

Original Research Paper

Investigating the salinity vulnerability potential of Ajab-Shir plain aquifer using GALDIT framework and improving it with artificial intelligence

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

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

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 2024 July 27

Accepted: 2025 March 08

Available online: 2025 July 22

Keywords:

Coastal aquifer

Salinity Vulnerability Potential

Ajab-Shir plain

GALDIT

ABSTRACT

In recent years, the salinization in coastal aquifers, where agriculture is always developing, requires the investigation of aquifer vulnerability to water salinity. In the Ajab-Shir aquifer, to investigate the GALDIT vulnerability framework, which includes six layers such as type of aquifer (G), Aquifer hydraulic conductivity (A), Groundwater level above the sea level (L), distance from the coastline (D), quality Impact of saline water intrusion (I) and Aquifer thickness (T) used. Meanwhile, TDS values used to validate zoned vulnerability map. Also, to ensure the certainty of the available data, as well as to improve the weight and fix expert's errors in determining the weight of GALDIT layers, fuzzy logic (Sugeno), genetic algorithm (GA), random subspace algorithm (RS) and decision tree algorithm (M5P) were used. The results showed the correlation coefficient of about 0.5, 0.81, 0.6, 0.8, and 0.8 between GALDIT, GALDIT-F, GALDIT-GA, GALDIT-RS, and GALDIT-M5P with TDS, respectively. The south and south-east parts of the plain show the highest salinity potential and correlation values showed the good performance of GALDIT-F, GALDIT-RS and GALDIT-M5P methods in this study.

1. Introduction

Groundwater is the major part of the world's fresh water resources. Therefore, excessive use of water and pollution due to agricultural, industrial wastes, etc. exposes it to quantitative and qualitative decline. Especially in coastal aquifers, where a small declining of groundwater level can cause a reverse flow from the sea side


to the aquifer, which also leads to a qualitative deterioration. In most of the coastal aquifers, because of the hydraulic connection of the sea water resources with the aquifer and with the reduction of the groundwater level in the aquifer, the flow from the sea takes place to the aquifer, which causes the salinity of the aquifer and is


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

Citation:

Nouri-Sangarab, S., Asghari Moghaddam-Heris, A., and Jabraili- Andaryan, N., 2025. Investigating the salinity vulnerability potential of Ajab-Shir plain aquifer using GALDIT framework and improving it with artificial intelligence. Scientific Quarterly Journal of Geosciences, 35(2), 136, 85-100. <https://doi.org/10.22071/gsj.2025.468001.2150>.

E-ISSN: 2645-4963; Copyright©2021 G.S. Journal & the authors. All rights reserved.

 doi: 10.22071/gsj.2025.468001.2150

 dor: 20.1001.1.10237429.1404.35.2.5.8



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

known as the saline water intrusion from the sea into the aquifer. Considering that the Ajab-Shir plain is one of the plains of Urmia Lake basin which so far no salinity potential studies have been carried out on it. In this article, with the aim of using the GALDIT framework to investigate the salinity potential of the aquifer, and considering applying expert opinions to determine the rank and weight of the GALDIT framework, Fuzzy Logic (Sugeno), Genetic Algorithm (GA), Decision Tree Algorithm (M5P) and Random Subspace Algorithm (RS) were used to improve it. Sugeno's fuzzy method and genetic algorithm are common methods in optimizing vulnerability frameworks, but so far the M5P and RS methods have not been used to improve water infiltration vulnerability assessment frameworks. In this study TDS values have been used to validate the used methods.

2. Research methodology

2.1. Study area description

The aquifer of Ajab-Shir Plain has an area of about 73 square kilometers and is spread over an area equal to 76% of Ajab-Shir Plain. This plain is located on the edge of Lake Urmia and west of East Azerbaijan province. The height 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 Ajab-Shir plain, originates from the western slopes of Sahand mountain, and flows in an east-west direction. After passing through Ajab-Shir city, it flows into Urmia Lake, (Figure 1).

2.2. Investigating the potential of qualitative vulnerability using GALDIT

The aquifer of Ajab-Shir Plain has an area of about 73 square kilometers and is spread over an area equal to 76% of Ajab-Shir Plain. This plain is located on the edge of Lake Urmia and west of East Azerbaijan province. The height 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 Ajab-Shir plain, originates from the western slopes of Sahand mountain, and flows in an east-west direction. After passing through Ajab-Shir city, it flows into Urmia Lake.

$$VIGALDIT = Gr Gw + Ar Aw + Lr Lw + Dr Dw + Ir Iw + Tr Tw \quad (1)$$

In the aforementioned relationship, *VIGALDIT* is the vulnerability potential of aquifer salinity, *r* is the rank and *w* is the weight of each parameter. The range of weight and rank in the zoning of the GALDIT vulnerability map is 1 to 4 and 2.5 to 10 respectively, which are considered from low risk to high risk respectively. Generally, the range of vulnerability index *VIGALDIT* is also from 45 to 180.

