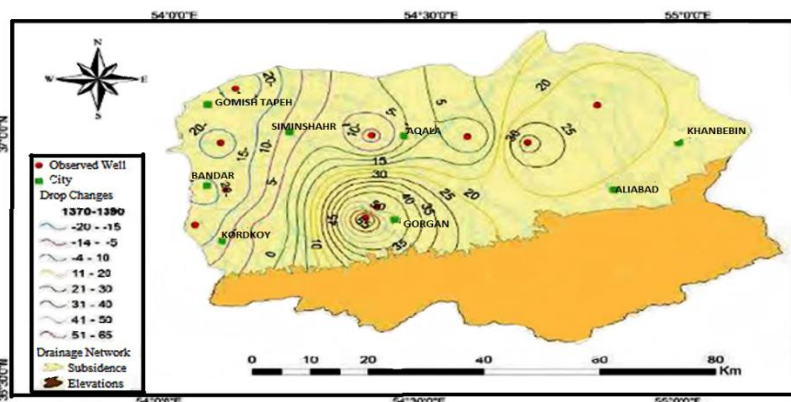
4-Depth(m)	System chart	Description
0-40		Clay
50-120		Sequence of clay layers and find sandstones
130-150		Small to medium sand
160-200		Small to medium silty sand

نتایج حاصل از لوگ‌های حفاری شده نیز مبین وجود لایه‌هایی با ضخامت بالای ۳۰ متر در قسمت فوقانی بوده و با افزایش عمق از میزان ذرات ریزدانه کاسته می‌شود. در لایه زیرین نیز توالی لایه‌های رسی به همراه سیلت و ماسه بوده ضخامتی مابین ۵۰ الی ۸۰ متر را شامل می‌گردد.

۲-۳- تغییرات سطح آب زیرزمینی

بطور متوسط سالانه حدود ۷۸۱/۳۹۴ میلیون مترمکعب از آبخوان آبرفتی دشت گرگان برداشت می‌گردد که بیشترین سهم آن با ۸۸/۵ درصد از منابع تخلیه آب زیرزمینی مربوط به چاه بهره‌برداری بوده، حدود ۹/۲ درصد به سیستم قنات اختصاص داده شده و ۲/۳ درصد باقیمانده مربوط به چشمه‌های آبرفتی می‌باشد. میزان افت سطح آب زیرزمینی در آبخوان دشت گرگان در سال‌های اخیر بسیار محسوس بوده به طوری که در چاه پیزومتر انجیرآب تراز آب زیرزمینی در سال ۱۳۷۰ در تراز ۴۷/۹۴ متری، در سال ۱۳۸۰ در تراز ۵۲/۰۱ متری و در سال ۱۳۸۹ در تراز ۵۴/۸۴ متری قرار داشته است. می‌توان مهم‌ترین عامل ایجاد نشست در این دشت را افت شدید سطح آب زیرزمینی در رسوبات آبرفتی ریزدانه‌ای دانست که از قابلیت تراکم‌پذیری بالایی در اثر زهکشی آب برخوردار است (گزارشات سالانه شرکت آب منطقه ای استان گلستان).

به منظور بررسی تغییرات سطح آب زیرزمینی دشت گرگان، نقشه هم‌افت ۱۹ ساله (از سال ۱۳۷۰ الی ۱۳۸۹) بر مبنای ۱۲ حلقه چاه مشاهده‌ای با منحنی‌های ۵ متر همراه با لایه‌های پایه در شکل زیر ارائه شده است. با توجه به نقشه هم‌افت ۱۹ ساله، در قسمت شمالی دشت یعنی در شرق آق‌قلا منحنی هم‌افت ۱/۶۱- متر قرار دارد که به سمت غرب کاهش می‌یابد و به منحنی ۲۳/۱۸- متر در گستره شمال بندر ترکمن می‌رسد. منحنی حداکثر افت در دشت در محل چاه مشاهده‌ای انجیرآب رقم ۶/۹ متر می‌باشد که به سمت شمال، شرق و غرب کاهش می‌یابد (شایان^۱ و همکاران، ۲۰۱۵).



شکل (۴): تغییرات سطح آب زیرزمینی دشت گرگان (نمودار هم‌افت) (شایان و همکاران، ۲۰۱۵)
 Fig. 4-Groundwater level changes in Gorgan plain (drop Fig.)

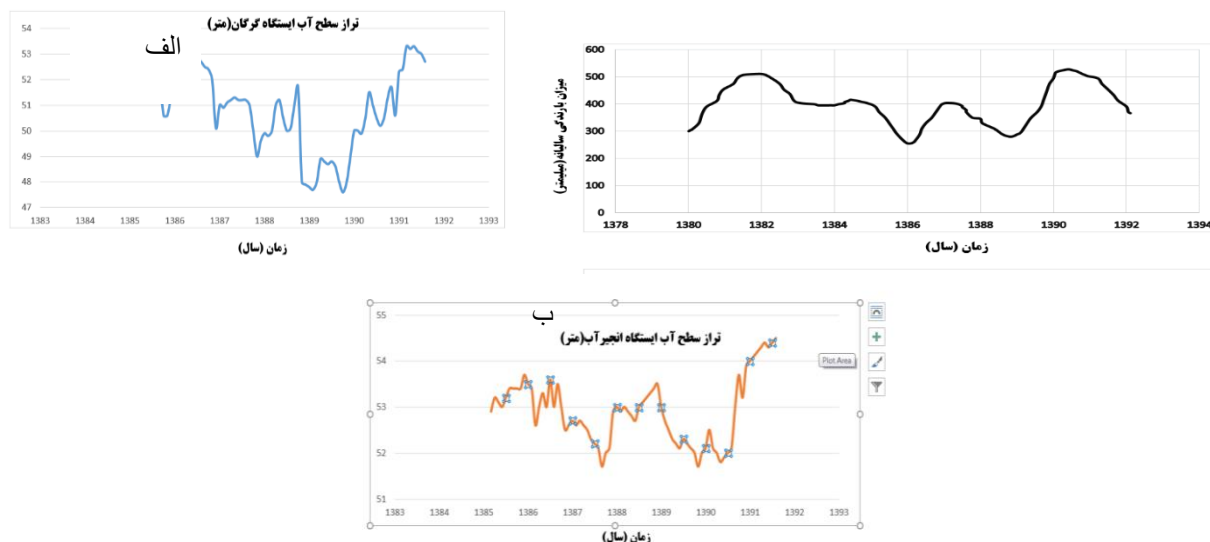
نشست زمین به علت برداشت بیش‌ازحد و بی‌رویه و افت سطح آب زیرزمینی در دشت گرگان ایجاد شده و در صورت استمرار روند فعلی بهره‌برداری، سبب بروز مشکلاتی و مخاطراتی در سطح گسترده خواهد شد. آگاهی از پدیده نشست زمین و مخاطرات ناشی از آن در برنامه‌ریزی‌های آتی منطقه از اهمیت بالایی برخوردار است، بنابراین در این مقطع از مطالعات، دشت گرگان از نظر خطر نسبی نشست زمین با توجه به موارد زیر در قالب پهنه‌های با خطر نسبی زیاد، متوسط، کم و بدون خطر تقسیم‌بندی شده است.

