

**Soraya Nouri-Sangarab<sup>1</sup>, Asghar Asghari Moghaddam<sup>2\*</sup>** 

**2. Corresponding Author**, Professor, Department of Earth Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

**Email:** [moghaddam@tabrizu.ac.ir](mailto:moghaddam@tabrizu.ac.ir)

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-5984-094x>

|                         |                 |
|-------------------------|-----------------|
| <b>Article Info</b>     | <b>ABSTRACT</b> |
| <b>Article type:</b>    |                 |
| <b>Research Article</b> |                 |
|                         |                 |
| <b>Article history:</b> |                 |
| <b>Received:</b>        |                 |
| <b>Revised:</b>         |                 |
| <b>Accepted:</b>        |                 |
| <b>Published:</b>       |                 |
|                         |                 |
|                         |                 |
| <b>Keywords:</b>        |                 |
| Subsidence potential,   |                 |
| DIFA, ALPRIFT, InSAR,   |                 |
| Sentinel-1, Artificial  |                 |
| Intelligence.           |                 |
|                         |                 |
|                         |                 |
|                         |                 |
|                         |                 |
|                         |                 |
|                         |                 |
|                         |                 |
|                         |                 |
|                         |                 |

## **EXTENDED ABSTRACT**

### **INTRODUCTION**

The dry and semi-arid climate on one hand, and the pressure on groundwater resources for agricultural development on the other, have in numerous cases led to land subsidence. Given the threats and destructive effects of land subsidence on water and soil resources, the necessity of managing this phenomenon and preventing its expansion is considered a key element in the country's sustainable development (Amighpey and Arabi, 2024). The phenomenon of land subsidence is defined by UNESCO as the collapse or sinking of the ground surface occurring on a large scale (Poland, 1984). Land subsidence is a geological phenomenon that causes a slow, vertical sinking of the ground surface (Hu et al., 2009). The main causes of land subsidence are the extraction of fluids, compaction of strata, and reduction in the thickness of rock and soil layers. The weight of the overlying layers causes compaction and a reduction in thickness, ultimately leading to subsidence, which can have natural or anthropogenic origins.

In various parts of the world, methods such as radar interferometry, numerical methods, or overlay methods of effective layers have been used to identify and measure land subsidence. Salehi et al. (1392/2013), in order to determine the area of influence and estimate the amount of land subsidence in the southern Mahyar plain, used interferometry as a reliable method for measuring ground surface changes with very high accuracy, extensive coverage, and high spatial resolution. In that research, the maximum subsidence rate was calculated using ENVISAT radar images over the period 2003-2006 as 8.2 cm, and the results indicated a lowering of the ground surface following a drop in the water table at a constant rate (Salehi et al., 2013).

The Tasuj plain, as one of the plains in the Lake Urmia basin, relies on groundwater as its major water source. In recent years, numerous reports of subsidence effects have been presented from this area. In countries with arid and semi-arid climates like Iran, groundwater extraction increases annually due to growing population needs. As groundwater is extracted and the water table in the aquifer drops, the likelihood of subsidence in the plains also increases, which further heightens the necessity of identifying vulnerable and subsidence-prone areas in order to manage the quantity and location of groundwater extraction. Considering the critical condition of groundwater in the plains around Lake Urmia and the occurrence of subsidence in these plains in recent years, investigating this phenomenon in the Tasuj plain also seems essential. Therefore, in the present study, the subsidence potential of the study area was assessed using the ALPRIFT framework, and to modify it, some parameters were removed and added, and for the first time, a modified subsidence potential termed DIFA was introduced. On the other hand, to improve the modified DIFA potential method and address its uncertainty, artificial intelligence methods such as fuzzy logic (Sugeno and Mamdani) and artificial neural networks were used. Furthermore, to analyze the vertical displacement of the ground surface in the plain and validate the obtained subsidence potential, the Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) method was employed.

### **DATA AND METHODOLOGY**

#### **Study Area**

The Tasuj study area is located in the west of East Azerbaijan province, bounded to the north by the Marand area, to the west by the Salmas area, and to the east by the Shabestar-Soofian area. The area of the Tasuj study region is approximately 587.17 square kilometers, and the extent of the Tasuj plain is 288.5 square kilometers. The maximum and minimum elevations relative to the mean sea level are 1502 meters and 1268 meters, respectively. The location of the study area is provided in Figure 1. According to the De Martonne classification, the climate of the study area is semi-arid and cold.

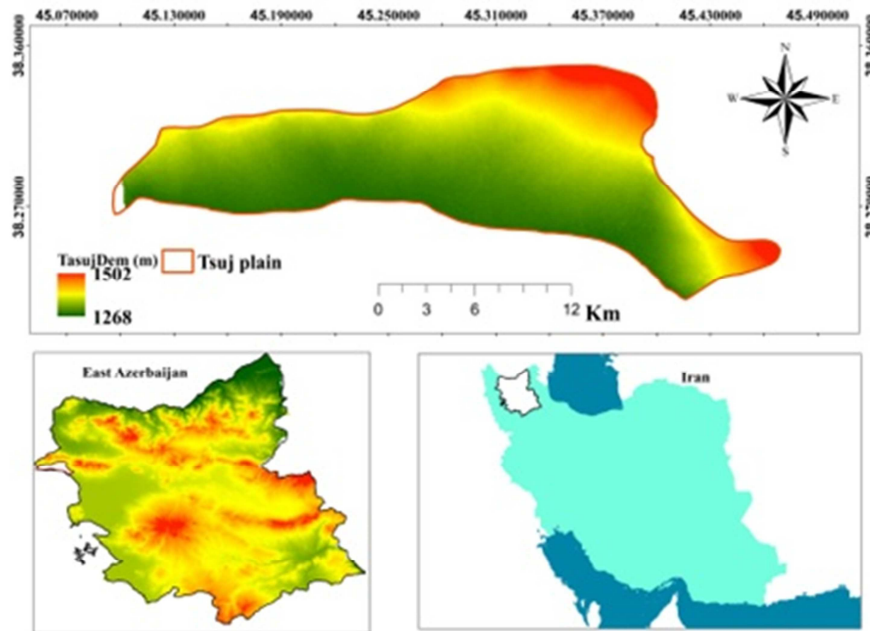


Figure 1: Geographic location of the Tasuj Plain (Case study)

#### Investigating Subsidence Vulnerability Potential Using ALPRIFT

The ALPRIFT framework was first used in the Shabestar plain by Nadiri et al. (2018), inspired by the DRASTIC method (Aller et al., 1987) (Habibi, 2013). This method is a quantitative operational framework for assessing vulnerability potential to subsidence in aquifers, based on the rating and weighting (PCSM) method (Nadiri et al., 2017a, b, c). ALPRIFT comprises seven layers effective in causing subsidence in the study area: Aquifer media (A), Land use (L), Pumping (P), Recharge (R), Thickness of Alluvium (I), distance from Fault (F), and decline in groundwater level (T).

#### Investigating Subsidence Vulnerability Potential Using DIFA

The DIFA framework, based on ALPRIFT, will be examined for the first time in this study. The objective of this framework is to remove and add some parameters influencing ground surface displacement and subsidence, and to modify the ALPRIFT framework to suit the study area. Its parameters include: Decline in water level (D), Impact of Unsaturated zone thickness (I), distance from Fault (F), and Aquifer media (A). The difference between this framework and ALPRIFT is the removal of similar parameters such as pumping rate, land use, and recharge, and the replacement of the alluvium thickness impact with the unsaturated zone thickness impact. To prepare the modified subsidence potential map via overlay, the same process as ALPRIFT will be followed, ultimately resulting in a zonation map of the area's vulnerability.

#### Calculating Subsidence Using Sentinel-1 Satellite Radar Imagery

Sentinel, as a constellation of multiple satellites spaced 180 degrees apart, images the entire Earth every 6 days. As the first satellite in the European Space Agency's five-satellite Copernicus series, it images the planet day and night, in all weather conditions, using the C-band, and with 4 imaging modes it also achieves a spatial resolution of less than 10 meters. Further details on the processing method will be provided.

#### Optimizing the Modified Subsidence Potential (DIFA) with Artificial Neural Network (ANN)

The results and evaluation of the performance of optimizing DIFA with an Artificial Neural Network (ANN) are presented in Table 4.

**Table 4: Performance evaluation results of DIFA optimization with Sugeno, Mamdani, and artificial neural network methods**

| Phase                     | Evaluation Criteria | Model Type |      |      |
|---------------------------|---------------------|------------|------|------|
|                           |                     | FL         | ML   | ANN  |
| Test                      | RMSE                | 0.2        | 0.27 | 0.27 |
|                           | R                   | 0.91       | 0.89 | 0.9  |
|                           | R <sup>2</sup>      | 0.82       | 0.8  | 0.81 |
| Train                     | RMSE                | 0.1        | 0.1  | 0.11 |
|                           | R                   | 0.92       | 0.92 | 0.91 |
|                           | R <sup>2</sup>      | 0.85       | 0.84 | 0.83 |
| R <sup>2</sup> with RADAR |                     | 0.86       | 0.84 | 0.86 |

## RESULTS AND DISCUSSION

Based on the integrated ALPRIFT map, the subsidence vulnerability index in the Tasuj plain was calculated to range between 94 and 180, and its validation with radar-measured subsidence yielded a correlation coefficient of  $R^2 = 0.17$ . According to the ALPRIFT overlay map, the highest potential is observed in the western parts of the plain. However, based on the final modified vulnerability index (DIFA) map, the values of this index range from 43 to 116.

The correlation coefficients obtained between each of these methods and the radar-measured subsidence are  $R^2_{FL} = 0.86$ ,  $R^2_{ML} = 0.84$ , and  $R^2_{ANN} = 0.86$ , respectively. This indicates that all three methods provided acceptable results. However, the fuzzy logic and artificial neural network methods showed better results compared to the Mamdani method, although there is not a significant numerical difference between them.

## CONCLUSION

This study modified the ALPRIFT subsidence assessment framework by reducing overlapping parameters to create the DIFA framework. Validation using InSAR-derived subsidence data (2016-2022) for the Tasuj plain showed DIFA ( $R^2=0.32$ ) outperformed ALPRIFT ( $R^2=0.17$ ). Further optimization of DIFA using AI methods (Fuzzy Logic and Artificial Neural Networks) significantly improved correlation, with the Fuzzy Logic model achieving the highest accuracy ( $R^2=0.86$ ). Spatial analysis identified the highest subsidence potential in central areas (due to groundwater over-extraction) and western/northwestern zones (due to fine-grained clay/silt soils). The findings provide a robust tool for guiding sustainable groundwater management and targeted irrigation strategies in vulnerable regions.

## REFERENCES

### References [in Persian]

- Amighpey, M., Arabi, S. (2024). Studying Land Subsidence in Iran Caused by Groundwater Over-Extraction by Preparing the Comprehensive Subsidence Map of the Country. *Iran-Water Resources Research*, 19(5):145-156. [In Persian]
- Habibi, M.H.G. (2013). Application of Artificial Intelligence Methods for Predicting Groundwater Levels in Hadishahr Plain, M.Sc. Thesis, University of Tabriz. [In Persian]
- Khodabandeh, A.A., Amini-Fazl, A. (1993). Geological Map of Tasuj Quadrangle (1:100,000), Geological Survey of Iran. [In Persian]
- Salehi, R., Ghafouri, M., Lashkaripour, G.H., Dehghani, M. (2013). Evaluation of Land Subsidence in South Mahyar Plain Using Radar Interferometry, *Iranian Journal of Irrigation and Water Engineering*, 3(11). [In Persian]
- Zandi, R., Farzinkia, R., Shafiei, N. (2019). Land Subsidence and Radar Interferometry, *Satellite Publications*. [In Persian]

### References [in English]

- Hu, B., Zhou, J., Wang, J., Chen, Z., Dongqi, Wang. (2009). Risk assessment of land subsidence at Tianjin coalal area in China. *Environmental Earth Sciences*, 59(2):269-276.
- Poland, J.F. (1984). Guidebook to Studies of Land Subsidence Due to Groundwater Withdrawal, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, UNESCO.