2.3. Optimization of GALDIT method

In this study, to optimize the GALDIT framework to eliminate the errors caused by the application of expert opinions and reduce the uncertainty of the effective parameters, among the various optimization methods and models, from the four methods of fuzzy logic (Sugeno), genetic algorithm (GA), decision tree algorithm (M5P) and Random Subspace (RS) algorithm have been used.

2.4. Preparation of input layer map of GALDIT method (GALDIT)

To evaluate the vulnerability potential of Ajab-Shir aquifer, there are six parameters, type of aquifer (G), hydraulic conductivity of the aquifer (A), height of the groundwater level (L), distance from the coastline (D), the qualitative impact of saltwater advance (I) and the thickness of the aquifer (T) were prepared and zoned in the ArcGIS environment according to the ranking and decimal weight mentioned in table (1), (Figure 6).

3. Discussion and results

In this study, the GALDIT method was used to evaluate the salinity potential of the Ajab-Shir Plain aquifer, and the vulnerability index (112-64) was obtained, which was divided into four ranges: low (76-64), medium (83-76), high (83-101) and too many (101-112) were divided. The highest vulnerability index was observed in the south and southeast sides of the plain aquifer, and according to the statistics provided by the regional water company, the pumping rate is high in this area. Therefore, excessive and indiscriminate extraction of underground water in these areas causes a drop in the underground water level, and as a result, an increase in the reverse flow of saline underground water reaches the top and causes a decrease in the quality and increase in the salinity of the underground water in these areas. Because the salinity of underground water is usually measured with TDS values, TDS values were also used to verify the vulnerability index of GALDIT, and a correlation coefficient of 0.5 was obtained. According to the map resulting from TDS interpolation, the south and southwest sides of the Ajab-Shir plain aquifer have the highest TDS values (Figure 8). Also, to determine the parameters that play a greater role in the vulnerability of the area, the correlation coefficient between the parameters and TDS was obtained, which parameters of hydraulic conductivity and the qualitative effect of salt water advance ($Cl/HCO_3^- + CO_2^{3-}$ ratio) were respectively 66. 0 and 0.64 showed the highest correlation, which indicated the sensitivity of these parameters in increasing and decreasing the vulnerability potential of the studied area. In addition, to solve the expert opinions in determining the weight of the GALDIT framework and reduce the uncertainty in the data required for the zoning of the GALDIT framework, genetic algorithm (GA), Sugeno fuzzy logic (F) and subspace learning machine algorithms

were used. Randomization (M5P) and decision tree (RS) were used. The vulnerability index obtained for GALDIT-GA was in the range of (44-81) and its correlation with TDS was 0.6. Also, among the parameters, the parameters of the height of the underground water level (L) and the effect of the presence of infiltrating salt water (I) were assigned the most weight from the optimization with the genetic algorithm (Relation 6). The correlation coefficient of the GALDIT-F map with TDS was also 0.81. Also, the correlation coefficient of GALDIT-RS and GALDIT-M5P was 0.8 (Figure 9). According to the comparison of the obtained correlation coefficients of the used methods, GALDIT-F, GALDIT-RS, and GALDIT-M5P methods have the highest correlation with TDS, among which the fuzzy logic method has a very small difference. It showed the best performance in evaluating the potential and improving the GALDIT method.

4. Conclusion

To investigate the salinity potential of the Ajab-Shir plain

aquifer, the GALDIT framework was used, and TDS values were used to validate it. To improve the disadvantages and ensure the relative certainty of the mentioned method, the genetic algorithm, Sugeno fuzzy logic, selective subspace algorithm, and decision tree algorithm were applied. With the zoning of the GALDIT map, the southern and southeastern sides of the region showed the highest vulnerability potential. The map obtained from the optimization of the genetic algorithm also presented the result of dispersion close to the GALDIT method but with an improvement of 0.1 in the correlation coefficient with TDS. GALDIT optimized with fuzzy logic (Sugeno), stochastic subspace algorithm and decision tree algorithm showed the greatest potential in the south, south-west, and south-east sides of the lake. The correlation coefficient for GALDIT-GA, GALDIT-F, GALDIT-RS, and GALDIT-M5P with TDS was obtained as 0.6, 0.81, 0.8, and 0.8 respectively. Therefore, the correlation values confirm the good performance of the GALDIT-F, GALDIT-RS, and GALDIT-M5P methods.