در این خصوص نمودار بارش سالیانه شهر گرگان که برای بازه زمانی بین ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۲ ترسیم شد (شکل شماره ۵- نمودار الف)، نشان می‌دهد که منطقه مورد مطالعه کمترین بارش را در بازه زمانی مورد مطالعه اواخر ۱۳۸۵ تا اواخر ۱۳۸۸ تجربه کرده است. همچنین نمودارهای تغییر سطح آب زیرزمینی (شکل شماره ۵- نمودار ب)، در دو ایستگاه واقع در محدوده شمال شهر گرگان که سیگنال فرونشست در آن مشاهده شد ایستگاه‌های

1 -Shayan

گرگان و انجیراب نشان می‌دهند که در بازه زمانی ۱۳۸۵ تا ۱۳۸۹ تراز سطح آب زیرزمینی گرگان علیرغم نوسانات فصلی دارای روند نزولی می‌باشد. در این نمودارها میزان بارش سالیانه برحسب میلی‌متر و تراز سطح آب زیرزمینی برحسب متر نسبت به سطح‌منا سطح آب‌های آزاد ارائه شده است. این نمودارها نشان می‌دهند که دلیل اصلی افت سطح زمین در شهر گرگان، کاهش نزولات جوی و برداشت بی‌رویه از ذخایر آب‌های زیرزمینی بوده است که منجر به افت سطح آب زیرزمینی و در نهایت فرونشست شده است. امکان بهره‌برداری بی‌رویه و اضافه برداشت‌ها و به تبع آن موجبات خشک شدن تدریجی قنات و چاه‌ها را فراهم کرده است. در این رابطه آبخوان دشت گرگان نیز از این مسئله حادث شده برای آبخوان‌های کشور مستثنی نبوده و متحمل بهره‌برداری بیش‌ازحد مجاز گردیده است.

در حال حاضر از مجموع ۱ میلیارد مترمکعب پتانسیل آب‌های سطحی منطقه حدود ۳۵۰ میلیون مترمکعب بهره‌برداری به عمل می‌آید و مابقی به دریا می‌ریزد و همچنین از مجموع ۱/۸ میلیارد مترمکعب آب‌های زیرزمینی در حدود ۱۱۰۰ میلیون مترمکعب آن پتانسیل آب شیرین در آبرفت‌ها می‌باشد که ۹۵۰ میلیون مترمکعب آن برداشت می‌گردد. با توجه به اینکه هم‌اکنون در حدود ۷۳ درصد از آب موردنیاز بخش‌های مختلف در منطقه از آب زیرزمینی تأمین می‌گردد، لذا این حجم برداشت از منابع آب زیرزمینی موجبات افت آب زیرزمینی دشت را فراهم آورده است. (گزارشات سالانه شرکت آب منطقه ای استان گلستان)



شکل (۵): الف) میزان بارش سالیانه شهر گرگان ب) پیزومترهای ایستگاه گرگان و انجیراب

Fig. 5 –a) Annual Precipitation Rate in Gorgan City b) Piezometers of Gorgan and Anjirab Station

۳-۳- تغییرات فشار مؤثر و اثر افت سطح آب زیرزمین بر تنش اعمالی به لایه‌های زیرین

طی گزارشات داده‌های هواشناسی بین سال‌های ۸۸ تا ۹۰ در دشت گرگان، به علت خشکسالی در سال هاس مذکور سطح آب زیرزمینی به میزان ۵ متر افت داشته است و برای دیگر نقاط دشت گرگان نیز جداگانه بر اساس تراز آب در پیزومترها مشخص شده است. با کاهش فشار آب منفذی و با این فرض که تغییر وزن مخصوص خاک در اثر افت آب ناچیز است، تغییرات تنش کل ناچیز بوده و بر اساس اصل تنش مؤثر، تنش مؤثر در لایه‌های خاک افزایش می‌یابد. به صورت معادل می‌توان تصور کرد که فشار آب منفذی کاهش پیدا نکرده است (استوماس و گیانولولوس^۱، ۲۰۱۰). بلکه افزایش تنش کل ناشی از اعمال بار خارجی، باعث افزایش تنش مؤثر گردیده است؛ که طبق شکل زیر بار خارجی ناشی معادل با افت سطح آب زیرزمینی به ارتفاع H₂ به صورت زیر محاسبه می‌شود.

