

Investigating the Subsidence of the Ground Surface in Kavos Dome Tower, Golestan Province

Masooome Amighpey^{1*}, Fateme Ghoraiyan², Akram Molayi²

1*. Land surveying department, National cartographic center, Tehran, Iran

2. Radar image processing expert, Land surveying department, National cartographic center Tehran, Iran

Abstract

Antiquities and cultural heritage are the birth certificates of any country. Since the ancient works define any land's age, history, and civilization, it is necessary to protect cultural historical works by combining science and art. Iran is one of the first in the world to have ancient monuments and historical and cultural buildings and has the oldest culture and civilization. Climate changes around the world and their consequences in the form of continuous droughts, water shortages, and seasonal floods have cast a shadow on the country's cultural heritage in the past few years. One of the consequences of climate change has been water scarcity and pressure on underground water resources. The lack of management of underground water resources and their indiscriminate extraction has caused widespread subsidence in the world and Iran. On the one hand, subsidence is considered an environmental threat that destroys the aquifer and soil, and on the other hand, it destroys the buildings and structures located in the place. Many subsidence has spread to urban areas and caused destruction and damage to ancient monuments. Geodetic data and methods such as radar interferometry, GPS data, accurate leveling observations, and gravimeters are used to diagnose and monitor the areas affected by the risk of subsidence. Radar interferometry with wide coverage and high spatial resolution, along with GPS with high temporal resolution, as well as accurate leveling observations and high-precision gravimeters, can be a suitable source for changing the shape of the earth's surface in the region. GonbadKavos Tower, the tallest brick tower in the world, is one of the most important ancient monuments of Iran in Golestan province. Considering the importance of protecting ancient and historical monuments, it is important to investigate the amount of subsidence of the Gorgan Plain in the area of this tower to evaluate its effect on the shape of the tower.



**Knowledge of
Conservation and
Restoration**

Vol. 6(3) No.17
December 2023
<https://kcr.richt.ir>

Pages: 29 to 37

Corresponding Author

Masooome Amighpey

Land surveying department,
National cartographic
center, Tehran, Iran

Email
amighpey@yahoo.com

To investigate the area and extent of subsidence of Gorgan Plain, the integration of geodetic observations in the region, including radar interferometry, leveling, and GPS was used. To investigate the subsidence range of this province, 53 sensor radar images were obtained from the Sentinel-1 satellite from the European Space Center between July 2017 and June 2019. The results show that due to the lack of management of the process of extracting underground water sources in the Gorgan Plain, unfortunately, this plain has experienced extensive land surface subsidence with a maximum rate of 22 cm per year. One of the sensitive structures located in the subsidence area of the Gorgan Plain is the Gonbad Kavos Tower. The rate of subsidence in the area of this tower is 6 cm per year. Also, the changes in the subsidence rate in the area of the tower and its surroundings are significant. To preserve and maintain this tower, the need to use methods of strengthening the structure in this historical work is something that should be taken into consideration. On the other hand, it is suggested to manage the use of underground water resources in the Gorgan Plain, modify the cultivation pattern to prohibit the cultivation of water-rich crops in agriculture, and artificially feed the aquifer to stop subsidence in the Gorgan region. It is also suggested to use micro geodesy observations and calculations to investigate and monitor the shape change of this historical tower.

Keywords: InSAR, subsidence, Gonbad Kavos tower

بررسی فرونشست سطح زمین در برج گنبد کاووس استان گلستان

معصومه آمیغ پی^{۱*}، فاطمه قرائیان^۲، اکرم ملائی^۲

*^۱. رئیس اداره ترازیبی دقیق و تداخل سنجی راداری، اداره کل نقشه برداری زمینی، سازمان نقشه برداری کشور، تهران، ایران

^۲. کارشناس پردازش تصاویر راداری، اداره کل نقشه برداری زمینی، سازمان نقشه برداری کشور، تهران، ایران