بررسی پتانسیل آسیب‌پذیری شوری آبخوان دشت عجب‌شیر با استفاده از چهار چوب GALDIT و بهبود آن با روش‌های هوش مصنوعی

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

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

چکیده

در سال‌های اخیر شور شدن آب در آبخوان‌های ساحلی که همواره در آن‌ها کشاورزی در حال توسعه می‌باشد، نیازمند بررسی پتانسیل آسیب‌پذیری آبخوان نسبت به شوری آب است. در آبخوان عجب‌شیر نیز برای بررسی پتانسیل آسیب‌پذیری از چهار چوب GALDIT که شامل شش لایه: نوع آبخوان (G)، هدایت هیدرولیکی آبخوان (A)، ارتفاع سطح آب زیرزمینی (L)، فاصله از خط ساحلی (D)، تاثیر کیفی پیشروی آب شور (I) و ستبرای آبخوان (T) می‌باشد، استفاده شد. در ضمن برای صحت‌سنجی نقشه پهنه‌بندی شده پتانسیل آسیب‌پذیری شوری، مقادیر TDS مورد استفاده قرار گرفت. همچنین برای اطمینان از قطعیت داده‌های در دسترس و نیز بهبود وزن و رفع ایرادات کارشناسی در تعیین وزن لایه‌های GALDIT، از منطق‌فازی (ساجنو)، الگوریتم ژنتیک (GA)، الگوریتم زیرفضای تصادفی (RS) و الگوریتم درخت تصمیم (M5P) استفاده شده است. نتایج به دست آمده از همبستگی GALDIT-RS، GALDIT-GA، GALDIT-F، GALDIT، GALDIT-M5P و GALDIT با TDS به ترتیب ۰/۵، ۰/۸۱، ۰/۶، ۰/۸ و ۰/۸ به دست آمد. بخش‌های جنوب و جنوب‌خاوری دشت دارای بیشترین پتانسیل شوری است و مقادیر همبستگی، عملکرد خوب روش‌های GALDIT-RS، GALDIT-F، GALDIT-M5P را در این مطالعه نشان داد.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۱۸

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۴/۰۱

کلیدواژه‌ها:

آبخوان ساحلی

پتانسیل آسیب‌پذیری شوری

دشت عجب‌شیر

GALDIT

۱- پیش‌نوشتار

گرفته می‌شود که پتانسیل آبخوان را برای نفوذ و پخش آلاینده‌ها از سطح زمین به سیستم جریان آب زیرزمینی نشان می‌دهد (Babiker et al., 2005) که می‌توان به دو حالت تقسیم کرد؛ الف) آسیب‌پذیری کمی که آسیب‌پذیری آبخوان به سطح معینی از بهره‌برداری در یک زمان مشخص بوده و ب) آسیب‌پذیری کیفی که آسیب‌پذیری آبخوان به سطح معینی از تخلیه آلاینده در یک زمان خاص، عنوان می‌شوند. از این رو، می‌توان آسیب‌پذیری کیفی را در زمینه سلامت انسان و بوم‌شناسی (اکوسیستم) بررسی کرد (Dong et al., 2020). شناسایی مناطق آسیب‌پذیر می‌تواند با هدف برنامه‌ریزی کاربری اراضی، نظارت علمی و جلوگیری از آلودگی آب‌های زیرزمینی انجام شود (Bouderbala et al., 2016). حفاظت و مدیریت منابع آب زیرزمینی با ارزیابی آسیب‌پذیری کیفی ویژه‌ای دارد. به این دلیل برای ارزیابی پتانسیل آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان‌ها از روش‌های هم‌پوشانی و شاخص مانند DRASTIC (Aller et al., 1987)، GALDIT (Chachadi and Lobo-Ferreira, 2001)،

آب‌زیرزمینی بخش عمده منابع آب شیرین جهان را تشکیل می‌دهد. بنابراین مصارف بی‌رویه از آب و آلودگی در اثر پسماندهای کشاورزی، صنعت و... آن را در معرض افت کمی و کیفی قرار می‌دهد، به‌ویژه در آبخوان‌های ساحلی که افت کمی می‌تواند سبب جریان معکوس از سمت دریا و هجوم آب شور به آبخوان شود که افت کیفی را نیز به دنبال دارد. در بیشتر آبخوان‌های ساحلی با وجود ارتباط هیدرولیکی منابع آب دریا با آبخوان و با کاهش سطح آب‌زیرزمینی در آبخوان، جریان از دریا به آبخوان صورت می‌گیرد که این پدیده به نفوذ آب شور از دریا به آبخوان انجامیده و شوری آبخوان را در پی خواهد داشت. در طول مسیر و با افزایش سن آب‌زیرزمینی، ترکیب آب زیرزمینی به طرف ترکیب شیمیایی آب دریا متمایل می‌شود. این تغییرات در طی حرکت سریع آب از مناطق سطحی به مناطق متوسط و مناطقی که جریان خیلی کند و آب از نظر سنی قدیمی است، اتفاق می‌افتد (اصغری مقدم، ۱۳۸۹). آسیب‌پذیری یک ویژگی ذاتی آب‌های زیرزمینی در نظر

