



Temporal dynamics and heterogeneity of geological behavior of land subsidence in Varamin plain using InSAR time series

Mohammad Kaveh Cholcheh¹ , Hamid Reza Nassery^{2*} , Farshad Alijani³ 

1- Ph.D. Student, Department of Mineral and Groundwater Resources, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University Tehran, Tehran, Iran.

2- Professor, Department of Mineral and Groundwater Resources, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University Tehran, Tehran, Iran.

3- Associate Professor, Department of Mineral and Groundwater Resources, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University Tehran, Tehran, Iran.

*Corresponding author: h-nassery@sbu.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article	The Varamin plain, located southeast of Tehran, is experiencing land subsidence, leading to infrastructure damage and reduced aquifer storage capacity. Despite previous zonation studies, the temporal dynamics of subsidence and its differential behavior across various geological units have received less attention. In this study, using 10-year time series (2014–2024) derived from radar interferometry (Sentinel-1, LiCSBAS) and ARIMA modeling on stationary data (first-order differencing), the autocorrelation structure of nine observation wells in different parts of the Varamin aquifer was analyzed. The results showed that in stations located within fine-grained clay units (e.g., W-14 and W-03), the mean 10-year cumulative subsidence rates were 726 mm and 473 mm, respectively, and the temporal behavior followed an autoregressive (AR) model with a stable trend. In contrast, stations in coarse-grained units (W-06 and W-08) exhibited mean subsidence rates of less than 200 mm and showed purely random (moving average) behavior without a significant trend. The Ljung–Box test confirmed the adequacy of the models (p-value > 0.05). The main finding of this study is that sediment grain size, particularly the thickness and continuity of clay layers, plays a decisive role in the type of subsidence dynamics (trending vs. random), and that groundwater level decline alone, without sufficient clay layers, does not lead to significant subsidence. This result highlights the need for risk zoning based on sediment type, not only on subsidence rates, in the management of alluvial aquifers.
Article history:	
Submit Date:	
2026/06/27	
Accept Date:	
2026/09/19	
Keywords:	
Autocorrelation,	
LiCSBAS, Subsidence,	
Time series, Varamin.	
Cite this article: Kaveh Cholcheh, Mohammad., Nassery, Hamid Reza., Alijani, Farshad. (2026). Temporal dynamics and heterogeneity of geological behavior of land subsidence in Varamin plain using InSAR time series. <i>Hydrogeology</i> , 10 (2), 63-81. DOI: http://doi.org/10.22034/hydro.2026.73278.1343	
 © The Author(s). Publisher: University of Tabriz. DOI: http://doi.org/10.22034/hydro.2026.73278.1343	

Expanded Abstract

Introduction

Land subsidence is an important geological hazard in many arid and semi-arid regions, particularly where groundwater resources are intensively exploited. Excessive groundwater withdrawal reduces pore-water pressure and increases effective stress within aquifer sediments, resulting in compaction and downward displacement of the land surface. This process can damage infrastructure and agricultural lands and may also cause an irreversible reduction in aquifer storage capacity (Galloway and Burbey, 2011; Bagheri-Gavkosh et al., 2021). However, groundwater-level decline alone does not necessarily produce the same magnitude of subsidence in different parts of an aquifer. The response of the aquifer system also depends on sediment grain size, the thickness and continuity of fine-grained layers, aquifer geometry, and hydrogeological conditions. Fine-grained sediments, particularly clay and silt, generally have a greater potential for compaction than coarse-grained deposits.

The Varamin Plain, located southeast of Tehran, is an important agricultural region that has experienced considerable groundwater depletion and land subsidence. Previous studies have mainly focused on the spatial distribution and zoning of subsidence, while less attention has been given to its temporal behavior and the differences between geological units. Time-series analysis can provide additional information on whether deformation at a specific location is persistent and temporally dependent or mainly controlled by short-term fluctuations. In this study, Sentinel-1 InSAR time-series data were integrated with Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA) modeling to investigate the temporal dynamics of land subsidence in the Varamin aquifer. The objectives were to determine the spatial and temporal patterns of subsidence during 2014–2024, characterize the temporal structure of deformation at selected observation wells, compare the behavior of fine- and coarse-grained sedimentary environments, and evaluate the role of groundwater decline and sediment characteristics in controlling subsidence.

Materials and Methods

The Varamin Plain is located in southeastern Tehran Province within the Central Iranian geological zone. Groundwater generally flows from northwest to southeast, and groundwater depth varies from approximately 4 to 224 m. The northern parts of the aquifer are generally characterized by thicker and coarser alluvial deposits, whereas finer-grained sediments become more important toward the central, southern, and southwestern parts.

Land-surface displacement was investigated using Sentinel-1 radar data covering the period from October 2014 to July 2024. The Small Baseline Subset (SBAS) approach and LiCSBAS package were used to derive cumulative displacement maps and displacement time series (Morishita et al., 2020). Surface-displacement time series were initially extracted for 14 observation wells located in different hydrogeological and geological settings.

Stationarity of the time series was examined using the Augmented Dickey-Fuller (ADF) test. The original series were generally non-stationary, and first-order differencing was therefore applied. Most time series became stationary after first-order differencing. W-10 and W-12 remained non-stationary and required a different differencing order; therefore, they were excluded to maintain a consistent statistical framework among the compared stations. The final ARIMA analysis was performed for nine observation wells. The Box-Jenkins procedure was used for model identification. Autocorrelation Function (ACF) and Partial Autocorrelation Function (PACF) plots were examined to identify suitable autoregressive and moving-average orders. Candidate models were compared using the Akaike Information Criterion (AIC) and Bayesian Information Criterion (BIC), and residual independence was evaluated using the Ljung-Box test. Prediction accuracy was assessed using Mean Absolute Error (MAE), Root Mean Square Error (RMSE), and Mean Absolute Percentage Error (MAPE). The modeled temporal behavior was subsequently compared with groundwater-level changes and available lithological information.

Results and Discussion

The ten-year InSAR analysis revealed considerable spatial variability in subsidence across the Varamin Plain. The maximum annual subsidence rate reached approximately 92.6 mm/year. Three main subsidence zones were identified: a severe and extensive zone in the southwestern part of the plain, a localized high-rate zone northwest of Pakdasht, and a relatively extensive but lower-rate zone along the northern Varamin-Pakdasht area. This spatial variability indicates that the aquifer does not respond uniformly to groundwater depletion.

The original subsidence time series were predominantly non-stationary. After first-order differencing, nine selected stations satisfied the stationarity requirements and were modeled using ARIMA. Different model structures were obtained for different locations, demonstrating that subsidence also exhibits considerable temporal heterogeneity. Among the investigated stations, W-14 and W-03 showed some of the highest cumulative subsidence values, approximately 726 and 473 mm, respectively. These stations are located in areas containing relatively fine-grained sediments. W-14 was represented by ARIMA(1,1,0), whereas W-03 was represented by ARIMA(2,1,1). Their autoregressive components indicate that current deformation is partly related to previous deformation states, suggesting a relatively persistent compaction process.

In contrast, W-06 and W-08, located mainly in coarser-grained sedimentary environments, showed substantially lower cumulative subsidence. W-06 was represented by ARIMA(0,1,1), indicating dominance of a moving-average component and greater sensitivity to short-term fluctuations. W-08 was represented by ARIMA(2,1,2), showing a mixed temporal structure. Therefore, the temporal behavior of subsidence differed substantially among the geological settings.

An important observation was that considerable groundwater-level decline did not always correspond to high land subsidence. W-06 and W-08 experienced substantial groundwater-level changes but showed relatively limited surface deformation. In contrast, W-03 and W-14 showed much greater subsidence in areas containing more

fine-grained sediments. These results suggest that groundwater depletion is an important triggering factor, but the magnitude of surface deformation is strongly controlled by the presence of compressible sediments.

Fine-grained clay-rich layers can undergo substantial consolidation following pore-pressure reduction, whereas coarse-grained sandy and gravelly deposits generally exhibit lower compressibility. Consequently, two locations experiencing similar groundwater-level declines may undergo very different amounts of land subsidence. This interpretation is consistent with previous studies emphasizing the effects of aquifer-system compaction and sediment characteristics on subsidence behavior (Hung et al., 2010; Heidari et al., 2026).

The Ljung-Box test produced p-values greater than 0.05 for the final fitted models, indicating that significant residual autocorrelation was not present. The p-values were 0.78 for W-06, 0.85 for W-08, 0.57 for W-03, and 0.62 for W-14. Model performance based on MAE and RMSE was generally acceptable. However, MAPE produced relatively large values at several stations because this index becomes unstable when observed displacement values approach zero. The fitted models were also used for short-term forecasting. The general forecast pattern indicated continuation of subsidence at most stations. At W-14, cumulative subsidence was predicted to increase from approximately 731.7 mm at the first forecast step to approximately 799.0 mm at the twelfth step, corresponding to about 67.3 mm of additional deformation. Nevertheless, ARIMA models are linear and do not explicitly include physical controlling factors such as groundwater abstraction, recharge, and precipitation; therefore, the forecasts should mainly be considered short-term statistical estimates.

Conclusions

The integration of Sentinel-1 InSAR observations and ARIMA time-series modeling provided an effective framework for investigating both spatial and temporal variations in land subsidence in the Varamin Plain. The results showed that subsidence behavior is highly heterogeneous and cannot be explained solely by groundwater-level decline.

The most important finding is that sediment characteristics, particularly the presence and continuity of fine-grained compressible layers, strongly control the magnitude and temporal behavior of subsidence. W-14 and W-03, located in relatively fine-grained settings, experienced substantially greater cumulative deformation and stronger temporal dependence than stations located in coarser-grained deposits. Therefore, groundwater-level decline should be regarded as a major triggering factor, while the geological and sedimentological characteristics of the aquifer determine the magnitude of its deformation response. Subsidence hazard assessment should consequently consider groundwater decline

together with sediment type, clay content, and the spatial distribution of compressible layers.

The results also demonstrate that ARIMA modeling can distinguish between persistent and short-term deformation behavior and provide useful short-term forecasts. Future studies should incorporate groundwater abstraction, recharge, precipitation, and other explanatory variables using ARIMAX or multivariate approaches. More detailed information on clay thickness and mineralogical composition would also improve interpretation of the physical mechanisms controlling subsidence.