فصلنامه دانش حفاظت و مرمت

سال ششم، شماره ۳، شماره پیاپی ۱۷

پاییز ۱۴۰۲

<https://kcr.richt.ir>

صفحات: ۲۹ تا ۳۷

نویسنده مسئول

معصومه آمیغ پی

رئیس اداره ترازیبی دقیق و تداخل

سنجی راداری، اداره کل نقشه برداری

زمینی، سازمان نقشه برداری کشور،

تهران، ایران

رایانامه

amighpey@yahoo.com

چکیده

برج گنبد کاووس، بلندترین برج آجری جهان یکی از مهم‌ترین آثار باستانی ایران در استان گلستان است. نظر به اهمیت حفاظت از آثار باستانی و تاریخی، بررسی میزان فرونشست دشت گرگان در محدوده این برج به منظور ارزیابی تأثیر آن بر تغییر شکل برج، حائز اهمیت است. به علت عدم مدیریت روند استخراج منابع آب زیرزمینی در دشت گرگان، متأسفانه این دشت دچار فرونشست گسترده سطح زمین با بیشینه نرخ ۲۲ سانتی‌متر در سال شده است. یکی از سازه‌های حساس واقع در منطقه فرونشست دشت گرگان، برج گنبد کاووس است. میزان فرونشست در محدوده این برج شش سانتی‌متر در سال است. همچنین تغییرات نرخ فرونشست در محدوده برج و اطراف آن قابل توجه است. به‌منظور حفظ و نگهداری این برج، اقدامات مقابله‌ای با آثار مخرب فرونشست بر برج و اقدامات جلوگیری از روند فرونشست دشت گرگان پیشنهاد می‌شود.

واژگان کلیدی: تداخل سنجی راداری، فرونشست، برج گنبد کاووس

مقدمه

به ریاضیات و هندسه است و نمادی برجسته از یک برج یادبود دوره اسلامی است که طراحی سازه آن به لحاظ تناسبات معماری و مصالح آجری بکار رفته در نوع خود نظیر است. این بنا هندسه‌ای دایره‌ای شکل دارد که تبدیل به ۱۰ ضلعی منتظم می‌شود و نه تنها به لحاظ چگونگی ایستایی و معماری دقیق آن بلکه به لحاظ زیبایی منحصر به فرد آن از جمله آثار برجسته جهانی به شمار می‌رود. متأسفانه استفاده بیش از حد از منابع آب‌های زیرزمینی در استان گلستان با هدف توسعه کشاورزی که منجر به ایجاد فرونشست‌های گسترده در این منطقه شده است، به همراه برخی از کاستی‌ها در امر حفاظت از این میراث تاریخی نهایتاً منجر به ایجاد تهدید جدی برای سلامت این بنا شده است. در این تحقیق میزان فرونشست سطح زمین در محدوده این ابنیه تاریخی مورد بررسی قرار می‌گیرد

معرفی برج گنبد کاووس

برج کاووس، بلندترین برج آجری جهان است که یکی از بی‌نظیرترین یادمان‌های برجسته معماری ایران در دوره اسلامی در شمال شهر گنبد کاووس و در ۳۰ کیلومتری بازمانده شهر باستانی گرگان (جرگان) قرار دارد (شکل ۱). این برج، در تیرماه سال ۱۳۹۱ در فهرست آثار یونسکو به‌عنوان اثر جهانی ثبت شده است. ارتفاع ساختمان برج کاووس ۵۵ متر است که با احتساب بلندی ۱۵ متری تپه، پای بست آن به ۷۰ متر می‌رسد. این بنای عظیم تمام آن از آجر ساخته شده و نمونه‌ای ارزنده در فن آجرکاری است. برج کاووس از تنها شواهد باقی‌مانده از شهر باستانی گرگان یا جرجان است که زمانی از مراکز هنر و علم در منطقه بود و طی حمله مغول به ایران در سده‌های ۱۴ و ۱۵ میلادی، تخریب شد. بقایای شهر کهن گرگان در فاصله حدود سه کیلومتری بنای برج کاووس واقع است. شهر گنبد کاووس امروزی بعدها در پیرامون برج ساخته شده‌است و نام خود را از این بنا گرفت.

