

Original Research Paper

Investigation of subsidence potential of the Ajabshir plain using artificial intelligence models and radar interferometric technique

Soraya Nouri -Sangarab¹, Asghar Asghari –Moghaddam^{1*}, and Nasser Jabraili-Andaryan¹

¹ Department of Earth Sciences, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 2023 January 29

Accepted: 2023 March 25

Available online: 2023 September 23

Keywords:

Ajabshir plain aquifer

Subsidence

ALPRIFT

Genetic algorithm

Fuzzy logic

ABSTRACT

Recently, due to the trend of decreasing rainfall and increasing groundwater pumping rate, there have been concerns about the risks caused by the decrease in the volume of aquifer reserves and the drop in the groundwater level, and as a consequence the land subsidence. Also, in Ajabshir plain due to a gradual decrease in the water level, it is necessary to estimate the subsidence and investigate the subsidence potential to prevent its harmful risks in the future. For this purpose, using the ALPRIFT framework, which includes seven layers of parameters affecting subsidence, the subsidence potential map was zoned. The subsidence potential index was obtained in low and moderate ranges. In the next step, using Sentinel-1 satellite images, the subsidence during the years 2020-2021 was estimated to be 2.4 cm, which had a significant correlation with the groundwater level of the water year 2020-2021 and subsidence potential. In addition, artificial intelligence optimization methods including fuzzy logic (Sugeno) and genetic algorithm were used in order to fix the defects of applying expert opinions and increase the correlation between subsidence (Insar) and ALPRIFT, among these models, Sugeno's fuzzy method provided the best correlation between the two subsidence maps and ALPRIFT. The correlation between subsidence with ALPRIFT, ALPRIFT-GA and ALPRIFT-SFL was obtained as 0.46, 0.62 and 0.72 respectively.

1. Introduction

In recent years, there have been concerns about the consequences of reducing the water level in exploitation wells and the increase in extraction compared to the recharging of groundwater resources. One of the most essential concerns, in this case, is land subsidence, especially in residential areas, which causes a lot of human and financial damage, as well as reducing the hydrodynamic

coefficients of aquifers and thus reducing their storage. Ajabshir plain is one of the plains of the Urmia lake basin, where groundwater is the main sources of water used in the region. With the withdrawal from groundwater, the possibility of subsidence in the plains also increases, which increases the need to identify vulnerable and prone-to-subsidence areas to manage the amount

* Corresponding author: Asghar Asghari –Moghaddam; E-mail: moghaddam@tabrizu.ac.ir

Citation:

Nouri -Sangarab, S., Asghari –Moghaddam, A., and Jabraili-Andaryan, N., 2023. Investigation of subsidence potential of the Ajabshir plain using artificial intelligence models and radar interferometric technique. Scientific Quarterly Journal, GEOSCIENCES, 33(3), 129, 71-84. <https://doi.org/10.22071/gsj.2023.382187.2055>

and location of the withdrawal from groundwater. Considering the critical conditions of the groundwater in the plains around Urmia lake and the phenomenon of subsidence in recent years, it seems necessary to investigate this phenomenon in the Ajabshir plain as well. Therefore, in the current study, the subsidence potential of the study area was carried out using the practical framework of ALPRIFT, and then, to improve the performance of the ALPRIFT method, remove expert opinions and reduce uncertainty, artificial intelligence methods including Sugeno Fuzzy Logic (SFL) and genetic algorithm (GA) has been used. Also, for verification, it has been compared with the amount of subsidence extracted and calculated from the radar data of the Sentinel-1 satellite.

2. Research methodology

2.1. Study area description

The aquifer of the Ajabshir plain has an area of about 73 square kilometers and is spread over an area equal to 76% of Ajabshir plain. The plain is located on the edge of Urmia lake and west of East Azerbaijan province. The elevation of the highest and lowest point of the region is 3345 and 1272 meters, respectively, compared to the average sea level. Qala-chai River is the main drainage of Ajabshir basin, originates from the western slopes of Sahand Mountain, and flows in the east-west direction. After passing through Ajabshir city, it flows into Urmia lake.

2.2. Subsidence vulnerability potential with ALPRIFT

The ALPRIFT framework was used for the first time in Shabestar plain by Nadiri et al. (2018) inspired by the DRASTIC method (Aller et al., 1987; Habibi, 2021). This method is a practical quantitative framework for investigating the potential of vulnerability to subsidence in aquifers based on the ranking and weighting method (PCSM: Point Count System Model) (Nadiri et al., 2017a, b, c). ALPRIFT includes seven effective layers which causing subsidence in the studied area: (A) Aquifer media, (L) Land use, (P) Pumping, (R) Recharge, (I) Impact of aquifer thickness, (F) fault distance and (T) decline of the water Table. At first, each of these parameters is converted into the required layers with specific ratings in the Arc GIS environment with interpolation methods, and then using predetermined weights by Nadiri et al. (2018) will be overlapped and finally, the vulnerability zoning map of the region will be created. Equation (1) is used to prepare the subsidence potential index map:

$$SVI = ArAw + LrLw + PrPw + RrRw + IrIw + FrFw + TrTw \quad (1)$$

Where SVI is the index of subsidence potential, r and w index also represent the rank and weight of the layer, respectively. The ranks of the sub-layers of each criterion vary from 1 to 10 depending on their impact on the vulnerability potential, where 1 means the lowest and 10 the highest risk of subsidence (Nadiri et

al., 2018). The weight of each layer is a fixed value between 1 and 5, which shows the relative importance of each layer compared to other layers in the vulnerability potential of the aquifer (Nadiri et al., 2018).

Fuzzy logic is used through fuzzy operators based on the IF variable IS set THEN, action model. Fuzzy logic includes three methods: Larsen (LFL), Mamdani (MFL), and Sugeno (SFL), which mainly uses Sugeno modeling because of its constant and linear process (Sugeno, 1985). This method of modeling includes three steps: 1) determining the structure or clustering, 2) using fuzzy operators, and 3) estimating the parameters and least squares of error. Fuzzy sets are the most suitable method for solving human errors and the nature of uncertainty in systems due to having vague and gradual boundaries between defined boundaries (Calvo et al., 2009, Tayfur et al., 2014). To optimize ALPRIFT with artificial intelligence methods, the subsidence potential index (ALPRIFT) must first be modified with the following formula and then continue with the optimization process:

$$CSVI = \frac{(SVI)_{\max}}{(NSV)_{\max}} * (NSV)_i \quad (2)$$

CSVI indicates the corrected subsidence vulnerability index, $(SVI)_{\max}$ is the maximum value of subsidence index, $(NSV)_{\max}$ is the maximum amount of subsidence estimated through InSAR, and $(NSV)_i$ is the amount of subsidence obtained from InSAR.

For GA optimization, the objective function of the genetic algorithm optimization method is given in Eq. (3). This function is the same as the correlation coefficient between the subsidence obtained from radar images and the subsidence vulnerability index (ALPRIFT), which weight coefficients are optimized with the aim of maximizing this function.

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}} \quad (3)$$

In the above relation, F is the objective function of the optimization problem, V_i : the vulnerability index of the point, $\bar{V}$: is the average of the vulnerability indexes, S_i is the radar subsidence at point i, $\bar{S}$: is the average radar subsidence and n is the number of data.

2.3. Preparing a map of the input layers of the ALPRIFT method

To prepare a potential map of subsidence vulnerability with the ALPRIFT framework, seven effective parameters including: (A) Aquifer media, (L) Land use, (P) Pumping, (R) Recharge, (I) Impact of aquifer thickness, (F) fault distance and (T) decline of the water Table were used.

2.4. Subsidence with Sentinel-1 images

SLC, Sentinel-1 images were used to calculate the amount of subsidence in Ajabshir plain using radar images. In this research, from two pairs of Sentinel-1 radar images with a one-year

period (2020-2021), each pair of images with a 36-day period (15.10.2020-09.09.2020 and 16.10.2021-10.09.2021) was used. In the following, the work steps are briefly mentioned in order: Stack, S-1 Enhance Spectral Diversity, Interferogram Formation, Phase to displacement, Range-Doppler Terrain Correcting. Then it was entered into the ArcMap environment in the tiff format of the Snap software and by superimposing it with the DEM map of the area, the final map was obtained.

3. Discussion and results

In this research, the ALPRIFT framework was used to investigate the potential of subsidence vulnerability so that sensitive and influential parameters in increasing the potential of subsidence vulnerability can be investigated. Based on this, the subsidence vulnerability index for Ajabshir plain was divided into two classes of low and medium potential. Sentinel-1 radar images were used to verify and ensure the accuracy of the potential obtained from the ALPRIFT method. Based on this, the subsidence rate for the year 2020-2021 with two pairs of images (With the time period of 15.10.2020-09.09.2020 and 16.10.2021-10.09.2021), 2.4 cm was estimated. To know the relationship between subsidence and groundwater level, a correlation was established between them and a correlation coefficient of 0.25 was obtained, which was acceptable in its own way. The drop in the groundwater level of this aquifer in the long term (1386-1400) was one and a half meters and in the short term (2020-2021), it was 0.84 meters. Also, the correlation coefficient between the calculated subsidence potential and the actual subsidence was 0.46, which showed that it can be the results obtained from ALPRIFT were confirmed,

but in order to improve the ALPRIFT method and eliminate the disadvantages of expert weighting and reduce uncertainty, genetic and fuzzy algorithm optimization methods were used. This study showed that both the genetic algorithm and Sugeno's fuzzy algorithm have improved the results of the ALPRIFT method, but the Sugeno's fuzzy method has a better performance than the genetic algorithm and can be used to estimate the subsidence potential in the study area.

4. Conclusion

The results of this research show that the correlation coefficient between the three methods (ALPRIFT, GA and SFL) with the Sentinel 1 satellite data, the Sugeno fuzzy method (SFL) with a correlation coefficient of 0.72 and a squared error of 0.2 was the best method. Based on this, in the vicinity of Ajabshir city, the villages of Shishvan, Mahaba, Shirazand Pesian have high subsidence potential than other parts of the plain. The investigations showed that the pumping of groundwater, recharging, lowering of the groundwater level and the aquifer media are the most important factors causing the land subsidence of this area. In these agricultural and residential areas with dominant material of silt, clay and a mixture of clay and sand the highly land subsidence will be occurs if a continuous pumping and groundwater level delining carry out the area. Despite the importance of the issue, no study and management measure have been carried out in this plain, so it is suggested that management programs to protect the subsidence, such as modifying the cultivation and irrigation pattern, should be carried out in these areas, and excessive pumping should be avoided.