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

ماخذنگاری:

نوری سنگراب، ث، اصغری مقدم‌هریس، ا، جبرائیلی اندریان، ن، ۱۴۰۴، بررسی پتانسیل آسیب‌پذیری شوری آبخوان دشت عجب‌شیر با استفاده از چهار چوب GALDIT و بهبود آن با روش‌های هوش مصنوعی. فصلنامه علمی علوم زمین، ۳۵(۲)، ۸۵-۱۰۰. <https://doi.org/10.22071/gsj.2025.468001.2150>

doi: 10.22071/gsj.2025.468001.2150

doi: 20.1001.1.10237429.1404.35.2.5.8

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/>)

به آلاینده‌ها نشان می‌دهد و لازم است تمهیدات بیشتری در این مناطق برای کنترل و حفاظت آبخوان اتخاذ شود. شاخص‌های AVI و SINTACS در حقیقت می‌توانند برای ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان‌های غیرساحلی به کار رفته و در ترکیب با Galdit به‌عنوان ابزاری مفید در جهت ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی نسبت به هر نوع آلودگی در سطح زمین و پیشروی آب شور دریا در آبخوان‌های ساحلی مورد استفاده قرار گیرند (قراداغی و همکاران، ۱۴۰۰).

فخری و همکاران (Fakhri et al., 2024)، جهت ارزیابی خطر شوری در آبخوان دشت ارومیه از گالدیت استفاده کردند. آن‌ها در مطالعه خود گرادیان هیدرولیکی و نرخ پمپاژ را در روش‌های جداگانه بررسی نمودند. هر دو شاخص Galdit-P و Galdit-IP همبستگی قوی با غلظت کلر نشان دادند و دقت بالاتری نسبت به گالدیت اولیه ارائه دادند. تجزیه و تحلیل حساسیت تأثیر حیاتی گرادیان هیدرولیکی را نشان داد (Fakhri et al., 2024).

قره‌خانی و همکاران (Gharekhani et al., 2023)، رویکردی جدید برای ارزیابی آسیب‌پذیری سفره‌های ساحلی بر اساس مدل‌های بهینه‌سازی استفاده کردند. برای این منظور، مدل‌های آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی DRASTICA-GA و Galdit-GA به‌عنوان مدل‌های جداگانه با استفاده از NSGA-II (non-dominated sorting genetic algorithm-II) برای تولید نقشه‌های AV (Assembled Vulnerability) به‌عنوان مدل‌های چندگانه ترکیب شد. برای همبستگی نیز نیرتات و TDS مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که روش ارائه شده می‌تواند به طور دقیق شاخص‌های AV را برای شناسایی مناطق آسیب‌پذیر مربوط به منشا مختلف آلودگی تعریف کرد (Gharekhani et al., 2023).

برزگر و همکاران (Barzegar et al., 2021)، برای بهبود وزن و رتبه‌های چهارچوب Galdit با ترکیب روش‌های نمونه‌گیری مجدد BA و DA با مدل‌های ماشین یادگیری (ML)، افزایش گرادیان شدید (XGBoost)، افزایش گرادیان سبک (eXtreme Gradient Boosting)، تقویت تطبیقی (AdaBoost)، تقویت طبقه‌بندی (Adaptive Boosting) (CatBoost) و جنگل تصادفی (RF) مطالعه‌ای برای شوری دشت شیبستر انجام دادند. برای اعتبارسنجی مدل‌ها نیز از ضریب همبستگی پیرسون (r) و همبستگی فاصله (DC) بین شاخص‌های آسیب‌پذیری پیش‌بینی‌شده و TDS استفاده کردند. همبستگی Galdit با TDS به ترتیب با ضریب پیرسون و همبستگی فاصله ۰/۴۴۷ و ۰/۵۱۱ حاصل شد. به‌طور کلی مشخص شد که روش نمونه‌گیری مجدد BA به عملکرد بهتر مدل‌های ML نسبت به DA می‌انجامد. با این حال، در همه موارد، مشخص شد که یکپارچه‌سازی روش‌های نمونه‌گیری مجدد و مدل‌های ML ابزارهای امیدوارکننده‌ای برای بهبود دقت مدل آسیب‌پذیری Galdit هستند (Barzegar et al., 2021).