بنای این سازه را می‌توان به سه بخش شالوده یا پی آجری، ساقه یا بدنه و پوشش مخروطی گنبدی تقسیم نمود. از آنجاکه ساخت چنین بنایی بر تپه‌ای مصنوعی

آثار باستانی و میراث فرهنگی، شناسنامه هر کشوری است. از آنجاکه آثار باستانی قدمت، تاریخچه و تمدن هر سرزمینی را مشخص می‌کند، حفاظت آثار تاریخی فرهنگی، با تلفیقی از علم و هنر امری ضروری است. کشور ما ایران نیز در رده‌های اول دارنده آثار باستانی و بناهای تاریخی و فرهنگی در جهان است و دارای کهن‌ترین فرهنگ و تمدن جهان است. از گذشته، میراث و فرهنگ با اقلیم پیوندی دیرینه داشته است و امروزه توجه به این رابطه و تحکیم آن لازمه توسعه پایدار است. از دیگر سو، تغییرات اقلیمی در دنیا و تبعات آن در قالب خشکسالی‌های مستمر و کم‌آبی و بروز سیلاب‌های فصلی در چند ساله گذشته بر میراث فرهنگی کشور سایه انداخته است. در حال حاضر تغییرات اقلیمی یکی از بزرگ‌ترین تهدیدات پیش روی فرهنگ و میراث فرهنگی و طبیعی جوامع بشری بشمار می‌رود. با وقوع تغییرات اقلیمی مخاطراتی همچون آتش‌سوزی جنگل‌ها، وقوع سیلاب‌های ناگهانی، ایجاد خشکسالی‌های مستمر و غیره افزایش یافته که خود موارث فرهنگی و معنوی را تهدید می‌کند. از جمله راهکارهای مؤثر در کاهش چالش‌های فزاینده ناشی از تغییرات اقلیمی، سازگاری با این تغییرات در راستای حفظ و نگهداری از محیط زیست است.

یکی از تبعات تغییر اقلیم، کم‌آبی، محدودیت منابع آب سطحی، خشک شدن دریاچه‌ها و تالاب‌ها و فشار بر منابع آب زیرزمینی بوده است. عدم مدیریت منابع آب زیرزمینی و استخراج بی‌رویه از آن‌ها، خود موجب فرونشست‌های گسترده‌ای در جهان و ایران شده است (آمیغ پی و همکاران، ۱۴۰۲). فرونشست‌ها از یک سو تهدیدی زیست‌محیطی محسوب می‌شوند که موجب تخریب آبخوان و خاک می‌شوند و از دیگر سو موجب تخریب ابنیه و سازه‌های واقع در محل می‌شوند. بسیاری از فرونشست‌ها به محدوده‌های شهری گسترش پیدا کرده و موجب تخریب و آسیب به آثار باستانی شده‌اند (Alfare et al., 2014; 2021; Rukayah et al., 2021; Hamouda et al.,

برج گنبد کاووس استان گلستان نمونه‌ای واضح و روشن از توجه مردمان این سرزمین در اعصار گذشته



شکل ۱. نمایی از برج تاریخی گنبد کاووس

به ۱۴/۶۶ در قسمت پاکار گنبد می‌رسد. گنبد بر روی بالایی لایه‌های از قرنیز پیش‌آمده به‌صورت مخروطی و به ارتفاع ۱۸ متر، بنا شده است. در یک‌پوسته یا دوپوسته بودن این گنبد اختلاف نظر وجود دارد. به نظر می‌رسد این گنبد به‌صورت یک‌پارچه تراشیده و صیقل داده شده است. گمان می‌رود ماندگاری بسیار زیاد این سازه تا اندازه‌ای به‌علت استفاده از آجر پیش‌بر و ریشه‌دار باشد.

بررسی فرونشست دشت گرگان

رشد جمعیت همراه با گسترش بی‌رویه بهره‌برداری از آب به‌ویژه در امور کشاورزی و صنعت، جامعه امروز را با اثرات نامطلوب زیادی در جنبه‌های کمی و کیفی منابع آب مواجه کرده است. از این‌رو لزوم استفاده عقلانی و مدیریت پایدار بهره‌برداری از منابع آب امری آشکار به نظر می‌رسد. افزایش روز افزون بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی به‌ویژه در حوضه‌هایی که با نهشته‌های آبرفتی انباشته شده‌اند، در مناطق مختلفی از کشور عزیزمان ایران، موجب فرونشست زمین شده است.