بررسی پتانسیل فرونشست دشت عجب شیر با استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی و تکنیک تداخل سنجی راداری

ثریا نوری سنگراب^۱، اصغر اصغری مقدم^{۱*} و ناصر جبرائیلی اندریان^۱

^۱ گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

چکیده

طی سال‌های اخیر، با توجه به روند کاهشی بارش و افزایش پمپاژ از منابع آب زیرزمینی، نگرانی‌هایی از مخاطرات ناشی از کاهش حجم ذخایر آبخوان و افت سطح آب زیرزمینی و فرونشست زمین ایجاد شده است. در دشت عجب شیر نیز به دلیل کاهش تدریجی سطح آب زیرزمینی، برآورد فرونشست و بررسی پتانسیل فرونشست برای جلوگیری از مخاطرات زیان‌بار آن در آینده، ضروری به نظر می‌رسد. بدین منظور، با استفاده از چهارچوب ALPRIFT که شامل هفت لایه از پارامترهای مؤثر بر فرونشست می‌باشد، نقشه پتانسیل فرونشست آبخوان پهنه‌بندی شد. شاخص پتانسیل فرونشست در دو محدوده کم و متوسط به‌دست آمد. در مرحله بعد با استفاده از عکس‌های ماهواره‌ای Sentinel-1، فرونشست در طی سال‌های ۱۳۹۹-۱۴۰۰، به مقدار ۲/۴ سانتی‌متر برآورد گردید که همبستگی معناداری با تراز آب زیرزمینی سال آبی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ و پتانسیل فرونشست داشت. همچنین در ادامه، برای رفع نقص اعمال نظرات کارشناسانه و افزایش همبستگی بین فرونشست (Insar) و ALPRIFT، از روش‌های بهینه‌سازی هوش مصنوعی شامل منطق فازی (ساجنو) و الگوریتم ژنتیک استفاده شد که از بین این مدل، روش فازی ساجنو بهترین همبستگی بین دو نقشه فرونشست و ALPRIFT را ارائه داد. همبستگی بین فرونشست با، ALPRIFT، ALPRIFT-SFL و ALPRIFT-GA به ترتیب ۰/۴۶، ۰/۶۲ و ۰/۷۲ به‌دست آمد.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۰۵

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۷/۰۱

کلیدواژه‌ها:

آبخوان دشت عجب شیر

فرونشست

ALPRIFT

الگوریتم ژنتیک

منطق فازی

۱- پیش‌نوشتار

طی سال‌های اخیر نگرانی‌هایی از پیامدهای کاهش سطح آب در چاه‌های بهره‌برداری و فزونی برداشت نسبت به تغذیه منابع آب زیرزمینی ایجاد شده است. یکی از اساسی‌ترین نگرانی در این مورد، فرونشست زمین به ویژه در مناطق مسکونی است که باعث آسیب‌های جانی و مالی زیاد و همچنین باعث کاهش ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان‌ها و در نتیجه کاهش ذخیره آنها می‌باشد. از عمده دلایل فرونشست زمین می‌توان به برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی به منظور تأمین نیازهای کشاورزی، صنعتی، مصارف خانگی و غیره اشاره کرد که بیشتر آبخوان‌ها را تحت تأثیر قرار داده است. کاهش بارش‌های آسمانی، مصارف بی‌رویه منابع آب سطحی و زیرزمینی، احداث سدهای مهندسی نشده بر روی زهکش‌های اصلی و جلوگیری از نفوذ از بستر رودخانه‌ها به آبخوان‌ها، افزایش اراضی، به‌ویژه محصولات با آب‌بری بالا و الگوی کشت نامناسب و عدم آبیاری صحیح در چند دهه گذشته باعث بحرانی شدن وضعیت منابع آب در بیشتر دشت‌های کشور شده است، به طوری که سطح آب زیرزمینی در اغلب آبخوان‌های مهم کشور به طور مداوم طی چند

سال اخیر سیر نزولی داشته است. کاهش سطح تراز آب زیرزمینی دشت‌ها اثرات زیان‌بار زیادی داشته و سبب کاهش کیفیت آب و فرونشست زمین شده است. پدیده فرونشست زمین (Land Subsidence) توسط یونسکو، فروریزش یا نشست زمین که در مقیاس بزرگ رخ می‌دهد، تعریف شده است (Poland, 1984). فرونشست زمین یک پدیده زمین‌شناسی است که موجب پایین رفتن آرام و عمودی سطح زمین می‌شود (Hu et al., 2009). علت اصلی فرونشست زمین توسط خروج سیالات، تراکم طبقات و کاهش ستبرای لایه‌های سنگ و خاک است. وزن لایه‌های بالایی سبب تراکم و کاهش ستبرا و در نهایت، فرونشست می‌شود که می‌تواند منشأ طبیعی یا انسانی داشته باشد. میزان فرونشست در تناسب با حجم سیال خارج شده از زمین و قابلیت تراکم لایه‌های به جا مانده است. در بسیاری از آبخوان‌ها، آب‌های زیرزمینی از فضای بین لایه‌های رس، شن، ماسه یا سیلت پمپاژ می‌شود. اگر آبخوان از جنس رسوبات دارای رس و یا سیلت باشد، با توجه به تراکم‌پذیری بالای این مواد زمین‌شناسی استخراج آب زیرزمینی باعث فشردگی این لایه‌ها شده و در نهایت نشست

* نویسنده مسئول: اصغر اصغری مقدم؛ E-mail: moghaddam@tabrizu.ac.ir

ماخذنگاری:

نوری سنگراب، ث، اصغری مقدم، ا. و جبرائیلی اندریان، ن. ۱۴۰۲، بررسی پتانسیل فرونشست دشت عجب شیر با استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی و تکنیک تداخل سنجی راداری. فصلنامه علمی علوم زمین، ۳۳(۳)، ۷۱-۸۴. <https://doi.org/10.22071/gsj.2023.382187.2055>

doi: 10.22071/gsj.2023.382187.2055



doi: 20.1001.1.10237429.1402.33.3.5.6

حقوق معنوی مقاله برای فصلنامه علوم زمین و نویسندگان مقاله محفوظ است.



This is an open access article under the by-nc/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

استفاده شده است. همچنین برای صحت‌سنجی نیز با میزان فرونشست واقعی که از داده‌های راداری ماهواره سنتینل-۱ (Sentinel-1) استخراج و محاسبه شده، مقایسه گردیده است.

۲- روش پژوهش

در این پژوهش، هدف، بررسی پتانسیل فرونشست و مقایسه آن با فرونشست به دست آمده از عکس‌های ماهواره‌ای است. پتانسیل فرونشست با چهارچوب ALPRIFT به دست آمده، سپس با روش‌های بهینه‌سازی هوش مصنوعی شامل منطق فازی (ساجنو) و الگوریتم ژنتیک بهینه شده است. در مرحله آخر نیز همبستگی بین نقشه‌های به دست آمده از روش‌های یاد شده با نقشه فرونشست حاصل از تصاویر ماهواره‌ای محاسبه گردیده است.

۳- داده‌ها و اطلاعات

۳-۱- جغرافیای منطقه مطالعاتی

آبخوان دشت عجب‌شیر به مساحت حدود ۷۳ کیلومترمربع، در وسعتی برابر با ۷۶ درصد از دشت عجب‌شیر گسترده شده است. این دشت در حاشیه دریاچه ارومیه و باختر استان آذربایجان شرقی قرار گرفته است. ارتفاع بلندترین و پست‌ترین نقطه منطقه نسبت به تراز متوسط دریا به ترتیب برابر با ۳۳۴۵ و ۱۲۷۲ متر است. موقعیت منطقه مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است. اقلیم محدوده مطالعاتی عجب‌شیر در سیستم طبقه‌بندی دوماستن، نیمه‌خشک ارزیابی شده است (سازمان آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی، ۱۳۹۲). رودخانه قلعه‌چای زهکش اصلی دشت عجب‌شیر به شمار می‌رود که از دامنه‌های باختری کوه سهند سرچشمه گرفته و در راستای خاور به باختر جریان می‌یابد و پس از گذر از شهر عجب‌شیر به دریاچه ارومیه می‌ریزد. رودخانه قلعه‌چای در دامنه بلندی‌ها از زهکشی آبخوان‌های محلی تغذیه می‌گردد و دارای جریان پایه است که این آب‌ها برای آبیاری زمین‌های دره قلعه‌چای برداشت می‌شود. این رودخانه در دشت عجب‌شیر به صورت فصلی در فصل‌های زمستان و بهار جریان دارد و در سایر ایام، کم و بیش بدون آب است. بر روی شاخه اصلی این رود، سد قلعه‌چای قرار دارد که دارای حجم مفید ۴۰ میلیون مترمکعب است (سامانی، ۱۳۹۵). طبق داده‌های اخذ شده از سازمان آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی (۱۳۹۲)، متوسط بارندگی سالانه در ارتفاعات و دشت، از ۵ ایستگاه باران‌سنجی ینگجه، شیشوان، عجب‌شیر، هرگلان و خانیان طول دوره آماری ۲۶ ساله (۱۳۷۰-۱۳۹۶) انتخاب گردید که در جدول ۱ مقادیر مربوطه ارائه شده است.

۳-۲- زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

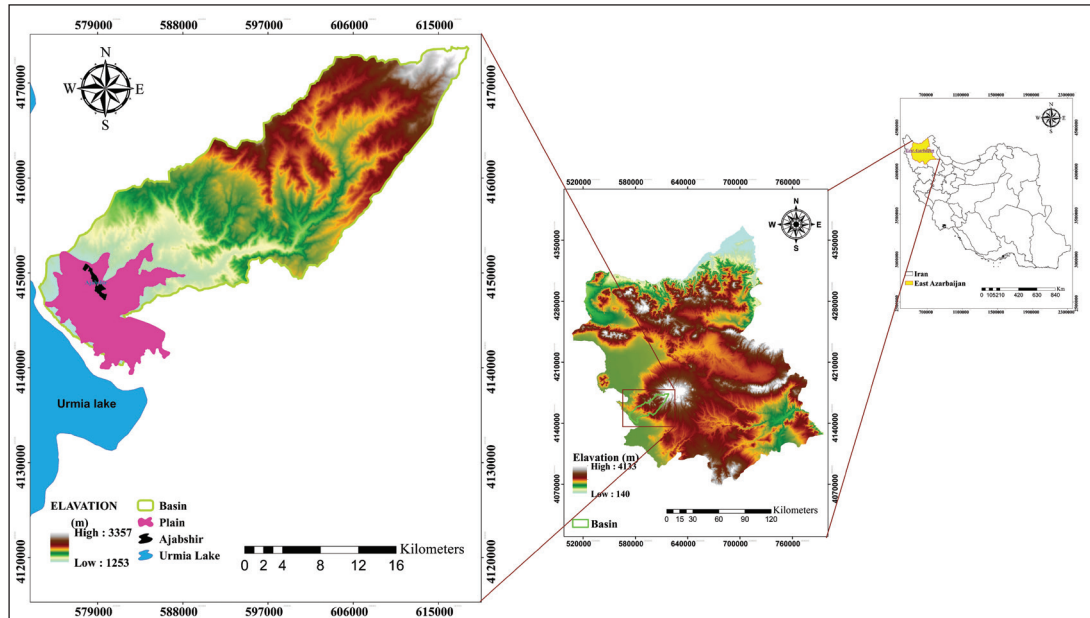
منطقه عجب‌شیر دارای تنوع قابل‌توجهی از رخنمون‌های رخساره‌ای است. رخنمون‌های سنگی و لایه‌های رسوبی گسترده در منطقه مورد مطالعه، تاریخ زمین‌شناسی پیچیده و طولانی را نشان می‌دهد. نقشه‌های زمین‌شناسی و زمین‌ساخت منتشر شده گویای آن است که آذربایجان و از جمله منطقه مورد مطالعه در محل برخورد رسوبی-زمین‌ساختی البرز و زاگرس و بالاخره پهنه آتشفشانی ارومیه-دختر قرار دارد (درویش‌زاده، ۱۳۸۰). در این منطقه شاهد آگلومرای آذرآواری و نهشته‌های لار هستیم که حاصل فعالیت‌های انفجاری سهند بوده و از جنس پیروکسن-آندزیت می‌باشد. نهشته‌های کواترنری شامل مجموعه‌ای از پادگانه‌های (تراس‌های) قدیمی، پادگانه‌های جوان، نهشته‌های نرم و ریزدانه و شوره‌زارهای حاشیه دریاچه ارومیه است. از این بین، پادگانه‌های جوان پهنه گسترده‌ای از منطقه را می‌پوشاند و از جنس قلوه‌سنگ و شن و ماسه سخت نشده است. همچنین زمین‌های کشاورزی بخشی از این مجموعه به شمار می‌آید. جوان‌ترین نهشته‌های رسوبی، رسوبات عهد حاضر هستند که در بستر رودخانه قلعه‌چای به جای گذاشته شده‌اند و متشکل از شن و ماسه و قلوه‌سنگ و تا حدودی سیلت و رس هستند. در ناحیه عجب‌شیر رخنمون‌های