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفا برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

- Aller, L., Bennett, T., Lehr, J., Petty, R. (1987). DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution using hydrogeologic settings. US EPA, Robert S. Kerr *Environmental Research Laboratory*, 85(2).
- Nadiri, A.A., Gharekhan, M., Khatib, R., Sadeghfam, S., Asghari Moghaddam, A. (2017). Groundwater vulnerability indices conditioned by Supervised Intelligence Committee Machine (SICM). *Science of the Total Environment*, 574, 691–706.
- Nadiri, A.A., Gharekhani, M., Khatibi, R., Asghari Moghaddam, A. (2017)b. Assessment of groundwater vulnerability using a supervised committee to combine fuzzy logic and models. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(9), 8562-8577.
- Nadiri, A.A., Sedghi, Z., Khatibi, R., Gharekhani, M. (2017) c. 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., Taheri, Z., Khatibi, R., Barzegari, G., Dideban, K. (2018). Introducing a new framework for mapping subsidence vulnerability indices (SVIs). *Sci Total Environ*. 628:1043–1057.

آماده انتشار (بدون شماره مجله)



# این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

## مقدمه

در سال‌های اخیر نگرانی‌هایی از خطرات کاهش سطح آب در چاه‌های بهره‌برداری و افزایش برداشت از منابع آب زیرزمینی نسبت به تغذیه، ایجاد شده است. فرونشست زمین یکی از مهم‌ترین چالش‌های هیدروژئولوژیکی در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان است که عمده‌تاً از افت شدید سطح آب زیرزمینی ناشی می‌شود. در ایران، این پدیده در بسیاری از دشت‌های حوضه دریاچه ارومیه به دلیل برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی برای کشاورزی تشدید شده است. کاهش نزولات جوی، 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 کشت به‌ویژه محصولات با آب‌بری بالا و الگوی کشت نامناسب و عدم آبیاری صحیح در چند دهه گذشته باعث ایجاد وضعیت بحرانی در منابع آب در اکثر دشت‌های کشور شده است، به‌طوری که سطح آب زیرزمینی در اغلب آبخوان‌های مهم کشور به‌طور مداوم طی چند سال اخیر سیر نزولی داشته است. کاهش سطح تراز آب زیرزمینی دشت‌ها اثرات زیان‌بار زیادی داشته و کاهش کیفیت آب و فرونشست زمین را موجب گردیده است. سرزمین ایران نیز با توجه به اقلیم خشک و نیمه خشک از یک سو و فشار بر منابع آب زیرزمینی به‌منظور توسعه کشاورزی از دیگر سو، در موارد متعددی دچار فرونشست زمین شده است. با توجه به تهدیدات و آثار مخرب فرونشست زمین بر منابع آب و خاک، لزوم مدیریت این پدیده و جلوگیری از گسترش آن امری کلیدی در توسعه پایدار کشور محسوب می‌شود (Amighpey and Arabi, 2024). پدیده فرونشست زمین توسط یونسکو به‌عنوان فروریزش یا نشست گسترده سطح زمین تعریف شده است (Poland, 1984). این پدیده زمین‌شناختی، پدیدار شدن تدریجی و عمودی سطح زمین را به‌دنبال دارد (Hu et al., 2009) و عمده‌تاً از خروج سیالات زیرزمینی، تراکم لایه‌های رسوبی و کاهش ضخامت آن‌ها ناشی می‌شود. وزن لایه‌های فوقانی، همراه با کاهش فشار منفذی، موجب فشردگی و در نهایت نشست قائم می‌گردد. این فرآیند می‌تواند منشأ طبیعی یا انسانی داشته باشد و میزان آن به حجم سیال استخراج‌شده و قابلیت تراکم لایه‌های باقی‌مانده بستگی دارد. در بسیاری از آبخوان‌ها، پمپاژ آب زیرزمینی از فضای منافذ بین ذرات رس، شن، ماسه یا سیلت انجام می‌شود. هنگامی که آبخوان حاوی رسوبات ریزدانه رسی یا سیلتی باشد، استخراج آب به‌دلیل تراکم‌پذیری بالای این مواد، باعث فشردگی لایه‌ها و در نتیجه ایجاد نشست قائم می‌شود (Zandi et al., 2019).

در سطح جهانی، روش‌های مختلفی از جمله تداخل‌سنجی راداری، مدل‌سازی عددی و روش‌های هم‌پوشانی لایه‌های مؤثر برای شناسایی و پایش فرونشست زمین به‌کار گرفته شده‌اند. صالحی و همکاران (۱۳۹۲) با استفاده از تصاویر راداری ENVISAT در دشت مهیار جنوبی، نرخ حداکثر فرونشست را طی بازه ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۶ حدود ۸/۲ سانتی‌متر محاسبه کردند و نشان دادند که افت سطح زمین با سرعتی نسبتاً ثابت و همگام با افت سطح ایستابی رخ داده است. Liosis و همکاران (۲۰۱۸) با بهره‌گیری از تصاویر ENVISAT، ALOS و Sentinel-1A و به‌کارگیری تکنیک‌های SBAS و DInSAR، فرونشست قابل‌توجهی را در منطقه ال‌وگان امارات متحده عربی شناسایی کردند. نتایج پردازش داده‌ها نشان داد که نرخ فرونشست در بازه ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ براساس تصاویر ENVISAT و ALOS به ۱۸ سانتی‌متر در سال می‌رسد، در حالی که داده‌های Sentinel-1 حداکثر فرونشست محلی حدود ۱۰ سانتی‌متر را ثبت کرده است. این پژوهش، کاهش سطح آب زیرزمینی را به‌عنوان محتمل‌ترین عامل اصلی این پدیده معرفی کرد.

در ایران نیز پژوهش‌های متعددی به بررسی فرونشست و شاخص آسیب‌پذیری آن پرداخته‌اند. باقری و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از شبکه‌های عصبی کانولوشنی (CNNs) و دو راهبرد خوشه‌بندی و رگرسیون، شاخص

## این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

آسیب پذیری فرونشست (SVI) را در آبخوان تبریز مدل سازی کردند. نتایج نشان داد که هر دو مدل CNN در مقایسه با روش پایه ALPRIFT، دقت بالاتری براساس منحنی ROC و مقادیر AUC ارائه می دهند (AUC مدل خوشه بندی ۰/۸۷ و مدل رگرسیون ۰/۸۳). همچنین، ادغام ۱۵ تصویر SAR از ماهواره ALOS-2 PALSAR-2 با لایه های ALPRIFT، الگوهای فضایی و نقاط بحرانی فرونشست را با دقت بیشتری آشکار ساخت.

ندیری و همکاران (۲۰۲۲) نیز با هدف مدیریت پویای فرونشست در دشت هادیشهر، شاخص آسیب پذیری فرونشست دینامیک (DSVI) را توسعه دادند. این پژوهش در سه مرحله انجام شد: ابتدا نقشه پتانسیل فرونشست با استفاده از چارچوب ALPRIFT و بهینه سازی وزن ها از طریق مدل چندگانه (IMM) تهیه گردید؛ سپس سطح آب زیرزمینی با مدل GMDH پیش بینی شد و در نهایت نتایج دو مرحله پیشین ترکیب گردید تا نقشه های دینامیک آسیب پذیری فرونشست تولید شود. نوری سنگراب و اصغری مقدم (۱۴۰۴) در یک مقاله کنفرانسی پتانسیل فرونشست دشت تسوج با استفاده از تداخل سنجی تصاویر ماهواره ای Sentinel-1، و چهار چوب ALPRIFT مورد بررسی قرار دادند. در این مقاله از ۷ پارامتر جهت بررسی پتانسیل فرونشست دشت استفاده شده که ۳ تا از این پارامترها هم پوشانی زیاد با پارامترهای دیگر داشتند و پارامتر مسقطی محسوب نمی شدند. کریم زاده و Matsuoka (۲۰۲۰) با استفاده از تصاویر راداری X-band ماهواره های COSMO-SkyMed و تکنیک SBAS InSAR، فرونشست زمین و معابر شهری تبریز را طی سال های ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۸ پایش کردند. نتایج نشان داد که میانگین نرخ فرونشست در راستای خط دید (LOS) در منطقه ۲ شهر تبریز حدود ۲۰ میلی متر در سال است و بخش قابل توجهی از ساختمان ها و معابر شهری در معرض خطر فوری قرار دارند.

در دشت اصفهان-برخوار نیز احمدی بنیا و همکاران (۲۰۲۴) با تحلیل داده های Sentinel-1 طی بازه ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۲، میانگین سالانه فرونشست را بین ۲۵ تا ۴۵ سانتی متر گزارش کردند. این مقدار در حالی ثبت شد که میانگین سالانه افت سطح آب زیرزمینی در آبخوان مربوطه به ۲۳۰ سانتی متر می رسید. یافته های این پژوهش بار دیگر بر رابطه مستقیم و معنادار بین افت شدید سطح آب زیرزمینی و نرخ فرونشست تأکید کرد.

ملکی و همکاران در سال ۱۴۰۲ برای ارزیابی فرونشست زمین در مناطق زلزله زده غرب کرمانشاه، از تکنیک تداخل سنجی راداری استفاده کردند. با پردازش زوج تصویر راداری در منطقه مطالعاتی در بازه زمانی ۲۰۱۷/۱۱/۱۱ تا ۲۰۱۷/۱۱/۳۰ متوسط جابجایی فرونشست در خلاف جهت دید، ۱۶/۳- و ۳۳/۱- سانتی متر به دست آمد که در راستای خطوط گسلی مشاهده شده است. همچنین متوسط نرخ جابجایی بالآمدگی در منطقه مورد مطالعه ۱۷/۵ و ۳۴/۵ سانتی متر در سال و در راستای دید ماهواره حاصل شد.

روش های عددی متداولی نیز برای مدل سازی پدیده فرونشست به کار رفته اند که بیشتر بر پایه فرضیات ساده کننده ای بنا شده اند، نتایج حاصله دقت کمی داشته و همچنین دارای عدم قطعیت بالایی هستند (Naderi, 2018). از این رو در سال های اخیر برای پیش بینی آسیب پذیری دشت نسبت به فرونشست از روش های هوش مصنوعی استفاده شده است (Nadiri et al., 2013; Nadiri et al., 2022). این روش ها نسبت به روش های قبلی از عدم قطعیت کمتر برخوردار بوده و مناطق در معرض خطر با دقت بالایی شناسایی می شود. همچنین دقت اجرای برنامه های مدیریتی برای جلوگیری از وقوع این پدیده را افزایش می دهد.

دشت تسوج به عنوان یکی از دشت های حوضه دریاچه ارومیه است که آب زیرزمینی از عمده منابع آب مورد استفاده در این دشت می باشد در سال های اخیر گزارشات متعددی از آثار فرونشست در آن ارائه شده است. در کشورهای با



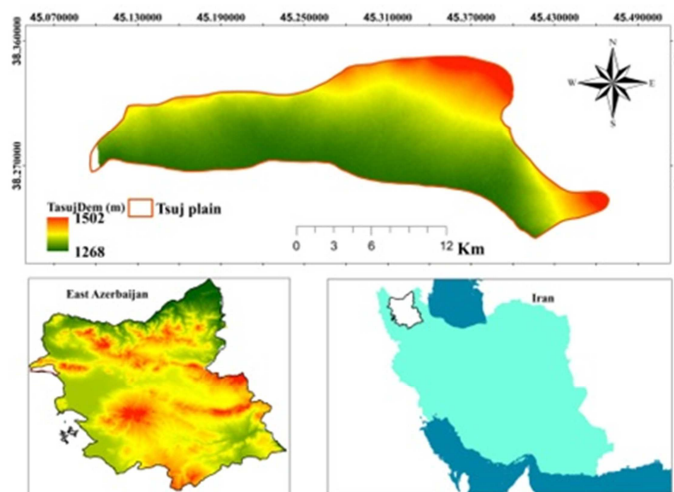
## این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

اقلیم خشک و نیمه خشک مانند ایران برداشت از آب‌های زیرزمینی هر ساله با توجه به افزایش نیاز جمعیتی افزایش می‌یابد. با برداشت از آب‌های زیرزمینی با کاهش سطح آب در آبخوان احتمال فرونشست از دشت‌ها نیز افزایش می‌یابد که این امر لزوم شناسایی مناطق آسیب‌پذیر و مستعد فرونشست را به‌منظور مدیریت مقدار و محل برداشت آب‌زیرزمینی 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 تسوج نیز ضروری به‌نظر می‌رسد. لذا در پژوهش حاضر، با هدف بهبود دقت پهنه‌بندی در دشت تسوج، چارچوب DIFA به‌عنوان یک نسخه اصلاح‌شده و محلی‌سازی‌شده از ALPRIFT توسعه داده شد. در این چارچوب، پارامترهای کم‌تأثیر یا تکراری حذف و پارامتر تأثیر ضخامت منطقه غیراشباع اضافه گردید. سپس برای غلبه بر عدم قطعیت‌های روش هم‌پوشانی، از تکنیک‌های هوش مصنوعی (منطق فازی و شبکه عصبی مصنوعی) استفاده و همچنین داده‌های واقعی فرونشست حاصل از تصاویر Sentinel-1 نیز برای اعتبارسنجی نتایج به‌کار گرفته شد.