مناسب نبود، شالوده بنا را با هزینه و تلاش بسیار، بر زمین سخت قرار دادند. این شالوده یا پی که قطر بالای آن ۱۷/۰۸ متر است، تماماً با آجر ساخته شده و بر اساس پژوهشی که در مجاورت برج ترانشه زدند، مشخص شد که تا عمق ۹/۸ متری زیر زمین نیز ادامه پیدا می‌کند که هر چه پایین‌تر می‌رود، قطر و ضخامت آن بیشتر می‌شود. در عمق ۸/۸ متری زیر زمین، بیرون‌زدگی‌هایی دارد که احتمالاً برای کنترل و اصلاح شیب بدنه یا مقابله با نشست بنا طراحی شده است. تنها حدود ۱/۴۵ متر از شالوده بالاتر از سطح زمین است و با انحنایی مناسب، آن را پرها و ساقه‌های استوانه‌ای میل پیوند زده‌اند. قسمت ساقه که مدور و استوانه‌ای است، دارای ده پره مثلثی و به ارتفاع ۳۷ متر ساخته شده و از پایه‌ای که بر شالوده استوار است تا قرنیز زیر گنبد ادامه دارد. قطر داخلی برج در پایین این قسمت ۹/۶۷ متر و قطر خارجی ۱۴/۶۳ متر است. پرها علاوه بر تزئین، موجب استحکام بیشتر بنا هم می‌شوند. قطر ساقه نیز با بیشتر شدن ارتفاع، کاسته می‌شود؛ از ۱۷/۰۶ در پای کار