قائم را موجب می‌گردد (زند و همکاران، ۱۳۹۸). در سال ۱۳۸۴ مطالعاتی توسط سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، جهت بررسی فرونشست زمین در دشت تهران-شهریار صورت گرفت. در این مطالعه، در گام نخست پس از جمع‌آوری آمار و اطلاعات مورد نیاز به منظور صحت‌سنجی و تعیین محدوده فرونشست، بررسی داده‌های InSAR با همکاری پژوهشگران دانشگاه‌های کمبریج و اکسفورد، انجام گرفت. این بررسی‌ها نشان داد که در منطقه گسترده‌ای از جنوب باختر تهران با مساحت حدود ۴۱۶ کیلومتر مربع پدیده فرونشست منطقه‌ای با الگوی «V» شکل و بیشینه نرخ نشست حدود ۱۶ سانتی‌متر بر سال شکل گرفته و فرونشست در آن همچنان ادامه دارد (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۸۴). صالحی و همکاران (۱۳۹۲)، جهت تعیین محدوده تأثیر و برآورد میزان فرونشست زمین در دشت مهیار جنوبی از روش تداخل‌سنجی به عنوان روشی قابل اطمینان برای اندازه‌گیری تغییرات سطح زمین با دقت بسیار بالا، پوشش گسترده و قدرت تفکیک مکانی بالا استفاده کرده‌اند که در آن پژوهش، بیشینه نرخ فرونشست با تصاویر راداری انویست (ENVISAT) در بازه زمانی ۲۰۰۶-۲۰۰۳، به مقدار ۸/۲ سانتی‌متر محاسبه شد و نتایج گویای افت سطح زمین در پی افت سطح ایستابی با سرعتی ثابت بوده است (صالحی و همکاران، ۱۳۹۲). ندیری و همکاران (Nadiri et al., 2022)، به منظور کنترل و مدیریت این پدیده در دشت هادی‌شهر به شناسایی مناطق محتمل فرونشست و ارائه شاخص‌های آسیب‌پذیری فرونشست دینامیک (DSVI) پرداختند. این پژوهش بر اساس روش آلپریفت (ALPRIFT) بوده و در سه مرحله ایجاد شده است. مرحله اول: تهیه نقشه فرونشست با استفاده از چهارچوب آلپریفت و بهینه‌سازی وزن‌ها با مدل چندگانه (IMM)، مرحله دوم: پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی با استفاده از مدل GMDH، مرحله سوم: ترکیب نتایج مراحل ۱ و ۲ برای تهیه نقشه‌های دینامیک آسیب‌پذیری فرونشست بوده است (Nadiri et al., 2022). داداشی و همکاران (۱۳۹۹)، جهت تحلیل آسیب‌پذیری فرونشست دشت مرند با استفاده از چهارچوب ALPRIFT، نشان دادند که مناطق جنوب‌خاوری و جنوب‌باختری دشت اطراف شهر مرند و مناطق یامچی و کوشک از نظر فرونشست آسیب‌پذیر هستند و همچنین متوسط فرونشست حاصل شده از تصاویر راداری سنتینل ۱، ۲ سانتی‌متر برآورد شده است (داداشی و همکاران، ۱۳۹۹). روش‌های عددی متداولی نیز برای مدل‌سازی پدیده فرونشست به کار رفته‌اند که بیشتر بر پایه فرضیات ساده‌کننده‌ای بنا شده‌اند، نتایج حاصله دقت کمی داشته و همچنین دارای عدم قطعیت بالایی هستند (Naderi et al., 2018). از این رو، در سال‌های اخیر برای پیش‌بینی آسیب‌پذیری دشت نسبت به فرونشست از روش‌های هوش مصنوعی استفاده شده است (Nadiri et al., 2020, 2022; Kim et al., 2017). این روش‌ها نسبت به روش‌های پیشین از عدم قطعیت کمتر برخوردار بوده و مناطق در معرض خطر با دقت بالایی شناسایی می‌شود. همچنین دقت اجرای برنامه‌های مدیریتی برای جلوگیری از رخداد این پدیده را افزایش می‌دهد.

دشت عجب‌شیر یکی از دشت‌های حوضه دریاچه ارومیه است که آب زیرزمینی از عمده منابع آب مورد استفاده در منطقه می‌باشد. در کشورهای خشک و نیمه‌خشک مانند ایران، برداشت از آب‌های زیرزمینی هر ساله افزایش می‌یابد. با برداشت از آب‌های زیرزمینی احتمال فرونشست از دشت‌ها نیز افزایش می‌یابد که این امر لزوم شناسایی مناطق آسیب‌پذیر و مستعد فرونشست را به منظور مدیریت مقدار و محل برداشت آب زیرزمینی را بیش از پیش افزایش می‌دهد. با توجه به شرایط بحرانی آب‌های زیرزمینی دشت‌های اطراف دریاچه ارومیه و رخداد پدیده فرونشست در طی سال‌های اخیر در این دشت‌ها بررسی این پدیده در دشت عجب‌شیر نیز ضروری به نظر می‌رسد. از این رو، در مطالعه حاضر، پتانسیل فرونشست منطقه مطالعاتی با استفاده از چهارچوب آلپریفت (ALPRIFT) انجام گرفته و سپس به منظور بهبود عملکرد روش آلپریفت، حذف نظرات کارشناسی و کاهش عدم قطعیت، از روش‌های هوش مصنوعی شامل منطق فازی ساجنو (SFL) و الگوریتم ژنتیک (GA)

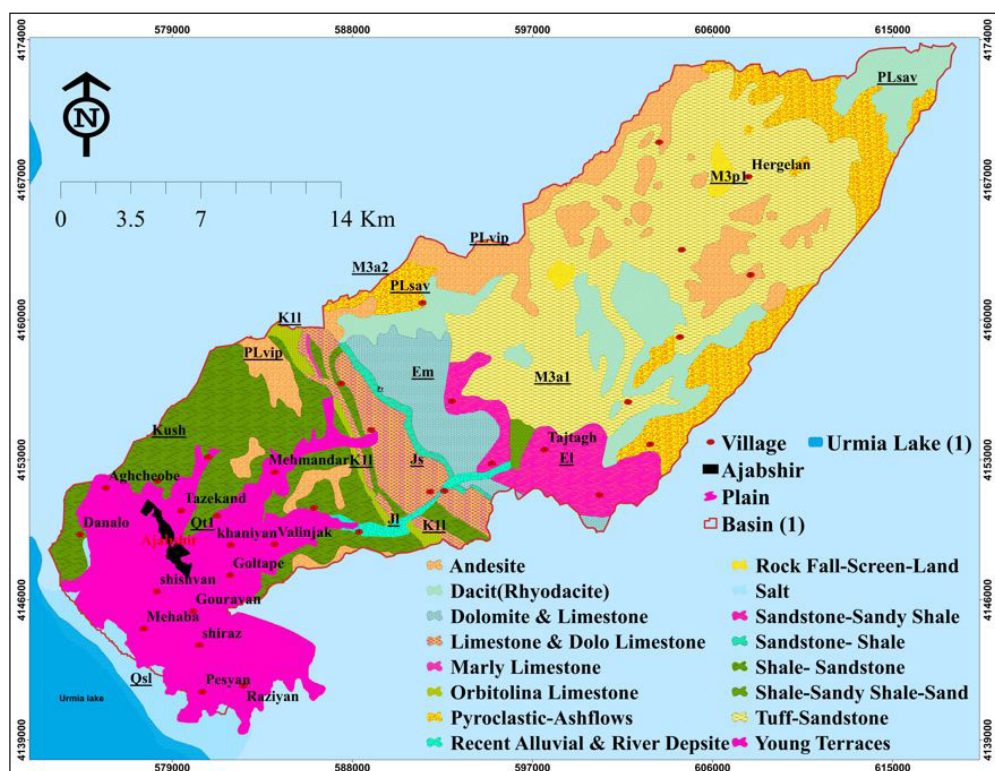
می خورد که شماری از آنها فعال بوده و رسوبات کواترن را تحت تأثیر قرار داده است. همچنین اثرات آتشفشانی سهند و گسترش سنگ های آذرین در منطقه در سطح گسترده نیز یکی دیگر از عوامل اصلی این شکل گیری می باشد (شکل ۲).

کرتاسه در شمال باختر منطقه به شدت چین خورده و گسله هستند که در بیشتر مناطق توسط رسوبات دشت پوشیده شده اند. روند عمومی محور چین ها و گسل ها شمال باختر-جنوب خاور است. گسل ها و شکستگی های فراوان در این ناحیه به چشم



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی دشت عجب شیر.

Figure 1. Geographical location of Ajabshir Plain.



شکل ۲ - نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه.

Figure2 . Geological map of the study area.

جدول ۱- متوسط بارندگی سالانه ارتفاعات و دشت عجب شیر (میلی متر).

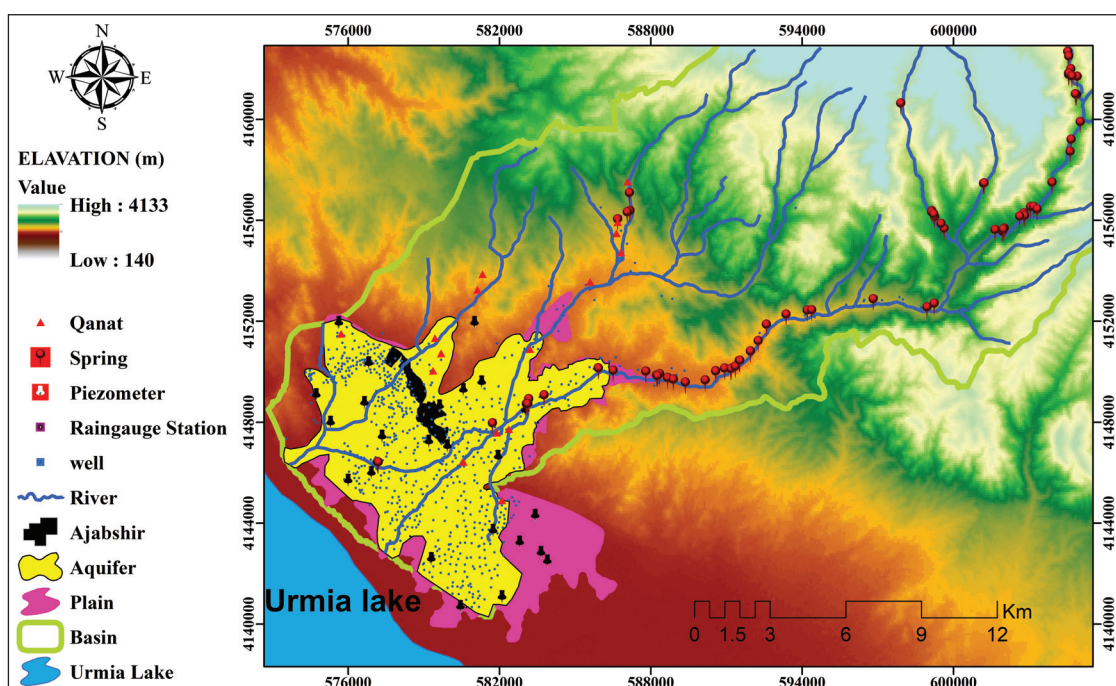
Table 1. Average annual precepitation of Ajabshir highlands and plains (mm).