دینامیک زمانی و ناهمگنی رفتار زمین‌شناسی فرونشست زمین در دشت ورامین با استفاده از سری زمانی InSAR

محمد کاوه چلچله^۱، حمیدرضا ناصری^{۲*}، فرشاد علی‌جانی^۳

۱- دانشجوی دکتری، گروه زمین‌شناسی معدنی و آب، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

۲- استاد، گروه زمین‌شناسی معدنی و آب، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

۳- دانشیار، گروه زمین‌شناسی معدنی و آب، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

*نویسنده مسئول: h-nassery@sbu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	دشت ورامین در جنوب‌شرق تهران با پدیده فرونشست زمین مواجه است که پیامدهایی مانند خسارت به زیرساخت‌ها و کاهش ظرفیت ذخیره آبخوان دارد. با وجود مطالعات پیشین درباره پهنه‌بندی فرونشست، دینامیک زمانی این پدیده و تفاوت رفتار آن در واحدهای زمین‌شناسی مختلف کمتر بررسی شده است. در این پژوهش، سری‌های زمانی ۱۰ ساله جابه‌جایی سطح زمین در بازه ۱۳۹۳-۱۴۰۳، استخراج‌شده از تصاویر Sentinel-1 با استفاده از LiCSBAS، تحلیل شد. پس از بررسی مانایی و اعمال تفاضل مرتبه اول، مدل‌های ARIMA برای ۹ ایستگاه واقع در بخش‌های مختلف آبخوان برازش شدند. نتایج نشان داد فرونشست تجمعی ۱۰ ساله در ایستگاه‌های W-03 و W-14، واقع در بخش‌های دارای رسوبات ریزدانه، به‌ترتیب حدود ۷۲۶ و ۴۷۳ میلی‌متر بود و سری‌های زمانی آن‌ها وابستگی بیشتری به مقادیر گذشته نشان دادند. در مقابل، ایستگاه‌های W-06 و W-08 در بخش‌های عمدتاً درشت‌دانه، فرونشست تجمعی کمتر از ۲۰۰ میلی‌متر و ساختار زمانی متفاوتی داشتند. مدل‌های منتخب شامل ساختارهای خودرگرسیون، میانگین متحرک و ترکیبی بودند. آزمون لیونگ-باکس نیز نبود خودهمبستگی معنادار در باقیمانده مدل‌ها را نشان داد ($p > 0.05$). مقایسه نتایج با اطلاعات زمین‌شناسی و فرونشست، ورامین، هیدروژئولوژیکی نشان داد شدت و الگوی زمانی فرونشست با ویژگی‌های دانه‌بندی و حضور لایه‌های ریزدانه مرتبط است و افت سطح آب زیرزمینی به‌تنهایی نمی‌تواند تفاوت شدت فرونشست را توضیح دهد. بنابراین، در پهنه‌بندی خطر فرونشست آبخوان‌های آبرفتی، ویژگی‌های رسوب‌شناسی نیز باید در کنار افت سطح آب و میزان فرونشست لحاظ شوند.

کلیدواژه‌ها:

خودهمبستگی، سری زمانی، فرونشست، ورامین، LiCSBAS

استناد: کاوه، چلچله، محمد، ناصری، حمیدرضا، علی‌جانی، فرشاد. (۱۴۰۵). دینامیک زمانی و ناهمگنی رفتار زمین‌شناسی فرونشست زمین در دشت ورامین با استفاده از سری زمانی InSAR. هیدروژئولوژی، ۱۰ (۲)، ۸۱-۶۴. DOI:

<http://doi.org/10.22034/hydro.2026.73278.1343>

ناشر: دانشگاه تبریز.

© نویسندگان.



DOI: <http://doi.org/10.22034/hydro.2026.73278.1343>

مقدمه

اندازه‌گیری کنند (Raucoules et al., 2003). تداخل‌سنجی راداری در سال‌های اخیر به‌عنوان یکی از کارآمدترین روش‌ها برای اندازه‌گیری تغییرات سطح زمین مورد توجه قرار گرفته است (Fruneau and Sarti, 2000). با توجه به ماهیت تدریجی فرونشست، تحلیل سری‌های زمانی InSAR امکان بررسی تغییرات این پدیده در طول زمان را فراهم می‌کند. از رویکردهای متداول در این زمینه می‌توان به تداخل‌سنجی مبتنی بر پراکنشگرهای دائمی ($PSInSAR^2$) و روش مجموعه خط مبنای کوتاه ($SBAS^3$) اشاره کرد (Helali et al., 2024; Hung et al., 2010). افزون بر این، $LiCSBAS^4$ یک بسته متن‌باز برای تحلیل سری زمانی InSAR است که برای پردازش‌شده LiCSAR توسعه یافته است. LiCSAR پردازش خودکار داده‌های Sentinel-1 را با استفاده از نرم‌افزار GAMMA انجام می‌دهد و LiCSBAS امکان استخراج سری‌های زمانی جابه‌جایی و برآورد سرعت تغییر شکل سطح زمین را از این محصولات فراهم می‌کند.

تحلیل سری‌های زمانی روشی آماری برای بررسی مجموعه‌ای از داده‌ها است که در فواصل زمانی منظم و متوالی ثبت شده‌اند. هدف اصلی این تحلیل، شناسایی ساختار و الگوهای زمانی حاکم بر داده‌ها از طریق بررسی مؤلفه‌هایی همچون روند، تغییرات فصلی و نوسانات تصادفی است. در علوم زمین و سنجش از دور، تحلیل سری‌های زمانی کاربرد گسترده‌ای در مطالعه پدیده‌هایی مانند جابه‌جایی پوخته زمین، فرونشست و تغییر شکل‌های ناشی از فعالیت‌های آتشفشانی دارد. با استفاده از ابزارهایی مانند تابع خودهمبستگی^۵ و مدل‌های سری زمانی می‌توان ساختار وابستگی زمانی داده‌ها را شناسایی و قابلیت پیش‌بینی رفتار آینده آن‌ها را ارزیابی کرد (Shumway and Stoffer, 2025). در یک سری زمانی با رفتار نویز سفید، خودهمبستگی معناداری میان مقادیر مشاهده‌شده در تأخیرهای مختلف وجود ندارد؛ در مقابل، وجود خودهمبستگی نشان می‌دهد که مقادیر فعلی تا حدی به مقادیر گذشته وابسته‌اند و سری دارای ساختار یا حافظه زمانی

فرونشست زمین، که گاهی از آن با عنوان زلزله خاموش یاد می‌شود، یک مخاطره زمین‌شناسی است (Park et al., 2014) که به نشست آهسته یا فرورفتگی سریع بخش‌های مختلف زمین گفته می‌شود که ناشی از تراکم رسوبات یا جابه‌جایی مواد در بخش‌های زیرسطحی با افزایش تنش مؤثر است (Bagheri-Gavkosh et al., 2021). فرونشست می‌تواند به دلیل فشردگی سیستم آبخوان ناشی از برداشت آب زیرزمینی (Galloway and Burbey, 2011)، فشار ساخت‌وسازهای انسانی، بهره‌برداری از منابع طبیعی مانند نفت و گاز و حرکات تکتونیکی در پوسته زمین رخ دهد (Du et al., 2018)، ولی در بسیاری از مناطق برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی عامل اصلی است (Pourghasemi and Mohseni Saravi, 2017; Rahimi et al., 2025). پدیده فرونشست در مناطق مسکونی، صنعتی و کشاورزی می‌تواند آثار تخریبی قابل‌توجهی به دنبال داشته باشد. این پدیده می‌تواند خطراتی برای خطوط لوله، جاده‌های ارتباطی، خطوط راه‌آهن، مناطق مسکونی و تخریب مناطق کشاورزی را به دنبال داشته باشد. در برخی موارد، فرونشست دائمی و برگشت‌ناپذیر است (Fijani and Zarei, 2024; Heidari et al., 2026). همچنین نشست زمین باعث تغییراتی در ضرایب هیدرودینامیک آبخوان می‌شود. معمولاً به دلیل فرونشست، تخلخل مفید آبخوان کاهش می‌یابد و به دنبال آن آبدهی ویژه و هدایت هیدرولیکی نیز به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد (شریفی کیا، ۱۳۹۱).

روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری فرونشست زمین وجود دارد، مانند سیستم تعیین موقعیت جهانی (GPS^1) و ترازیابی دقیق که دو روش ژئودتیکی برای پایش فرونشست زمین می‌باشند. هر دو روش محدود به ایستگاه‌های اندازه‌گیری هستند و نیازمند حضور میدانی و صرف زمان و هزینه نسبتاً زیادی هستند (آزرم و همکاران، ۱۴۰۱). روش‌های سنجش از دور از جمله روش تداخل‌سنجی راداری قادرند جابه‌جایی سطح زمین را با تفکیک‌پذیری مکانی بالا و پوشش گسترده

³ Small Baseline Subset⁴ LiCSAR Small Baseline Subset⁵ Autocorrelation¹ Global Positioning System² Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar

مقدار p بزرگتر از ۰/۰۵ نشان می‌دهد شواهد کافی برای رد فرض صفر و وجود خودهمبستگی معنادار وجود ندارد (Wang et al., 2025).

مدل ARIMA یکی از پرکاربردترین مدل‌های کلاسیک در تحلیل سری‌های زمانی است که با سه پارامتر (p, d, q) مشخص می‌شود: خودهمبستگی (AR) وابستگی به مقادیر گذشته، تعداد دفعات تفاضل‌گیری (I) برای ایستا کردن داده و میانگین متحرک (MA) وابستگی به خطاهای پیشین را نشان می‌دهد (Z. Zhang et al., 2025). این مدل انواع مختلفی دارد که هر کدام برای شرایط خاصی توسعه یافته‌اند. انتخاب نوع مدل به ماهیت داده (فصلی بودن، وجود متغیرهای کمکی، چندمتغیره بودن یا رفتار حافظه بلندمدت بستگی دارد (K. Zhang et al., 2025).

برای تعیین مقادیر بهینه p (مرتبه خودهمبستگی) و q (مرتبه میانگین متحرک) در مدل ARIMA، از دو ابزار گرافیکی اصلی استفاده می‌شود: تابع خودهمبستگی (ACF) و تابع خودهمبستگی جزئی (PACF). پس از ایستا کردن سری زمانی با تعداد تفاضل‌های مناسب (پارامتر d) نقش ACF و PACF روی سری ایستا شده بررسی می‌شود (Z. Zhang et al., 2025). به این صورت که اگر تابع PACF پس از چند تأخیر مشخص (مثلاً p تأخیر) به صفر برسد (قطع شود) و تابع ACF به تدریج کاهش یابد، مدل $AR(p)$ با همان مرتبه p انتخاب می‌شود برعکس، اگر تابع ACF پس از q تأخیر قطع شود و PACF به تدریج کاهش یابد، مدل $MA(q)$ با مرتبه q تعیین شود. در حالت‌های پیچیده‌تر که هر دو تابع رفتاری کاهش‌ی تدریجی دارند، مدل $ARIMA(p, q)$ مطرح می‌شود و برای انتخاب بهترین ترکیب p و q از معیارهایی مانند معیار اطلاعاتی آکائیکه (AIC^5) استفاده می‌شود تا مدلی با کمترین مقدار این معیار به عنوان مدل بهینه انتخاب گردد.

فناوری تداخل‌سنجی راداری به‌طور گسترده در پایش فرونشست به کار رفته است؛ برای نمونه در پژوهشی با SBAS-InSAR سه محدوده فرونشست در معدن مس دکسینگ با حداکثر نشست ۱۱۳۱/۹ میلی‌متر شناسایی شد (Xiao et al., 2022).

است. این تمایز در شناسایی الگوی حاکم بر سری و میزان پیش‌بینی‌پذیری آن اهمیت دارد.