به‌عنوان مثال میزان افزایش تنش مؤثر در نقطه A ناشی از افت سطح آب در لایه ماسه به ارتفاع H₂ نشان داده شده است

$$\sigma'_v(\text{initial})H_1\gamma_{\text{sand}} + H_2(\gamma_{\text{sat.sand}} - \gamma_w)(0.5H_3(\gamma_{\text{sat.clay}} - \gamma_w)) \quad (۱)$$

$$\sigma'_v(\text{final})H_1\gamma_{\text{sand}} + H_2\gamma_{\text{sand}} + 0.5H_3(\gamma_{\text{sat.clay}} - \gamma_w)$$

$$\Delta\sigma = (H_1(\gamma_{\text{sand}} - \gamma_w) - H_1(\gamma_{\text{sand}} - \gamma_w)) + (H_2(\gamma_{\text{sand}} - (\gamma_{\text{sat.sand}} - \gamma_w)) + (0.5H_3(\gamma_{\text{sat.clay}} - \gamma_w) - 0.5H_3(\gamma_{\text{sat.clay}} - \gamma_w))$$

طبق رابطه بالا میزان اضافه تنش ناشی از افت آب این گونه محاسبه می‌شود.

$$\Delta\sigma'_r = H_2(\gamma_{\text{sand}} - \gamma'_{\text{sand}}) = H_2(19.42 - 9.89) = 9.53H_2 \quad (2)$$

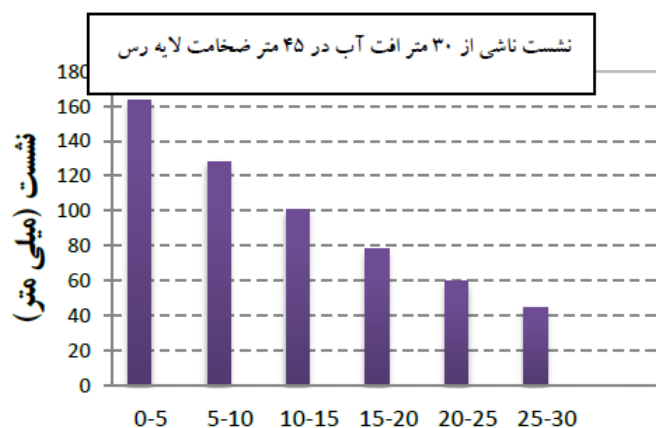
H1	Initial water level
H2	Final water level
H3	A *

شکل (۶): افت سطح آب زیرزمینی

Fig. 6- Groundwater level drop

میزان نشست ناشی از افت سطح آب زیرزمینی، مرحله به مرحله محاسبه می‌شود، در این صورت اگر افت آب ۲۰ متر باشد، ۲۰ متر افت آب، در ۴ مرحله با افت ۵ متر اعمال می‌شود و میزان نشست ناشی از ۵ متر افت آب در مرحله اول، علاوه بر اینکه بر لایه‌ای که افت آب در آن اتفاق افتاده است بر دیگر لایه‌های ریزدانه زیرین نیز اعمال می‌شود و چون که افت سطح آب زیرزمینی به صورت گسترده می‌باشد میزان اضافه تنش اعمالی به لایه‌های زیرین به اندازه اضافه تنش لایه‌های بالایی (اضافه تنش ناشی از افت آب) می‌باشد.

لازم به ذکر است که تأثیر نشست که افت سطح آب در لایه‌های بالایی دارند بیشتر از همان میزان افت آب در لایه‌های پایینی می‌باشد. به دلیل اینکه در لایه‌های پایینی میزان مودول الاستیک بزرگ‌تر و ضریب تغییر حجم کمتری دارند که در نمودار زیر تأثیر عمقی که آب در آن افت پیدا می‌کند و نشست متناظر آن نشان داده شده است. بر همین مبنا اگر خاکی به ضخامت ۴۵ متر داشته مدنظر باشد و افت آبی به میزان ۳۰ متر باشد که این میزان افت آب، ۶ مرحله با هر بار افت آب به میزان ۵ متر در عمق مربوط به همان لایه اعمال می‌شود. باید دقت شود در زمان اعمال بار ناشی از افت آب در مرحله دوم و سوم و ... این میزان تنش روی لایه‌های بالای خود دیگر اعمال نمی‌شود یعنی ۵ متر افت آب در مرحله اول روی ۴۵ متر ضخامت خاک اثرگذار است و در مرحله دوم، ۵ متر افت آب چون در لایه دوم خاک اتفاق می‌افتد این میزان افزایش تنش روی ۴۰ متر ضخامت خاک زیرین خود اثر می‌گذارد.



شکل (۷): تراز افت آب (متناسب با عمق خاک) تأثیر میزان افت آب در ترازهای مختلف بر روی نشست لایه‌های خاک اشباع

(میونی، ۲۰۰۶)

Fig. 7- The level of water loss (proportionate to the depth of the soil) the effect of the amount of water loss at different levels on the settlement of saturated soil layers (Miono, 2006)

۳-۴- ضریب تراکم‌پذیری حجمی

مقادیر نسبت پواسون را می‌توان با انجام آزمایش‌های مربوطه به دست آورد یا از روابط و مقادیر ارائه‌شده در کتاب‌ها استفاده نمود که در اینجا از نتایج تجربی ارائه‌شده در کتاب مکانیک خاک استفاده شده است. طبق جدول شماره پنج، نسبت پواسون برای رس متوسط بین ۰/۳ تا ۰/۳۵ و برای رس سفت بین ۰/۲ تا ۰/۳ می‌باشد که در اینجا یک میزان متوسط و حداقلی را با توجه به خاک منطقه که رس متوسط می‌باشد به میزان ۰/۳ لحاظ شده است (تزامیوگلو و لوپاساکیس^۱، ۲۰۱۷).