Station name	mean annual precipitation (mm)	Geographical coordinates	
		UTMY	UTM X
Yengije	375	4156360	597753
Ajabshir	252	4147414	579568
Shishvan	256	4147073	578086
Khaniyan	237	4149005	582478

۳-۳- وضعیت هیدروژئولوژیکی منطقه

روز و کمترین مقدار آن در اطراف شوره زارها کمتر از ۱۰۰ مترمربع در روز می باشد (سامانی، ۱۳۹۵). مقدار قابلیت انتقال از بخش میانی جنوب دشت پیرامون روستاهای نبرین، ناسا و شیراز حدود ۵۰۰ مترمربع در روز است. جهت جریان آب زیرزمینی در کل دشت از شمال و شمال خاور به سمت جنوب و جنوب باختر بوده و در انتهای دشت به سبب برداشت زیاد از آب های شیرین، جریان آب زیرزمینی معکوس شده و از سمت شوره زارها به سمت آبخوان می باشد. تغذیه آبخوان از سازندهای مجاور در شمال و شمال خاور و خاور و همچنین شیب توپوگرافی کنترل کننده جهت کلی جریان آب زیرزمینی دشت عجب شیر است (سامانی، ۱۳۹۵). بر اساس داده های اخذ شده از سازمان آب منطقه ای استان آذربایجان شرقی (۱۳۹۲) تعداد ۶۲۲ حلقه چاه فعال در دشت عجب شیر وجود دارد که عمدتاً برای مصارف آشامیدن و کشاورزی مورد استفاده قرار می گیرند که بیشتر به صورت چاه های نیمه ژرف می باشند و درصد کمی از آنها به صورت ژرف حفر گردیده است. در ارتفاعات شمال خاوری در محدوده مطالعاتی ۲۰ چشمه و در سمت شمال باختری نزدیک به انتهای دشت یک چشمه وجود دارد و تنها هشت رشته قنات در منطقه مورد مطالعه، فعال می باشند (شکل ۳).

آبخوان دشت عجب شیر از نوع آبخوان آزاد می باشد که در نهشته های آبرفتی شکل گرفته است. بخشی از این آبرفت از حمل سنگ های آذرآواری (پیروکلاستیک) کوه سهند توسط رودخانه قلعه چای ایجاد شده است. آبرفت های منطقه از سنگ های آذرآواری (توف)، لاوا (ریولیت، ریوداسیت، داسیت، آندزیت و شیل آهکی) و ماسه سنگ تشکیل شده اند. سنگ کف عجب شیر به دلیل نفوذ توده های آذرین و وجود ته نشست های دریاچه ای در نقاط مختلف، متفاوت است. بالاترین تراز سنگ کف در منطقه حدود ۱۳۰۰ متر و در نواحی شمال-خاوری منطقه هست. ستبرای آبرفت در دامنه های رودخانه قلعه چای افزایش می یابد. قابلیت انتقال آبخوان در نقاط مختلف آن به دلیل تغییر دانه بندی و ستبرای لایه آب دار تغییر می نماید. بیشترین ستبرای آبرفت در بین خانیان و عجب شیر و تا بیش از ۱۰۰ متر می رسد. ستبرای آبرفت به تدریج و با دور شدن از بستر رودخانه کاهش می یابد. ستبرای آبرفت در منطقه بین روستاهای شیراز، ناسا و نبرین نیز کم و بیش زیاد و بین ۶۰ تا ۷۰ متر است (سامانی، ۱۳۹۵). بیشترین قابلیت انتقال در اطراف رودخانه قلعه چای و کنار شهر عجب شیر بیش از ۱۰۰۰ مترمربع در



شکل ۳- نقشه منابع آب منطقه مورد مطالعه.

Figure 3. Water resources map of the study area.

۳-۴- بررسی پتانسیل آسیب پذیری فرونشست با استفاده از آلپریفت

چهارچوب آلپریفت نخستین بار در دشت شیستر توسط ندیری و همکاران (Nadiri et al., 2018) با الهام گیری از روش دراستیک (Aller et al., 1987) استفاده شده است (حبیبی، ۱۳۹۹). این روش، چهارچوب عملی کمی برای بررسی پتانسیل آسیب پذیری نسبت به فرونشست در آبخوان ها براساس روش رتبه دهی و وزن دهی (PCSM: Point Count System Model) می باشد (Nadiri et al., 2017a, b, c). آلپریفت شامل هفت لایه مؤثر در ایجاد فرونشست در منطقه مورد مطالعه می باشد: محیط آبخوان (A: Aquifer media)، کاربری اراضی (L: Land use)، پمپاژ (P: Pumping of groundwater)، تغذیه (R: Recharge)، ضخامت آبرفت (I: Impact of alluvium thickness)، فاصله از گسل (F: Fault distance) و افت سطح آب زیرزمینی (T: Water table decline). در ابتدا هر کدام از این پارامترها با رتبه بندی های مشخص در محیط آرک جی آی اس با روش های درون یابی تبدیل

به لایه های مورد نیاز شده و سپس با استفاده از وزن های از پیش تعیین شده توسط ندیری و همکاران (Nadiri et al., 2018) هم پوشانی شده و در نهایت، نقشه پهنه بندی آسیب پذیری منطقه ایجاد خواهد شد. جهت تهیه نقشه شاخص پتانسیل فرونشست از رابطه (۱) استفاده می شود:

$$SVI = ArAw + LrLw + PrPw + RrRw + IrIw + FrFw + TrTw \quad (1)$$

در رابطه فوق SVI شاخص پتانسیل فرونشست، اندیس r و w نیز به ترتیب معرف رتبه و وزن لایه می باشد. رتبه های مربوط به زیر لایه های هر معیار بستگی به میزان تأثیر آنها بر پتانسیل آسیب پذیری، از ۱ تا ۱۰ متغیر است که ۱ به معنای کمترین و ۱۰ بیشترین خطر فرونشست در نظر گرفته می شود (Nadiri et al., 2018). رتبه های مربوط به هر پارامتر در جدول ۲ نشان داده شده است. وزن هر لایه نیز مقدار ثابتی بین ۱ تا ۵ می باشد که اهمیت نسبی هر لایه را نسبت به لایه های دیگر در پتانسیل آسیب پذیری آبخوان نشان می دهد (Nadiri et al., 2018).

جدول ۲- رتبه و وزن دهی مربوط به هر کدام از پارامترهای روش آلپریفت (Nadiri et al., 2018).

Table 2. Rate and weight of each parameter of the ALPRIFT method (Nadiri et al., 2018).

Pumping rate (cm/yr)		Land use		Aquifer media		Recharge (cm/yr)		Distance from fault (km)		Alluvial thickness (m/day)		Groundwater level drop (m)	
rate	Range	rate	Range	rate	Range	Rate	Range	Rate	Range	Rate	Range	Rate	Range
1	0.0001>	9-10	Mines and extractive resources	8-10	Clay	10	0-4	10	0-1	1	0-25	1	0-0.2
2	0.0001- 0.005			8-9	Karst silty	9	4-9	8	1-2	2	25-55	2	0.2-0.5
3	0.005-0.01		Agricultural areas	6-8	sediments	7	9-14	6	2-3	3	55-90	3	0.5-0.9
4	0.01-0.5	7-9	dam building	3-5	Sand	5	14-19	4	3-4	4	90-130	4	0.9-1.4
5	0.5-1	6-9	residential areas	2-3	Gravel	3	19-24	2	4-5	5	130-175	5	1.4-2
6	1-5	4-8	Transportation areas	1-3	Different rocks	1	24<	1	5<	6	175-225	6	2-2.7
7	5-20	3-4	dry areas							7	225-280	7	2.7-3.5
8	20-40		barren land	8-10	Any kind of acidified organic soil					8	280-304	8	3.5-4.4
9	40-65	1-3								9	304-405	9	4.4-5.4
10	65<	1								10	>405	10	5.4<
1		2		3		4		5		3		5	

Weights assigned to parameters

برای طراحی و مدل سازی شدن با مقادیر زبانی و دانش فرد خبره است که برای نخستین بار توسط پروفیسور لطفی زاده در سال ۱۹۶۵ مطرح گردید (Zadeh, 1965). در این روش، به جای نیاز به اطلاعات دقیق می توان از طریق طراحی مدلهایی، کنترل کننده های بازخوردی در سیستم را وادار به دریافت داده های مبهم کرده تا بتوانند آنها را به حالت های ساده تر و مؤثرتر در اجرا به کار ببرند. اساس منطق فازی بر پایه مجموعه های فازی استوار است و همچنین نظریه کلاسیک مجموعه ها در علم ریاضیات را بسط داده است و عضویت درجه بندی شده را ارائه می دهد. به این ترتیب که یک عنصر تا درجاتی و نه کاملاً، عضو یک مجموعه باشد. در این تئوری، عضویت اعضای مجموعه از طریق تابع $X(u)$ مشخص می شود که X نمایانگر یک عضو مشخص و u تابعی فازی است که درجه عضویت X در مجموعه مربوطه را تعیین می کند و مقدار آن بین صفر و یک است (رابطه ۲).

$$A = \{(X.u \ A(x)) | x \in X\}, \quad X(0,1) \quad (2)$$

برای مدل سازی با منطق فازی، ابتدا بایستی داده های ورودی به صورت توابع عضویت نشان داده شوند، سپس با استفاده از قوانین فازی توابع عضویت را به داده های خروجی مرتبط ساخت. منطق فازی از طریق عملگرهای فازی به کار گرفته می شوند که بر اساس قوانین اگر... آنگاه، انجام می گیرد. منطق فازی شامل سه روش

۳-۵- محاسبه فرونشست با تصاویر راداری ماهواره سنتینل ۱

با ورود ماهواره های راداری از دهه ۱۹۹۰ تکنیک تداخل سنجی راداری به عنوان ابزاری دقیق و کارآمد در پایش جابجایی های سطح زمین ناشی از پدیده های مختلف از جمله فرونشست شناخته شده است. سنتینل به عنوان یک مجموعه دو ماهواره ای که هر یک با فاصله ۱۸۰ درجه از یکدیگر قرار دارند تمام کره زمین را در هر ۶ روز تصویربرداری می کند. این ماهواره به عنوان نخستین ماهواره از سری ماهواره های پنج گانه کوپرنیکوس سازمان فضایی اروپا، به طور شبانه روز با هر شرایط آب و هوایی با استفاده از باند C، به تصویربرداری از سیاره زمین می پردازد و با ۴ حالت تصویربرداری توان تفکیک مکانی کمتر از ۱۰ متر را نیز دارد.