یکی از رویکردهای متداول در تحلیل سری‌های زمانی یک‌متغیره، روش باکس-جنکینز^۱ است. این روش اساساً شامل برازش یک مدل ARIMA به داده‌ها می‌باشد (Amin et al., 2025). در این رویکرد، ویژگی‌های سری زمانی با استفاده از توابع خودهمبستگی و خودهمبستگی جزئی^۲ بررسی می‌شوند. در چارچوب مدل‌سازی ARIMA، لازم است سری پس از اعمال تعداد مناسب تفاضل‌گیری به مانایی برسد. یکی از پرکاربردترین آزمون‌های آماری برای بررسی مانایی (ایستایی) سری‌های زمانی، آزمون دیکی-فولر تعمیم‌یافته^۳ است. در یک سری مانا، میانگین و واریانس در طول زمان ثابت بوده و ساختار خودهمبستگی تنها به فاصله زمانی بین مشاهدات وابسته است، نه به زمان وقوع آن‌ها که پیش‌نیاز بسیاری از مدل‌های سری زمانی مانند ARIMA محسوب می‌شود (Liang et al., 2026). فرض صفر در این آزمون وجود ریشه واحد (ناایستایی) می‌باشد و رد آن (معمولاً با سطح معناداری ۰/۰۵) نشان‌دهنده مانایی سری است. آماره آزمون با مقادیر بحرانی در سطوح مختلف مقایسه شده و مقدار p -value نیز معیار تصمیم‌گیری را فراهم می‌کند (Xiao et al., 2024). این توابع به عنوان ابزارهای تشخیصی قدرتمندی عمل می‌کنند که ساختار حافظه داخلی سری‌های زمانی را آشکار می‌سازند. خودهمبستگی میزان همبستگی یک سری زمانی با مقادیر گذشته خود را در تأخیرهای زمانی مختلف نشان می‌دهد که برای شناسایی الگوهای تکراری، روندها یا رفتار فصلی کاربرد دارد. خودهمبستگی جزئی نیز همبستگی بین مشاهدات را در یک تأخیر مشخص، پس از حذف اثر تأخیرهای کوتاه‌تر، اندازه‌گیری می‌کند. این دو تابع معمولاً برای شناسایی ساختار وابستگی زمانی داده‌ها و تعیین مرتبه مدل‌های سری زمانی مانند ARIMA مورد استفاده قرار می‌گیرند (Raju et al., 2022). آزمون لیونگ باکس^۴ به منظور بررسی و شناسایی همبستگی پیاپی در سری‌های زمانی است. این آزمون یک آزمون مرکب است که به جای بررسی خودهمبستگی هر تأخیر بطور جداگانه، خودهمبستگی کلی را براساس تعدادی از تأخیرها ارائه می‌کند. فرض صفر آزمون بیان‌گر نبود خودهمبستگی معنادار تا وقفه مورد بررسی است. بنابراین،

⁴ Ljung-Box

⁵ Akaike Information Criterion

¹ Box-Jenkins

² Partial Autocorrelation

³ Augmented Dickey Fuller

مانایی داده‌ها تحلیل و مدل‌های سری زمانی ARIMA به‌عنوان ابزاری تفسیرپذیر برای شناسایی نوع وابستگی به مقادیر گذشته و تفکیک مؤلفه‌های روند و نوسان به کار گرفته شد. انتخاب این مدل مبتنی بر هدف پژوهش در تبیین رفتار دینامیکی فرونشست و امکان مقایسه ساختار زمانی ایستگاه‌های واقع در واحدهای زمین‌شناسی مختلف بوده و صرفاً به پیش‌بینی مقادیر آینده محدود نمی‌باشد. این تحلیل از آن جهت حائز اهمیت است که رفتار فرونشست در واحدهای زمین‌شناسی مختلف می‌تواند الگوی کاملاً متفاوتی داشته باشد. تمایز این پژوهش نسبت به مطالعات مشابه جهانی (Takafuji et al., 2019; Xiao et al., 2024) در تمرکز همزمان بر تفکیک دینامیک فرونشست در واحدهای زمین‌شناسی ریزدانه و درشت‌دانه و استفاده از مدل ARIMA نه صرفاً برای پیش‌بینی، بلکه به عنوان ابزاری تفسیرپذیر برای شناسایی ساختار خودهمبستگی و الگوی حاکم بر هر واحد است.

مواد و روش‌ها

گستره مورد مطالعه

گستره مورد مطالعه در حوضه آبریز دشت ورامین در جنوب شرقی استان تهران و در دامنه جنوبی رشته‌کوه‌های البرز، در گستره‌ای بین $29^{\circ} 55'$ تا $0^{\circ} 56'$ طول شرقی و 28° تا $29^{\circ} 58'$ عرض شمالی قرار دارد. حوضه ورامین از شرق به حوضه‌های آبریز ایوانکی و گرمسار، از غرب به حوضه‌های آبریز تهران - کرج، از جنوب به حوضه آبریز دریاچه نمک و از شمال به حوضه لواسانات محدود شده است. تراز توپوگرافی متوسط محدوده مطالعاتی ورامین 1024 متر با دامنه تغییرات 810 تا 2310 متر از سطح آب‌های آزاد واقع شده است. رودخانه جاجرود که اصلی‌ترین منبع آب سطحی این دشت است از شمال شرق به سمت جنوب جریان دارد، همچنین رودخانه شور از غرب محدوده وارد این گستره شده و با پیوستن به رودخانه جاجرود از جنوب گستره خارج می‌شود. با توجه به این که دشت ورامین در مجاورت کویر مرکزی ایران قرار دارد، دارای آب و هوای گرم و خشک با میانگین دمای 21 درجه سانتی‌گراد است. مقادیر متوسط باران

(Wang et al., 2025) نرخ فرونشست $2/4$ میلی‌متر در سال را در دشت سونگن با شعاع اثر 800 متر گزارش کرده‌اند. در زمینه مدل‌سازی سری زمانی، پژوهشگران عمدتاً بر پیش‌بینی متمرکز بوده‌اند؛ از جمله مدل EMD-ARIMA¹ توسط ژائو همکاران (Xiao et al., 2024) و ARIMA-BP² توسط (Wang et al., 2025) که هر دو بهبود دقت نسبت به ARIMA را نشان دادند. در حوزه آب زیرزمینی نیز تبسم و صدیقه (Tabassum and Seddiq, 2026) با ARIMA(0,1,0) افت 25 متری آب تا 2050 را در میمنسینگ بنگلادش پیش‌بینی کردند. با این حال، آنچه در تمامی این مطالعات در نظر گرفته نشده است، تحلیل ساختار همبستگی ذاتی سری‌های زمانی به‌عنوان بازتابی از ویژگی‌های فیزیکی محیط است. هیچ‌یک بررسی نکرده‌اند که آیا رفتار خودهمبسته یا تصادفی فرونشست در واحدهای ریزدانه و درشت‌دانه تفاوت بنیادین دارد یا خیر. پژوهش حاضر با پر کردن این شکاف، ARIMA را نه به‌عنوان یک ابزار پیش‌بینی صرف، بلکه به عنوان ابزاری تشخیصی برای شناسایی الگوی دینامیکی حاکم بر هر واحد زمین‌شناسی به کار می‌گیرد.

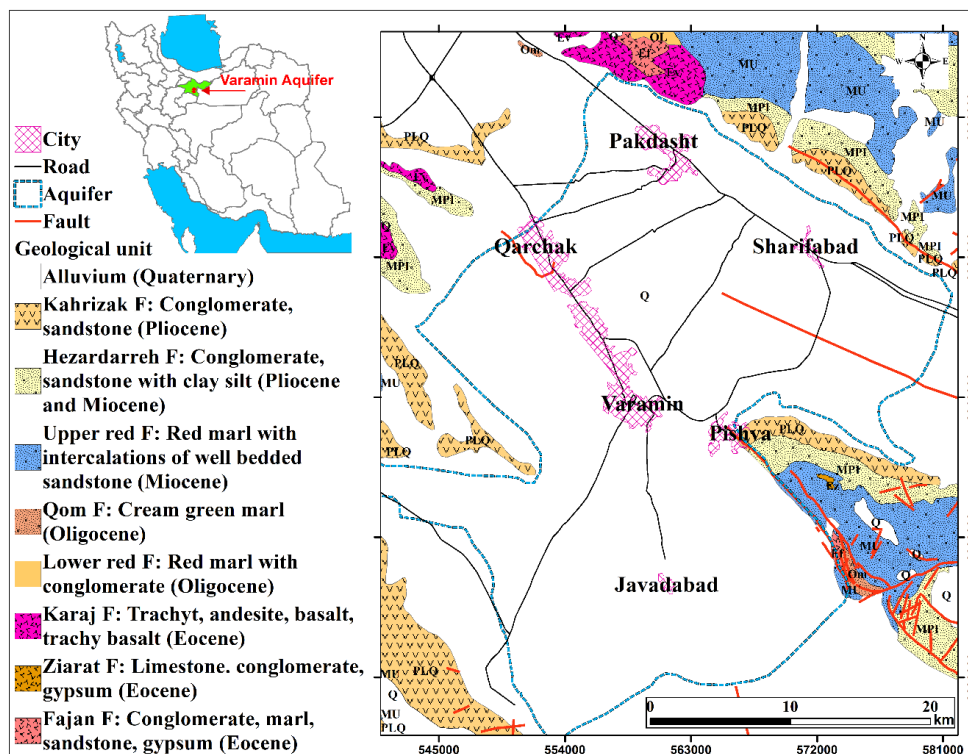
دشت ورامین در جنوب‌شرق شهر تهران طی سال‌های اخیر با فرونشست زمین مواجه بوده است؛ پدیده‌ای که علاوه بر خسارات گسترده به زیرساخت‌های شهری، کشاورزی و صنعتی، موجب تغییرات عمدتاً غیرقابل بازگشت در ساختار آبخوان و کاهش ظرفیت ذخیره آن می‌شود. با وجود مطالعات متعدد در زمینه پایش مکانی فرونشست و بررسی ارتباط آن با افت سطح آب زیرزمینی، تمرکز اغلب پژوهش‌ها بر برآورد تجمعی یا پهنه‌بندی شدت فرونشست بوده و تحلیل ساختار دینامیکی و رفتار زمانی این پدیده در مقیاس آبخوان کمتر مورد توجه قرار گرفته است. به‌ویژه ناهمگنی رفتاری فرونشست در واحدهای زمین‌شناسی مختلف و تفاوت الگوهای وابستگی زمانی در بخش‌های مختلف آبخوان کم‌تر مورد توجه بوده است. از این‌رو، هدف این پژوهش تحلیل دینامیک زمانی فرونشست و مقایسه الگوهای رفتاری آن در بخش‌های مختلف دشت با تأکید بر جنس لایه‌های زمین‌شناسی است. بدین منظور، با استفاده از سری زمانی استخراج‌شده از داده‌های تداخل‌سنجی راداری، ساختار خودهمبستگی و ویژگی‌های

² ARIMA Autoregressive Integrated Moving Average

¹ Empirical Mode Decomposition- ARIMA

رس)، کهریزک (کنگلومرا و ماسه‌سنگ) و آبرفت‌های کنونی هستند (شکل ۱). سنگ‌کف در مرکز دشت نزدیک شهر پیشوا بالا آمده و یک تاقدیس را تشکیل داده است، در نتیجه آبخوان را به دو بخش شمالی و جنوبی تقسیم کرده است. بخش شمالی آبخوان عمیق و رسوبات دانه‌درشت اما بخش جنوبی آبخوان کم‌عمق و رسوبات ریزدانه هستند.