### داده‌ها و روش‌ها

#### منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی تسوج در غرب استان آذربایجان شرقی و از شمال به محدوده مرند و از غرب به محدوده سلماس و از شرق به محدوده شبستر-صوفیان محدود می‌گردد. مساحت محدوده مطالعاتی تسوج حدود ۵۸۷/۱۷ کیلومتر مربع و وسعت دشت تسوج برابر ۲۸۸/۵ کیلومتر مربع است. بیشترین و کمترین ارتفاع نسبت به تراز متوسط سطح دریا به‌ترتیب ۱۵۰۲ و ۱۲۶۸ متر می‌باشد. موقعیت منطقه مورد مطالعه در شکل ۱ ارائه شده است. منطقه از جنوب به دریاچه ارومیه، از شمال به محدوده مرند، ارتفاعات میشو، از شرق به شبستر و از غرب به سلماس محدود شده است. میزان متوسط سالانه ریزش‌های جوی در ایستگاه تسوج ۲۳۲/۷ میلی‌متر در سال در طول بازه زمانی ۱۳۵۸-۱۳۷۹ گزارش شده است. اقلیم منطقه مورد مطالعه با توجه به دوما رتن نیمه‌خشک و سرد است. و درجه حرارت حوضه در ایستگاه تسوج بین ۱۱- و ۳۳ درجه سانتی‌گراد متغیر می‌باشد.

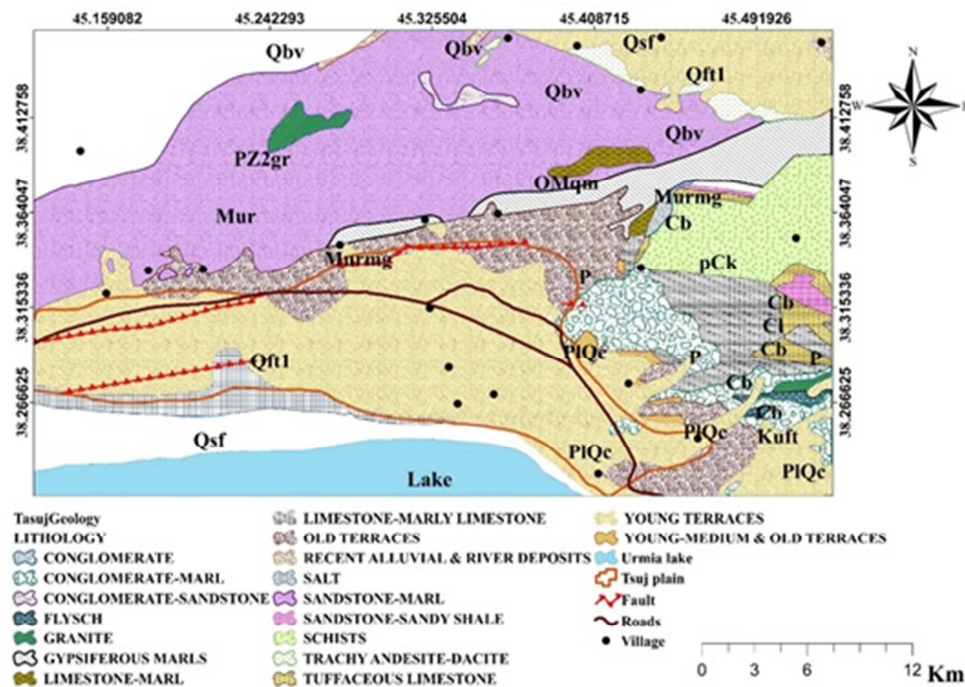


شکل ۱: موقعیت جغرافیایی دشت تسوج (مورد مطالعاتی)

# این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

## زمین شناسی منطقه مورد مطالعه

با توجه به مطالعات صورت گرفته برحسب نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ (Khodabandeh and Amini-Fazl, 1993) و زون بندی های زمین ساختی در ایران، محدوده مطالعاتی تسوج در ادامه شمال باختری زون زمین ساختی ایران مرکزی و زون تکتونیکی سنجند-سیرجان و جنوب واحد زمین ساختی البرز-آذربایجان قرار دارد. به طور کلی تنوع سازند در این منطقه زیاد است و هر سه گروه اصلی سنگ های رسوبی، آذرین و دگرگونی مشاهده می شود و در گستره پرکامبرین تا عهد حاضر رخمون دارند. سازندهای دگرگون شده منطقه به سن پرکامبرین و کامبرین در شمال شرق حوضه برونزد دارند که عملاً پی سنگ این منطقه را تشکیل می دهند. این پی سنگ شامل مجموعه ای سنگ های تخریبی، مکانیکی و توده های نفوذی دگرگونی هستند. سازندهای رسوبی از دوران پالئوزوئیک به بعد در منطقه دیده می شوند. اکثر این سازندها از لحاظ هیدروژئولوژی اهمیت دارند، خصوصاً آنهایی که در محدوده گسل تسوج در حاشیه دشت قرار دارند و تکتونیزه شدن آنها در اثر فشار و کشش های مربوط به گسل، باعث نفوذپذیری آنها شده است. نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه در شکل ۲ آورده شده است.



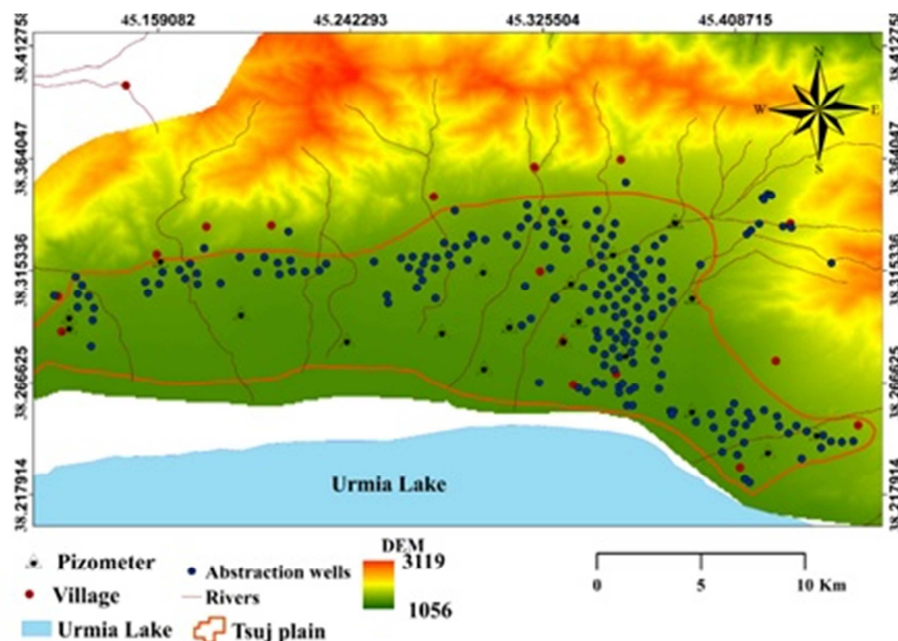
شکل ۲: نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه اقتباس از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ (Khodabandeh and Amini-Fazl, 1993)

## هیدروژئولوژی منطقه مورد مطالعه

آبخوان دشت تسوج از نوع آزاد و ناهمگن و از زیرحوضه های دریاچه ارومیه است. مساحت حوضه آبریز تسوج ۱۷۸ کیلومترمربع، که دشت آبرفتی منطقه حدود ۱۱۸ کیلومترمربع می باشد. رسوبات تشکیل دهنده سفره شامل شن، ماسه، رس و مخلوطی با نسبت های متغیر می باشد. در منطقه مرکزی دشت در حوالی تسوج رسوبات ضخامت قابل توجهی را داشته و دانه بندی آنها هم مناسب است، بنابراین ضریب قابلیت انتقال بالا در این ناحیه باعث استخراج حجم قابل توجهی از آب زیرزمینی شده است. این زیرحوضه فاقد رودخانه دائمی بوده و چندین رودخانه

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

فصلی از ارتفاعات حاشیه‌ی دشت سرچشمه می‌گیرند و رواناب‌هایی را در فصول پربابی وارد دشت می‌نمایند، که در نهایت در دریاچه ارومیه تخلیه می‌شوند. نقشه منابع آب منطقه مورد مطالعه در شکل ۳ آورده شده است.



شکل ۳ نقشه منابع آب منطقه مورد مطالعه

داده‌ها

بررسی پتانسیل آسیب‌پذیری فرونشست با استفاده از ALPRIFT

چارچوب ALPRIFT نخستین بار توسط ندیری و همکاران (۲۰۱۸) در دشت شبستر معرفی شد. این چارچوب با الهام‌گیری از روش DRASTIC (Aller et al., 1987) و بر پایه راهبرد رتبه‌دهی و وزن‌دهی (PCSM)<sup>۱</sup> طراحی شده است و به‌عنوان یک ابزار عملی و کمی برای ارزیابی پتانسیل آسیب‌پذیری آبخوان‌ها نسبت به فرونشست زمین به‌کار می‌رود (Nadiri et al., 2017a, b, c).

آلپریفت شامل هفت لایه مؤثر در ایجاد فرونشست در منطقه مورد مطالعه می‌باشد: محیط آبخوان<sup>۲</sup> (A)، کاربری اراضی<sup>۳</sup> (L)، پمپاژ<sup>۴</sup> (P) تغذیه<sup>۵</sup> (R)، ضخامت آبرفت<sup>۶</sup> (I)، فاصله از گسل<sup>۷</sup> (F) و افت سطح آب زیرزمینی<sup>۸</sup> (T). در این روش، ابتدا هر یک از لایه‌ها با توجه به شرایط محلی منطقه و با استفاده از رتبه‌های مشخص (از ۱ تا ۱۰) در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی (ArcGIS) تهیه می‌شوند. رتبه‌های بالاتر نشان‌دهنده تأثیر بیشتر آن پارامتر در افزایش پتانسیل فرونشست است. سپس این لایه‌ها با وزن‌های تعیین‌شده توسط ندیری و همکاران (۲۰۱۸) که نشان‌دهنده

<sup>۱</sup> - Point Count System Model

<sup>۲</sup> - Aquifer media

<sup>۳</sup> - Land use

<sup>۴</sup> - Pumping of groundwater

<sup>۵</sup> - Recharge

<sup>۶</sup> - Impact of alluvium thickness

<sup>۷</sup> - Fault distance

<sup>۸</sup> - Water table decline

## این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

اهمیت نسبی هر لایه است (وزن‌ها بین ۱ تا ۵ متغیرند)، با یکدیگر هم‌پوشانی داده می‌شوند تا نقشه نهایی پتانسیل آسیب‌پذیری فرونشست تهیه گردد. جهت تهیه نقشه شاخص پتانسیل فرونشست از رابطه ۱ استفاده می‌شود:

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

در این رابطه، اندیس‌های  $r$  و  $w$  به ترتیب معرف رتبه و وزن هر لایه هستند. رتبه هر پارامتر براساس میزان تأثیر آن بر وقوع فرونشست و با در نظر گرفتن ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی منطقه تعیین می‌شود، به گونه‌ای که رتبه ۱ کمترین و رتبه ۱۰ بیشترین پتانسیل آسیب‌پذیری را نشان می‌دهد. وزن لایه‌ها نیز بیانگر اهمیت نسبی آن‌ها در مقایسه با سایر پارامترها است و از طریق قضاوت کارشناسی و مطالعات پیشین تعیین شده‌اند (Nadiri et al., 2018). جزئیات رتبه و وزن مربوط به هر لایه در جدول ۱ ارائه شده است.