۳-۶- بهینه سازی روش آلپریفت

در این پژوهش، برای بهینه سازی چهارچوب آلپریفت برای رفع خطای ناشی از اعمال نظرات کارشناسانه و کاهش عدم قطعیت پارامترهای مؤثر، از میان موارد گوناگون روش ها و مدل های بهینه سازی، از دو روش الگوریتم ژنتیک و منطق فازی (ساجنو (Sugeno)) استفاده شده است. منطق فازی (Fuzzy Logic) یا تئوری فازی فناوری جدیدی برای جایگزینی نیازمندی یک سیستم به ریاضیات پیچیده و پیشرفته،

۳-۷- اجرای مدل

– تهیه نقشه لایه‌های ورودی روش آلبریف

برای تهیه نقشه پتانسیل آسیب‌پذیری فرونشست با چهارچوب آلبریف، هفت پارامتر مؤثر با رتبه‌های پیشنهادی ندیری و همکاران (Nadiri et al., 2018) در محیط نرم‌افزار ArcMap رتبه‌دهی، کلاس‌بندی و در نهایت با وزن پیشنهادی ندیری و همکاران (Nadiri et al., 2018) همپوشانی انجام گرفت.

۱- محیط آبخوان (A): جنس لایه‌های تشکیل دهنده خاک نقش بسزایی در افزایش پتانسیل آسیب‌پذیری فرونشست دارد. رسوبات دانه ریز مانند سیلت و رس به دلیل نفوذپذیری کم، عدم حالت الاستیسیته و ضریب تحکیم بالا، پس از برداشت بی‌رویه از آب‌زیرزمینی دچار تحکیم برگشت‌ناپذیر شده و باعث فرونشست زمین می‌شوند. بنابراین، لایه محیط آبخوان بعد از درون‌یابی، طبق جدول ۲ به رسوبات دانه ریز بیشترین رتبه و رسوبات دانه درشت مانند شن و ماسه و.. کمترین رتبه در نظر گرفته شده است (شکل ۴-۱).

۲- کاربری اراضی (L): کاربری زمین می‌تواند یکی از عوامل افزایش پتانسیل آسیب‌پذیری فرونشست باشد. با توجه به منطقه مورد مطالعه، کشاورزی، کاربری چیره در دشت به‌شمار می‌رود که بیشترین رتبه نیز به آن اختصاص داده شده است. نقشه کاربری اراضی توسط تصاویر ماهواره‌ای و نرم‌افزار ENVI تهیه شده و سپس لایه با رتبه‌های جدول ۲ در نرم‌افزار ArcMap کلاس‌بندی و تهیه گردیده است (شکل ۴-۲).

۳- میزان پمپاژ (P): پمپاژ بی‌رویه باعث افت سطح آب زیرزمینی می‌شود که با کاهش فشار هیدرولیکی فضای بین دانه‌ای نیز کاهش یافته و در نتیجه فرونشست رخ می‌دهد. به عبارتی، هر چه میزان پمپاژ در منطقه‌ای بیشتر باشد، پتانسیل آسیب‌پذیری فرونشست بیشتر و هر چه مقدار پمپاژ کمتر باشد، پتانسیل آسیب‌پذیری فرونشست کمتری رخ می‌دهد. نقشه پمپاژ برای سال ۱۴۰۰-۱۳۹۹ در نرم‌افزار ArcMap درون‌یابی و توسط رتبه‌های تعیین شده برای پمپاژهای مختلف در جدول ۲ به‌دست آمد (شکل ۴-۳).

۴- تغذیه (R): تغذیه بر خلاف پمپاژ تأثیر ممانعت بر افزایش پتانسیل فرونشست دارد. هر چه تغذیه بیشتر باشد، خطر آسیب‌پذیری کمتری از لحاظ فرونشست، منطقه را تهدید خواهد کرد. بنابراین، بیشترین رتبه برای تغذیه کمتر و کمترین رتبه آسیب‌پذیری به تغذیه بیشتر مطابق با جدول ۲ در نظر گرفته شده است. در این مطالعه، برای ایجاد این لایه تغذیه از روش پیسکوپو (Piscopo, 2001) استفاده شد. پارامترهای مؤثر در این روش، لایه‌های بارش، نفوذپذیری خاک و درصد شیب می‌باشند که رتبه‌های مربوط به هر یک از این لایه‌ها در جدول ۳ آورده شده است. با رتبه‌بندی و همپوشانی این سه لایه در نهایت لایه تغذیه طبق رابطه (۵) محاسبه شد (شکل ۴-۴).

(۵) درصد شیب + بارش + خاک = تغذیه خالص

۵- ستبرای آبرفت (I): از سطح زمین تا سنگ کف را شامل می‌شود که رابطه مستقیم با فرونشست دارد. هر چه ستبرای بیشتر باشد، وزن وارده بر رسوبات و تغییر شکل لایه‌ها با برداشت آب از آبخوان بیشتر شده و خطر آسیب‌پذیری فرونشست بالاتر خواهد بود. با این استدلال طبق جدول ۲ هر چه ستبرای بیشتر باشد، پتانسیل فرونشست بیشتر و هر چه کمتر باشد، بالعکس خواهد بود. این لایه توسط استخراج ستبرای آبرفت از لاگ‌های پیژومتری در دسترس و درون‌یابی و رتبه‌دهی و کلاس‌بندی در نرم‌افزار ArcMap محاسبه گردید (شکل ۴-۵).

۶- فاصله از گسل (F): حرکات زمین‌ساختی به ویژه گسل از عوامل طبیعی مؤثر در رخداد فرونشست است. جابه‌جایی رسوبات درشت‌دانه و ریزدانه در محل شکاف‌های ایجاد شده، سبب تشدید پدیده فرونشست می‌شوند. بنابراین، هر محدوده دور از گسل باشد، امکان رخداد فرونشست نیز کمتر خواهد بود و بالعکس. طبق جدول ۲ مناطقی که در فاصله بیشتر از ۵ کیلومتر از گسل قرار دارند، رتبه ۱ داده شد.

لارسن، ممدانی و ساجنو است که عمدتاً از مدل‌سازی ساجنو به دلیل ثابت و خطی بودن روند آن استفاده می‌شود (Sugeno, 1985). این روش از مدل‌سازی شامل سه مرحله: (۱) تعیین ساختار یا خوشه‌بندی، (۲) استفاده از عملگرهای فازی و (۳) تخمین پارامترها و حداقل مربعات خطا می‌باشد. مجموعه‌های فازی به دلیل داشتن مرزهای مبهم و تدریجی بین مرزهای تعریف شده، مناسب‌ترین روش برای رفع خطاهای انسانی و ماهیت عدم قطعیت در سیستم‌ها می‌باشد (Calvo et al., 2009; Tayfu et al., 2014). برای بهینه‌سازی آلبریف با روش‌های هوش مصنوعی شاخص پتانسیل فرونشست (آلبریف) را ابتدا باید با فرمول زیر اصلاح نمود و سپس به فرایند بهینه‌سازی ادامه داد:

$$CSVI = \frac{(SVI)_{\max}}{(NSV)_{\max}} * (NSV)_i \quad (3)$$

CSVI نشان‌دهنده شاخص آسیب‌پذیری فرونشست تصحیح شده، $(SVI)_{\max}$ بیشینه مقدار شاخص فرونشست، $(NSV)_{\max}$ بیشینه مقدار فرونشست برآورد شده از طریق INSAR و $(NSV)_i$ مقدار فرونشست حاصل از INSAR می‌باشد.

الگوریتم ژنتیک (GA) در سال ۱۹۷۵ برای نخستین بار توسط هالند معرفی گردید (Goldberg, 1989). الگوریتم ژنتیک، الهام گرفته از علم ژنتیک و نظریه تکامل داروین و بر اساس بقای سازگارترین‌ها با انتخاب طبیعی استوار است. رایج‌ترین کاربرد آن، استفاده به‌عنوان تابع بهینه‌کننده است. الگوریتم ژنتیک معمولاً برای ایجاد راه‌حل‌های باکیفیت بالا به‌منظور بهینه‌سازی و حل مسائل پیچیده با استفاده از اپراتورهای الهام گرفته از سیستم زیستی مثل جهش، تقاطع یا ترکیب مجدد و انتخاب مورد استفاده قرار می‌گیرند (Mitchell, 1996). الگوریتم ژنتیک با استفاده از ایده ترکیب کروموزوم‌های بهتر در طبیعت، که از نسل‌های بهتری به عمل می‌آیند، اقدام به حل مسائل می‌کند که در این میان امکان دارد با ایجاد جهش‌هایی باعث بهبود نسل بعدی شود. روند استفاده از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی شامل ۴ مرحله می‌باشد: مرحله ابتدایی یا اولیه، انتخاب، تقاطع یا ترکیب مجدد و جهش. در ابتدا، چندین جواب به‌صورت الگوریتمی یا تصادفی، برای مسئله تولید می‌شود که هر جواب یک کروموزوم و مجموعه جواب‌ها، جمعیت اولیه نامیده می‌شود. سپس با استفاده از عملگرهای الگوریتم ژنتیک پس از انتخاب کروموزوم‌های سازگارتر، کروموزوم‌ها باهم ترکیب و جهشی در آنها ایجاد می‌شود. در نهایت، جمعیت کنونی با جمعیت جدیدی که از ترکیب و جهش در کروموزوم‌ها حاصل شده است، ترکیب می‌شود. ممارست در این فرایندها تا جایی ادامه می‌یابد که دیگر در جمعیت جدید بهبود تازه‌ای رخ ندهد. مجموعه‌ای از پارامترهای هدف به‌صورت اتفاقی برای جمعیت که با تعداد ثابتی تعیین‌شده‌اند تولید شده و پس از شبیه‌سازی، عددی را که معرف انحراف معیار آن مجموعه از اطلاعات است به آن عضو از جمعیت یاد شده نسبت داده می‌شود. این فرایند تا جایی برای همه تک به تک اعضای جمعیت انجام می‌گیرد تا سازگارترین نسل جایگزین نسل‌های پیشین شود. در این مطالعه، از الگوریتم ژنتیک به‌منظور بهینه‌سازی وزن پارامترهای آلبریف استفاده شده است. متغیرهای تصمیم مسئله، وزن‌های مربوط به هفت پارامتر مؤثر در برآورد شاخص پتانسیل فرونشست است. تابع هدف روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک در رابطه (۴) آورده شده است. این تابع همان ضریب همبستگی بین فرونشست حاصل از تصاویر راداری و شاخص آسیب‌پذیری فرونشست (آلبریف) است که با هدف بیشینه شدن این تابع، ضرایب وزنی بهینه می‌شوند.

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}} \quad (4)$$

در رابطه فوق F تابع هدف مسئله بهینه‌سازی، V_i : شاخص آسیب‌پذیری مربوط به نقطه، $\bar{V}$: میانگین شاخص‌های آسیب‌پذیری، S_i : فرونشست راداری در نقطه i، $\bar{S}$: میانگین فرونشست راداری و n نیز تعداد داده می‌باشد.