جدول ۴- نسبت پواسون انواع خاک‌های رس و ماسه (میونی، ۲۰۰۶)

Poisson's ratio of clay and sand type -Tab. 4

نوع خاک	رس نرم	رس متوسط	رس سفت	ماسه شل	ماسه متوسط	ماسه متراکم
نسبت پواسون	۰/۰-۴/۳۵	۰/۰-۳۵/۳	۰/۰-۳/۲	۰/۰-۲۵/۱۵	۰/۰-۳/۲۵	۰/۰-۳۵/۲۵

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش تحکیم نشان داده‌شده در شکل زیر می‌توان به‌طور متوسط مقدار ضریب تراکم‌پذیری حجمی، حدود ۰/۰۵ بر اساس میزان تنش متوسط برای خاک رس این منطقه در نظر گرفت و با استفاده از روند زیر می‌توان میزان مدول الاستیک خاک را به دست آورد و سپس بر اساس جدول زیر نوع رس را مشخص نمود؛ که به‌صورت تقریبی نشان‌دهنده خاک رس متوسط می‌باشد.

جدول ۵- مدول الاستیک انواع رس و ماسه (میونی^۲، ۲۰۰۶)

Tab. 5- Elastic modulus Tab. of Different types of clay and sand

نوع خاک	مدول الاستیک $\frac{kg}{cm^2}$
رس نرم	۱۵۰-۱۰
رس متوسط	۳۰۰-۱۵۰
رس سفت	۱۰۰۰-۳۰۰
ماسه شل	۲۰۰-۱۰۰
ماسه متوسط	۴۰۰-۲۰۰
ماسه متراکم	۸۰۰-۴۰۰

$$\frac{1}{m_v} = \frac{(1-\mu)}{(1-2\mu)(1+\mu)} E \rightarrow E = 270 \frac{kg}{cm^2} \quad (3)$$

۳-۵- ضخامت لایه ریزدانه

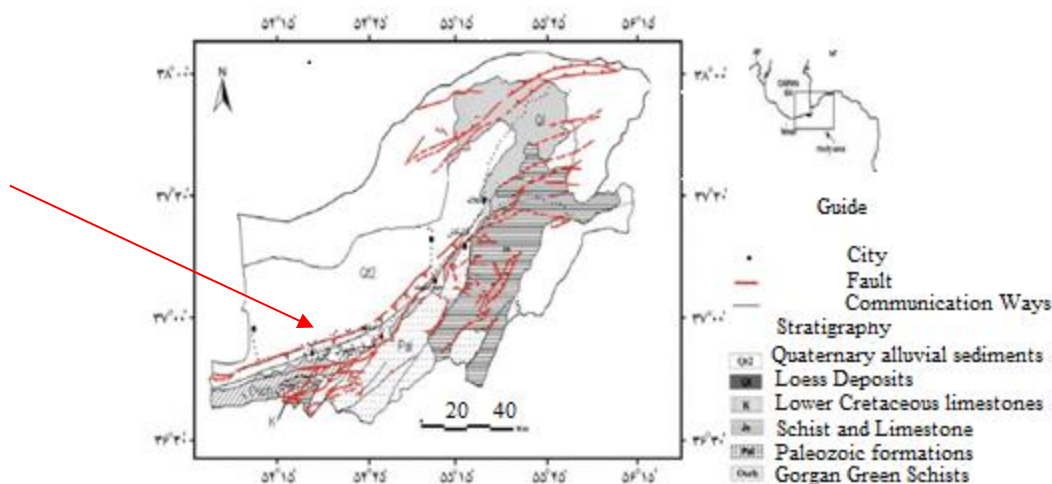
ضخامت لایه ریزدانه (رس) بر اساس داده‌های لوگ‌های حفاری مربوط به چاه‌های کشاورزی موجود در دشت گرگان و گمانه‌های پیژومترهای موجود مشخص شده‌اند. برای به دست آوردن میزان ضخامت لایه ریزدانه و تعداد لایه‌های ریزدانه، باید کلیه مشخصات لایه‌ها از سطح زمین تا سن کف مشخص گردد. برای محاسبه نشست ناشی از افت سطح آب زیرزمینی ضخامت کل لایه ریزدانه از سطح زمین لحاظ نگردید چون معمولاً چند متر بالایی در سطح زمین از قبل خشک بوده‌اند و افت سطح آب بر روی لایه بالایی تأثیری ندارد و این عمق را می‌توان از طریق ارتفاع سطح آب در زمان حفاری و یا تراز آب از زمانی که خشک‌سالی و افت آب شروع شده در نظر گرفت و میزان تنشی که ناشی از خاک سطحی که افت آب در آن انجام نشده است در میزان تنش تخمینی در هر عمقی برای تعیین ضریب تغییر حجم لحاظ گردید.

با افزایش عمق، تراکم لایه‌های خاک و میزان مدول الاستیک خاک افزایش می‌یابد که این افزایش غیرخطی می‌باشد، به‌جای استفاده از نشانه فشردگی که تقریباً ثابت است از ضریب تغییر حجم استفاده شده است. ضریب تغییر حجم با توجه به عمق هر لایه و میزان تنشی که هر لایه تحمل می‌کند از روی نمودار به‌دست‌آمده از آزمایش تحکیم ادنومتر به نسبت تنش مشخص قرائت می‌شود. برای محاسبه دقیق میزان نشست باید خاک

ریزدانه به لایه‌های با ضخامت‌های کمتر بین ۲ تا ۱ متر تقسیم شوند و سپس نشست هر لایه به میزان تنش همان لایه و ضریب تغییر حجم آن لایه محاسبه گردد. یکی از پارامترهای اثرگذار بر روی محاسبات نشست خاک، ضخامت لایه‌های ریزدانه می‌باشد مثلاً اگر فرض شود سطح آب زیرزمینی به میزان ۱ متر افت داشته باشد میزان نشست ناشی از آن در یک لایه ریزدانه که ۱۱ متر ضخامت دارد و به زیر لایه‌های ۱ متری تقسیم شده است. با توجه به فرارگیری دشت گرگان در دامنه کوه و متغیر بودن لایه‌بندی خاک و عمق سن بستر که به تناسب آن ضخامت لایه‌های ریزدانه هم متفاوت می‌باشند بر اساس نتایج به دست آمده از لایه‌بندی، ضخامت لایه‌های ریزدانه بین ۳۰ تا ۷۰ متر متغیر هستند.