شوری آبخوان دشت عجب‌شیر بیشتر منشا گرفته از شوره‌زارهای انتهایی دشت است که به‌عنوان منشا آب شور در نظر گرفته می‌شود. با توجه به اینکه در دشت عجب‌شیر مطالعات پتانسیل‌یابی شوری انجام نگرفته است، در این مقاله با هدف استفاده از چهارچوب Galdit به بررسی پتانسیل شوری سفره پرداخته شد و با توجه به اعمال نظرات کارشناسانه در تعیین رتبه و وزن چهارچوب گالدیت برای بهبود آن از روش‌های منطق فازی (ساجنو)، الگوریتم ژنتیک (GA)، الگوریتم درخت تصمیم (M5P) و الگوریتم زیرفضایی تصادفی (RS) استفاده شد. روش فازی ساجنو و الگوریتم ژنتیک از روش‌های متداول در بهینه‌سازی چهارچوب‌های آسیب‌پذیری می‌باشد ولی روش‌های M5P و RS تاکنون برای بهبود چهارچوب‌های ارزیابی آسیب‌پذیری نفوذ آب استفاده نشده است که در این مطالعه کارایی این دو روش نیز ارزیابی می‌شود.

آبخوان دشت عجب‌شیر به مساحت حدود ۷۳ کیلومتر مربع، در وسعتی برابر با

GOD (Foster, 1987) و ... استفاده می‌شود. از بین روش‌های هم‌پوشانی یاد شده چهارچوب Galdit ویژه آبخوان‌های ساحلی است (Hu et al., 2018; Motevalli et al., 2018; Bordbar et al., 2020, 2021).

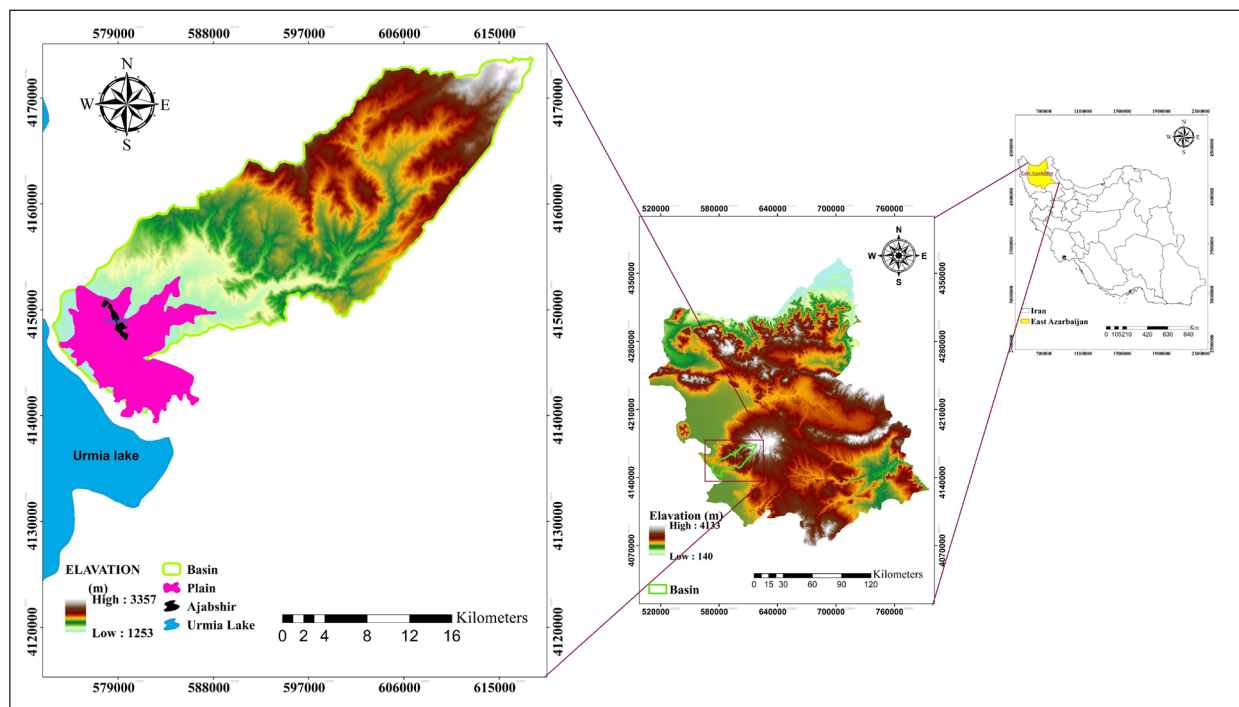
چهارچوب گالدیت توسط چاچادی (Chachadi, 2005)، برای ۵۰ آبخوان ساحلی بررسی شد که نشان داد این چهارچوب می‌تواند برای بررسی دقیق موقعیت مناطق آلوده به شوری استفاده شود. گرجی و اصغری مقدم (Gorgij and Asghari, 2016)، به‌منظور ساده‌سازی روش Galdit به‌عنوان رویه‌ای در ارزیابی آسیب‌پذیری نفوذ آب شور با جایگزینی سطح ایستابی بالای دریا (L) با نرخ پمپاژ آب زیرزمینی (P) با هدف نمایش مؤثر وضعیت آب‌های زیرزمینی با عنوان GAPDIT مطالعه‌ای برای آبخوان دشت آذرشهر انجام دادند. همچنین برای افزایش پیش‌بینی توزیع آسیب‌پذیری از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) استفاده کردند که نتایج نشان داد که نرخ پمپاژ جایگزین شده در مواردی که داده‌های سطح آب در دسترس نیست، با GAPDIT قابل توجیه است و نقشه‌های حاصل همبستگی معقولی را بین روش‌های Galdit و GAPDIT نشان می‌دهد. همچنین نقشه‌های به دست آمده نشان داد که بیشترین آسیب‌پذیری در شمال باختر دشت آذرشهر مشاهده می‌شود (Gorgij and Asghari Moghaddam, 2016). کازاکیس و همکاران (Kazakis et al., 2018)، برای ارزیابی آسیب‌پذیری نفوذ آب دریا در آبخوان ساحلی شمال یونان از GAPDIT و به‌منظور اصلاح آن از روش دسته‌بندی چند معیاره فازی (Galdit-F) استفاده کردند. در ابتدا، روش GAPDIT منطقه‌ای با آسیب‌پذیری بالا را نشان داد که به موازات خط ساحلی و مساحت ۸/۶ کیلومتر مربع را پوشش می‌دهد. روش اصلاح شده GAPDIT-F به گسسته‌سازی بیشتر مناطق آسیب‌پذیر دست یافت که برای ایجاد یک برنامه مدیریت منطقی برای جلوگیری از نفوذ آب دریا ضروری است. رویکرد GAPDIT-F همچنین ناحیه‌ای از آبخوان را متمایز کرد که تحت تأثیر سیالات زمین گرمایی است. در نهایت، نقشه راهی به‌منظور انطباق راهبردهای (استراتژی‌های) مدیریت با مقوله‌های GAPDIT-F، جلوگیری و کاهش نفوذ آب تهیه شد. راهبردهای مدیریتی پیشنهادی آبخوان ساحلی شامل اجرای تغذیه مدیریت شده آبخوان (MAR)، تخصیص مجدد چاه‌های موجود، بهینه‌سازی نرخ پمپاژ در طول سال هیدرولوژیکی و برنامه پایش دقیق است (Kazakis et al., 2018).