یافته و موجب پدیده فرونشست می‌شود. فرونشست با میزان افت سطح آب رابطه‌ای مستقیم دارد و هر چه افت بیشتر باشد، خطر آسیب پذیری فرونشست نیز بیشتر خواهد بود. لایه افت سطح آب زیرزمینی با اختلاف سطح آب سال ۱۴۰۰-۱۳۹۹ و درونی‌یابی و کلاس بندی بارته‌های جدول ۲ در آرک‌مپ به دست آمد (شکل ۴-۷)

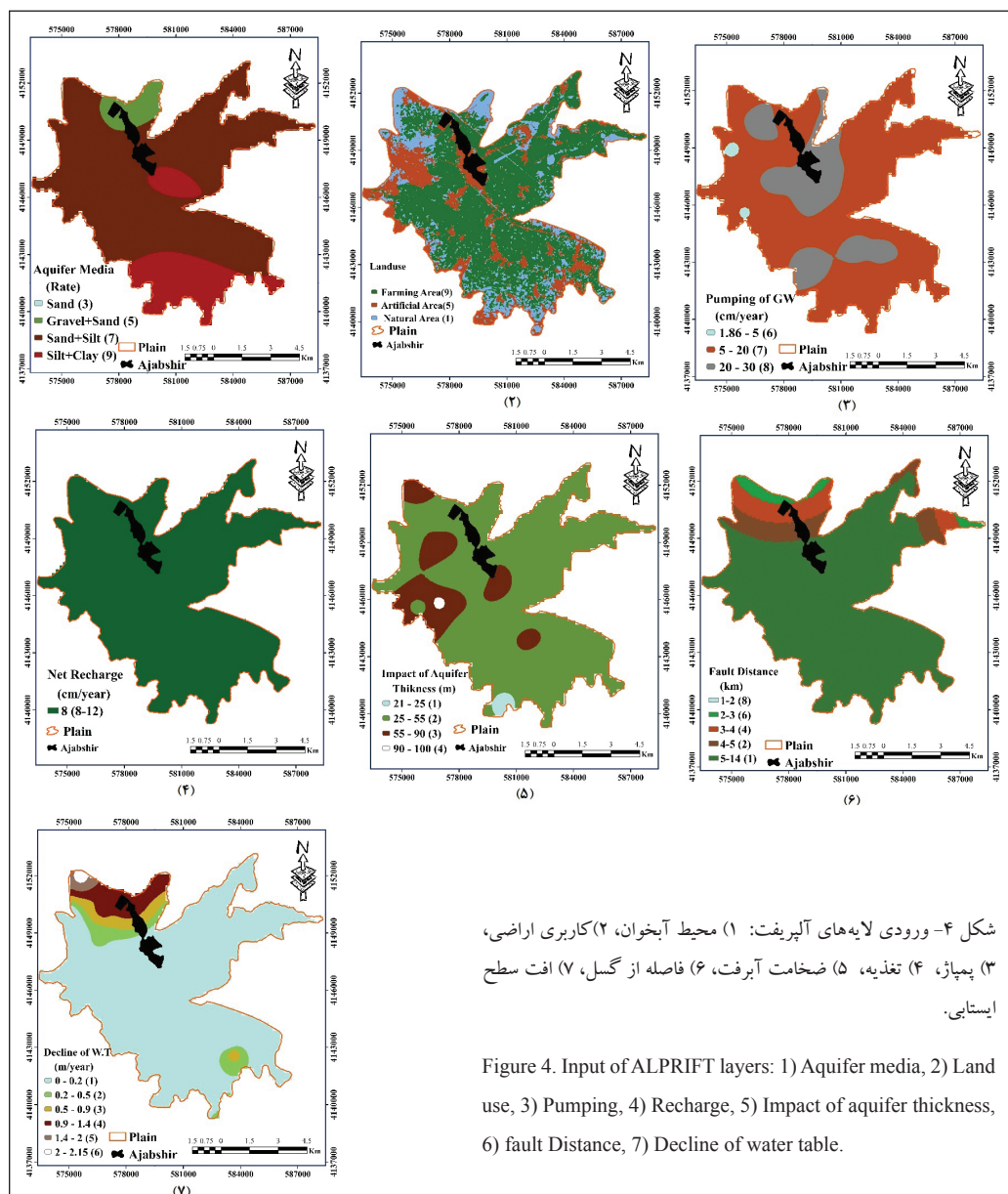
این لایه با اندازه‌گیری فاصله محدوده مطالعاتی از گسل‌های رخ داده با استفاده از دستور Euclidean Distance در محیط نرم افزار آرک جی‌آی‌اس بر حسب کیلومتر محاسبه گردید (شکل ۴-۶).

۷- افت سطح آب زیرزمینی (T): با افت سطح آب زیرزمینی به دلایلی چون خشکسالی، برداشت‌های بی‌رویه و... تنش موثر وارد بر رسوبات افزایش

جدول ۳- رتبه بندی تغذیه پيسکوپو (Piscopo, 2001).

Table 3. Piscopo's recharge rating (Piscopo, 2001).

precipitation		Slope		Soil permeability		Recharge rate	
Rate	Range(mm)	Rate	SlopeRange (%)	Rate	Range	Rate	Range
4	>580	4	<2	5	High	10	11-13
3	700-850	3	2-10	4	Moderate to high	8	9-11
2	500-700	2	10-33	3	Moderate	5	7-9
1	<500	1	>33	2	Low	3	5-7
				1	Very low	1	3-5



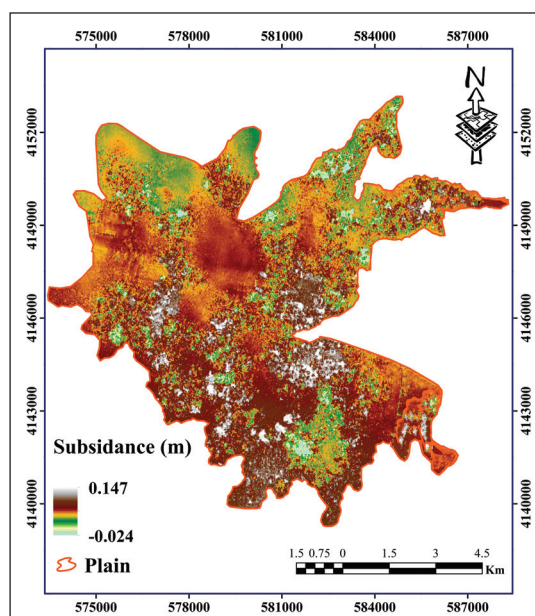
شکل ۴- ورودی لایه‌های آلپریف: ۱) محیط آبخوان، ۲) کاربری اراضی، ۳) پمپاژ، ۴) تغذیه، ۵) ضخامت آبرفت، ۶) فاصله از گسل، ۷) افت سطح ایستایی.

Figure 4. Input of ALPRIFT layers: 1) Aquifer media, 2) Land use, 3) Pumping, 4) Recharge, 5) Impact of aquifer thickness, 6) fault Distance, 7) Decline of water table.

— برآورد فرونشست با تصاویر سنتینل ۱

دربافتی برای هر یک از پوشش‌ها است و تصویر کوه‌رنسی نشان‌دهنده میزان تطابق سیگنال‌های تداخل‌سنجی است که مقادیر آن بین صفر و یک است و هرچه به یک نزدیک‌تر و یا بیشتر از ۰/۶ باشد، نشان‌دهنده برخورداری محاسبات از دقت بالا می‌باشد. در ادامه، پس از یکپارچه‌سازی و حذف خطای ناشی از توپوگرافی در تصویر فاز، فیلتر گلداشتاين اعمال گردید. در آخر با استفاده از ابزار Phase to displacement میزان جابه‌جایی سطح زمین به دست آمد. جابه‌جایی‌های ایجاد شده در منطقه، مقادیر فرونشست و بالآمدگی‌ها در سطح زمین را نشان می‌دهند. در این مرحله، برای صحت‌سنجی تصویر به دست آمده از تصویر فاز، تصویر کوه‌رنسی نیز به displacement اضافه شده است که با مقایسه مکان مشابه در هر دو تصویر می‌توان به صحت تصویر نهایی از جابه‌جایی‌های به دست آمده اطمینان حاصل کرد. در مرحله آخر، با استفاده از ابزار Range-Doppler Terrain Correcting تصویر به دست آمده تصحیح هندسی شد و به فرمت tiff از نرم‌افزار اسنپ ۱۶ (Snap16) وارد محیط آرک‌مپ شد و با روی هم‌گذاری آن با نقشه مدل رقومی ارتفاعی (DEM) ۱۷ منطقه نقشه نهایی به دست آمد (شکل ۵).

برای محاسبه میزان فرونشست در دشت عجب شیر با استفاده از تصاویر راداری، از تصاویر SLC، سنتینل ۱ استفاده گردید. در این پژوهش از دو جفت تصویر راداری سنتینل-۱ با بازه زمانی یک ساله (۲۰۲۰-۲۰۲۱) که هر جفت تصویر با زمانی ۳۶ روزه (۲۰۲۰/۱۰/۱۵-۲۰۲۰/۰۹/۰۹ و ۲۰۲۱/۱۰/۱۶-۲۰۲۱/۰۹/۱۰) هستند، استفاده شد. در مرحله اجرا، پس از تعریف اطلاعات مداری برای هر کدام از تصاویر، با Stack کردن جفت تصویر، تصاویر اسلیو و مستر (Master و Slave) ایجاد شدند (تصویر مستر (Master) تصویری است که از لحاظ هندسی و رادیومتری مبنای تصویر اسلیو (Slave) تصویر شده از لحاظ هندسی و رادیومتری با تصویر Master می‌باشد). برای از بین بردن اختلاف رادیومتریکی بین این دو تصویر، از دستور Interferogram S-1 Enhance Spectral Diversity با استفاده از ابزار Formation اثر فاز ناشی از توپوگرافی سطح زمین با انتخاب DEM، SRTM 1 Sec بر اساس مدل رقومی عملی شد. در این مرحله دو تصویر فاز و کوه‌رنسی ایجاد شدند. تصویر فاز نشان‌دهنده اختلاف پرتوهای ارسالی راداری و سیگنال‌های



شکل ۵- نقشه میزان فرونشست دشت عجب شیر سال ۲۰۲۰-۲۰۱۹ بر اساس ماهواره سنتینل ۱.

Figure 5. Map of the subsidence rate of Ajabshir plain in 2019-2020 based on Sentinel-1 satellite.

نقشه شاخص آسیب‌پذیری فرونشست محاسبه گردید (شکل ۶- A). شاخص آسیب‌پذیری فرونشست برای دشت عجب شیر از ۳۰ تا ۱۲۷ به دست آمد که طبق تقسیم‌بندی ندیری و (Nadiri et al., 2018)، شامل ۲ کلاس؛ کم (۳۰-۹۵) و متوسط (۹۵-۱۲۷) می‌باشد. بیشترین پتانسیل آسیب‌پذیری در مناطق مرکزی مشاهده می‌شود. در این مناطق، شهر عجب شیر و سایر روستاهای دشت پراکنده شده‌اند، همچنین شامل مناطق کشاورزی نیز می‌شود و تقریباً ۸۰ درصد از محدوده دشت را در برمی‌گیرد. مابقی دشت نیز در بخش امنی از لحاظ پتانسیل فرونشست قرار دارند. برای صحت‌سنجی نقشه پتانسیل به دست آمده، ضریب همبستگی آلپرفیت و داده‌های استخراج شده نقشه فرونشست به دست آمده از تصاویر راداری سنتینل ۱ محاسبه شد و ضریب همبستگی ۰/۴۶ حاصل شد که نشان‌دهنده پاسخ آلپرفیت در محدوده مورد نظر می‌باشد.