در دشت و ارتفاعات گستره مطالعاتی ورامین به ترتیب ۱۵۷/۵ و ۱۹۷/۸ میلی‌متر در سال است. از نظر ساختار زمین‌شناسی این دشت در پهنه ایران مرکزی جای دارد. رخنمون‌های زمین‌شناسی در منطقه از قدیم به جدید شامل سازندهای کرج (داسیت و سنگ‌های آذرآواری)، قرمز فوقانی (شیل سنگ‌های تبخیری)، هزاردره (کنگلومرا و ماسه‌سنگ همراه سیلت و

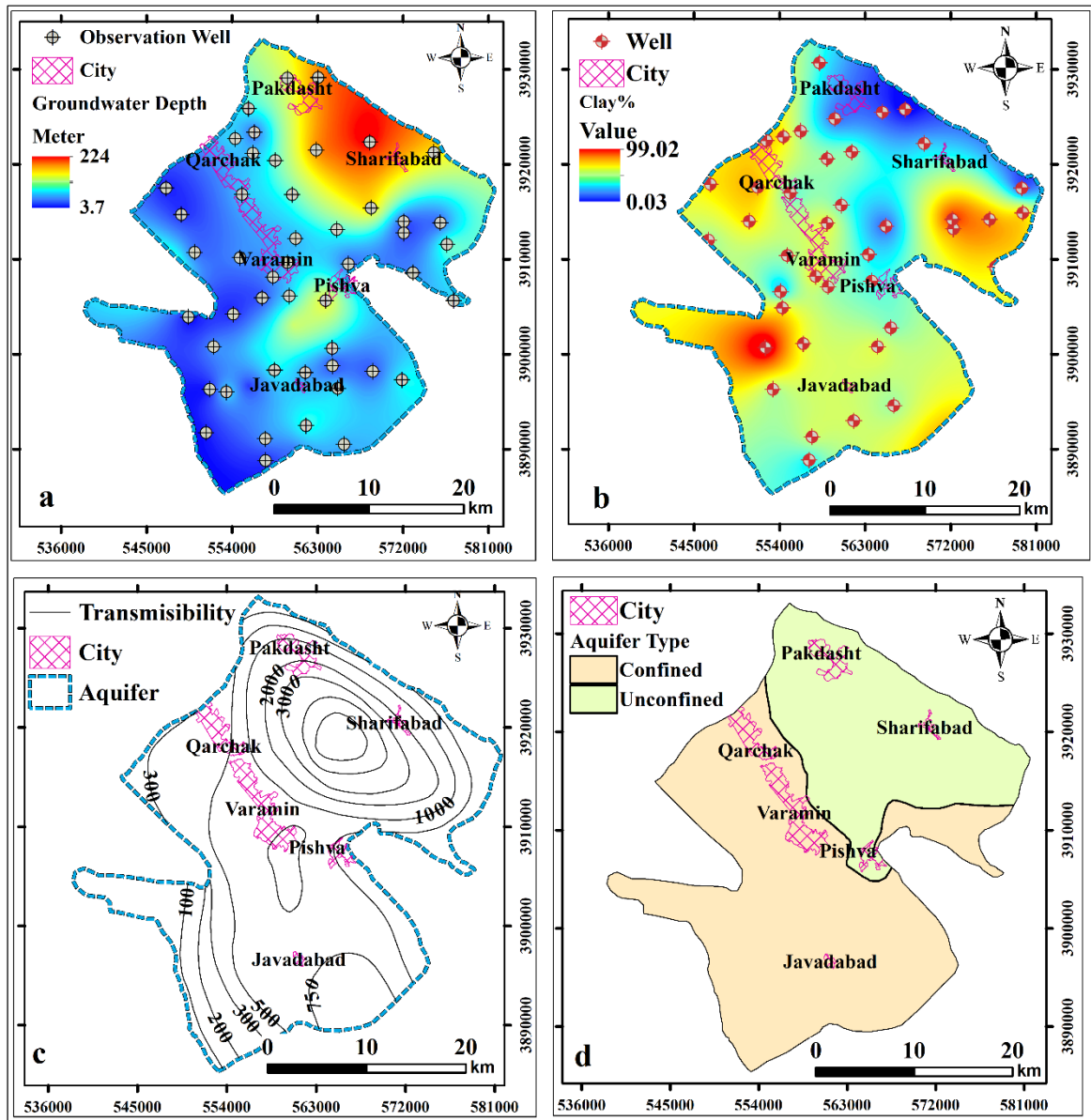


شکل ۱- گستره آبخوان ورامین بر روی نقشه زمین‌شناسی (Haddadan and Mohammadian, 2006).

Figure 1- The extent of the Varamin aquifer on the geological map (Haddadan and Mohammadian, 2006).

زیرزمینی در منطقه از شمال غرب به سمت جنوب شرق است. شمال دشت عمدتاً از رسوبات درشت دانه تشکیل شده و در جنوب بیش‌تر ریزدانه است (شکل ۲). در شمال گستره قابلیت انتقال آب زیرزمینی ۵۰۰۰ متر مربع بر روز و در جنوب قابلیت ۲۰۰ متر مربع بر روز است (شکل ۲). بر اساس آمار شرکت مدیریت منابع آب ایران میزان کل تخلیه از آبخوان آبرفتی توسط چاه، چشمه و قنات ۳۸۹/۹۵ میلیون متر مکعب می‌باشد که از این میزان تخلیه، ۳۸۱/۳۲ میلیون متر مکعب مرتبط با تعداد ۲۰۰۱ حلقه چاه عمیق و ۱۰۴۹ حلقه چاه نیمه عمیق و ۸/۶۲ میلیون متر مکعب مرتبط با ۱۶ رشته قنات می‌باشد. سهم چشمه‌ها در تخلیه از این آبخوان آبرفتی بسیار ناچیز و در حدود ۰/۰۰۶ میلیون متر مکعب می‌باشد.

از دیدگاه هیدروژئولوژی دشت ورامین دارای سه نوع آبخوان آزاد، تحت‌فشار و معلق بوده است. آبخوان در بخش شمالی دشت از نوع غیرمحبوس و در مرکز و جنوب آن از نوع محبوس بوده است (شکل ۲)، ضمن این که آبخوان‌های معلق نیز در بخش شمالی به‌طور پراکنده وجود دارند. در سال‌های اخیر به دلیل بهره‌برداری بیش از حد مجاز از آب زیرزمینی و افت سطح ایستابی، آبخوان در بخش مرکز و جنوب دشت از حالت محبوس به حالت غیرمحبوس تغییر کرده است. بیشترین ضخامت آبخوان در شمال دشت ورامین ۳۰۰ متر و کمترین ضخامت آبرفت در جنوب غربی دشت ورامین ۱۵۰ متر است. عمق آب زیرزمینی در آبخوان اصلی بین ۲۲۴-۴ متر زیر سطح زمین است (شکل ۲). جهت عمومی جریان آب



شکل ۲- نقشه‌های (a) عمق آب زیرزمینی، (b) درصد رس، (c) قابلیت انتقال و (d) گستره محبوس و غیرمحبوس در آبخوان ورامین.
Figure 2- Maps of a) groundwater depth, b) clay percentage, c) transmissivity, and d) confined and unconfined extent in the Varamin aquifer.

روش‌شناسی

در مرحله اول، محصولات آماده LiCSAR (شامل اینترفروگرام‌های باز شده^۱ و نقشه‌های همدوسی^۲) از پورتال COMET-LiCS دانلود شده و به فرمت باینری ۴-بایتی با ممیز شناور تک‌دقتی تبدیل شدند. سپس تصحیح اثرات تروپوسفری با استفاده از داده‌های GACOS^۳ اعمال شده و تصاویر مطابق با گستره مورد مطالعه برش داده شدند. در مرحله تحلیل سری زمانی، اینترفروگرام‌های بی‌کیفیت و دارای خطای بازشدگی با استفاده از آزمون بسته‌شدگی حلقه

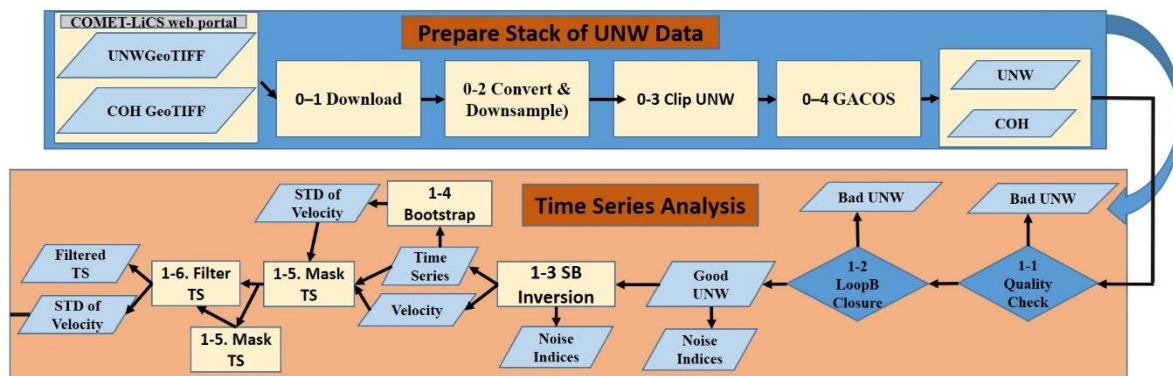
پردازش سری زمانی InSAR در این روش عمدتاً به دو بخش آماده‌سازی دسته‌ای از داده‌های دسته‌بندی نشده و خام (مرحله صفر) و تجزیه و تحلیل سری‌های زمانی (مرحله یک) تقسیم می‌شود. روندنمای مراحل پردازش تصاویر برای محاسبه فرونشست در شکل ۳ نشان داده شده است (Morishita et al., 2020). در این پژوهش مقدار فرونشست از مهرماه سال ۱۳۹۳ تا تیرماه سال ۱۴۰۳ محاسبه شده است.

³ Generic Atmospheric Correction Online Service for InSAR

¹ Unwrapped
² coherence maps

جابجایی و نقشه‌های سرعت با دقتی در حدود میلی‌متر است. روش LiCSBAS به‌عنوان یک چارچوب معتبر برای استخراج سری زمانی جابه‌جایی سطح زمین از داده‌های Sentinel-1، در مطالعات متعددی برای پیش‌فروشنشت مورد استفاده قرار گرفته است. در این پژوهش، مقادیر نشست استخراج‌شده از LiCSBAS به‌عنوان داده‌های مشاهده‌ای در نظر گرفته شده و برای ارزیابی عملکرد مدل‌های پیش‌بینی با مقادیر پیش‌بینی‌شده مقایسه شدند.

به‌صورت خودکار شناسایی و حذف شدند. سپس وارون‌سازی شبکه SBAS با اعمال قید زمانی (NSBAS^۱) انجام شده و سری زمانی جابجایی و نقشه سرعت محاسبه شد. در ادامه، پیکسل‌های نویزی با استفاده از شاخص‌های مختلف کیفیت (مانند میانگین همدوسی، تعداد شکاف زمانی، انحراف معیار سرعت فرونشست و تعداد خطاهای بسته‌شدگی حلقه) ماسک شده و در نهایت فیلتر مکانی-زمانی برای کاهش نویز باقیمانده اعمال گردید (شکل ۳). خروجی نهایی شامل سری‌های زمانی



شکل ۳- روندنمای محاسبه فرونشست در نرم‌افزار LiCSBAS (Morishita et al., 2020).

Figure 3- Workflow for calculating the subsidence in LiCSBAS software (Morishita et al., 2020).

پژوهش مقایسه رفتار زمانی فرونشست در ایستگاه‌های مختلف با یک چارچوب آماری یکسان بود، اعمال مرتبه متفاوت تفاضل‌گیری برای تعداد محدودی از ایستگاه‌ها می‌توانست قابلیت مقایسه نتایج را کاهش دهد؛ بنابراین این دو ایستگاه از ادامه تحلیل حذف شدند و تعداد چاه‌های مورد بررسی به ۹ حلقه کاهش یافت.