بردبار و همکاران (Bordbar et al., 2020)، به‌منظور ایجاد نقشه آسیب‌پذیری مطمئن برای آب زیرزمینی به‌عنوان راه حلی کلیدی برای حفاظت از منابع آب زیرزمینی و برنامه‌ریزی بیشتر در آبخوان‌های ساحلی از چهارچوب Galdit استفاده کردند. همچنین برای بهینه‌سازی وزن آن از دو روش بهینه‌ساز گرگ خاکستری (Grey Wolf Optimizer) (GWO) و الگوریتم ژنتیک (GA) استفاده گردید. این چهارچوب در آبخوان ساحلی قره‌سو-گرگان رود واقع در شمال ایران مورد آزمایش قرار گرفت. شاخص Galdit ارزیابی ضعیفی از آسیب‌پذیری در برابر نفوذ آب دریا را نشان داد. برعکس، چهارچوب‌های Galdit-GWO و Galdit-GA نتایج معقول‌تری ارائه نمود. نقشه‌های آسیب‌پذیری نشان دادند که بخش‌های باختری و شمال‌باختری منطقه مورد مطالعه از نفوذ آب دریا رنج می‌برند. همچنین مقادیر ضریب همبستگی بین شاخص‌های Galdit، Galdit-GWO و Galdit-GA با نسبت Cl/HCO_3 برابر با ۰/۳۱، ۰/۵۳ و ۰/۴۹ و مقادیر متناظر برای پارامتر TDS، به ترتیب ۰/۴۵، ۰/۶۴ و ۰/۶۰ به دست آمد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مدل‌های بهینه‌سازی پیشنهادی توانایی ارائه نتایج دقیق را دارند. افزون‌براین، این مدل‌ها سبب کاهش ذهنیت و افزایش قابلیت شاخص Galdit می‌شوند (Bordbar et al., 2020).