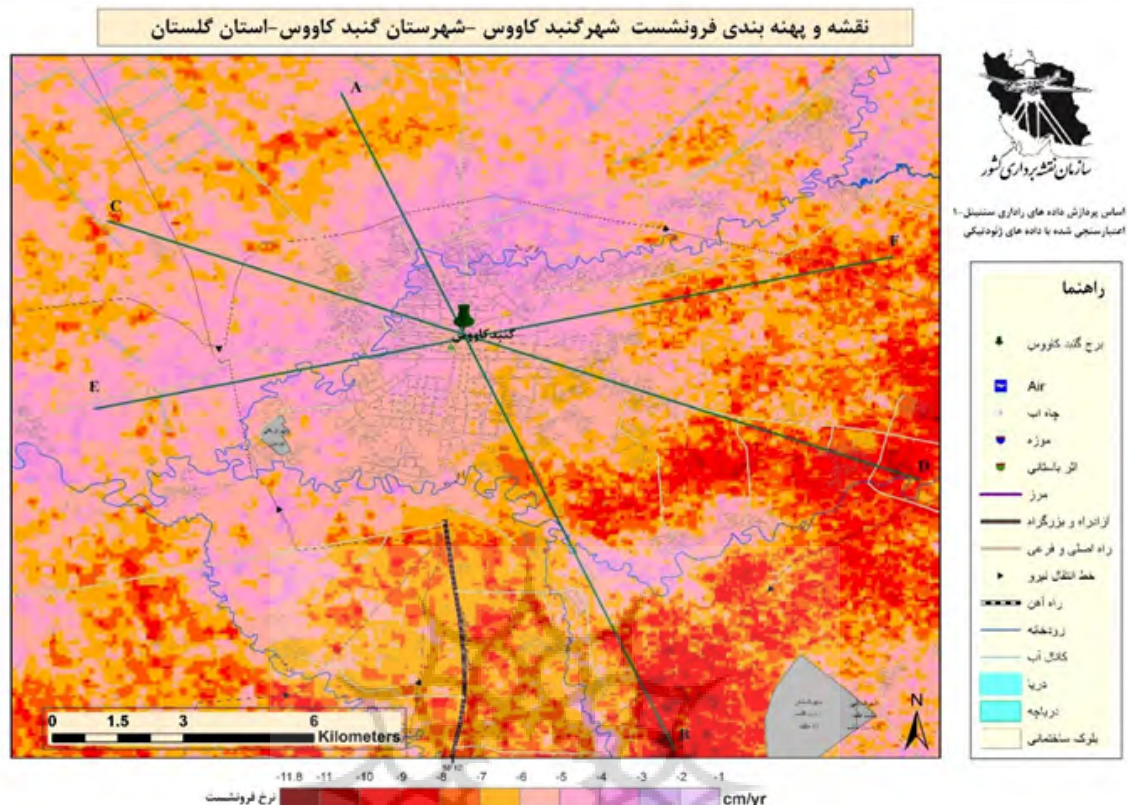


شکل ۲. نقشه فرونشست استان گلستان

مخاطره فرونشست از داده‌ها و روش‌های ژئودتیکی همچون تداخل‌سنجی راداری، داده‌های GPS و مشاهدات ترازیبی دقیق و ثقل‌سنجی استفاده می‌شود. تداخل‌سنجی راداری با پوشش وسیع و توان تفکیک مکانی بالا در کنار GPS با قدرت تفکیک زمانی بالا و نیز مشاهدات ترازیبی دقیق و ثقل‌سنجی با دقت بالا می‌تواند منبع مناسبی برای تغییر شکل سطح زمین در منطقه باشد. به منظور بررسی فرونشست دشت گرگان، از تلفیق انواع مشاهدات ژئودتیکی در منطقه، شامل تداخل‌سنجی راداری، ترازیبی و GPS استفاده شد. به منظور بررسی محدوده فرونشست این استان، ۵۳ تصویر راداری سنجنده از ماهواره Sentinel-1 از مرکز فضایی اروپا در بازه زمانی تیر ۱۳۹۷ تا خرداد ۱۳۹۹ اخذ گردید. نتایج حاصل این پردازش‌های راداری شامل ۶۲۴ اینترفروگرام بود. بنابراین پردازش‌های انجام شده، در استان گلستان، مناطقی به

مخاطرات پدیده فرونشست ابعاد گسترده‌ای دارد که از آن جمله می‌توان به ایجاد تخریب در شریان‌های حیاتی و سازه‌های مهم، تغییر ناهمسان در ارتفاع و شیب رودخانه‌ها، آبراهه‌ها و سازه‌های انتقال آب، شکست و یا بیرون‌زدگی لوله جدار چاه‌ها در نتیجه تنش‌های تراکمی ناشی از تراکم آبخوان‌ها و ایجاد اختلال در بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی، پیشروی امواج در مناطق پست ساحلی، کاهش برگشت‌ناپذیر تمام یا بخشی از مخزن آب زیرزمینی در نتیجه از بین رفتن یا کاهش تخلخل مفید نهشته‌ها، کاهش میزان نفوذپذیری سطحی و پیرو آن گسترش پهنه‌های بیابانی و سیلابی و کاهش بازدهی اشاره کرد؛ بنابراین با توجه به گستردگی دامنه مخاطرات فرونشست، مدیریت این پدیده امری حیاتی در مدیریت شهری محسوب می‌شود