برای انتخاب مدل‌های ARIMA مناسب برای هر یک از سری‌های زمانی تفاضل‌گیری‌شده (مرتبه اول) مربوط به چاه‌های فرونشست، از تحلیل توابع خودهمبستگی (ACF) و خودهمبستگی جزئی (PACF) با روش باکس-جنکینز برای شناسایی و مدل‌سازی سری‌های زمانی استفاده شده است. با توجه به مانا بودن سری‌ها پس از یک بار تفاضل، الگوهای ACF و PACF برای تعیین مرتبه‌های اولیه AR و MA بررسی شدند و مدل نهایی با مقایسه معیارهای اطلاعاتی و بررسی نبود خودهمبستگی معنادار در باقیمانده‌ها انتخاب شد. مدل نهایی برای هر سری بر اساس کم‌ترین مقدار معیار اطلاعاتی آکائیک (AIC) و همچنین نبود خودهمبستگی در باقیمانده‌ها

در این پژوهش ۱۴ چاه مشاهده‌ای با داده‌های کامل انتخاب شدند. از میان آن‌ها، W-01، W-02 و W-07 به دلیل نبود فرونشست قابل‌توجه از ادامه تحلیل کنار گذاشته شدند؛ بنابراین، بررسی مانایی برای ۱۱ ایستگاه انجام شد. بررسی ایستایی سری‌های زمانی با استفاده از آزمون دیکی-فولر تعمیم‌یافته (ADF) انجام شد. نتایج آزمون بر روی داده‌های سری‌های زمانی فرونشست نشان داد که تمامی متغیرها دارای p-value بزرگ‌تر از ۰/۰۵ هستند (جدول ۱)، بنابراین همگی نایستا تشخیص داده شدند. به‌منظور رفع نایستایی، داده‌ها یک بار تفاضل‌گیری شده و مجدداً آزمون ADF روی سری‌های تفاضل مرتبه اول اجرا شد. نتایج این مرحله حاکی از آن است که اکثر متغیرها پس از یک بار تفاضل به سطح مانایی رسیده‌اند (p-value کوچک‌تر از ۰/۰۵). با این حال، دو متغیر W-10 و W-12 علی‌رغم تفاضل‌گیری مرتبه اول، همچنان دارای p-value به ترتیب ۰/۵۴ و ۰/۴۹ بودند و نایستا باقی ماندند (جدول ۱). این متغیرها برای دستیابی به مانایی نیاز به تفاضل‌گیری مرتبه دوم داشتند. با توجه به اینکه هدف این

^۱ New Small Baseline Subset

(آزمون لیونگ-باکس) انتخاب شد. در ادامه، دلیل انتخاب هر مدل به اختصار شرح داده می‌شود:

جدول ۱- داده‌های بررسی ایستایی داده‌های فرونشست و تفاضل مرتبه اول فرونشست.

Table 1- Data for stationarity analysis of subsidence data and first-order difference of subsidence.

Original Data				First-order differencing		
Name	ADF Statistic	p-value	Is Stationary (p<0.05)	ADF Statistic	p-value	Is Stationary (p<0.05)
W-03	-2.05	0.26	Non-Stationary	-5.88	0.00	Stationary
W-04	-2.75	0.07	Non-Stationary	-3.14	0.02	Stationary
W-05	-0.20	0.94	Non-Stationary	-7.44	0.00	Stationary
W-06	-0.70	0.85	Non-Stationary	-15.72	0.00	Stationary
W-08	-1.97	0.30	Non-Stationary	-16.97	0.00	Stationary
W-09	0.14	0.97	Non-Stationary	-6.01	0.00	Stationary
W-10	1.80	1.00	Non-Stationary	-1.48	0.54	Non-Stationary
W-11	1.90	1.00	Non-Stationary	-12.43	0.00	Stationary
W-12	1.96	1.00	Non-Stationary	-1.58	0.49	Non-Stationary
W-13	0.17	0.97	Non-Stationary	-12.74	0.00	Stationary
W-14	0.56	0.99	Non-Stationary	-8.81	0.00	Stationary

معنی‌داری در برخی وقفه‌های بالاتر، مدل AR(1) بر اساس AIC انتخاب شد.

W-14: مشابه W-11، ACF در وقفه اول (۰/۱۹۵) معنی‌دار است و PACF نیز در وقفه اول قطع می‌شود، هر چند وقفه‌های ۱۱ و ۱۲ نیز معنی‌دار هستند. مدل AR(1) انتخاب شد.

W-13: مشابه W-06، ACF تنها در وقفه اول معنی‌دار (۰/۱۶۶-) است، و سپس کاهش می‌یابد، بنابراین مدل MA(1) برگزیده شد.

در ادامه به منظور مدل‌سازی و پیش‌بینی پدیده فرونشست زمین در ایستگاه‌های مختلف، از خانواده مدل‌های خودبازگشتی میانگین متحرک انباشته (ARIMA) استفاده شد. انتخاب این مدل‌ها به دلیل توانایی آن‌ها در شناسایی دینامیک‌های خطی و ایستا بودن سری‌های زمانی فرونشست (استفاده از آزمون‌های ریشه واحد) صورت پذیرفت. برای هر ایستگاه، پس از بررسی توابع خودهمبستگی و خودهمبستگی جزئی، مرتبه‌های مختلف مدل‌های ARIMA برآورد و با معیارهای اطلاعاتی آکائیک و بیزین^۱ مقایسه شدند. مدل نهایی برای هر ایستگاه بر اساس کم‌ترین مقدار معیار اطلاعاتی آکائیک و همچنین معنی‌داری پارامترها و نبود خودهمبستگی در مانده‌ها (با استفاده از آزمون لیونگ-باکس) انتخاب شد.

در این پژوهش، سری‌های زمانی جابجایی سطح زمین برای ۱۴ حلقه چاه مشاهده‌ای در دشت ورامین با استفاده از پردازش تداخل‌سنجی راداری مبتنی بر روش SBAS و بسته نرم‌افزاری LiCSBAS بر روی تصاویر Sentinel-1 بازه زمانی مهر ۱۳۹۳

W-06: الگوی ACF تنها در وقفه اول معنی‌دار است و سپس کاهش می‌یابد، در حالی که PACF به تدریج کاهش می‌یابد. این رفتار نشان‌دهنده یک مدل MA(1) است که با مقادیر ACF و PACF (وقفه اول به ترتیب ۰/۳۶- و ۰/۳۷-) سازگار می‌باشد.

W-05: هر دو تابع ACF و PACF دارای چندین وقفه معنی‌دار (تا وقفه ۱۲) هستند که نشان از وجود ساختار پیچیده‌تر دارد. مدل ARMA(4,4) با کم‌ترین AIC انتخاب شد.

W-08: ACF تنها در وقفه اول معنی‌دار (۰/۴۲۹-) است و سپس کاهش می‌یابد، اما PACF در وقفه‌های ۱ و ۳ معنی‌دار است. مدل ARMA(2,2) انتخاب شد.

W-04: ACF تنها در وقفه اول معنی‌دار (۰/۲۹۴-) و سپس کاهش می‌یابد، اما PACF در وقفه‌های ۱ و ۳ معنی‌دار است (به ترتیب ۰/۲۹۷- و ۰/۱۸۱). مدل ARMA(2,2) انتخاب شد.

W-03: ACF در وقفه دوم (۰/۲۳۳) و چند وقفه بعدی معنی‌دار است؛ PACF نیز در وقفه دوم معنی‌دار است و سپس کاهش می‌یابد. مدل ARMA(2,1) مناسب تشخیص داده شد. W-09: هر دو تابع ACF و PACF در وقفه‌های متعددی (۱، ۵، ۶، ۷، ۱۰، ۱۱، ۱۲) معنی‌دار هستند، لذا مدل ARMA(4,4) با کم‌ترین AIC انتخاب شد.

W-11: ACF در وقفه اول (۰/۱۴۸-) معنی‌دار است و سپس نوسان دارد؛ PACF نیز در وقفه اول معنی‌دار است. با وجود

¹ Bayesian Information Criterion

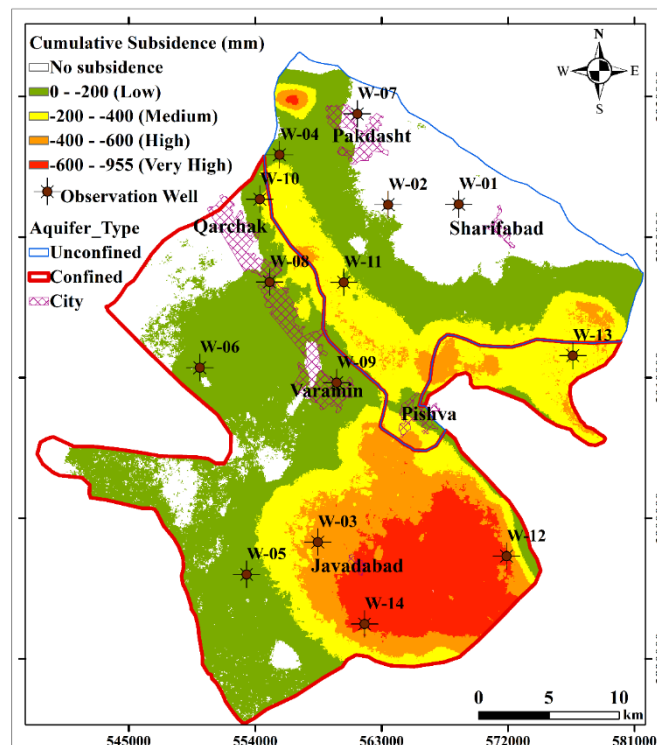
۹۵۵ میلی‌متر محاسبه شد. کانون اصلی این پدیده در جنوب غرب گستره مورد مطالعه است که علاوه بر داشتن بیش‌ترین مقدار، در جنوب و جنوب شرق گستره مورد مطالعه گسترش دارد. در این بخش آبخوان محبوس به غیرمحبوس تبدیل شده است. یک کانون کاملاً مشخص و نقطه‌ای در شمال غرب شهر پاکدشت با ۸۵۰ میلی‌متر فرونشست مشاهده می‌شود. در ناحیه شمالی شهرهای ورامین و پاکدشت، یک نوار نسبتاً عریض با فرونشست تجمعی ۴۰۰-۲۰۰ و در برخی مناطق آن ۶۰۰-۴۰۰ میلی‌متر فرونشست رخ داده است. در سایر بخش‌های آبخوان، فرونشست وجود ندارد یا فرونشست تجمعی حداکثر به ۲۰ میلی‌متر در ۱۰ سال رسیده است. شمال گستره مورد مطالعه علی‌رغم داشتن افت ۵۰ متری آب زیرزمینی به علت درشت دانه بودن آبرفت هیچ گونه فرونشستی مشاهده نشده است، چاه‌های W-01، W-07 و W-02 که در این بخش قرار دارند به علت نداشتن فرونشست از ادامه مطالعه حذف شدند. براساس فرونشست تجمعی، گستره مورد مطالعه به ۵ بخش بدون فرونشست، فرونشست کم (۲۰۰-۰ میلی‌متر)، فرونشست متوسط (۴۰۰-۲۰۰ میلی‌متر)، فرونشست زیاد (۶۰۰-۴۰۰ میلی‌متر) و فرونشست خیلی زیاد (بیش از ۶۰۰ میلی‌متر) تقسیم شد (شکل ۴).

جدول ۲ خلاصه‌ای از مدل‌های نهایی به همراه معیارهای ارزیابی دقت در دوره آزمایش (MAE، RMSE، MAPE) را نشان می‌دهد. مقادیر سطح معناداری آزمون لیونگ-باکس برای تمامی مدل‌ها بزرگ‌تر از ۰/۰۵ است که بیان‌گر کفایت مدل در تبیین همبستگی‌های سری زمانی می‌باشد. دقت پیش‌بینی مدل‌ها در دوره آزمایش با استفاده از معیارهای خطا محاسبه شده است. هرچند در برخی ایستگاه‌ها مانند W-11 مقدار MAPE بالا گزارش شده است، این موضوع به دلیل ماهیت نسبی این شاخص و حساسیت آن به مقادیر کوچک نشست در گام‌های زمانی آزمون است. بنابراین، مقدار بالای MAPE الزاماً بیان‌گر خطای زیاد مدل در مقیاس واقعی فرونشست نیست. با توجه به اینکه معیارهای MAE و RMSE میزان خطای پیش‌بینی را نشان می‌دهند، ارزیابی عملکرد مدل‌ها بر اساس ترکیبی از این معیارها انجام شد و MAPE به‌عنوان یک شاخص مکمل مورد استفاده قرار گرفت.