۳-۶- گسل

با توجه به نقشه ساده شده زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه شکل زیر، مجموعه سازندهای پالئوزوئیک، شیست‌های سبز گرگان، سنگ‌آهک‌های ژوراسیک و سنگ‌آهک‌های کرت است پایانی، از مهم‌ترین واحدهای سنگچین‌های در این منطقه هستند (صالحی^۱ و همکاران، ۲۰۱۳). در این میان، سازندهای لار و مزدوران با سن ژوراسیک بالایی بیشترین برون‌زد را در منطقه مورد مطالعه دارند. واحدهای سنگچین‌های سنوزوییک دارای گسترش محدودی در این منطقه است. نهشته‌های لسی از گسترده‌ترین رسوبات دوران چهارم نیز در این ناحیه به صورت تپه‌ماهورهایی برون‌زد دارد (آرتیوشکوی^۲، ۲۰۰۷). مهم‌ترین ساختارهای فعال منطقه مورد مطالعه را گسل‌های کاسپین (خزر) و شمال البرز تشکیل می‌دهند. این گسل‌ها با روند شمال خاور - جنوب باختر تا شمال باختر - جنوب خاور و سازوکاری راندگی یا راستالغز چپ بر با مؤلفه معکوس در پهنه ساختاری البرز گزارش شده است. مطالعه و ارزیابی شاخصه‌ای مختلف مورفوتکتونیک در منطقه مورد مطالعه و بر روی سیزده زیر حوضه در ارتفاعات جنوبی دشت گرگان نشان می‌دهد که منطقه از دیدگاه نو زمین ساختی فعال است (آتابای و تورانی^۳، ۱۹۷۹).



شکل (۸): نقشه زمین‌شناسی ساده شده و گسل‌های کوارتزی از گستره مورد مطالعه و پیرامون آن (با تغییراتی از صالحی و همکاران، ۲۰۱۳)

Fig. 8 -Simplified geological map and Quaternary faults from the study area and its surroundings (with modifications by Salehi et al., 2013)

۴- نتیجه گیری

همان‌گونه که از بررسی نمودارهای بارش سالیانه و سطح ایستایی در گرگان استنباط می‌گردد حداکثر فرونشست در مرکز نقشه و در محدوده مسکونی، باغات و زمین‌های کشاورزی تکوین یافته و بطور کلی مناطقی قرار دارد که تقاضای آب برای کشاورزی و تراکم چاه‌های آب زیرزمینی بیشترین میزان را دارد.

در این راستا تغییرات سطح آب و میزان افت آن نیز از طریق پردازش آمار چاه‌ها مورد ارزیابی، پردازش و پهنه‌بندی قرار گرفت و نتایج مبین آن است که برداشت بی‌رویه آب دلیل اصلی فرونشست منطقه می‌باشد و همچنین برداشت از این سفره عمیق موجب کاهش فشار پیرومتریک نیز شده است. این کاهش فشار موجب بر هم خوردن تعادل و افزایش فشار حاصل از بار رسوبات بالایی سفره شده است به طوری که تخلخل رسوبات با جور شدگی مجدد کاهش یافته و در اثر افزایش تراکم، فرونشست حاصل شده است که. شواهد زمینی متعددی از جمله رشد ظاهری لوله جدارچاه‌ها نشان‌دهنده ادامه روند پدیده فرونشست در این منطقه است.

1- Salehi
2- Artyushkov

3 -Atabai and Turani

تحلیل پارامترهای مؤثر، نشان می‌دهد که نشست، به دلیل افت یکسان آب و یا ضخامت یکسان لایه ریزدانه در اعماق مختلف، متفاوت می‌باشد و لزوماً یک رابطه خطی میان افت سطح آب زیرزمینی و ایجاد پدیده فرونشست وجود ندارد. در بیشتر مواقع، سترای رسوبات ریزدانه و هدایت هیدرولیکی پایین این رسوبات، باعث ایجاد تأخیر زمانی بین افت سطح آب زیرزمینی و نشست سطح زمین می‌شود.

در این تحقیق پدیده فرونشست در محدوده شهر گرگان بررسی و محدوده فرونشست و میزان آن در بازه زمانی ۳۴ ماه با استفاده از روش تداخل سنجی راداری مشخص گردید، نکته جالب درباره سیگنال فرونشست که در شمال شهر گرگان مشاهده شد، روند تقریباً شرقی-غربی آن است که با روند برخی از ساختارهای منطقه بخصوص گسل خزر و مرز پیشانی کوهستان همخوانی دارد. این موضوع نشان می‌دهد که باوجود اینکه افت سطح ایستابی در نهایت منجر به فرونشست شده است ولی به نظر می‌رسد عوامل ساختاری روند محدوده فرونشست را کنترل نموده‌اند. رویارویی با خطر فرونشست بر سه اصل پیش‌بینی، تشخیص و پایش استوار است در این راستا، پیش‌نیاز هرگونه مدل‌سازی هندسی این پدیده به‌منظور پیش‌بینی و کنترل آن و همچنین شناسایی مناطق فرونشست، بهره‌گیری از ابزارهای ژئودتیکی موجود بالأخص تکنیک تداخل سنجی راداری و ترازبایی دقیق می‌باشد. از طرفی به خاطر هزینه مناسب و پوشش مکانی مناسبی که تداخل سنجی راداری در مقایسه با پوشش مکانی و هزینه تکرار مشاهدات ترازبایی دقیق ارائه می‌دهد، استفاده از این تکنیک در کنار استفاده از مشاهدات ترازبایی دقیق به‌منظور کنترل صحت نتایج حاصل از تداخل سنجی راداری پیشنهاد می‌شود.