— استانداردسازی داده‌ها

برای از بین بردن دامنه مختلف مقادیر داده و تبدیل مقادیر به اعدادی مابین صفر و یک، فرایند استانداردسازی داده‌ها با استفاده از رابطه ۶ انجام گرفت:

$$X_i^n = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (6)$$

در رابطه فوق X_i داده i ام، $X_{\min}$ و $X_{\max}$ به ترتیب کمترین و بیشترین مقدار داده‌ها و X_i^n عدد استاندارد شده می‌باشند.

— تهیه نقشه آسیب‌پذیری فرونشست با آلپرفیت

پس از تهیه هفت لایه از پارامترهای مؤثر پیشنهادی ذکر شده (شکل ۴)، مطابق با وزن پارامترهای جدول ۲ وزن داده شد و پس از تلفیق این لایه‌ها طبق رابطه ۱

روش خوشه‌سازی کاهشی برای دسته‌بندی داده‌ها مدل فازی اجرا شد. R برای مرحله آموزش و آزمایش به ترتیب ۰/۹۳ و ۰/۸۴ با خطای (RMSE) ۰/۱۰۱ و ۰/۲ بوده است و در نهایت، با درون‌یابی داده خروجی در جی‌آی‌اس نقشه آلپریفت بهینه‌شده با منطق فازی با شاخص آسیب‌پذیری ۰/۰۷ تا ۰/۷۵ به دست آمد (شکل ۶-ب). ضریب همبستگی بین خروجی حاصل از روش منطق فازی با نقشه فرونشست راداری ۰/۷۲ حاصل شد. نتایج ارزیابی عملکرد بهینه‌سازی با منطق فازی (ساجنو) در جدول ۴ ارائه گردیده است.

جدول ۴- نتایج ارزیابی عملکرد بهینه‌سازی با فازی ساجنو.

Table 4. The results of evaluation of optimization performance with fuzzy sugeno.

Evaluation criteria	R	R ²	RMSE
Train	0.93	0.87	0.101
Test	0.84	0.72	0.2

به لایه پمپاژ از آب‌زیرزمینی و بعد از آن به ترتیب لایه‌های تغذیه، محیط آبخوان و افت سطح آب زیرزمینی اختصاص یافته است. شاخص آسیب‌پذیری فرونشست با الگوریتم ژنتیک برای منطقه ۸۸ تا ۹۵ به دست آمد که طبق کلاس‌بندی ندریری و همکاران (Nadiri et al., 2018)، شاخص آسیب‌پذیری شامل دو کلاس کم و متوسط شد که بیشترین پتانسیل فرونشست در قسمت‌هایی از شمال، مرکزی و جنوب دشت رو مشاهده شد (شکل ۶-ج). ضریب همبستگی به‌دست‌آمده از این نقشه با نقشه فرونشست راداری ۰/۶۴ می‌باشد.

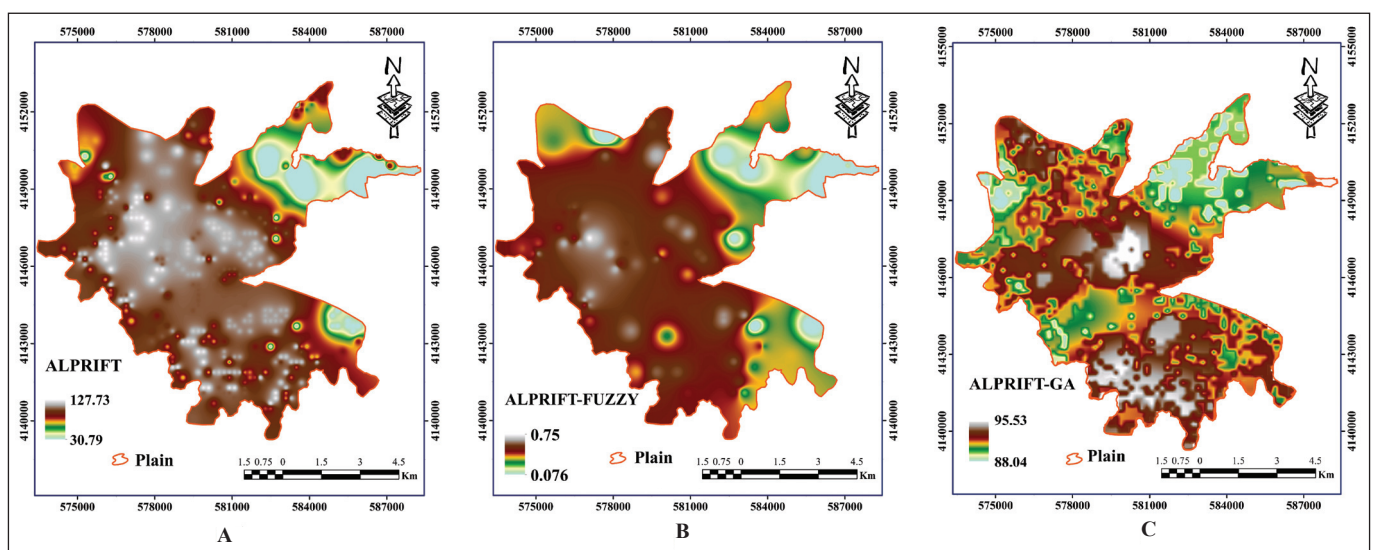
$$SVI_G = 1.3A_r + 0.02L_r + 5P_r + 2.7R_r + 0.7I_r + 0.01F_r + 1.3T_r \quad (V)$$

نقشه آسیب‌پذیری به روش آلپریفت بهینه‌شده با منطق فازی (ساجنو)

در این مطالعه، برای بهینه‌سازی با روش منطق فازی، به جهت بازدهی بیشتر و درصد خطای کمتر، از ساجنو استفاده شد، ورودی‌های این مدل هفت پارامتر اصلی آلپریفت در نظر گرفته شد و خروجی مدل نیز طبق رابطه ۴ محاسبه شد. در ادامه، برای استانداردسازی داده‌ها، تمام ورودی‌ها و خروجی بر اساس رابطه ۶ به بازه صفر و یک انتقال داده شدند. ۸۰ درصد از داده‌ها به عنوان داده آموزش (Train) و ۲۰ درصد از آنها به عنوان داده آزمایش (Test) در نظر گرفته شدند. با استفاده از

نقشه آسیب‌پذیری به روش آلپریفت بهینه‌شده با الگوریتم ژنتیک

در این مطالعه بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک با بیشینه کردن تابع هدف صورت گرفت. تابع هدف با همبستگی بین نقشه فرونشست راداری و شاخص آسیب‌پذیری فرونشست تعریف شد و وزن‌های بهینه پارامترهای آلپریفت به روش الگوریتم ژنتیک با بیشینه کردن تابع هدف در رابطه (۳) به دست آمد. با قرار دادن وزن‌های بهینه‌شده در فرمول (۱) شاخص آسیب‌پذیری جدیدی از ترکیب روش آلپریفت و الگوریتم ژنتیک حاصل شد (رابطه ۷). در این روش رتبه‌ها بر اساس رتبه‌های روش آلپریفت و وزن‌ها بر اساس وزن‌های به‌دست‌آمده از الگوریتم ژنتیک است. بیشترین وزن



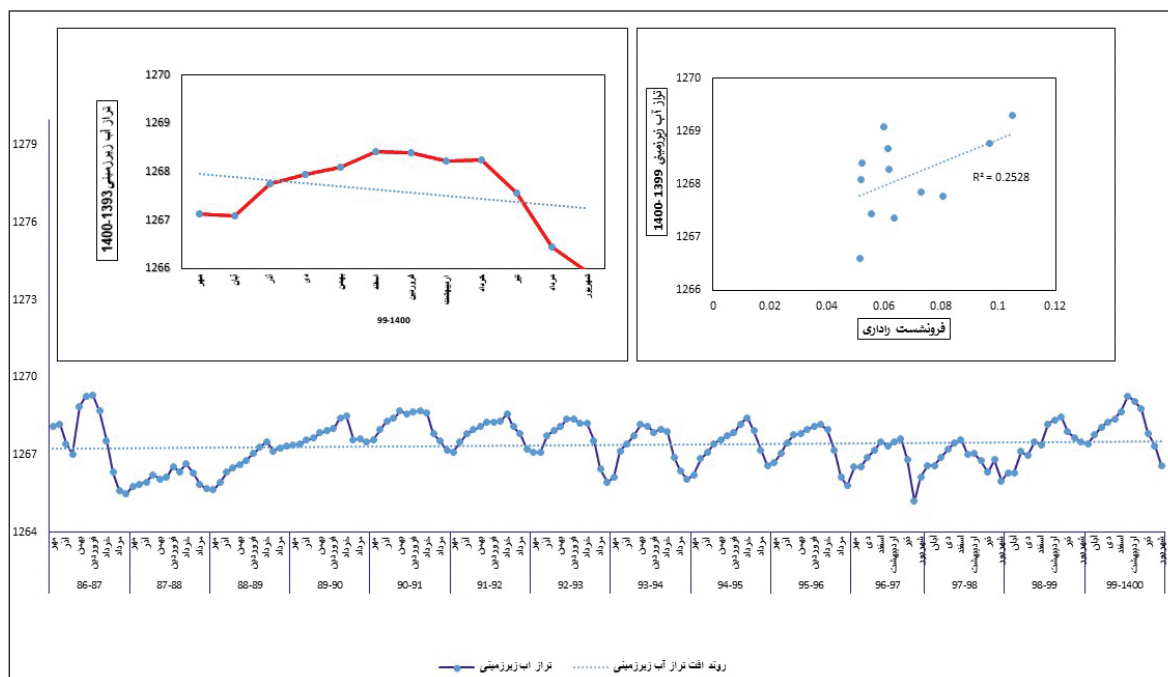
شکل ۶- نقشه‌های بهینه‌بندی شده: (A) آلپریفت، (B) آلپریفت-فازی ساجنو، (C) آلپریفت-الگوریتم ژنتیک.

Figure 6. Zoned maps: A) ALPRIFT, B) ALPRIFT-Fuzzy Sugeno, C) ALPRIFT-Genetic Algorithm.