تا تیر ۱۴۰۳ استخراج شد. پس از بررسی مانایی با آزمون دیکی-فولر تعمیم‌یافته (ADF) و تأیید ایستایی با تحلیل میانگین متحرک و انحراف معیار سری‌های تفاضل مرتبه اول، مدل‌سازی سری زمانی با رویکرد باکس-جنکینز و با استفاده از مدل‌های ARIMA انجام پذیرفت. توابع خودهمبستگی و خودهمبستگی جزئی تا تأخیر ۲۰ محاسبه و الگوهای کاهش یا قطع شدگی آن‌ها مبنای تعیین مرتبه اولیه مدل قرار گرفت. سپس با جستجوی سیستماتیک در فضای پارامترهای (p,q) و بهینه‌سازی بر اساس کمترین معیار آکائیک (AIC)، مدل نهایی برای سری تفاضل مرتبه اول هر چاه برآزش شد. به منظور ارزیابی توانایی پیش‌بینی مدل‌ها، داده‌های سری زمانی به دو بخش آموزش (۸۰ درصد ابتدایی) و آزمون (۲۰ درصد انتهایی) تقسیم شدند. مدل‌های حاصل از بخش آموزش با مقادیر مشاهده‌شده دوره آزمون مقایسه و معیارهای MAE، RMSE و MAPE برای ارزیابی عملکرد آن‌ها محاسبه شد. اعتبار مدل‌ها با آزمون لیونگ-باکس (عدم خودهمبستگی باقیمانده‌ها در سطح اطمینان ۹۵٪) تأیید شد. کلیه مراحل محاسباتی با برنامه‌نویسی در زبان پایتون و با استفاده از کتابخانه statsmodels پیاده‌سازی شد. پس از برآزش مدل نهایی روی کل سری تفاضل، پیش‌بینی برای ۱۲ گام آینده (۱۲ ماه) انجام شد و با انتگرال‌گیری تجمعی سری پیش‌بینی به مقیاس اصلی فرونشست بازگردانده شد. داده‌های تراز آب زیرزمینی و لاگ زمین‌شناسی چاه‌ها (شامل جنس رسوبات، درصد رس، ضریب قابلیت انتقال و نوع آبخوان) از شرکت مدیریت منابع آب ایران (منطقه‌ای تهران) تهیه شد. در نهایت، به منظور بررسی ناهمگنی رفتار فرونشست در واحدهای زمین‌شناسی مختلف، فرونشست ۱۰ ساله و افت سطح آب زیرزمینی در بازه ۱۳۸۳ تا ۱۴۰۳ بر روی لاگ چاه‌ها رسم شد و ارتباط میان متغیرهای محیطی (عمق آب زیرزمینی، درصد رس، قابلیت انتقال، نوع آبخوان) با الگوی دینامیکی و فرونشست در ایستگاه‌های مختلف تحلیل گردید.

نتایج و بحث

بیش‌ترین فرونشست در آبخوان ورامین برای دوره ۱۰ ساله (مهر ۱۳۹۳ تا تیر ۱۴۰۳) در بخش‌های جنوبی گستره مقدار



شکل ۴- نقشه فرونشست تجمعی، چاه‌های مشاهده‌ای و نوع آبخوان ورامین در بازه زمانی مهرماه ۱۳۹۳ تا تیرماه ۱۴۰۳.

Figure 4- Map of cumulative subsidence, observation wells, and aquifer type of Varamin in the period from September 2014 to June 2024.

جدول ۲- خلاصه مدل‌های خودرگرسیو میانگین متحرک انباشته (ARIMA) برازش‌یافته برای سری‌های زمانی فرونشست در چاه‌های مشاهده‌ای منتخب دشت ورامین، همراه با مقادیر معیارهای اطلاعاتی آکائیک و بیزین، مقدار p آزمون لیونگ-باکس و شاخص‌های دقت پیش‌بینی شامل MAE و RMSE بر حسب میلی‌متر و MAPE بر حسب درصد.

Table 2- Summary of fitted Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA) models for subsidence time series at selected observation wells in the Varamin Plain, along with Akaike and Bayesian information criteria, p -values of the Ljung-Box test, and prediction accuracy metrics, including MAE and RMSE in millimeters and MAPE in percent.

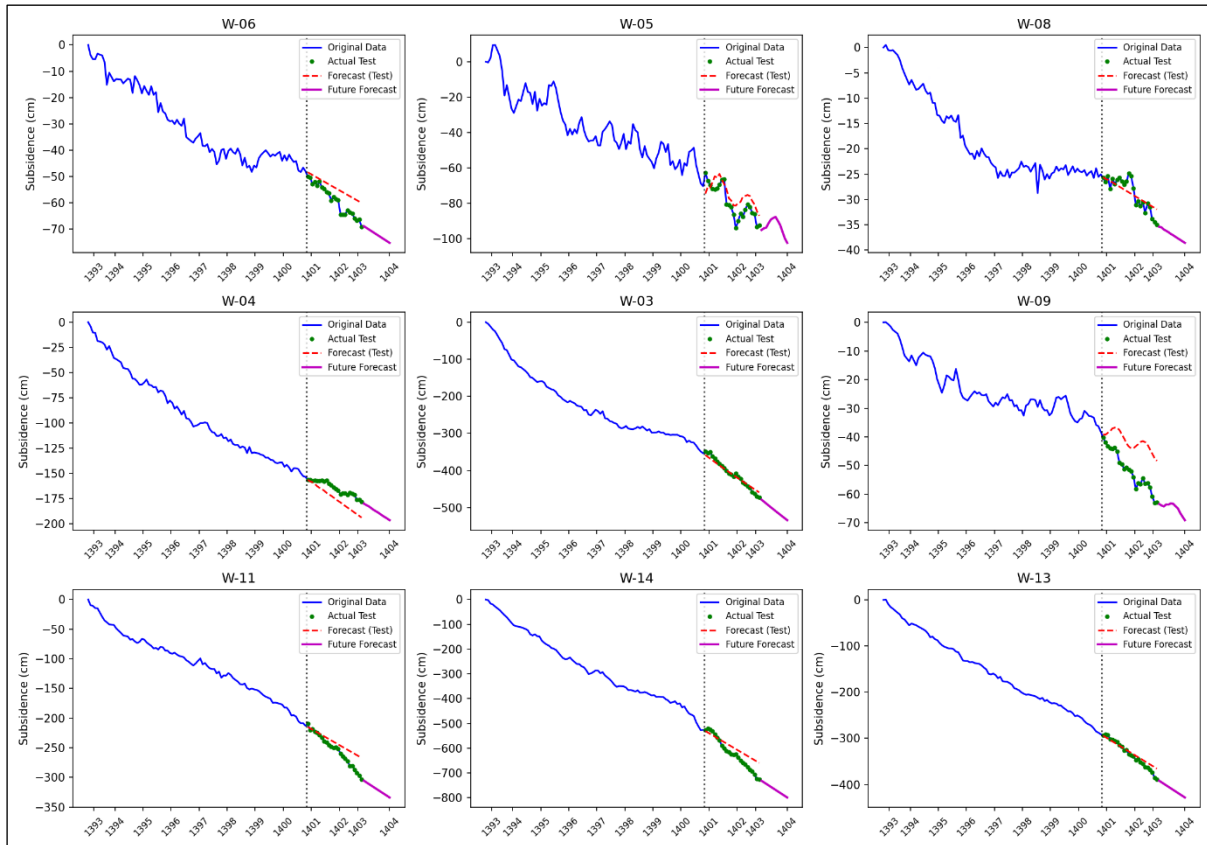
Name	ARIMA (p,d,q)	AIC	BIC	Ljung-Box	%MAE(mm)	RMSE (mm)	MAPE
W-06	ARIMA(0,1,1)	528.23	536.55	0.78	1.22	1.65	114.01
W-05	ARIMA(4,1,4)	705.79	733.5	0.17	3.86	4.97	247.73
W-08	ARIMA(2,1,2)	392.63	409.25	0.85	1.16	1.42	90.46
W-04	ARIMA(2,1,2)	541.45	558.07	0.93	1.30	1.65	603.30
W-03	ARIMA(2,1,1)	713.61	727.46	0.57	3.46	4.73	58.9
W-09	ARIMA(4,1,4)	448.84	476.55	0.85	1.4	1.75	190.07
W-11	ARIMA(1,1,0)	619.87	628.18	0.27	2.93	3.55	1022.62
W-14	ARIMA(1,1,0)	769.99	778.3	0.62	5.5	6.66	338.91
W-13	ARIMA(0,1,1)	605.26	613.57	0.69	3.08	3.86	101.45

روند کلی پیش‌بینی‌ها حاکی از ادامه فرونشست با شیبی نسبتاً ثابت در اغلب ایستگاه‌ها است. در ایستگاه W-14 پیش‌بینی می‌شود مقدار فرونشست از ۷۳۱/۷ در گام اول به ۷۹۹/۰ در گام دوازدهم برسد که نشان‌دهنده افزایش حدود ۶۷/۳ میلی‌متر در مقدار تجمعی فرونشست طی دوره پیش‌بینی است.

در محدوده ورامین فرونشست رفتار متفاوتی دارد. در ایستگاه W-06، ساختار میانگین متحرک غالب است که بیان‌گر وابستگی بیشتر سری به نوسانات و خطاهای کوتاه‌مدت گذشته است. اما چاه‌های W-11 و W-14 بیش‌تر تحت تأثیر فرونشست‌های قبلی هستند و نشان‌دهنده یک روند ادامه‌دار در موقعیت این چاه‌ها است.

براساس مدل‌های به دست آمده مقدار فرونشست به صورت ماهانه برای سال بعد مورد محاسبه قرار گرفت. نتایج دوره‌های ۳، ۶ و ۱۲ ماهه فرونشست تجمعی پیش‌بینی شده در شکل ۵ ارائه شده است. مقادیر پیش‌بینی شده فرونشست روندی

مشابه مقادیر محاسباتی دارند. چاه‌های W-08 و W-09 همچنان کم‌ترین فرونشست و چاه W-14 با اختلاف بیش‌ترین مقدار فرونشست را دارد.



شکل ۵- نمودار داده‌های واقعی، تست و پیش‌بینی مقادیر فرونشست در چاه‌های مشاهده‌ای.

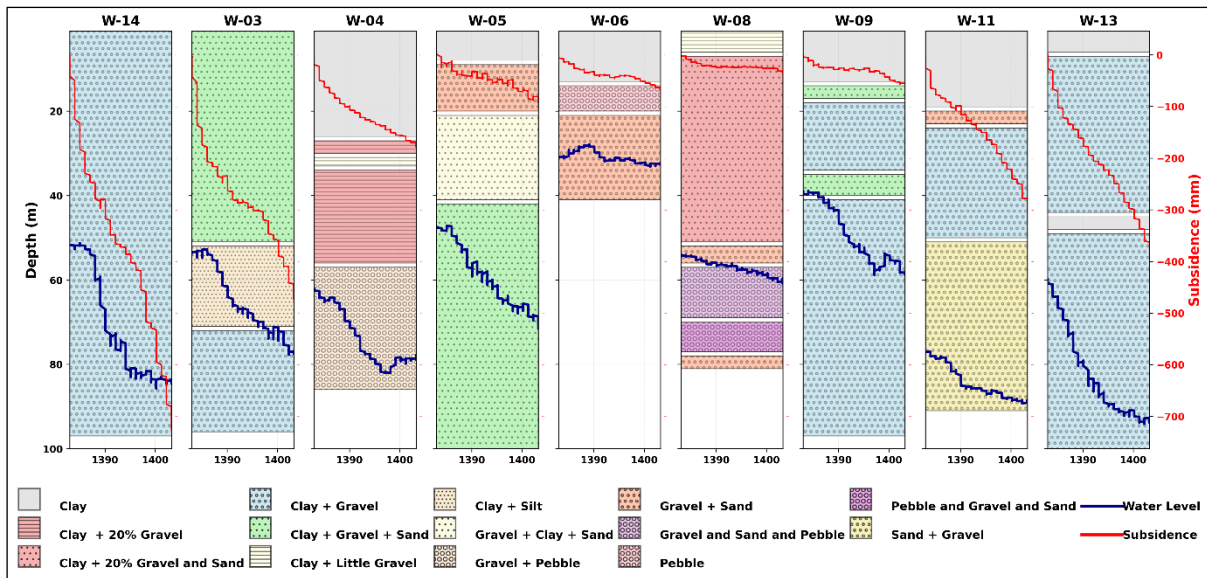
Figure 5- Chart of actual data, test, and predicted subsidence values at observation wells.