قراداغی و همکاران در سال ۱۴۰۰، جهت بررسی آسیب‌پذیری آبخوان ساحلی لاهیجان-چابکسر از ارزیابی مقایسه‌ای سه شاخص SINTACS، Galdit و AVI استفاده کردند. نتایج نشان داد این آبخوان در محدوده ساحلی و نزدیک به دریای خزر و به‌ویژه در بخش‌های شمالی محدوده مورد مطالعه، آسیب‌پذیری بیشتری را

شهر عجب‌شیر به دریاچه ارومیه می‌ریزد. رودخانه قلعه‌چای در دامنه بلندی‌ها از زهکشی آبخوان‌های محلی تغذیه می‌گردد و دارای جریان پایه بوده که برای آبیاری زمین‌های دره قلعه‌چای برداشت می‌شود. این رودخانه در دشت عجب‌شیر به صورت فصلی در فصل‌های زمستان و بهار دارای جریان است 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 (Samani, 2016).

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. 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



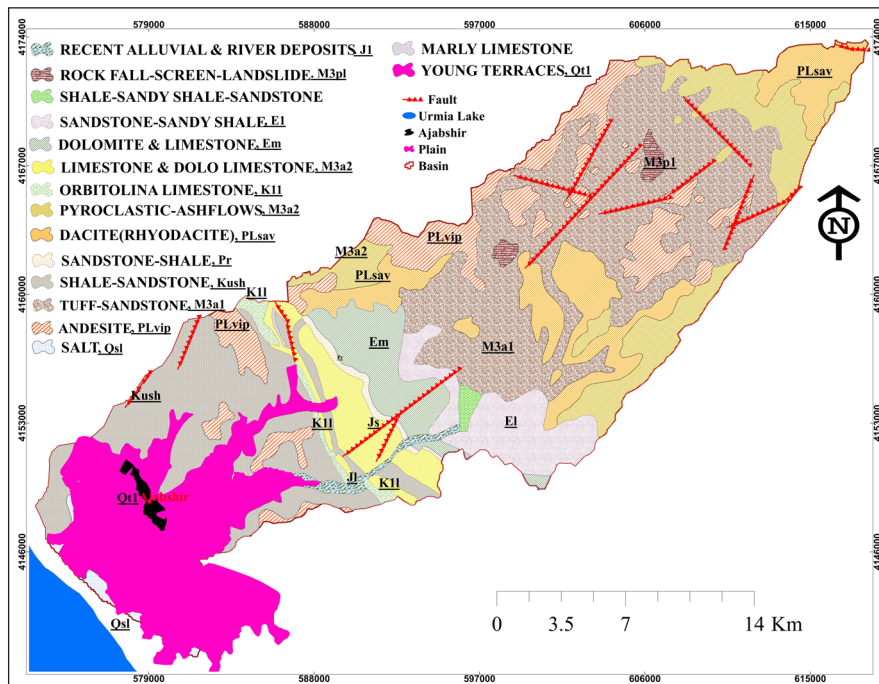
شکل ۱- موقعیت جغرافیایی دشت عجب‌شیر.

Figure 1. Geographical location of Ajab-Shir Plain

لایه آب‌دار تغییر می‌نماید. بیشترین ستبرای آبرفت در بین خانیان و عجب‌شیر و تا بیش از ۱۰۰ متر می‌رسد. ستبرای آبرفت به تدریج و با دور شدن از بستر رودخانه کاهش می‌یابد. در انتهای دشت به علت برداشت زیاد از آب‌های شیرین، جریان آب زیرزمینی معکوس شده و از سمت شوره‌زارها به سمت آبخوان می‌باشد (سازمان آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی، ۱۳۹۳). بیشترین قابلیت انتقال در اطراف رودخانه قلعه‌چای و کنار شهر عجب‌شیر بیش از ۱۰۰۰ مترمربع در روز و کمترین مقدار آن در اطراف شوره‌زارها کمتر از ۱۰۰ مترمربع در روز می‌باشد (سامانی، ۱۳۹۵). جهت جریان آب زیرزمینی در کل دشت از شمال و شمال خاور به سمت جنوب و جنوب باختر بوده و در انتهای دشت به علت برداشت زیاد از آب‌های شیرین، جریان آب زیرزمینی معکوس شده و از سمت شوره‌زارها به سمت آبخوان می‌باشد. تغذیه آبخوان از سازندهای مجاور در شمال و شمال خاور و همچنین شیب توپوگرافی کنترل‌کننده جهت کلی جریان آب زیرزمینی دشت عجب‌شیر می‌باشد (سامانی، ۱۳۹۵). تعداد ۲۵ چاه مشاهده‌ای جهت اندازه‌گیری سطح تراز آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه موجود است. خطوط هم‌پتانسیل و جهت جریان در دشت عجب‌شیر در نقشه شکل ۳ ارائه شده است.