در راستای ادامه تحقیق پیشنهاد می‌شود با استفاده از مدل‌سازی سری زمانی تصاویر راداری نرخ فرونشست در دوره زمانی طولانی‌تر رصد شود تا بتوان نقشه نرخ متوسط فرونشست در منطقه تهیه گردد. برای انجام مطالعات تکمیلی نیز از داده‌های ترازبایی و جی‌پی‌اس استفاده شود. همچنین برای اثبات ارتباط بین فرونشست و عوامل ساختاری، لازم است مطالعات ساختاری از جمله بررسی روند و نوع شکستگی‌ها و شکاف‌های ایجادشده در زمین و سازه‌ها انجام گیرد.

در راستای ادامه تحقیق، مدل‌سازی این پدیده به‌منظور پیش‌بینی رفتار زمانی آن در آینده پیشنهاد می‌شود. اصلاح روش‌های مدیریت منابع آب، تغییر روش‌های آبیاری و تغذیه مصنوعی به‌عنوان روش‌های کنترل نشست در منطقه توصیه می‌شود.

۵-سیاسگزار

بدین‌وسیله از کارشناسان محترم شرکت آب منطقه‌ای استان گلستان جهت همکاری در این تحقیق تشکر و قدردانی می‌گردد.

۶-منابع

- Abidin, H.Z., Andreas, H., Gumilar, I., Yuwono, B.D., Murdohardono, D. & Supriyadi, S. (2015). On Integration of Geodetic Observation Results for Assessment of Land Subsidence. Hazard Risk in Urban Areas of Indonesia. IAG 150 Years. 143, 435-442. https://doi.org/10.1007/1345_2015_82
- Abrishamchi, A., Khakbazanfard, F. & Taghavi, A. (2020). Planning for groundwater sustainable use: A case study in Nishapur Plain, Iran, Agricultural Water Management. 229, 105835. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105835>
- Amato, V., Aucelli.P.C., Corrado.G., Di Paola. G., Matano. F., Pappone. G. & Schiattarella. M. (2019). Comparing geological and Persistent Scatterer Interferometry data of the Sele River coastal plain, southern Italy: Implications for recent subsidence trends, Geomorphology. 351, 106953. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.106953>
- Amighpey, M. & Arabi, S. (2016). Studying land subsidence in Yazd province, Iran, by integration of InSAR and levelling measurements. Remote Sensing Applications, Society and Environment. 4, 1-8, <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2016.04.001>
- Anuphoa, A., Cuenca, M., Hooper, A. & Trisirisatayawong, I. (2013). InSAR timeseries analysis of land subsidence in Bangkok, Thailand, Int. J. Remote Sens., 34, 2969-2982, <https://doi.org/10.1080/01431161.2012.756596>.
- Artyushkov, E.V. (2007). Formation of the superdeep South Caspian basin: subsidence driven by phase change in continental crust, Russian Geology and Geophysics, 48 (12), 1002-1014, <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2007.11.007>
- Atabai, M. & Turani, M., (1979). Earthquake Seismicity of Golestan Province, East of the Southern Caspian Region, Iranian Geological Survey, 71-85, Article code' 13970510141046153609
- Ayala, I., Kim, S. & A. Barry, B. (1999). A Difference Fourier Transform Infrared Study of Tyrosyl Radical Z[•] Decay in Photosystem II. Biophysical Journal, 77 (4), 2137-2, [https://doi.org/10.1016/S0006-3495\(99\)77054-2](https://doi.org/10.1016/S0006-3495(99)77054-2)
- Baker, J.W. & Faber, M.H. (2008). Liquefaction Risk Assessment Using Geostatistics to account for Soil Spatial Variability. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE. 134(1), 14-23.