زیرزمینی و آبرفت درشت‌دانه، فرونشست ۳۰۱/۸ میلی‌متری دارد. در این چاه عمق آب زیرزمینی بیش از ۸۰ متر و جنس رسوبات بالاتر از سطح ایستابی ریزدانه است، بنابراین فرونشست در این چاه می‌تواند ناشی از لایه‌های ریزدانه بالایی باشد. چاه W-13 ۳۰ متر افت سطح آب زیرزمینی دارد، عمق آب زیرزمینی به صورت میانگین ۷۰ متر و رسوبات از جنس رس و شن هستند.

چاه‌های W-03 و W-14 بیش‌ترین مقدار فرونشست (به ترتیب ۴۷۳/۱ و ۷۲۶/۳ میلی‌متر) را دارند افت سطح آب زیرزمینی در هر دو چاه زیاد و جنس آبرفت رس و شن است. سطح آب زیرزمینی در هر دو چاه در عمق بالا (میانگین ۷۰ متر) قرار دارد (شکل ۶).

به‌منظور بررسی جنس رسوبات بر فرونشست، مقدار افت آب زیرزمینی و فرونشست بر روی لاگ هر چاه رسم شد. چاه‌های W-04، W-06، W-08، W-09 و W-05 فرونشست کم (۲۰۰-۰) دارند. چاه‌های W-08 و W-06 مقدار افت سطح آب زیرزمینی زیاد (۳۴/۹۹ و ۶۹/۱۹ متر) و جنس رسوبات عمدتاً شن است. چاه W-09 با داشتن مقدار افت بیش‌تر در حدود ۲۰ متر در طی ۲۰ سال و جنس لایه‌های رس و شن، ۶۰ میلی‌متر فرونشست دارد. چاه W-05 برخلاف داشتن افت مداوم و جنس لایه رس همراه شن و ماسه، فرونشست ۹۱/۸ میلی‌متری دارد.

چاه‌های W-11 و W-13 فرونشست متوسط (۲۰۰-۴۰۰ میلی‌متر) دارند. چاه W-11 با مقدار افت ۱۵ متری سطح آب



شکل ۶- لاگ، افت ۲۰ ساله آب زیرزمینی (۱۴۰۳-۱۳۸۳) و فرونشست ۱۰ ساله در موقعیت چاه‌های مشاهده‌ای.

Figure 6- Well log, 20-year groundwater level decline (2004–2025), and 10-year subsidence at the location of observation wells.

مدل‌های تهیه شده برای مقدار فرونشست با استفاده از سری زمانی نشان داد که در آبخوان ورامین فرونشست در بخش‌های مختلف آبخوان رفتارهای متفاوتی دارد. برخی داده‌ها بیش‌تر تحت تأثیر فرآیندهای تصادفی یا نویز سفید هستند. اما برخی دیگر تحت تأثیر فرونشست‌های قبلی و ادامه‌دار بودن روند فرونشست می‌باشند. همچنین برخی از نقاط دارای فرونشست پیچیده‌تری هستند و ترکیبی از شوک‌های آنی و روندهای قبلی هستند.

چاه W-05 علی‌رغم داشتن افت سطح آب زیرزمینی، عمق ۴۰ متری سطح آب زیرزمینی و جنس رس‌شن و ماسه‌دار مقدار فرونشست کم‌تر از ۲۰۰ میلی‌متر است، بنابراین، اگرچه افت سطح آب زیرزمینی یکی از عوامل اصلی مؤثر بر فرونشست است، شدت فرونشست تنها با میزان افت سطح آب قابل توضیح نیست. مقادیر فرونشست در چاه‌ها نشان دهنده تأثیر مختلف مقدار افت و عمق آب زیرزمینی بر مقدار فرونشست است. اما در برخی موارد مانند چاه W-09 و W-14 با توجه داشتن جنس و عمق یکسان، مقدار متفاوتی از فرونشست دارند این تفاوت می‌تواند با ویژگی‌های رسوبات ریزدانه، از جمله نوع، ضخامت و پیوستگی لایه‌های رسی مرتبط باشد؛ با این حال، داده‌های موجود برای تعیین سهم مستقل هر یک از این عوامل کافی نیست.

نتایج این پژوهش نشان داد که مدل‌های ARIMA با شناسایی ساختار داده‌ها و پیش‌بینی فرونشست، ابزاری مؤثر برای

مدل‌سازی خطی این پدیده هستند. تأیید کیفیت مدل‌ها توسط آزمون لیونگ-باکس و مقادیر خطای RMSE و MAE، کارایی این مدل‌ها را در شبیه‌سازی رفتار فرونشست تأیید می‌کند. با این حال، مدل‌های ARIMA ذاتاً خطی می‌باشند و در شناسایی روابط غیرخطی و پیچیده حاکم بر پدیده فرونشست که متأثر از عوامل متعددی مانند تغییرات اقلیمی و مدیریت منابع آب است، با محدودیت مواجه هستند. همچنین، در برخی ایستگاه‌ها مدل‌هایی با مرتبه بالاتر مانند $ARIMA(4,1,4)$ انتخاب شدند. اگرچه افزایش مرتبه مدل می‌تواند احتمال بیش‌برازش را افزایش دهد، این موضوع با استفاده از معیارهای اطلاعاتی AIC/BIC، آزمون Ljung-Box و ارزیابی عملکرد مدل‌ها در داده‌های آزمون مستقل بررسی شد. مقادیر بالای MAPE برای برخی چاه‌ها (مانند W-11) نه تنها به دلیل مقادیر کم فرونشست، بلکه می‌تواند ناشی از ناتوانی مدل در تفکیک نویز از سیگنال اصلی در نقاطی باشد که رفتار فرونشست تحت تأثیر شوک‌های تصادفی است. مطالعات تطبیقی در زمینه‌های مشابه، مانند پیش‌بینی نشست در معادن یا تراز آب زیرزمینی، نشان داده‌اند که مدل‌های ترکیبی مانند ARIMA-BP یا مدل‌های ماشین بردار پشتیبان می‌توانند با بهره‌گیری همزمان از قابلیت‌های مدل‌سازی خطی و غیرخطی، دقت پیش‌بینی را به‌طور چشمگیری افزایش دهند. از این رو، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی، عملکرد مدل ARIMA با مدل‌های غیرخطی و ترکیبی برای دستیابی

مدل‌های تهیه شده برای مقدار فرونشست با استفاده از سری زمانی نشان داد که در آبخوان ورامین فرونشست در بخش‌های مختلف آبخوان رفتارهای متفاوتی دارد. برخی داده‌ها بیش‌تر تحت تأثیر فرآیندهای تصادفی یا نویز سفید هستند. اما برخی دیگر تحت تأثیر فرونشست‌های قبلی و ادامه‌دار بودن روند فرونشست می‌باشند. همچنین برخی از نقاط دارای فرونشست پیچیده‌تری هستند و ترکیبی از شوک‌های آنی و روندهای قبلی هستند.

چاه W-05 علی‌رغم داشتن افت سطح آب زیرزمینی، عمق ۴۰ متری سطح آب زیرزمینی و جنس رس‌شن و ماسه‌دار مقدار فرونشست کم‌تر از ۲۰۰ میلی‌متر است، بنابراین، اگرچه افت سطح آب زیرزمینی یکی از عوامل اصلی مؤثر بر فرونشست است، شدت فرونشست تنها با میزان افت سطح آب قابل توضیح نیست. مقادیر فرونشست در چاه‌ها نشان دهنده تأثیر مختلف مقدار افت و عمق آب زیرزمینی بر مقدار فرونشست است. اما در برخی موارد مانند چاه W-09 و W-14 با توجه داشتن جنس و عمق یکسان، مقدار متفاوتی از فرونشست دارند این تفاوت می‌تواند با ویژگی‌های رسوبات ریزدانه، از جمله نوع، ضخامت و پیوستگی لایه‌های رسی مرتبط باشد؛ با این حال، داده‌های موجود برای تعیین سهم مستقل هر یک از این عوامل کافی نیست.

نتایج این پژوهش نشان داد که مدل‌های ARIMA با شناسایی ساختار داده‌ها و پیش‌بینی فرونشست، ابزاری مؤثر برای

وجود لایه‌های ریزدانه رسی با ضخامت کافی، با افزایش شدت فرونشست همراه بوده و به نظر می‌رسد نقش مهمی در تشدید این پدیده داشته باشد. با توجه به محدودیت داده‌های کمی مربوط به ویژگی‌های لیتولوژیک و ژئوتکنیک لایه‌ها، این ارتباط در پژوهش حاضر به صورت توصیفی بررسی شده و برای کمی‌سازی سهم هر عامل، انجام تحلیل‌های آماری چندمتغیره در مطالعات آینده پیشنهاد می‌شود. با این حال، به دلیل فقدان اطلاعات دقیق از درصد و کانی‌شناسی رس‌ها، این نتیجه‌گیری‌ها در سطح همبستگی باقی می‌ماند و برای اثبات علیت به داده‌های دقیق‌تری نیاز است. در مجموع، تلفیق فناوری تداخل‌سنجی راداری و مدل‌سازی سری زمانی ARIMA در این پژوهش، تصویری جامع از وضعیت فرونشست دشت ورامین ارائه داد. این مطالعه نشان داد که افت سطح آب زیرزمینی در یک آبخوان با لایه‌بندی رسی-شنی، منجر به فرونشست با نرخ‌های متفاوت می‌شود که این تفاوت شدیداً به درصد و نوع رسوبات ریزدانه وابسته است. مدل‌های ARIMA در اغلب ایستگاه‌ها توانستند روند کلی کوتاه‌مدت فرونشست را بازتولید کنند، هرچند دقت پیش‌بینی در میان ایستگاه‌ها متفاوت بود. با این وجود، پیچیدگی ذاتی پدیده فرونشست و وجود رفتارهای غیرخطی در برخی نقاط، ضرورت به‌کارگیری مدل‌های پیشرفته‌تر و شبکه‌های پایش دقیق‌تر با تأکید بر ویژگی‌های رسوبات موضعی را آشکار می‌سازد. نتایج این پژوهش می‌تواند به عنوان یک هشدار و یک ابزار برنامه‌ریزی برای مدیران منابع آب در جهت اتخاذ سیاست‌های کنترلی برداشت از آبخوان و کاهش خطرات ناشی از این پدیده برگشت‌ناپذیر مورد استفاده قرار گیرد.