به‌منظور تشخیص و پایش مناطق تحت تأثیر



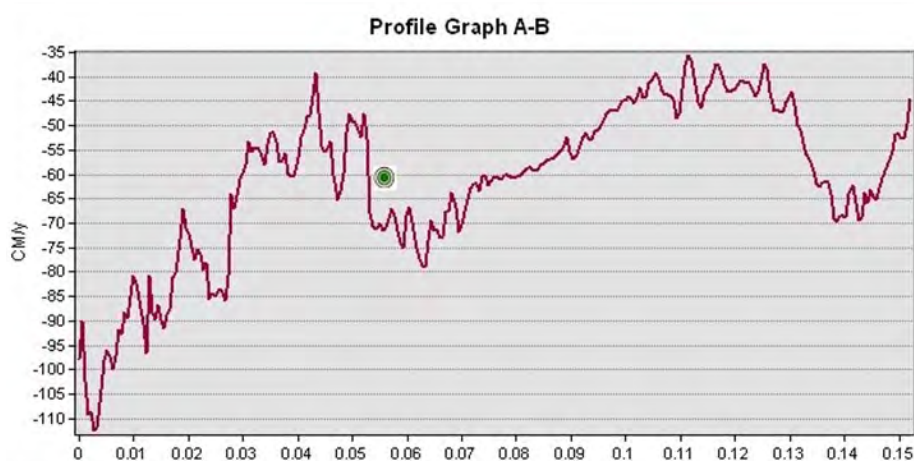
بررسی فرونشست برج گنبد کاووس

برج گنبد کاووس، در شمال شهر گنبد کاووس و در ۳۰ کیلومتری بازمانده شهر باستانی گرگان (جرجان) قرار دارد. نظر به اهمیت این اثر تاریخی و اهمیت حفظ و نگهداری آن، بررسی فرونشست در محدوده این برج تاریخی انجام شد. شکل ۳ نشان دهنده وضعیت فرونشست در محدوده این برج و اطراف آن است. همین طور که از این شکل پیداست محدوده برج دارای فرونشستی معادل ۶ سانتی متر در سال است

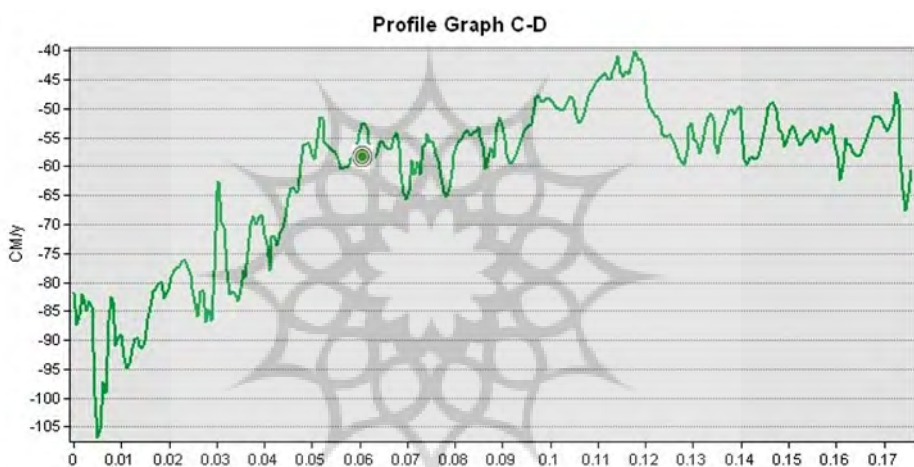
از دیگر سو، علاوه بر نرخ فرونشست در محدوده آثار باستانی، تغییرات نرخ فرونشست یا نشست نامتقارن عامل اساسی آسیب به سازه است؛ بنابراین در شکل ۴ تغییرات نرخ فرونشست در پروفیل های گذرنده از این برج نمایش داده شده است

وسعت ۴۸۰۰ کیلومترمربع در اطراف شهرهای گرگان، سرخنگلاته، آق قلا، گنبد کاووس و دلند دچار فرونشست با بیشترین نرخ ۲۲/۶ سانتی متر در سال است. با انجام این پردازش های راداری در استان گلستان سه منطقه فرونشست در « شهرستان بندرگز » با بیشترین نرخ ۷ سانتی متر در سال و در گنبد کاووس، در اطراف دهستان کوند با بیشترین نرخ ۳،۶ سانتیمتر در سال و در گرگان، مناطق شهری و اطراف شهرهای گرگان، سرخنگلاته، آق قلا، دلند، انبارآلوم، کلاله، گالیکش، مینودشت، گنبد کاووس، آزادشهر، رامیان، خان ببین و علی آباد کنول و غیره دچار فرونشست با بیشترین نرخ ۲۲،۶ سانتی متر در سال شناسایی شدند. این نتایج همچنین با مشاهدات GPS و ترازیبی موجود در منطقه صحت سنجی شد