### بررسی پتانسیل آسیب‌پذیری فرونشست با استفاده از DIFA

چهارچوب DIFA برای اولین بار و مبتنی بر آلپریفت در این مطالعه مورد بررسی قرار خواهد گرفت. هدف از این چهارچوب حذف و اضافه کردن برخی پارامترهای تأثیرگذار در جابجایی سطح زمین و فرونشست آن و اصلاح چهارچوب آلپریفت متناسب با منطقه مورد مطالعه می‌باشد. پارامترهای آن شامل افت سطح آب (D)، تأثیر ضخامت منطقه غیراشباع (I)، فاصله از گسل (F) و محیط آبخوان (A) است. تفاوت این چهارچوب با آلپریفت حذف پارامترهای مشابهی مثل نرخ پمپاژ، کاربری اراضی، تغذیه و جایگزینی تأثیر ضخامت غیراشباع با ضخامت آبرفت می‌باشد. جهت تهیه نقشه پتانسیل فرونشست اصلاح شده به صورت هم‌پوشانی نیز همانند آلپریفت عمل و در نهایت نقشه پهنه‌بندی آسیب‌پذیری منطقه ایجاد خواهد شد. جهت تهیه نقشه شاخص پتانسیل فرونشست اصلاح شده از رابطه ۲ استفاده می‌شود:

$$SVI_{(corrected)} = DrDw + IrIw + FrFw + ArAw \quad (2)$$

که در رابطه فوق  $SVI_{(corrected)}$  (پتانسیل فرونشست اصلاح شده (DIFA))، D (افت سطح آب)، I (تأثیر ضخامت منطقه غیراشباع)، F (فاصله از گسل) و A (محیط آبخوان) می‌باشد. رتبه و وزن‌های مربوط به هر پارامتر در جدول ۲ نشان داده شده است. پارامترهای فاصله از گسل (F) و افت سطح آب (D) مبتنی بر جدول رتبه‌دهی پارامترهای روش آلپریفت (Nadiri et al., 2018) می‌باشد.

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

| افت سطح آب<br>زیرزمینی (m) |         | ضخامت آبرفت<br>(m/day) |        | فاصله از گسل<br>(km) |        | نرخ تغذیه<br>(cm/yr) |        | محیط آبخوان |            | کاربری اراضی |           | نرخ پمپاژ<br>(cm/yr) |          |
|----------------------------|---------|------------------------|--------|----------------------|--------|----------------------|--------|-------------|------------|--------------|-----------|----------------------|----------|
| رتبه                       | محدوده  | رتبه                   | محدوده | رتبه                 | محدوده | رتبه                 | محدوده | رتبه        | محدوده     | رتبه         | محدوده    | رتبه                 | محدوده   |
| ۱                          | -۰/۲    | ۱                      | ۲۵-۰   | ۱۰                   | ۱-۰    | ۱۰                   | ۴-۰    | ۸           | رس         | ۹            | معدن و    | ۱                    | ۰/۱۰۰۰>  |
| ۲                          | ۰/۰-۲/۵ | ۲                      | ۵۵-۲۵  | ۸                    | ۲-۱    | ۹                    | ۹-۴    | ۱۰          | سیلت       | ۱۰           | منابع     | ۲                    | -۰/۵۰۰   |
| ۳                          | ۰/۰-۵/۹ | ۳                      | ۹۰-۵۵  | ۶                    | ۳-۲    | ۷                    | ۱۴-۹   | ۹-۸         | رسوبات     |              | استخراجی  |                      | ۰/۱۰۰۰   |
| ۴                          | ۰/۱-۹/۴ | ۴                      | -۹۰    | ۴                    | ۴-۳    | ۵                    | ۱۹-۱۴  |             | کارستی شده | ۹-۷          | کشاورزی   | ۳                    | -۰۰۵/۰۱  |
| ۵                          | ۱/۲-۴   | ۵                      | ۱۳۰    | ۲                    | ۵-۴    | ۳                    | ۲۴-۱۹  | ۸-۶         | ماسه       | ۹-۶          | ساختمان   | ۴                    | ۰/۰      |
| ۶                          | ۲-۲/۷   | ۶                      | -۱۳۰   | ۱                    | >۵     | ۱                    | ۲۴<    |             | گراول      | ۸-۴          | سد        | ۵                    | ۰/۰-۰۱/۵ |
| ۷                          | ۲/۳-۷/۵ | ۷                      | ۱۷۵    |                      |        |                      |        | ۵-۳         | انواع      | ۴-۳          | مسکونی    | ۶                    | ۰/۱-۵    |
| ۸                          | ۳/۴-۵/۴ | ۸                      | -۱۷۵   |                      |        |                      |        | ۳-۲         | سنگ ها     | ۳-۱          | حمل و نقل | ۷                    | ۵-۱      |
| ۹                          | ۴/۵-۴/۴ | ۹                      | ۲۲۵    |                      |        |                      |        | ۳-۱         | هر نوع     | ۱            | خشک       | ۸                    | ۲۰-۵     |
| ۱۰                         | ۵/۴<    | ۱۰                     | -۲۲۵   |                      |        |                      |        | ۸-          | خاک آلی    |              | زمین بایر | ۹                    | ۴۰-۲۰    |
|                            |         |                        | ۲۸۰    |                      |        |                      |        | ۱۰          | اسید شده   |              |           | ۱۰                   | ۶۵-۴۰    |
|                            |         |                        | -۲۸۰   |                      |        |                      |        |             |            |              |           |                      | ۶۵<      |
|                            |         |                        | ۳۰۴    |                      |        |                      |        |             |            |              |           |                      |          |
|                            |         |                        | -۳۰۴   |                      |        |                      |        |             |            |              |           |                      |          |
|                            |         |                        | ۴۰۵    |                      |        |                      |        |             |            |              |           |                      |          |
|                            |         |                        | >۳۰۵   |                      |        |                      |        |             |            |              |           |                      |          |
| ۱                          |         | ۲                      |        | ۳                    |        | ۴                    |        | ۵           |            | ۶            |           | ۷                    |          |
| وزن پارامترها              |         |                        |        |                      |        |                      |        |             |            |              |           |                      |          |

جدول ۲: رتبه و وزن دهی مربوط به هر کدام از پارامترهای روش DIFA

| افت سطح آب زیرزمینی (m) |         | تأثیر ضخامت منطقه غیر اشباع |        | فاصله گسل<br>(km) |        | محیط آبخوان |                         |
|-------------------------|---------|-----------------------------|--------|-------------------|--------|-------------|-------------------------|
| رتبه                    | محدوده  | رتبه                        | محدوده | رتبه              | محدوده | رتبه        | محدوده                  |
| ۱                       | ۰/۰-۲/۵ | ۱                           | ۱۰-۰   | ۱۰                | ۱-۰    | ۱۰-۸        | رس                      |
| ۲                       | ۰/۰-۵/۹ | ۲                           | ۲۰-۱۰  | ۸                 | ۲-۱    | ۹-۸         | سیلت                    |
| ۳                       | ۰/۱-۹/۴ | ۳                           | ۳۰-۲۰  | ۶                 | ۳-۲    | ۸-۶         | رسوبات کارستی شده       |
| ۴                       | ۱/۲-۴   | ۴                           | ۴۰-۳۰  | ۴                 | ۴-۳    | ۵-۳         | ماسه                    |
| ۵                       | ۲-۲/۷   | ۵                           | ۵۰-۴۰  | ۲                 | ۵-۴    | ۳-۲         | گراول                   |
| ۶                       | ۲/۳-۷/۵ | ۶                           | ۶۰-۵۰  | ۱                 | ۵<     | ۳-۱         | انواع سنگ ها            |
| ۷                       | ۳/۴-۵/۴ | ۷                           | ۷۰-۶۰  |                   |        | ۱۰-۸        | هر نوع خاک آلی اسید شده |
| ۸                       | ۴/۵-۴/۴ | ۸                           | ۸۰-۷۰  |                   |        |             |                         |
| ۹                       | ۵/۴<    | ۹                           | ۹۰-۸۰  |                   |        |             |                         |
| ۱۰                      |         | ۱۰                          | ۱۰۰-۹۰ |                   |        |             |                         |
| ۵                       |         | ۳                           |        | ۱                 |        | ۵           |                         |

#### محاسبه فرونشست با تصاویر راداری ماهواره سنتینل ۱-

با گسترش استفاده از ماهواره های راداری از دهه ۱۹۹۰، تکنیک تداخل سنجی راداری (InSAR) به عنوان یکی از دقیق ترین و کارآمدترین ابزارها برای پایش جابجایی های سطح زمین ناشی از پدیده های مختلف زمین شناختی، از جمله فرونشست، شناخته شده است. ماهواره Sentinel-1، به عنوان بخشی از منظومه ماهواره ای کوپرنیکوس سازمان

## این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

فضایی اروپا، شامل چندین ماهواره می‌باشد که با فاصله ۱۸۰ درجه نسبت به یکدیگر در مدار قرار گرفته و امکان تصویربرداری از کل سطح زمین را با دوره زمانی ۶ روزه فراهم کرده‌اند. این ماهواره نخستین عضو از سری پنج‌گانه ماهواره‌های کوپرنیکوس به‌شمار می‌رود و با بهره‌گیری از باند C، قابلیت تصویربرداری شبانه‌روزی و در تمام شرایط آب و هوایی را دارد. همچنین Sentinel-1 با دارا بودن چهار حالت تصویربرداری مختلف، توان تفکیک مکانی کمتر از ۱۰ متر را نیز ارائه می‌دهد. در ادامه، جزئیات مربوط به نحوه پردازش داده‌های این ماهواره تشریح خواهد شد.

### بهینه‌سازی روش پتانسیل فرونشست اصلاح شده

در این پژوهش برای بهینه‌سازی چهارچوب DIFA و کاهش عدم قطعیت پارامترهای مؤثر، از میان موارد گوناگون روش‌ها و مدل‌های بهینه‌سازی هوش مصنوعی، از دو شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و منطق فازی (ساجنو<sup>۱</sup> و ممدانی<sup>۲</sup>) استفاده شده است. منطق فازی<sup>۳</sup> یا تئوری فازی فناوری جدیدی برای جایگزینی نیازمندی یک سیستم به ریاضیات پیچیده و پیشرفته، برای طراحی و مدل‌سازی با مقادیر زبانی و دانش فرد خبره است که برای اولین بار توسط پروفسور لطفی‌زاده در سال ۱۹۶۵ مطرح گردید (Zadeh, 1965). در این روش به‌جای نیاز به اطلاعات دقیق می‌توان از طریق طراحی مدل‌هایی، کنترل‌کننده‌های بازخوردی در سیستم را وادار به دریافت داده‌های مبهم کرده تا بتوانند آن‌ها را به حالت‌های ساده‌تر و مؤثرتر در اجرا به‌کار ببرند. اساس منطق فازی بر پایه مجموعه‌های فازی استوار است و همچنین نظریه کلاسیک مجموعه‌ها در علم ریاضیات را بسط داده است و عضویت درجه‌بندی‌شده را ارائه می‌دهد. به این ترتیب که یک عنصر  $x$  در جایی و نه کاملاً، عضو یک مجموعه باشد. در این تئوری، عضویت اعضای مجموعه از طریق تابع  $X(u)$  مشخص می‌شود که  $X$  نمایانگر یک عضو مشخص و  $u$  تابعی فازی است که درجه عضویت  $X$  در مجموعه مربوطه را تعیین می‌کند و مقدار آن بین صفر و یک است (رابطه ۳).

$$A = \{(X, u, A(x)) | x \in X\}, \quad X(0,1) \quad (3)$$

برای مدل‌سازی با منطق فازی باید ابتدا داده‌های ورودی به صورت توابع عضویت نشان داده شوند، سپس با استفاده از قوانین فازی توابع عضویت را به داده‌های خروجی مرتبط ساخت. منطق فازی از طریق عملگرهای فازی به‌کار گرفته می‌شوند که براساس قوانین اگر... آنگاه، انجام می‌گیرد. منطق فازی شامل سه روش لارسن، ممدانی و ساجنو است (Sugeno, 1985). روش‌های ممدانی و ساجنو به‌طور گسترده‌تری در علوم مهندسی به‌کار برده می‌شود. روش ممدانی نیاز به حافظه و زمان محاسبات زیادی دارد ولی روش ساجنو کارآمدتر بوده و کار با آن پیچیدگی کمتری دارد، به‌طوری‌که با روش‌های بهینه‌سازی به خوبی سازگار است (ندیری و همکاران، ۱۳۹۲). تفاوت اصلی روش‌های ممدانی و ساجنو در خروجی‌هایشان است که در روش ممدانی به صورت فازی ولی در روش ساجنو به صورت مقادیر ثابت بیان می‌شوند و محاسبات در ساجنو سریع‌تر و مناسب‌تر از ممدانی است. 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 می‌باشند (Calvo et al., 2009, Tayfu et al., 2014).