- Castellazzi, p., Garfias, J., Martel, R., Brouard, C. & Rivera, A. (2017). InSAR to support sustainable urbanization over compacting aquifers: The case of Toluca Valley, Mexico, *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, 63, 33-44, <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.06.011>
- Cian, F., Blasco, J.M.D. & Carrera, L. (2019). Sentinel-1 for monitoring land subsidence of coastal cities in Africa using PSInSAR: a methodology based on the integration of SNAP and StaMPS, *Geosciences*, 9, 124. Article code' 10.3390/geosciences9030124
- Das, B.M. & Sivakugan, N. (2015). Introduction to Geotechnical Engineering. Global Engineering: Timothy L. Anderson. 448 pages. <https://books.google.com/books?id=BzB-BAAAQBAJ&lpg=PP1&pg=PP1#v=onepage&q&f=false>
- Emmanuel, I.F. & Chidi, O. (2020). Characterisation and mapping of land subsidence based on geodetic observations in Lagos, Nigeria *Geodesy and Geodynamics* Available online 25 March <https://doi.org/10.1016/j.geog.2019.12.006>
- Fakhri, F. & Kalliola, R. (2015). Monitoring ground deformation in the settlement of Larissa in Central Greece by implementing SAR interferometry. *Nat Hazards* 78, 1429–1445. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1779-6>.
- Farzinkia, R., Zanganehasadi, M., Amirahmadi, A. & Zandi, R. (2019). The Relationship between Tectonic Activity and Its Impact on Land Subsidence in the Jovein Basin. *Hydrogeomorphology*. 6 (20), 165-185. [20.1001.1.23833254.1398.6.20.9.2](https://doi.org/10.1007/s11069-019-1779-6)
- Fazli, A., Sharifikia, M. & Shayan, S. (2013). Vulnerability Assessment of Structures and Settlements from Land Subsidence in Damghan Plain, *Iranian Journal of Applied Geomorphology*, 1, 1.
- Gongyu, L. & Wanfang, Z. (1999). Sinkholes in karst mining areas in China and some. methods of prevention. *Eng. Geol.* 52 (1), 45–50. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(98\)00053-2](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(98)00053-2)
- Guislain, B.G., Harvey, R.A.R., Tokaryk, D.W., Ross, A.J., Crozet, P. & Adamc, A.G. (2019). An alternative approach to interferogram collection and processing for a vintage Bomem DA3 Fourier transform spectrometer, *Journal of Molecular Spectroscopy*. 364, 111181. <https://doi.org/10.1016/j.jms.2019.111181>
- Hammond, W.C., Blewitt, G. & Kreemer, C. (2016). GPS imaging of vertical land motion in California and Nevada: implications for Sierra Nevada uplift. *J. Geophys. Res.* <https://doi.org/10.1002/2016JB013458>
- Haque, M.N., Shahid, S., Keramat, M. & Mohsenipour, M. (2016). GIS integration of hydrogeological and geoelectrical data for groundwater potential modeling in the western part of greater Kushtia district of Bangladesh. *Water Resources*, 43(2), 283-291.
- Hay-ManNg, A., Ge, L., Du, Z., Wang, S. & Ma, C. (2017). Satellite radar interferometry for monitoring subsidence induced by longwall mining activity using Radarsat-2, Sentinel-1 and ALOS-2 data, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 61: 92-103. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.05.009>
- Hoffmann, j., Leake, S.A., Galloway, D.L. & Wilson, A.M. (2003). MODFLOW-2000 ground-water model-user guide to the subsidence and aquifer-system compaction (SUB) package U.S. Geol. Surv. . Open-File Report 03-233
- HuaLi, J., Wang, S., Michel, C., & A.J.Russell, H. (2020). Surface deformation observed by InSAR shows connections with water storage change in Southern Ontario, *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 27: 100661. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100661>
- Huang, B., Shu, L. & Yang, Y.S. (2012). Groundwater Overexploitation Causing Land Subsidence: Hazard Risk Assessment Using Field Observation and Spatial Modelling. *Water Resour Manage* 26, 4225–4239 <https://doi.org/10.1007/s11269-012-0141-y>
- Hu, L., Dai, K., Xing, C., Li, Z., Tomás, R., Clark, B., Shi, X., Chen, M., Zhang, R., Qiu, Q. & Lu, Y. (2019). Land subsidence in Beijing and its relationship with geological faults revealed by Sentinel-1 InSAR observations. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 82, 101886. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.05.019>
- Jeanne, P., G. Farr Tom., Rutqvist, J., W. & Vasco, D. (2019). Role of agricultural activity on land subsidence in the San Joaquin Valley, California. *Journal of Hydrology*. 569, 462-469 <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.11.077>
- Li, H., Calder, C. & Cressie, N. (2018). One-step estimation of spatial dependence parameters: Properties and extensions of the APLE statistic, *Journal of Multivariate Analysis*, 105(1), 68-84, <https://doi.org/10.1016/j.jmva.2011.08.006>
- Li, Y., Gong, L. & Zhu, X. (2017). Measuring spatiotemporal features of land subsidence, groundwater drawdown, and compressible layer thickness in Beijing Plain, China *Water*. 9 (1), 64. <https://doi.org/10.3390/w9010064>
- Loupasakis, C. (2010). Geotechnical works in the Anargiroi village, Aetos Municipality, Florina Prefecture, Greece. Unpublished Report. Institute of Geology and Mineral Exploration, Athens.