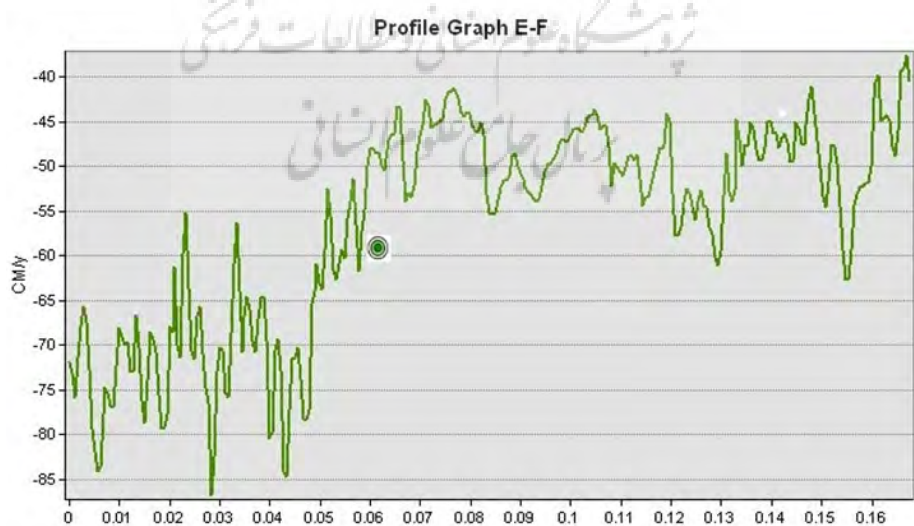
الف



ب



ج



شکل ۴. تغییرات نرخ فرونشست در پروفیل‌های گذرنده از برج گنبد کاووس

منابع

Alfare, Loredana., Donnici, Sandra., Marini, Mattia., Moscatelli, Massimiliano., Tosi, Luigi., & Vallone, Roberto. (2014). The Impact of Land Subsidence on Preservation of Cultural Heritage Sites: The Case Study of Aquileia (Venetian-Friulian Coastland, North-Eastern Italy). 10.1007/978-3-319-08660-6_34.

Amighpey, M., & Arabi, S. (2023). Comprehensive Iran subsidence atlas. National Cartographic Center of Iran, Tehran (In Persian)

Hamouda, A.Z., El-Gharabawy, S.E., M., Fekry, A., Nassar, M.A., & Salah, M. (2021). Subsidence model of the ancient Alexandria Royal port linked to sea-level rise and natural hazards using integrated geophysical methods, The Egyptian Journal of Aquatic Research, Volume 47, Issue 3, 2021, Pages

Rukayah, A., Sardjono, B., Abdullah, M., & Aziz, AMA. (2021). inventory of old buildings and land subsidence in Semarang Old Colonial City, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 623, International Conference on Environment, Sustainability Issues, and Community Development 21 October 2020, Semarang, Indonesia

همین‌طور که از شکل ۴ پیداست، تغییرات فرونشست در محدوده اطراف برج قابل‌تأمل است. توجه به نرخ فرونشست و تغییرات آن فرونشست دشت گرگان تهدیدی جدی برای این اثر تاریخی محسوب می‌شود

نتیجه‌گیری

در این تحقیق میزان فرونشست و تغییرات آن در محدوده برج گنبد کاووس، مورد بررسی قرار گرفت. میزان فرونشست ۶ سانتی‌متر در سال، با در نظر گرفتن تاریخچه فرونشست منطقه که حداقل متعلق به ۲۰ سال گذشته است. میزان جابه‌جایی بسیار بالاتر از میزان ذکر شده در مقررات ملی ساختمان است. از دیگر سو تغییرات فرونشست که عامل کلیدی در تخریب سازه‌های محل است؛ نیز در منطقه قابل توجه است. لزوم استفاده از روش‌های تحکیم سازه در این اثر تاریخی امری است که باید مورد توجه قرار گیرد. از دیگر سو، مدیریت بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی در دشت گرگان، اصلاح الگوی کشت و منع کشت محصولات پرآب بر کشاورزی، روش‌های تغذیه مصنوعی آبخوان به منظور توقف فرونشست در منطقه مؤکداً پیشنهاد می‌شود. همچنین استفاده از مشاهدات و محاسبات میکروژئودزی به منظور بررسی و پایش تغییر شکل این برج تاریخی پیشنهاد می‌شود