شبکه عصبی مصنوعی یک سیستم پردازشگر اطلاعات توده‌ای هستند که به صورت موازی قرار گرفته‌اند و عملکردی شبیه شبکه عصبی مغز انسان دارند (Hopfield, 1982). ساختار کلی آن شامل سه لایه ورودی، میانی یا پنهان و

<sup>1</sup> - Sugeno

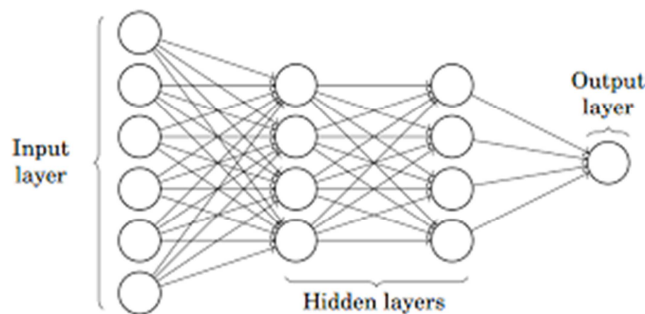
<sup>2</sup> - Mamdani

<sup>3</sup> - Fuzzy Logic

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

خروجی است. لایه ورودی یک لایه انتقال دهنده و تهیه کننده داده و لایه خروجی شامل مقادیر پیش بینی شده توسط شبکه و خروجی مدل و لایه پنهانی هم که شامل گره های پردازشگر می باشد محل پردازش است. تعداد لایه های پنهان و تعداد گره در هریک از لایه های آن معمولاً با استفاده از روش آزمون و خطا تعیین می شود. گره های لایه های مجاور در شبکه به طور کامل در ارتباط هستند. ورودی های هر گره ممکن است از متغیرهای ورودی یا خروجی گره های دیگر حاصل شود. هر گره دارای یک تابع عملگر است که به آن تابع تبدیل گر گفته می شود. (شکل ۴).

$$(\square) = 1/1+\exp(-\square\square) \quad (۴)$$



شکل ۴: شماتیکی از عملکرد لایه های مختلف شبکه عصبی مصنوعی ANN

برای بهینه سازی DIFA با روش های هوش مصنوعی، شاخص پتانسیل فرونشست اصلاح شده (DIFA) را ابتدا باید با فرمول زیر اصلاح نمود و سپس به فرآیند بهینه سازی ادامه داد:

$$CSVI = \frac{(SVI_{corrected})_{max}}{(NSV)_{max}} * (NSV)_i \quad (۵)$$

CSVI نشان دهنده شاخص آسیب پذیری فرونشست تصحیح شده،  $(SVI_{corrected})_{max}$  حداکثر مقدار شاخص فرونشست،  $(NSV)_{max}$  حداکثر مقدار فرونشست برآورد شده از طریق INSAR و  $(NSV)_i$  مقدار فرونشست حاصل از INSAR می باشد.

## یافته های تحقیق

### تهیه نقشه لایه های ورودی روش آلپریفت

برای تهیه نقشه پتانسیل آسیب پذیری فرونشست با چهارچوب آلپریفت، هفت پارامتر مؤثر با رتبه های پیشنهادی ندیری و همکاران (Nadiri et al., 2018) در محیط نرم افزار آرکمپ رتبه دهی، کلاس بندی و در نهایت با وزن پیشنهادی ندیری و همکاران (Nadiri et al., 2018) هم پوشانی انجام گرفت.

۱- محیط آبخوان (A): جنس و بافت رسوبات تشکیل دهنده آبخوان تأثیر قابل توجهی بر پتانسیل آسیب پذیری نسبت به فرونشست دارد. رسوبات ریزدانه مانند رس و سیلت به دلیل نفوذ پذیری پایین، رفتار غیرالاستیک و ضریب تحکیم بالا، در صورت افت سطح آب زیرزمینی، دچار تحکیم برگشتناپذیر می شوند و این فرآیند یکی از مهم ترین عوامل ایجاد فرونشست زمین به شمار می رود. بر این اساس، در لایه محیط آبخوان، پس از انجام درون یابی، رسوبات دانه ریز

# این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفا برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

بیشترین رتبه (بیشترین پتانسیل آسیب پذیری) و رسوبات درشت دانه مانند شن و ماسه کمترین رتبه را به خود اختصاص می دهند (جدول ۱) و (شکل ۵-A).

۲- کاربری اراضی (L): کاربری اراضی نیز از جمله عوامل مؤثر بر افزایش پتانسیل آسیب پذیری فرونشست به شمار می رود. در منطقه مورد مطالعه، کاربری غالب اراضی به فعالیت های کشاورزی اختصاص دارد که به دلیل برداشت گسترده آب زیرزمینی، بیشترین رتبه را در میان سایر کاربری ها دریافت کرده است. بر این اساس، نقشه کاربری اراضی با استفاده از رتبه های تعیین شده در جدول ۱ در نرم افزار ArcMap طبقه بندی و تهیه گردید (شکل ۵-B).

۳- میزان پمپاژ (P): پمپاژ بی رویه آب زیرزمینی از طریق ایجاد افت سطح آب، کاهش فشار هیدرولیکی و فشردگی فضای منافذ بین ذرات، منجر به تراکم لایه های رسوبی و در نهایت فرونشست زمین می شود. به عبارت دیگر، هرچه شدت پمپاژ در یک منطقه بیشتر باشد، پتانسیل آسیب پذیری نسبت به فرونشست نیز افزایش می یابد و بالعکس. بر این اساس، نقشه لایه پمپاژ با استفاده از میانگین داده های سال های ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۱ و با اعمال رتبه های تعیین شده در جدول ۱، از طریق درون یابی در نرم افزار ArcMap تهیه گردید (شکل ۵-C).

۴- تغذیه (R): تغذیه آبخوان، برخلاف پمپاژ، نقش بازدارنده در افزایش پتانسیل فرونشست دارد. به این معنا که هرچه میزان تغذیه بیشتر باشد، خطر آسیب پذیری منطقه نسبت به فرونشست کاهش می یابد. بر این اساس، در چارچوب ALPRIFT، تغذیه کمتر بیشترین رتبه (بیشترین پتانسیل آسیب پذیری) و تغذیه بیشتر کمترین رتبه را دریافت می کند (جدول ۱).

در این پژوهش، برای تهیه لایه تغذیه از روش پیشنهادی پیسکوپو (Piscopo, 2001) استفاده شد. در این روش، سه پارامتر بارش، نفوذ پذیری خاک و درصد شیب به عنوان عوامل مؤثر بر میزان تغذیه در نظر گرفته می شوند. رتبه های مربوط به هر یک از این پارامترها در جدول ۳ ارائه شده است. در نهایت، لایه تغذیه از طریق رتبه بندی و هم پوشانی این سه لایه و با استفاده از رابطه ۶ محاسبه گردید (شکل ۵-D).

جدول ۳: رتبه بندی تغذیه پیسکوپو (Piscopo, 2001)

| نرخ تغذیه |      | نفوذ پذیری خاک |      | شیب            |      | بارش        |      |
|-----------|------|----------------|------|----------------|------|-------------|------|
| محدوده    | رتبه | محدوده         | رتبه | محدوده شیب (%) | رتبه | محدوده (mm) | رتبه |
| ۱۱-۱۳     | ۱۰   | زیاد           | ۵    | <۲             | ۴    | >۵۸۰        | ۴    |
| ۹-۱۱      | ۸    | متوسط تا زیاد  | ۴    | ۱۰-۲           | ۳    | ۸۵۰-۷۰۰     | ۳    |
| ۷-۹       | ۵    | متوسط          | ۳    | ۳۳-۱۰          | ۲    | ۷۰۰-۵۰۰     | ۲    |
| ۵-۷       | ۳    | کم             | ۲    | >۳۳            | ۱    | <۵۰۰        | ۱    |
| ۳-۵       | ۱    | خیلی کم        | ۱    |                |      |             |      |

۵- ضخامت آبرفت (I): ضخامت آبرفت از سطح زمین تا سنگ بستر را شامل می شود و رابطه مستقیمی با پتانسیل فرونشست دارد. هرچه این ضخامت بیشتر باشد، وزن وارده بر رسوبات افزایش یافته و در صورت برداشت آب از آبخوان، تغییر شکل و تراکم لایه ها شدت بیشتری می یابد که در نتیجه خطر فرونشست را بالا می برد. بر این اساس، در چارچوب ALPRIFT، رسوبات با ضخامت بیشتر بیشترین رتبه (بیشترین پتانسیل آسیب پذیری) و رسوبات با ضخامت کمتر کمترین رتبه را دریافت می کنند (جدول ۱).

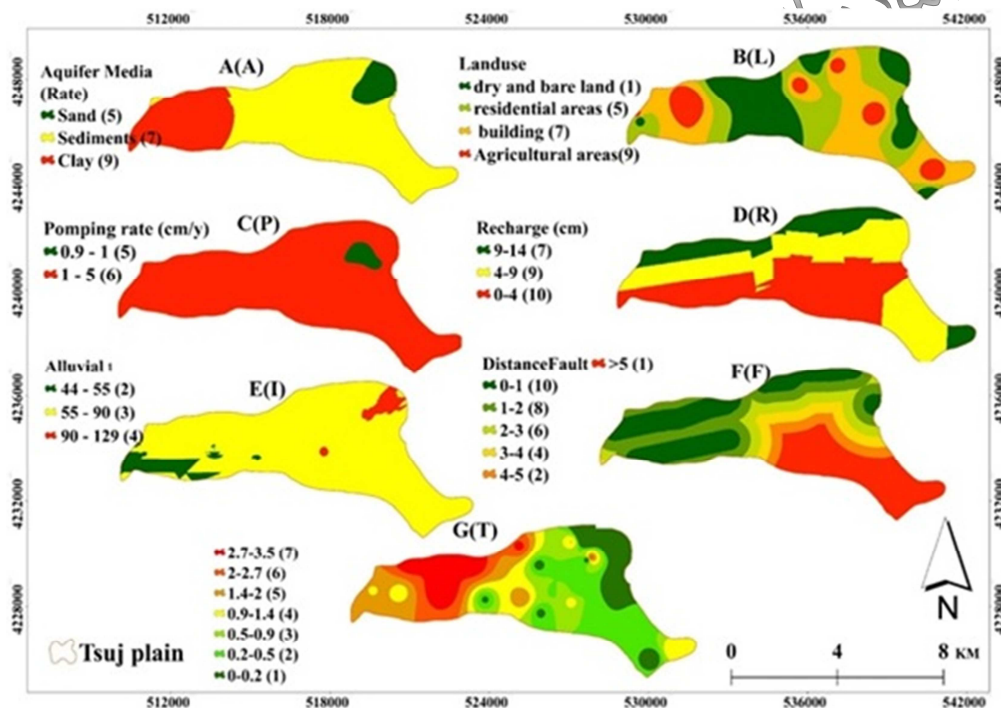


## این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می‌باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

لایه ضخامت آبرفت با استفاده از داده‌های لاگ پیزومترهای موجود، استخراج ضخامت آبرفت، درونیابی و سپس رتبه‌دهی و طبقه‌بندی در نرم‌افزار ArcMap تهیه گردید. (شکل ۵-۵).

۶- فاصله از گسل (F): حرکات تکتونیکی و به‌ویژه فعالیت گسل‌ها از جمله عوامل طبیعی مؤثر بر وقوع فرونشست زمین به‌شمار می‌روند. جابجایی رسوبات درشت‌دانه و ریزدانه در امتداد شکستگی‌های ایجادشده توسط گسل، می‌تواند فرآیند فرونشست را تشدید کند. بر این اساس، مناطق دورتر از گسل‌ها پتانسیل کمتری برای فرونشست دارند و بالعکس. در چارچوب ALPRIFT، مناطقی که در فاصله بیش از پنج کیلومتر از گسل قرار دارند، کمترین رتبه (رتبه ۱) را دریافت می‌کنند (جدول ۱). لایه فاصله از گسل با استفاده از ابزار Euclidean Distance در نرم‌افزار ArcGIS و بر حسب کیلومتر تهیه گردید (شکل ۵-۶).