- Loupasakis, C., Angelitsa, V., Rozos, D. et al. (2014). Mining geohazards—land subsidence caused by the dewatering of opencast coal mines: The case study of the Amyntaio coal mine, Florina, Greece. *Nat Hazards* 70, 675–691 (2014). <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0837-1>
- Mahmoudpour, M., Khamehchiyan, M., Nikudel, M. & Ghassemi, M. (2016). Numerical simulation and prediction of regional land subsidence caused by groundwater exploitation in the southwest plain of Tehran, Iran, *Engineering Geology*, 201(9), 6-28, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.12.004>
- Miller, M.M. & Shirzaei, M. (2015). Spatiotemporal characterization of land subsidence and uplift in Phoenix using InSAR time series and wavelet transforms. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 120, 5822-5842, <https://doi.org/10.1002/2015JB012017>
- Mioni, B. 2006. Soil Mechanics and Foundations. Publications of Tabriz University.
- Mirasi, S. (2012). Investigating the phenomenon of land subsidence by considering the influencing factors and the damages caused to rural buildings in the Maroodasht plain of Fars province. Master's Thesis in Geotechnics, Shiraz University of Technology
- Motagh, M., Shamshiri, R., Haghshenas, M., Haghghi., Wetzel, H.U., Akbari, B., Nahavandchi, H., Roessner, R. & Arabi, S. (2017). Quantifying groundwater exploitation induced subsidence in the Rafsanjan plain, southeastern Iran, using InSAR time-series and in situ measurements., *Engineering Geology*. 218, 134-151 <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.01.011>
- Motagh, M., Walter, T.R., Sharifi, M.A., Fielding, E., Schenk, A., Anderssohn, J. & Zschau, J. (2008). Land subsidence in Iran caused by widespread water reservoir overexploitation. *Geophys. Res. Lett.* 35 (16). <https://doi.org/10.1029/2008GL033814>
- Nemati, M., Hatzfeld, D., Gheitanchi, M., Sadidkhouy, A. & Mirzaei, N. (2011). Microseismicity of the AstaneFirouzkuh faults, east Alborz, Iran. *Tectonophysics*, 506(1-4), 11-21. <https://doi:10.1016/j.tecto.2011.04.007>
- Pacheco, J., Arzate, J., Rojas, E., Arroyo, M., Yutsis, V., & Ochoa, G. (2006). Delimitation of ground failure zones due to land subsidence using gravity data and finite element modeling in the Queretaro valley, Mexico. *Engineering Geology*, 84, 143-160. <https://doi:10.1016/j.enggeo.2005.12.003>
- Pacheco-Martínez, J., Hernandez-Marín, M., J. Burbey, T., González-Cervantes, N., Ortíz-Lozano, A., Zermeño-De-Leon, M. & Solís-Pintoc, A. (2013). Land subsidence and ground failure associated to groundwater exploitation in the Aguascalientes Valley, México, *Engineering Geology*. 164, 172-186, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.06.015>
- Rezaei, A. & Mousavi, Z. (2019). Characterization of land deformation, hydraulic head, and aquifer properties of the Gorgan confined aquifer, Iran, from InSAR observations *Journal of Hydrology*. 579, 124196. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124196>
- Rosen, P.A., Hensley, S., Joughin, I.R., Li, F.K., Madsen, S.N., Rodríguez, E. & Goldstein, R.M. (2000). Synthetic aperture radar interferometry. *Proceedings of the IEEE, Bandung Hydrological Study. Main Report Annex 1: Surface water resources*
- Rott, H. & Nagler, T. (2016). The contribution of radar interferometry to the assessment of landslide hazards, *Advances in Space Research*, 37(4), 710-719, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.06.059>
- Salehi, R., Ghafouri, M., Lashkaripour, G.H. & Dehghani, M. (2013). Investigation of Substance Abuse Difficulty Using Radar Interferometry, *Journal of Irrigation and Water Engineering*, No. 21
- Samsonov, S., van der Kooij, M. & Tiampo, K. (2011). A simultaneous inversion for deformation rates and topographic errors of DInSAR data utilizing linear least square inversion technique. *Comput. Geosci.* 37, 1083–1091. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.01.007>
- Shayan, S., Yamani, M. & Khalili, Y. (2015). Analysis of land subsidence phenomenon using geodynamic data (GPS) and underground water level, case study: Dasht Gorgan aquifer. *National Conference of the Iranian Association of Geomorphology*.
- Shayan, S., Yamani, M. & Yadegari, M. (2017). Zoning of the Land Subsidence in the Hamedan Qarachai Watershed. *Hydrogeomorphology*. 3 (9), 139-158. [20.1001.1.23833254.1395.3.9.7.7](https://doi.org/10.1007/s11069-017-0397-7)
- Solaymani Azad, SH., Nemati, M., Abbassi, M.R., Foroutan, M., Hessami, KH. Dominguezb, M., Bolourchia M. & Shahpasandz, S. (2019). Active-couple indentation in geodynamics of NNW Iran: Evidence from synchronous left-

- and right-lateral co-linear seismogenic faults in western Alborz and Iranian Azerbaijan domains, *Tectonophysics*, 754, 1-17, <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2019.01.013>
- Stamos, A. & Giannouloupoulos, P. (2010). Hydrogeological report, Geotechnical work to the Anargiri village, Aetos Municipality, Florina Prefecture, Greece. Institute of Geology and Mineral Exploration, Athens.
- Syvitski, J.P.M., Kettner, A.J., Overeem, I., Hutton, E.W.H., Hannon, M.T., Brakenridge, G.R., Day, J., Vörösmarty, C., Saito, Y., Giosan, L. & Nicholls, R.J. (2009). Sinking deltas due to human activities *Nat. Geosci.*, 2 (10), 681-686. <https://doi.org/10.1038/ngeo629>
- Tzampoglou, P. & Loupasakis, C. (2016). New data regarding the ground water level changes at the Amyntaio basin-Florina Prefecture, Greece. *Bull. Geol. Soc. Greece* 50 (2), 1006-1015. <https://doi.org/10.12681/bgsg.11805>
- Tzampoglou, P. & Loupasakis, C. (2017a). Evaluating geological and geotechnical data for the study of land subsidence phenomena at the perimeter of the Amyntaio coalmine, Greece. *Int. J. Min. Sci. Technol.* 28 (4), 61-612. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2017.11.002>
- Tzampoglou, P. & Loupasakis, C. (2017b). Land Subsidence Susceptibility and Hazard Mapping: The Case of Amyntaio Basin, Greece, *International Society for Optics and Photonics*.p. 104441L. <https://doi.org/10.1117/12.2277510>
- Tzampoglou, P. & Loupasakis, C. (2017). Mining geohazards susceptibility and risk mapping: The case of the Amyntaio open-pit coal mine, West Macedonia, Greece. *Environ Earth Sci* 76, 542. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6866-4>
- Tzampoglou, P. & Loupasakis, C. (2017d). Updated Ground Water Piezometry Data of the Amyntaio Sub-Basin and their Effect to the Manifestation of the Land Subsidence Phenomena. 11th International Hydrogeological Congress of Greece, Athens.
- Wempen, J. (2020). Application of DInSAR for short period monitoring of initial subsidence due to longwall mining in the mountain west United States *International Journal of Mining Science and Technology* 30(1), 33-37. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2019.12.011>
- Zhou, G., Gong, H., Chen, B., li, X., Li, J., Wang, X., Gao, M., Si, Y., Guo, L., Shi, M. & Duan, G. (2019). Corrigendum to “Quantifying the contribution of multiple factors to land subsidence in the Beijing Plain, China with machine learning technology” *Geomorphology*. 335(15), 48-61. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.03.017>
- Zhang, J., Feng, L. & Yao, F. (2014). Improved maize cultivated area estimation over a large scale combining MODIS-EVI time series data and crop phenological information. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 94, 102-113. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.04.023>