این پژوهش با وجود دستاوردهای ارزشمند، با محدودیت‌هایی همراه بوده است: اول، مدل‌های ARIMA به دلیل ماهیت خطی، قادر به جذب کامل پیچیدگی‌های رفتاری فرونشست در نقاط دارای نوسانات تصادفی نیستند و در ایستگاه‌هایی مانند W-11 با داده‌های نزدیک به صفر، خطای پیش‌بینی افزایش می‌یابد. دوم، پیش‌بینی‌های ارائه‌شده در این پژوهش به صورت نقطه‌ای ارائه شده‌اند و عدم ارائه بازه اطمینان، ارزیابی کامل عدم قطعیت نتایج را محدود می‌کند. در مطالعات آینده، ارائه بازه‌های اطمینان و تحلیل عدم قطعیت پیش‌بینی‌ها می‌تواند به افزایش قابلیت کاربردی نتایج کمک کند. سوم،

به پیش‌بینی‌های دقیق‌تر از فرونشست در آبخوان ورامین مقایسه شود. همچنین، وارد کردن متغیرهای کمکی (مانند میزان برداشت و داده‌های پیژومتری) در قالب مدل‌های ARIMAX می‌تواند به تبیین بهتر رفتار سری‌های زمانی کمک کند.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با تلفیق فناوری تداخل‌سنجی راداری با استفاده از LiCSBAS و مدل‌سازی سری زمانی ARIMA، تصویری کمی و تحلیلی از وضعیت فرونشست زمین در دشت ورامین طی بازه زمانی ۱۰ ساله (۱۴۰۳-۱۳۹۳) ارائه داد. نقشه فرونشست تجمعی بیشینه ۹۵۵ میلی‌متر را در بخش‌های جنوبی آبخوان نشان داد و سه کانون متمایز شامل جنوب غرب گستره (با بیشترین وسعت و مقدار فرونشست)، شمال غرب پاکدشت (کانونی نقطه‌ای با مقدار فرونشست زیاد) و نوار شمالی ورامین-پاکدشت (با وسعت زیاد و مقدار فرونشست کم‌تر) شناسایی شد. این الگوی مکانی، بیان‌گر تأثیرپذیری ناهمگن آبخوان از عوامل مؤثر بر فرونشست است.

تحلیل سری‌های زمانی فرونشست در موقعیت چاه‌های مشاهده‌ای نشان داد که داده‌ها عموماً ناپایدار می‌باشند و با یک مرتبه تفاضل‌گیری به مانایی می‌رسند. مدل‌های ARIMA برازش‌شده برای هر ایستگاه، تنوع رفتاری فرونشست را در سطح آبخوان آشکار می‌سازد: مدل‌های خودرگرسیون (AR) در چاه‌هایی با روند پایدار و مدل‌های میانگین متحرک (MA) در ایستگاه‌های متأثر از نوسانات کوتاه‌مدت عملکرد بهتری دارند. اعتبارسنجی مدل‌ها با آزمون لیونگ-باکس، کفایت آن‌ها در تبیین همبستگی‌های سری زمانی را تأیید کرد، هرچند معیارهای خطا (به‌ویژه MAPE بالا در برخی ایستگاه‌ها) نشان‌دهنده حساسیت مدل به داده‌های نزدیک به صفر و لزوم احتیاط در تفسیر پیش‌بینی‌های نقطه‌ای است. پیش‌بینی ۱۲ گام آینده، تداوم روند فرونشست با شیب نسبتاً ثابت در اغلب ایستگاه‌ها را نشان می‌دهد و می‌تواند اطلاعاتی درباره روند احتمالی کوتاه‌مدت فرونشست فراهم کند.

بررسی ارتباط میان فرونشست و ویژگی‌های محیطی، ارتباط قابل‌توجه دانه‌بندی رسوبات با شدت و الگوی فرونشست را نشان داد. یافته‌ها تأکید می‌کند که اگرچه افت سطح آب زیرزمینی شرط لازم برای وقوع فرونشست است، با این حال،

Bagheri-Gavkosh, M., Hosseini, S.M., Ataie-Ashtiani, B., Sohani, Y., Ebrahimian, H., Morovat, F., Ashrafi, S., 2021. Land subsidence: A global challenge. *Science of the Total Environment*, 778: 146193.

Du, Z., Ge, L., Ng, A.H.-M., Zhu, Q., Yang, X., Li, L., 2018. Correlating the subsidence pattern and land use in Bandung, Indonesia with both Sentinel-1/2 and ALOS-2 satellite images. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 67: 54–68.

Fijani, E., Zarei, P., 2024. Evaluation of land subsidence potential in Humand-Absard aquifer using remote sensing methods and its relationship with groundwater abstraction. *Hydrogeology*, 9(1): 1–15. [In Persian]

Fruneau, B., Sarti, F., 2000. Detection of ground subsidence in the city of Paris using radar interferometry: Isolation of deformation from atmospheric artifacts using correlation. *Geophysical Research Letters*, 27(24): 3981–3984.

Galloway, D.L., Burbey, T.J., 2011. Review: Regional land subsidence accompanying groundwater extraction. *Hydrogeology Journal*, 19(8): 1459–1486.

Haddadan, M., Mohammadian, H., 2006. Geological map of Varamin at 1:100000. Geological Survey of Iran.

Heidari, M., Saedi, B., Jalali, S.H., Saedi, B., 2026. Controls of aquifer geometry and sediment characteristics on land subsidence rates: Insights from machine learning in western Iran. *Journal of Hydrology*, 671: 135256.

Helali, L., Bagheri, R., Momeni, A., 2024. Investigation of land subsidence using radar interferometry technique (Case study: Semnan plain). *Hydrogeology*, 9(1): 86–100. [In Persian]

Hung, W.-C., Hwang, C., Chang, C.-P., Yen, J.-Y., Liu, C.-H., Yang, W.-H., 2010. Monitoring severe aquifer-system compaction and land subsidence in Taiwan using multiple sensors: Yunlin, the southern Choushui River Alluvial Fan. *Environmental Earth Sciences*, 59(7): 1535–1548.

Liang, B., Shi, G., Wu, Y., Zhu, Y., Wang, M., Sun, Z., 2026. Assessment of the compound impact of sea level rise, land subsidence and storm surge under climate change in Shanghai. *PLOS ONE*, 21(3): e0343974.

Morishita, Y., Lazecky, M., Wright, T.J., Weiss, J.R., Elliott, J.R., Hooper, A., 2020. LiCSBAS: An open-source InSAR time series analysis package integrated with the LiCSAR automated Sentinel-1 InSAR processor. *Remote Sensing*, 12(3): 424.

Park, I., Lee, J., Saro, L., 2014. Ensemble of ground subsidence hazard maps using fuzzy logic. *Central European Journal of Geosciences*, 6(2): 207–218.

داده‌های زمین‌شناسی موجود (لاگ چاه‌ها) فاقد جزئیات کافی برای تفکیک دقیق نقش نوع و درصد رس‌ها هستند. در مطالعات آینده، استفاده از مدل‌های غیرخطی یا ARIMAX همراه با متغیرهای کمکی می‌تواند برای تبیین بهتر رفتار فرونشست بررسی شود.

منابع

آزرم، ز.، مهرابی، وح.، نادى، س.، ۱۴۰۱. بررسی میزان همبستگی بین فرونشست و تغییرات سطح آب زیرزمینی با استفاده از آنالیز سری زمانی تداخل‌سنجی راداری (منطقه مطالعاتی: اصفهان). *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۱۱(۴): ۱۷۳–۱۹۲.

رحیمی، م.، کاکى، م.، اسدزاده، ف.، رضوردی‌نژاد، و.، ۱۴۰۳. برآورد فرونشست دشت قروه با استفاده از روش GARDLIF-SD و تداخل‌سنجی راداری. *هیدروژئولوژی*، ۹(۲): ۱۵۴–۱۳۹.

شریفی‌کیا، م.ر.، ۱۳۹۱. بررسی و تعیین میزان و دامنه فرونشست زمین به کمک روش تداخل‌سنجی تفاضلی راداری DinSAR در دشت نوق – بهرمان. *برنامه‌ریزی و آمایش فضا*، دوره شانزدهم، ۱۶(۳): ۷۷–۵۵.

فیجانی، ا.، زارعی، پ.، ۱۴۰۳. ارزیابی پتانسیل فرونشست زمین در آبخوان هومند-آب‌سرد با استفاده از روش‌های سنجش از دور و ارتباط آن با برداشت آب‌های زیرزمینی. *هیدروژئولوژی*، ۹(۱): ۱۵–۱.

هلالی، ل.، باقری، ر.، مومنی، ع.، ۱۴۰۳. بررسی فرونشست زمین با استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری (مطالعه موردی: دشت سمنان). *هیدروژئولوژی*، ۹(۱): ۸۶–۱۰۰.

References

Amin, P., Akhavan Ghalibaf, M., Hosseini, M., 2025. Soil surface subsidence time series modeling of an area with Aridisols and Vertisols complex using surveying and drone imagery in Central Iran. *Dokuchaev Soil Bulletin*, 122: 62–88.

Azarm, Z., Mehrabi, H., Nadi, S., 2022. Investigation of the correlation between land subsidence and groundwater level changes using radar interferometry time-series analysis (Case study: Isfahan). *Geography and Environmental Hazards*, 11(4): 173–192. [In Persian]

groundwater level in Mymensingh, Bangladesh: A longitudinal study utilizing ARIMA time-series forecasting. *Journal of Environmental Science, Health and Sustainability*, 2(1): 51–59.

Takafuji, E.H. de M., Rocha, M.M. da, Manzione, R.L., 2019. Groundwater level prediction/forecasting and assessment of uncertainty using SGS and ARIMA models: A case study in the Bauru Aquifer System (Brazil). *Natural Resources Research*, 28(2): 487–503.

Wang, F., Wu, X., Zhou, K., Wang, M., Ma, R., Wang, Q., 2025. Surface deformation analysis and prediction driven by multimodal data, InSAR technology, and ARIMA-BP model in typical oil exploitation area. *International Journal of Remote Sensing*, 46(5): 1964–1991.

Xiao, H., Xia, Y., Fan, Y., Chen, L., Duan, R., 2024. Identification and prediction inversion of mining area subsidence by integrating SBAS-InSAR and EMD-ARIMA model. *IEEE Access*, 12: 85822–85835.

Zhang, K., Wu, L., Yin, K., Yang, W., Huang, C., 2025. A discrete grey seasonal model with fractional order accumulation and its application in forecasting the groundwater depth. *Fractal and Fractional*, 9(2): 117.

Zhang, Z., Liu, H., Xu, X., Xie, Z., Huo, H., Chang, L., Tao, Z., 2025. Structural deformation warning method for coal mine roadway surrounding rock based on evidential reasoning. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 74: 1–12.

Pourghasemi, H.R., Mohseni Saravi, M., 2017. Land-subsidence spatial modeling using generalized additive model data mining technique. *Watershed Management Research*, 30(4): 20–34.

Rahimi, M., Kaki, M., Asadzadeh, F., Rezaverdinejad, V., 2025. Estimation of land subsidence in Qorveh Plain using the GARDLIF-SD method and radar interferometry. *Hydrogeology*, 9(2): 139–154. [In Persian]

Raju, A., Nanda, R., Singh, A., Malik, K., 2022. Multi-temporal analysis of groundwater depletion-induced land subsidence in Central Ganga Alluvial Plain, Northern India. *Geocarto International*, 37(26): 11732–11755.

Raucoules, D., Maisons, C., Carnec, C., Le Mouelic, S., King, C., Hosford, S., 2003. Monitoring of slow ground deformation by ERS radar interferometry on the Vauvert salt mine (France): Comparison with ground-based measurement. *Remote Sensing of Environment*, 88(4): 468–478.

Sharifi-Kia, M.R., 2012. Investigation and determination of the magnitude and extent of land subsidence using differential radar interferometry (DinSAR) in the Nog-Bahraman Plain. *Spatial Planning*, 16(3): 55–77. [In Persian]

Shumway, R.H., Stoffer, D.S., 2025. *Time Series Analysis and Its Applications: With R Examples*. Fifth Edition, Springer, Cham, 599 p.

Tabassum, S., Seddique, A.A., 2026. Spatiotemporal assessment and prognostic modeling of