۷- افت سطح آب زیرزمینی (T): افت سطح آب زیرزمینی ناشی از عواملی مانند خشکسالی و برداشت‌های بی‌رویه، تنش مؤثر وارد بر رسوبات را افزایش می‌دهد و از این طریق موجب تراکم لایه‌ها و وقوع فرونشست زمین می‌شود. فرونشست با میزان افت سطح آب زیرزمینی رابطه‌ای مستقیم دارد، به‌گونه‌ای که هرچه افت بیشتر باشد، پتانسیل آسیب‌پذیری نسبت به فرونشست نیز بالاتر خواهد بود. بر این اساس، لایه افت سطح آب زیرزمینی با محاسبه اختلاف سطح آب بین سال‌های ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۲، درونیابی و طبقه‌بندی بر اساس جدول ۱ در نرم‌افزار ArcMap تهیه گردید (شکل ۵-۷).



شکل ۵: ورودی لایه‌های: آلپریفت (۱) محیط آبخوان، (۲) کاربری اراضی، (۳) پمپاژ، (۴) تغذیه، (۵) ضخامت آبرفت، (۶) فاصله از گسل، (۷) افت سطح ایستابی

تهیه نقشه لایه‌های ورودی روش پتانسیل فرونشست اصلاح شده (DIFA)

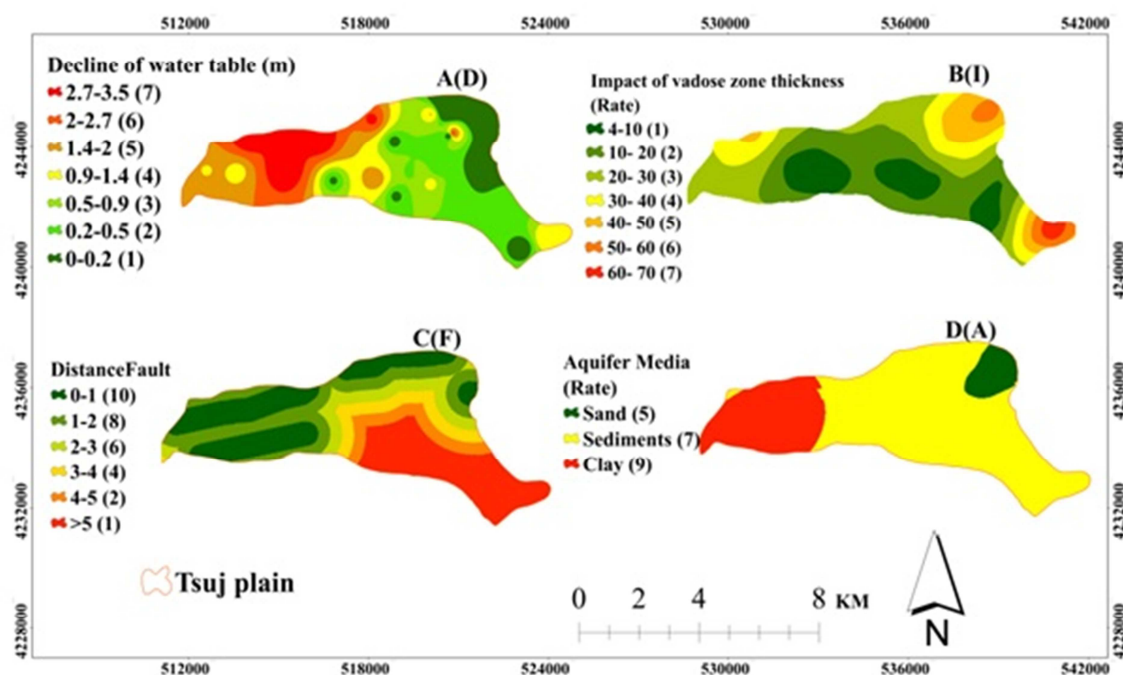
۱- افت سطح آب زیرزمینی (D): این لایه در چارچوب DIFA مانند پارامتر T در ALPRIFT با رتبه و وزن درج شده در جدول ۱ و ۲ تهیه گردید (شکل ۶-۵).

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

۲- تأثیر ضخامت زون غیر اشباع (I): ضخامت زون غیر اشباع در مناطقی که سطح منطقه اشباع نزدیک به سطح زمین است تقریباً برابر صفر تا ۱۰۰ متر در مناطقی که سطح ایستابی پایین است، متغیر می باشد. رتبه و وزن دهی مطابق جدول ۲ صورت گرفته است (شکل ۶-B).

۳- فاصله از گسل نیز با الهام از رتبه و وزن دهی روش ALPRIFT و مطابق جداول ۱ و ۲ تهیه گردید (شکل ۶-C).

۴- محیط آبخوان (A): جنس لایه های تشکیل دهنده همانند روش موجود در ALPRIFT از لاگ های حفاری به دست آمد و سپس لایه محیط آبخوان بعد از درون یابی، طبق جدول ۲ به رسوبات دانه ریز بیشترین رتبه و رسوبات دانه درشت مانند شن و ماسه و... کمترین رتبه اختصاص یافت (شکل ۶-D).



شکل ۶: ورودی لایه های DIFA (۱) افت سطح آب زیرزمینی، (۲) تأثیر ضخامت زون غیر اشباع، (۳) فاصله از گسل، (۴) محیط آبخوان

#### برآورد فرونشست با تصاویر سنتینل ۱

برای محاسبه میزان فرونشست در دشت تسوج، از تصاویر SLC ماهواره Sentinel-1 استفاده شد. در این پژوهش، ۶۰ جفت تصویر راداری با فاصله زمانی تقریبی ۳۶ روز طی بازه شش ساله ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۲ پردازش گردید. پس از تعریف اطلاعات مداری تصاویر، جفت تصاویر به صورت Master و Slave در محیط نرم افزار SNAP هم پوشانی شدند. تصویر Master به عنوان مبنای هندسی و رادیومتری انتخاب شد و تصویر Slave با آن تطبیق داده شد. برای کاهش اختلافات رادیومتری بین دو تصویر، از دستور S-1 Enhance Spectral Diversity استفاده گردید. سپس با بهره گیری از ابزار Interferogram Formation و انتخاب مدل رقومی ارتفاع SRTM 1 Sec HGT، اثرات توپوگرافی از فاز تداخلی حذف شد و دو تصویر فاز و کوهرنسی تولید گردید. تصویر فاز، اختلاف فاز بین سیگنال ارسالی و دریافتی را نشان می دهد، در حالی که تصویر کوهرنسی میزان همبستگی بین دو تصویر را بیان می کند. مقادیر کوهرنسی نزدیک به یک یا بالاتر از ۰/۶، نشان دهنده دقت بالای محاسبات است.

## این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

در ادامه، پس از یکپارچه سازی و حذف خطاهای توپوگرافی باقی مانده، فیلتر Goldstein بر روی تصویر فاز اعمال شد. سپس با استفاده از ابزار Phase to Displacement، مقادیر جابجایی سطح زمین استخراج گردید. برای ارزیابی صحت نتایج، تصویر کوهرنسی نیز به لایه جابجایی اضافه شد تا از طریق مقایسه مکانی، اعتبار جابجایی های محاسبه شده بررسی شود. در نهایت، تصویر حاصل با ابزار Range-Doppler Terrain Correcting از نظر هندسی تصحیح شد و به فرمت TIFF خروجی گرفته شد. این تصویر در محیط ArcMap با نقشه مدل رقومی ارتفاعی منطقه هم پوشانی گردید و نقشه نهایی فرونشست تهیه شد (شکل ۸).

### استاندارد سازی داده ها

برای از بین بردن دامنه مختلف مقادیر داده و تبدیل مقادیر به اعدادی مابین صفر و یک، فرآیند استاندارد سازی داده ها با استفاده از رابطه ۷ انجام گرفت:

$$X_i^n = \frac{X_i - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (7)$$

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

### تهیه نقشه آسیب پذیری فرونشست با آلپریفت

پس از تهیه هفت لایه اطلاعاتی مؤثر بر فرونشست (شکل ۵) و اعمال وزن های تعیین شده در جدول ۱، این لایه ها با استفاده از رابطه ۱ هم پوشانی داده شدند و نقشه شاخص پتانسیل آسیب پذیری فرونشست (SVI) برای دشت تسوج تهیه گردید (شکل ۱۰-A). مقدار این شاخص در محدوده مورد مطالعه بین ۹۴ تا ۱۸۰ متغیر بود و بر اساس طبقه بندی پیشنهادی ندیری و همکاران، به سه دسته کم، متوسط و زیاد تقسیم بندی شد.

نتایج نشان داد که بیشترین پتانسیل فرونشست در نواحی غربی دشت متمرکز است. در این مناطق، رسوبات عمدتاً از نوع رسی هستند و کاربری اراضی نیز غالباً کشاورزی است. در مقابل، نواحی مرکزی و شرقی به ترتیب پتانسیل فرونشست متوسط تا کم را نشان دادند. برای ارزیابی اعتبار نقشه حاصل، ضریب همبستگی بین شاخص ALPRIFT و مقادیر واقعی فرونشست استخراج شده از تصاویر راداری Sentinel-1 محاسبه شد. این همبستگی برابر با ۰/۱۷ به دست آمد که نشان دهنده عملکرد ضعیف چارچوب ALPRIFT در شرایط محلی دشت تسوج است. نقشه نهایی پتانسیل فرونشست در (شکل ۱۰-A) ارائه شده است.

### تهیه نقشه آسیب پذیری فرونشست با DIFA

با توجه به پاسخ ضعیف روش پتانسیلی ALPRIFT در محدوده مورد نظر، لایه های نرخ پمپاژ، کاربری اراضی و ضخامت آبرفت حذف و لایه ضخامت محیط غیر اشباع اضافه گردید. در مجموع ۴ لایه مؤثر در افزایش پتانسیل فرونشست با توجه جدول ۲ و لایه های شکل ۶ به صورت چارچوب DIFA پهنه بندی شد. با توجه به نقشه نهایی شاخص آسیب پذیری در محدوده ۴۳ تا ۱۱۶ به دست آمد که مطابق تقسیم بندی ندیری و همکاران در دو کلاس کم و متوسط تقسیم می شود. با توجه به نقشه پهنه بندی DIFA بیشترین پتانسیل آسیب پذیری در نواحی شمالی، شمال غربی و مرکزی می باشد که همبستگی بهتری نسبت به ALPRIFT با فرونشست راداری دارد. ضریب همبستگی ( $R^2$ ) به دست آمده از صحت سنجی این نقشه با فرونشست راداری ۰/۳۲ بوده که نشان دهنده اصلاح این همبستگی با تغییرات ایجاد شده در ALPRIFT است (شکل ۱۰-B).

# این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

## بهینه سازی پتانسیل فرونشست اصلاح شده (DIFA) با ساجنو و ممدانی

در این پژوهش برای بهینه سازی با روش منطق فازی، به جهت بازدهی بیشتر و درصد خطای کمتر، از ساجنو و به دلیل استفاده از تابع عضویت در خروجی مدل، توان بالا در تحلیل داده ها با عدم قطعیت بالا، از ممدانی استفاده شد، ورودی های این مدل چهار پارامتر اصلی DIFA در نظر گرفته و خروجی مدل نیز طبق رابطه ۵ محاسبه شد. در ادامه برای استاندارد سازی داده ها، تمام ورودی ها و خروجی ها براساس رابطه ۷ به بازه صفر و یک انتقال داده شدند. ۸۰ درصد از داده ها به عنوان داده آموزش (Train) و ۲۰ درصد از آن ها به عنوان داده آزمایش (Test) در نظر گرفته شدند. با استفاده از روش خوشه سازی کاهشی برای دسته بندی داده ها مدل فازی برای هر دو روش ممدانی و ساجنو اجرا شد. نتایج R و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برای مراحل آزمایش و آموزش جهت بهینه سازی با فازی ساجنو به ترتیب ۰/۹۱، ۰/۲ و ۰/۹۲، ۰/۱ و برای فازی ممدانی به ترتیب ۰/۸۹، ۰/۲۷ و ۰/۹۲، ۰/۱ به دست آمد. خروجی حاصل شده از هر کدام از روش های بهینه سازی در ArcMap درون یابی و نقشه های DIFA-SL و DIFA-ML مطابق شکل (شکل ۱۰-C، شکل ۱۰-D) پهنه بندی شدند. ضریب همبستگی بین نقشه های آسیب پذیری فرونشست بهینه شده فازی ساجنو و ممدانی با نقشه فرونشست راداری به ترتیب ۰/۸۶ و ۰/۸۴ به دست آمد. در این مرحله فازی ساجنو با اختلاف کم، توانایی بهبود بیشتر پتانسیل فرونشست اصلاح شده یا DIFA را داشته است. نتایج ارزیابی عملکرد این مرحله از بهینه سازی در جدول ۴ ارائه گردیده است.