۴-بحث

همبستگی بین پتانسیل فرونشست محاسبه شده و فرونشست واقعی ۰/۴۶ حاصل شد که نشان داد تا حدودی می توان به نتایج به دست آمده از آلبریف اطمینان کرد ولی جهت بهبود روش آلبریف و رفع معایب وزنی دهی کارشناسانه و کاهش عدم قطعیت، از روش های بهینه سازی الگوریتم ژنتیک و فازی ساجنو استفاده شد که وزن های حاصل از بهینه با الگوریتم ژنتیک به ترتیب برای لایه های پمپاژ از آب های زیرزمینی، تغذیه، محیط آبخوان و افت سطح آب زیرزمینی، ۵، ۲/۷، ۱/۳ و ۱/۳ که بیشترین وزن ها را به خود اختصاص داده اند، به دست آمد. در ادامه، نتایج حاصل با فرونشست واقعی مشاهده شده با تصاویر راداری، صحت سنجی شد که ضریب همبستگی به ترتیب برای ALPRIFT-GA و ALPRIFT-SFL، ۰/۶۲ و ۰/۷۲ به دست آمد. این بررسی نشان داد هر دو روش الگوریتم ژنتیک و فازی ساجنو نتایج روش آلبریف را بهبود داده اند ولی روش فازی ساجنو عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم ژنتیک داشته و می تواند برای برآورد پتانسیل فرونشست در منطقه مطالعاتی استفاده شود.

در این پژوهش، از چهارچوب آلبریف برای بررسی پتانسیل آسیب پذیری فرونشست استفاده شد تا از این طریق بتوان پارامترهای حساس و تأثیرگذار در افزایش پتانسیل آسیب پذیری فرونشست را بررسی نمود. بر این اساس، شاخص آسیب پذیری فرونشست برای دشت عجب شیر در دو کلاس پتانسیل کم و متوسط تقسیم بندی شد. برای صحت سنجی و اطمینان از صحت پتانسیل به دست آمده از تصاویر راداری سنتینل-۱ (Sentinel-1) استفاده شد. بر این اساس، نرخ فرونشست برای سال ۱۴۰۰-۱۳۹۹ (۲۰۲۰-۲۰۲۱) با دو جفت تصویر (با بازه زمانی ۲۰۲۰/۱۰/۱۵-۲۰۲۰/۰۹/۰۹ و ۲۰۲۱/۱۰/۱۶-۲۰۲۱/۰۹/۱۰) ۲/۴ سانتی متر برآورد شد (شکل ۵). برای اطلاع از ارتباط میزان فرونشست با تراز آب زیرزمینی، همبستگی بین شان ایجاد شد و ضریب همبستگی ۰/۲۵ به دست آمد که در نوع خود قابل قبول بود. هیدروگراف معرف تراز آب زیرزمینی و نتایج همبستگی در شکل ۷ ارائه شده است. افت در آبخوان این دشت در دراز مدت (۱۴۰۰-۱۳۸۶) یک و نیم متر و در کوتاه مدت (۱۴۰۰-۱۳۹۹)، ۰/۸۴ متر بوده است. همچنین ضریب



شکل ۷- نمودار هیدروگراف تراز آب زیرزمینی دشت عجب شیر و نتایج همبستگی بین میزان فرونشست و تراز آب زیرزمینی در سال آبی ۱۴۰۰-۱۳۹۹.

Figure 7. The hydrograph diagram of the groundwater level of Ajabshir plain and Correlation results between subsidence rate and ground-water level in 2019-2020.

۵-نتیجه گیری

سطح آب زیرزمینی و محیط آبخوان می باشد. در این مناطق کشاورزی و مسکونی با مواد غالب سیلت، رس و مخلوطی از رس و ماسه در صورت پمپاژ مداوم و افت سطح آب زیرزمینی، فرونشست شدید زمین رخ خواهد داد. به رغم اهمیت موضوع، مطالعات و اقدامات مدیریتی در این دشت صورت نگرفته است، از این رو، پیشنهاد می شود برنامه های مدیریتی برای حفاظت از فرونشست از جمله اصلاح الگوی کشت و آبیاری در این مناطق انجام شود و بایستی از پمپاژ بیش از حد پرهیز شود.

نتایج این پژوهش نشان می دهد که ضریب همبستگی بین سه روش (آلبریف، الگوریتم ژنتیک و فازی ساجنو) با داده های ماهواره ای سنتینل ۱، روش فازی ساجنو (SFL) با ضریب همبستگی ۰/۷۲ و مجذور مربعات خطای ۰/۲ بهترین روش است. بر این اساس، در حوالی شهر عجب شیر، روستاهای شیشوان، مهابا، شیراز و پسیان پتانسیل فرونشست بیشتری نسبت به بقیه قسمت های دشت دارد. بررسی ها نشان داد که مهم ترین عامل در فرونشست منطقه پمپاژ آب زیرزمینی، تغذیه آبخوان، کاهش

کتابنگاری

آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی، ۱۳۹۲، گزارش نهایی مطالعات آب‌های زیرزمینی دشت‌های استان آذربایجان شرقی در محیط زیست، GIS. مهندسین مشاور اول. حبیبی، الف.، ۱۳۹۹، بررسی پتانسیل فرونشست زمین در آبخوان دشت هادیشهر با استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد هیدروژئولوژی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز. داداشی، ث.، صادق‌فام، س.، نادیری، الف.، مجبی، ع.، ۱۳۹۹، تحلیل آسیب‌پذیری فرونشست آبخوان دشت مرند با استفاده از روش ALPRIFT بر اثر بهره‌برداری بی‌حد از منابع آب زیرزمینی. مهندسی عمران شریف، دوره ۲-۳۶، شماره ۳/۱، ص. ۸۵-۹۶. درویش‌زاده، الف.، ۱۳۸۰، زمین‌شناسی ایران. مؤسسه انتشارات امیرکبیر، تهران. زندی، ر.، فرزین‌کیا، ر.، شفیعی، ن.، ۱۳۹۸، فرونشست و تداخل سنجی راداری، انتشارات ماهواره. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۸۴، بررسی فرونشست زمین در دشت تهران-شهریار (گزارش نخست)، ص ۸۴. سامانی، س.، ۱۳۹۵، بررسی هیدروژئولوژی و عدم قطعیت مدل آب زیرزمینی دشت عجب‌شیر، آذربایجان شرقی. پایان‌نامه دکتری هیدروژئولوژی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز. صالحی، ر.، غفوری، م.، لشکری‌پور، غ.، دهقانی، م.، ۱۳۹۲، ارزیابی فرونشست زمین در دشت مهاباد جنوبی با استفاده از تداخل سنجی رادار، فصلنامه علمی و پژوهشی مهندسی آبیاری و آب، سال سوم، شماره ۱۱.

References

- Aller, L., Bennett, T., Lehr, J., and Petty R., 1987. DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution using hydrogeologic settings. US EPA, Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory. 85(2).
- Calvo, P. I., and Estrada, G. J. C., 2009. Improved irrigation water demand forecasting using a soft-computing hybrid model. Biosystems Engineering, 102, 202-218.
- Dadashi, S., Sadeghfam, S., Nadiri, A.A., Mohebi, E., 2020. Vulnerability analysis of Marand plain aquifer subsidence using ALPRIFT method due to overexploitation of underground water resources. Sharif civil engineering. 1/3(2-36): 85-96. (In Persian).
- Darvishzadeh, A., 2001. Geology of Iran. Amir Kabir Publishing Institute: Tehran. (In Persian)
- East Azerbaijan Regional Water Co., 2013. The final report of groundwater detailed studies of the plains of East Azerbaijan Province in the environment, GIS. Consulting engineers of the first. (In Persian).
- Geological Survey and Mineral Exploration of Iran, 2005. Investigation of land subsidence in Tehran-Shahriyar plain, first report, p. 84. (In Persian).
- Goldberg, D.E., 1989. Genetic algorithms in search, optimization and machine learning, 1st Ed., Addison-Wesley Publishing Company, New York.
- Habibi, A., 2021. Consideration of Land Subsidence Potential in Hadishahr Plain Aquifer Using Artificial Intelligence Models. MSc thesis of Hydrogeology, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz. (In Persian).
- Hu, B., Zhou, Jun., Wang, j., Chen, Z., and Dongqi, W., 2009. Risk assessment of land subsidence at Tianjin coal area in China. Environmental Earth Sciences. 59(2): 269-276.
- Kim, Y., Son, M., Moon, H.K., and Lee, S.A., 2017. A study on the development of an artificial neural network model for the prediction of ground subsidence over abandoned mines in Korea. Geosystem Engineering, 20(3), 163-171.
- Mitchell, M., 1996. An Introduction to Genetic Algorithms, Massachusetts Institute of Technology.
- Naderi, K., Nadiri, A.A., Asghari Moghaddam, A., and Kurd, M., 2018. A new method to identify and determine areas at risk of subsidence (case study: Selmas plain aquifer). Ecohydrology. 1(5): 85-97.
- Nadiri, A.A., Gharekhan, M., Khatibi, R., Sadeghfam, S., and Asghari Moghaddam, A., 2017a. Groundwater vulnerability indices conditioned by Supervised Intelligence Committee Machine (SICM). Science of the Total Environment. 574, 691-706.
- Nadiri, A.A., Gharekhan, M., Khatibi, R., and Asghari Moghaddam, A., 2017b. Assessment of groundwater vulnerability using supervised committee to combine fuzzy logic models. Environmental Science and Pollution Research. 24(9), 8562-8577.
- Nadiri, A.A., Habibi, I., Gharekhan, M., Sadeghfam, S., and Barzegar, R., 2022. Introducing dynamic land subsidence index based on the ALPRIFT framework using artificial intelligence techniques. Earth Science Informatics. <https://doi.org/10.1007/s12145-021-00760-w>
- Nadiri, A.A., Sedghi, Z., Khatibi, R., and Gharekhan, M., 2017c. Mapping vulnerability of multiple aquifers using multiple models and fuzzy logic to objectively derive model structures. Science of the Total Environment. 593-594, 75-90.
- Nadiri, A.A., Khatibi, R., Khalifi, P., and Feizizadeh, B., 2020. A study of subsidence hotspots by mapping vulnerability indices through innovative 'ALPRIFT' using artificial intelligence at two levels. Bulletin of Engineering Geology and the Environment 79(8):3989-4003.
- Nadiri, A.A., Taheri, Z., Khatibi, R., Barzegari, G., and Dideban, K., 2018. Introducing a new framework for mapping subsidence vulnerability indices (SVIs). Sci Total Environ. 628:1043-1057.
- Piscopo, G., 2001. Groundwater vulnerability map, explanatory notes, Castlereagh Catchment, NSW, Department of Land and Water Conservation, Australia.
- Poland, J.F., 1984. Guidebook to Studies of Land Subsidence Due to Groundwater Withdrawal, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, UNESCO.
- Salehi, R., Ghafoori, M., Lashkaripour, Gh., and Dehghani, M., 2013. Evaluation of land Subsidence in Southern Mahyar Plain Using Radar Interferometry. Scientific and Research Quarterly Journal of Irrigation and Water Engineering. third year. Number 11. (In Persian).
- Samani, S., 2016. Hydrogeological study and uncertainty of the groundwater model of Ajabshir plain, East Azerbaijan. Ph.D. Thesis in Hydrogeology, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz. (In Persian).
- Sugeno, M., 1985. Industrial applications of fuzzy control, Elsevier Science Inc.
- Tayfur, G., Nadiri, A. A., and Asghari Moghaddam, A., 2014. Supervised Intelligent Committee Machine method for hydraulic conductivity estimation. Water Resources Management, 28, 1173-1184.
- Zadeh, L.A., 1965. Fuzzy sets. Information and Control. 8: 338-353.
- Zandi, R., Farzinkia, R., Shafei, N., 2019. Subsidence & Radar Interometry. Satellite Publications. (In Persian).