## بهینه سازی پتانسیل فرونشست اصلاح شده (DIFA) با شبکه عصبی مصنوعی (ANN)

نتایج و ارزیابی عملکرد بهینه سازی DIFA با شبکه عصبی مصنوعی (ANN) در جدول ۴ آورده شده است. جهت بهینه سازی با این روش نیز همانند دو روش قبلی برای استاندارد سازی داده ها، تمام ورودی ها و خروجی ها مطابق رابطه ۷ به بازه صفر و یک انتقال داده شدند. ۸۰ درصد از داده های ورودی برای آزمایش و ۲۰ درصد از آن ها برای آموزش جدا شد. خروجی مدل نیز مطابق رابطه ۵ محاسبه شد. نتایج R و RMSE به ترتیب برای آموزش ۰/۹۱ و ۰/۱۱، همچنین برای آزمایش ۰/۲۷ و ۰/۹ به دست آمد. ضریب همبستگی نقشه خروجی حاصل از DIFA-ANN با نقشه فرونشست راداری ۰/۸۶ حاصل شد که اختلاف چندانی با ضریب همبستگی DIFA-SL با فرونشست راداری ندارد و تقریباً نتایج یکسانی را جهت بهبود نقشه DIFA ارائه دادند. در شکل (شکل ۱۰-E) نقشه خروجی DIFA-ANN آورده شده است.

جدول ۴: نتایج ارزیابی عملکرد بهینه سازی DIFA با روش های ساجنو، ممدانی و شبکه عصبی مصنوعی

| مرحله                     | معیار ارزیابی  | نوع مدل |      |      |
|---------------------------|----------------|---------|------|------|
|                           |                | FL      | ML   | ANN  |
| آزمایش                    | RMSE           | 0.2     | 0.27 | 0.27 |
|                           | R              | 0.91    | 0.89 | 0.9  |
|                           | R <sup>2</sup> | 0.82    | 0.8  | 0.81 |
| آموزش                     | RMSE           | 0.1     | 0.1  | 0.11 |
|                           | R              | 0.92    | 0.92 | 0.91 |
|                           | R <sup>2</sup> | 0.85    | 0.84 | 0.83 |
| R <sup>2</sup> with RADAR |                | 0.86    | 0.84 | 0.86 |

## نتایج و بحث

در این پژوهش با هدف بررسی پتانسیل آسیب پذیری فرونشست دشت تسوج از روش آلپریفت استفاده شد که با حاصل شدن عملکرد ضعیف این پتانسیل یابی برای منطقه مورد نظر، تعدادی از پارامترها بر حسب نیاز منطقه حذف

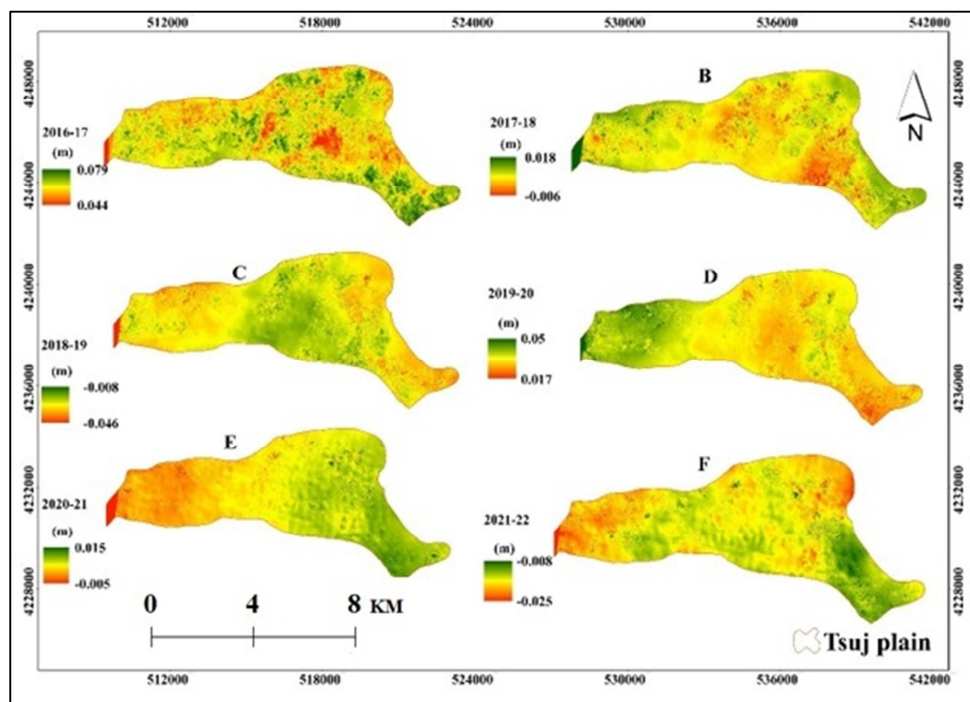
## این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

و اضافه گردید. چارچوب جدیدی با عنوان پتانسیل آسیب پذیری اصلاح شده (DIFA) با چهار پارامتر افت سطح آب، تأثیر ضخامت زون غیراشباع، فاصله از گسل و محیط آبخوان پهنه بندی شد. در ادامه برای بررسی بیشتر و دقیق فرونشست منطقه و ارزیابی عملکرد چارچوب جدید آسیب پذیری از تداخل سنجی راداری (Insar) استفاده گردید. همچنین جهت بهینه سازی DIFA و کاهش درصد خطا و افزایش قطعیت آن، سه روش بهینه سازی فازی ساجنو، فازی ممدانی و شبکه عصبی مصنوعی مورد استفاده قرار گرفت. براساس نقشه تلفیقی آلپریفت شاخص آسیب پذیری فرونشست در دشت تسوج بین ۹۴ تا ۱۸۰ محاسبه شد و نتیجه صحت سنجی آن با فرونشست راداری ضریب همبستگی ( $R^2 = 0.17$ ) ۰/۱۷ را حاصل نمود. مطابق نقشه هم پوشانی ALPRIFT بیشترین پتانسیل در نواحی غربی دشت مشاهده می شود. اما براساس نقشه نهایی شاخص آسیب پذیری اصلاح شده (DIFA)، مقادیر این شاخص بین ۴۳ تا ۱۱۶ متغیر است. نقشه پهنه بندی DIFA نشان داد که مناطق شمالی، شمال غربی و مرکزی بیشترین پتانسیل آسیب پذیری را دارند و این شاخص در مقایسه با ALPRIFT همخوانی بیشتری با داده های فرونشست راداری نشان می دهد. نتایج صحت سنجی این نقشه با استفاده از داده های فرونشست راداری، ضریب همبستگی ( $R^2$ ) معادل ۰/۳۲ را نشان داد که حاکی از بهبود همبستگی پس از اعمال تغییرات در مدل ALPRIFT می باشد. تصاویر راداری سنتینل-۱ برای دوره زمانی ۲۰۱۶-۲۰۲۲ در نرم افزار Snap تداخل سنجی شد که برای هر سال میانگین تغییرات فرونشست ماهانه (شکل ۷) و سپس جابجایی تجمع برای دوره شش ساله مورد مطالعه محاسبه گردید (شکل ۸). فرونشست راداری با تغییرات تراز آب زیرزمینی در بازه زمانی ۲۰۱۶-۲۰۲۲ ضریب همبستگی ۰/۴۶ ( $R^2 = ۰/۴۶$ ) حاصل شد که نشان دهنده همبستگی معناداری بین این دو می باشد (شکل ۹). بیشترین نرخ جابجایی با توجه به نقشه های راداری به دست آمده (شکل ۷) برای سال های ۲۰۱۹-۲۰۱۸ و ۲۰۲۲-۲۰۲۱ است که با افت تراز آب زیرزمینی در شکل ۸ تقریباً مطابقت دارد. فرونشست به عوامل مختلفی چون جنس خاک و لایه بندی، گسل، کاهش سطح آب زیرزمینی و سایر فعالیت های انسانی دارد. در دشت تسوج با در نظر گرفتن این عوامل بررسی پتانسیل و فرونشست راداری تحلیل شد.

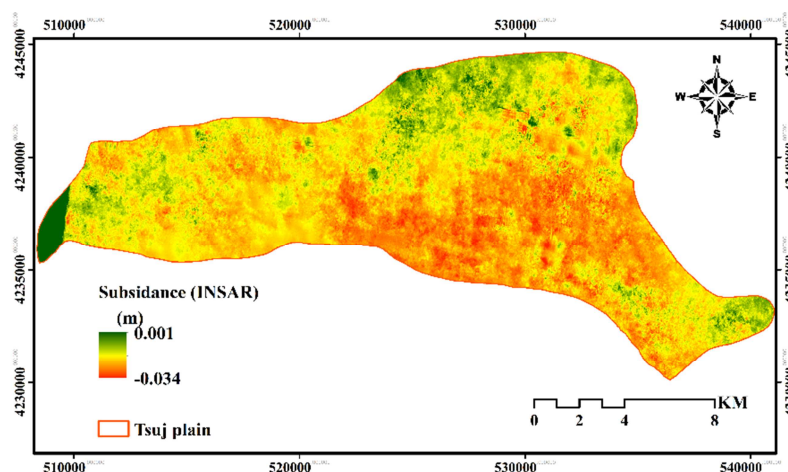
با توجه به نقشه فرونشست راداری بخش هایی از نواحی غربی و جنوبی شرقی و مرکزی و نقشه پتانسیل آسیب پذیری اصلاح شده (DIFA) بخش هایی در نواحی شمالی، شمال غربی و مرکزی بیشترین نرخ جابجایی و بیشترین مقدار پتانسیل را نشان می دهد. در این مناطق با توجه به نقشه های شکل ۶ جنس لایه نواحی غربی و شمال غربی رس بوده و گسل نیز در این ناحیه پتانسیل فرونشست را دو چندان کرده است. افت سطح آب نیز در این نواحی زیاد می باشد که سبب افزایش ریسک فرونشست شده است اما از طرفی با توجه به ضخامت منطقه غیراشباع و پراکندگی تغییرات آن در نقشه شکل (۶-B) کمی از شدت و مقدار این پتانسیل کم کرده ولی همچنان تأثیر خود را در نقشه DIFA نمایان کرده است. در رابطه با نقشه فرونشست راداری نیز می توان تأثیر و اهمیت این پارامترها را با مقایسه نقشه ها مشاهده کرد. مطابق این نقشه بخش های مرکزی بیشترین نرخ جابجایی عمودی را نشان می دهد که با توجه به اینکه جنس دانه بندی ماسه و تقریباً دانه درشت است و استخراج آب و بهره برداری راحت تر است بنابراین فرونشست در این نواحی و بالا بودن پتانسیل فرونشست قابل توجه است. همانطور که در بخش های مختلف مقاله اشاره شد، جهت رفع عدم قطعیت و بهبود پارامترها و پتانسیل آسیب پذیری اصلاح شده از روش های بهینه سازی هوش مصنوعی مانند فازی ساجنو، فازی ممدانی و شبکه عصبی مصنوعی استفاده شد که نقشه های بهینه شده به ترتیب با عناوین DIFA-FL، DIFA-ML و DIFA-ANN معرفی شده اند. همبستگی به دست آمده از هر کدام با فرونشست راداری به ترتیب  $R^2_{FL}$

این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

0.86،  $R^2_{ML}=0.84$  و  $R^2_{ANN}=0.86$  می باشد که نشان دهنده این است که هر سه روش نتایج قابل قبولی ارائه دادند. اما روش های منطق فازی و شبکه عصبی مصنوعی نسبت به روش ممدانی نتیجه بهتری را نشان دادند گرچه تفاوت عددی زیادی باهم ندارند. نقشه های پتانسیل یابی در شکل ۱۰ آورده شده است.



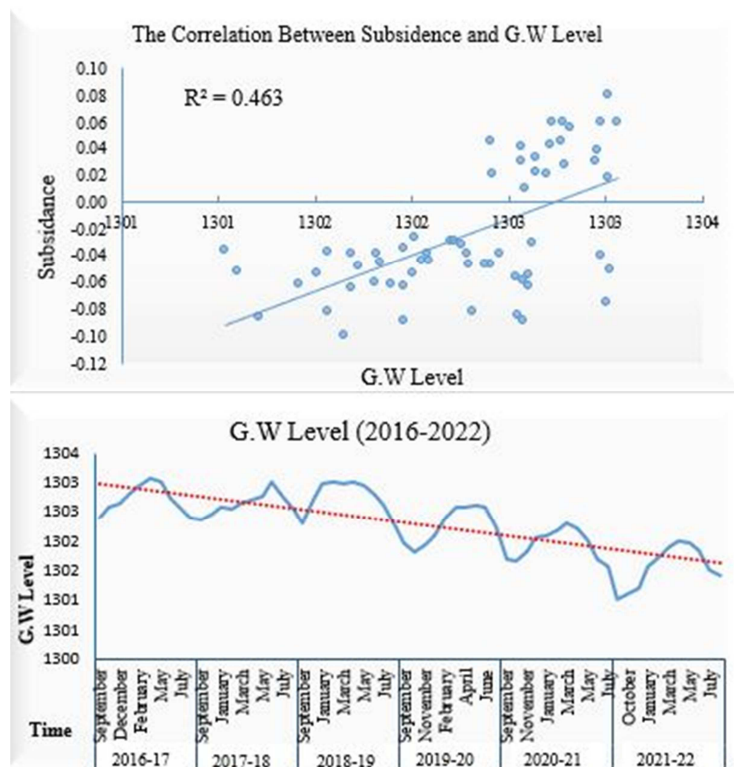
شکل ۷: نقشه فرونشست میانگین ماهانه به تفکیک سال های مختلف از ۲۰۱۶-۲۰۲۲



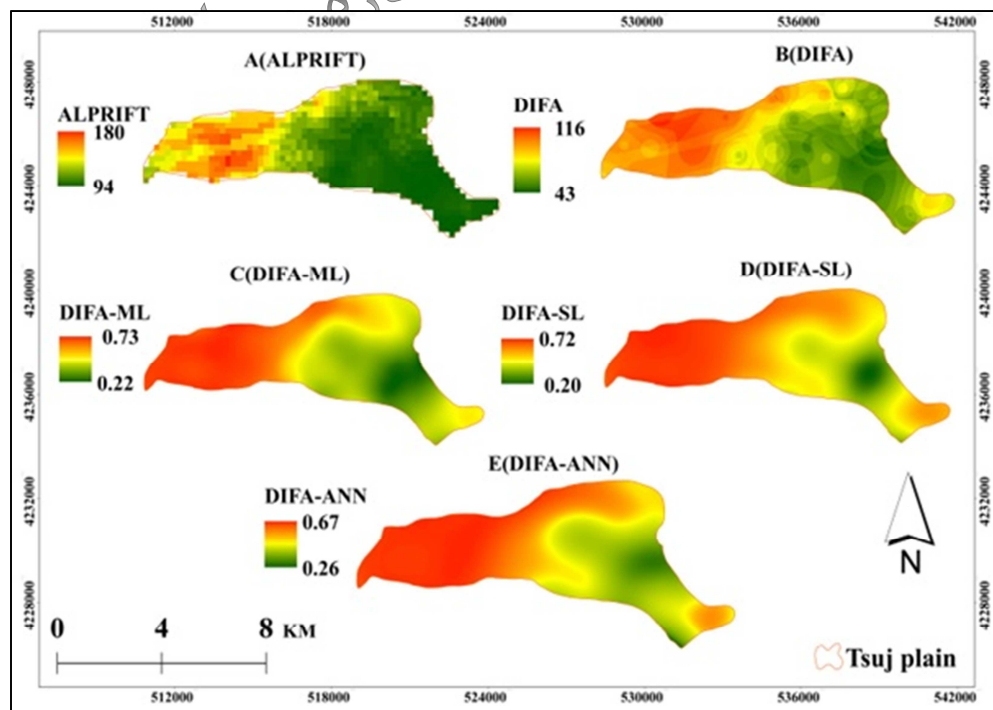
شکل ۸: نقشه فرونشست راداری منطقه مورد مطالعه



این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.



شکل ۹: نمودار همبستگی بین تراز آب زیرزمینی و فرونشست و تغییرات تراز آب زیرزمینی در مدت زمان مطالعه



شکل ۱۰: نقشه‌های پتانسیل آسیب پذیری فرونشست و نقشه‌های بهینه شده

# این نسخه موقت و قبل از چاپ نهایی می باشد. لطفاً برای ارجاع دقت کنید این نسخه بدون تاریخ و شماره است.

## نتیجه گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که با کاهش پارامترها و تغییرات ایجاد شده در چهارچوب ALPRIFT و ارائه چارچوب DIFA می توان به پتانسیل یابی نزدیک به واقعیت دست پیدا کرد. لذا وجود پارامترهای با تاثیر مشابه، پتانسیل و شاخص آسیب پذیری را بالاتر از حد واقعی تاثیر آن پارامتر نشان می دهد. جهت صحت سنجی چهارچوب های ALPRIFT و DIFA از فرونشست راداری تداخل سنجی شده استفاده شد. این مطالعه برای دوره شش ساله (۲۰۲۲-۲۰۱۶) برای دشت تسوج انجام گرفت. نتایج صحت سنجی چهارچوب ها با فرونشست راداری برای ALPRIFT و DIFA به ترتیب ۰/۱۷ و ۰/۳۲ به دست آمد. در عمل چهارچوب DIFA ضریب همبستگی بیشتری را ارائه داد. برای رفع عدم قطعیت و بهبود نتایج DIFA از روش های هوش مصنوعی منطق فازی (ساجنو و ممدانی) و شبکه عصبی مصنوعی استفاده شد. ضریب همبستگی به ترتیب برای DIFA-FL، DIFA-ML و DIFA-ANN تا ۰/۸۶ (با  $RMSE=$  ۰/۴۸)، (با  $RMSE=$  ۰/۶۸) و (با  $RMSE=$ ) بهبود یافت. می توان گفت که روش های بهینه سازی مورد استفاده توانایی لازم برای بهبود را داشته اند. در مجموع بیشترین پتانسیل آسیب پذیری و فرونشست در نواحی مرکزی به علت استخراج بی رویه برداشت و افت سطح آب زیرزمینی و بخش های غربی و شمال غربی به علت ریز بودن دانه بندی که عمدتاً از جنس رس و سیلت هستند به چشم می خورد. این پژوهش می تواند در اتخاذ تصمیم های مدیریتی بهتر در بهره برداری از آب زیرزمینی و اجرای روش های نوین و به صرفه آبیاری باغات و زمین های کشاورزی با توجه به مخاطره ایجاد شده و تشدید آن با توجه به ادامه این رویه، کمک شایانی بکند.

## منابع

- آمیغ پی، معصومه؛ عربی، سیاوش. (۱۴۰۲). مطالعه فرونشست زمین در ایران ناشی از بهره برداری بیش از حد از آب های زیرزمینی با تهیه نقشه جامع فرونشست کشور. پژوهش نامه مدیریت منابع آب/ایران، ۱۹(۵): ۱۴۵-۱۵۶.
- حبیبی، محمد حسن. (۱۳۹۲). کاربرد روش های هوش مصنوعی در پیش بینی سطح آب زیرزمینی در دشت هادیشهر، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تبریز.
- خدابنده، علی اکبر؛ امینی فصل، عباس. (۱۳۷۲). نقشه زمین شناسی چهارگوش تسوج (1:100,000)، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- زندی، رحمان؛ فرزین کیا، ربابه؛ شفیعی، نجمه. (۱۳۹۸). فرونشست زمین و تداخل سنجی راداری، انتشارات ماهواره. ۱۴۶ص.
- صالحی، رضا؛ غفوری، محمد؛ لشکری پور، غلامرضا؛ دهقانی مریم. (۱۳۹۲). بررسی فرونشست زمین در دشت مهیار جنوبی با استفاده از تداخل سنجی راداری، مجله علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب، ۳(۱۱).
- ملکی، رحمان؛ خاوریان نهزک، حسن؛ اصغری سراسکانرود، صیاد. (۱۴۰۲). اندازه گیری مقدار فرونشست زمین با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری (مطالعه موردی: مناطق زلزله زده غرب کرمانشاه). مخاطرات محیط طبیعی، ۱۲(۳۸)، ۲۳-۳۰.
- ندیری، عطالله؛ اصغری مقدم، اصغر؛ عبقری، هیراد؛ فیجانی، الهام. (۱۳۹۲). توسعه مدل های ترکیبی هوش مصنوعی برای تخمین تراوایی آبخوان: مطالعه موردی دشت تسوج. پژوهش نامه مدیریت منابع آب/ایران، ۱۹(۱).
- نوری سنگراب، ثریا؛ اصغری مقدم، اصغر. (۱۴۰۴). بررسی پتانسیل فرونشست دشت تسوج با استفاده از تداخل سنجی تصاویر ماهواره ای Sentinel-۱ و چهارچوب ALPRIFT، نهمین کنفرانس بین المللی توسعه فناوری مهندسی مواد، معدن و زمین شناسی، تهران، <https://civilica.com/doc/2442643>
- Ahmadi Benia, F., Entezari, M., Sadeghi, A., Salehi, A. (2024). Quantifying land subsidence and its nexus with groundwater depletion in Isfahan-Borkhar plain: An integrated approach using radar interferometry and spatial bivariate relationships. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 35, 101248. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101248>.
- Aller, L., Bennett, T., Lehr, J., Petty, R. (1987). DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution using hydrogeologic settings. *US EPA, Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory*, 85(2).



- Bagheri, A., Sadeghfam, S., Karimzadeh, S., Nadiri, A.A. (2024). Subsidence vulnerability indexing using convolutional neural networks based on clustering and regression modeling strategies. *Groundwater for Sustainable Development*, 25, 101180.
- Hopfield, J.J. (1982). Neutral networks and physical systems with emergent collective computational abilities. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 79, 2554-2558.
- Hu, B., Zhou, J., Wang, J., Chen, Z., Dongqi, Wang. (2009). Risk assessment of land subsidence at Tianjin coal area in China. *Environmental Earth Sciences*, 59(2):269-276.
- Karimzadeh, S., Matsuoka, M. (2020). Remote Sensing X-Band SAR Data for Land Subsidence and Pavement Monitoring. *Sensors*, 20, 4751. doi:10.3390/s20174751
- Liosis, N., Marpu, P.R., Pavlopoulos, K., Ouarda, T.B.M.J. (2018). Ground subsidence monitoring with SAR interferometry techniques in the rural area of Al Wagan, UAE. *Remote Sensing of Environment*, 216, 276-288. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.07.001>.
- Naderi, K., Nadiri, A.A., Asghari Moghaddam, A., 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., Asghari Moghaddam, A., Abghari, H., Fijani, E. (2013). Development of Hybrid Artificial Intelligence Models for Estimating Aquifer Transmissivity: A Case Study of the Tasuj Plain. *Iran Water Resources Research*, 9(1). [In Persian]
- Nadiri, A.A., Gharekhan, M., Khatibi, R., Sadeghfam, S., Asghari Moghaddam, A. (2017)a. 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., Asghari Moghaddam, A. (2017)b. 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., 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., Gharekhan, M. (2017) c. 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., Feizizadeh, B. (2020) A study of subsidence hotspots by mapping vulnerability indices through innovatory '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., 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.
- Sugeno, M. (1985). An introductory survey of fuzzy control. *Information Sciences, Elsevier Science Inc.* 36 (1-2), 59-83.
- Tayfur, G., Nadiri, A.A., Asghari Moghadam, A. (2014). Supervised Intelligent Committee Machine method for hydraulic conductivity estimation. *Water Resources Management*. 28:1173-1184. doi:10.1007/s11269-014-0553-y.
- Zadeh LA (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*. 8:338-353.