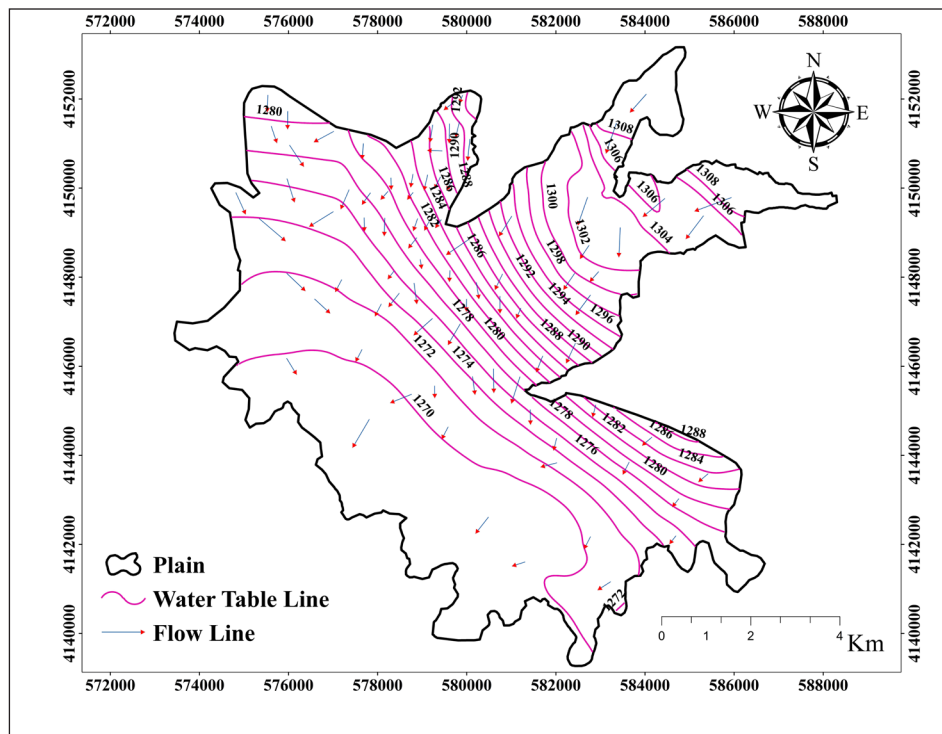
نقشه‌های زمین‌شناسی و زمین‌ساختی منتشر شده و همچنین نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ عجب‌شیر (تهیه شده توسط سلطانی سیسی و همکاران، ۱۳۸۴) گویای آن است که آذربایجان و از جمله منطقه مورد مطالعه در محل برخورد رسوبی- زمین‌ساختی البرز و زاگرس و بالاخره پهنه آتشفشانی ارومیه- دختر قرار دارد (درویش‌زاده، ۱۳۸۰). این منطقه شاهد آگلومرای آذرآواری و نهشته‌های لار است که حاصل فعالیت‌های انفجاری سهند بوده و از جنس پیروکسن- آندزیت می‌باشد. نهشته‌های کواترنری شامل مجموعه‌ای از پادگانه‌های قدیمی، پادگانه‌های جوان، نهشته‌های نرم و ریزدانه و شوره‌زارهای حاشیه دریاچه ارومیه است (شکل ۲).

آبخوان دشت عجب‌شیر از نوع آبخوان آزاد می‌باشد که در نهشته‌های آبرفتی شکل گرفته است. بخشی از این آبرفت از حمل سنگ‌های آذرآواری (پیروکلاستیک) کوه سهند توسط رودخانه قلعه‌چای ایجاد شده است. سنگ کف عجب‌شیر به دلیل نفوذ توده‌های آذرین و وجود ته‌نشست‌های دریاچه‌ای در نقاط مختلف متفاوت است. بالاترین تراز سنگ کف در منطقه، حدود ۱۳۰۰ متر و در نواحی شمال شرقی منطقه است. ستبرای آبرفت در حواشی رودخانه قلعه‌چای افزایش می‌یابد. قابلیت انتقال آبخوان در نقاط مختلف آن به دلیل تغییر دانه‌بندی و ستبرای



شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه (اقتباس از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهیه‌شده توسط سلطانی سیدی و همکاران، ۱۳۸۴).

Figure 2. Geological map of the study area (Adapted from the 1:100,000 map of the Geological Survey (Soltani Sisi et al., 2005)).

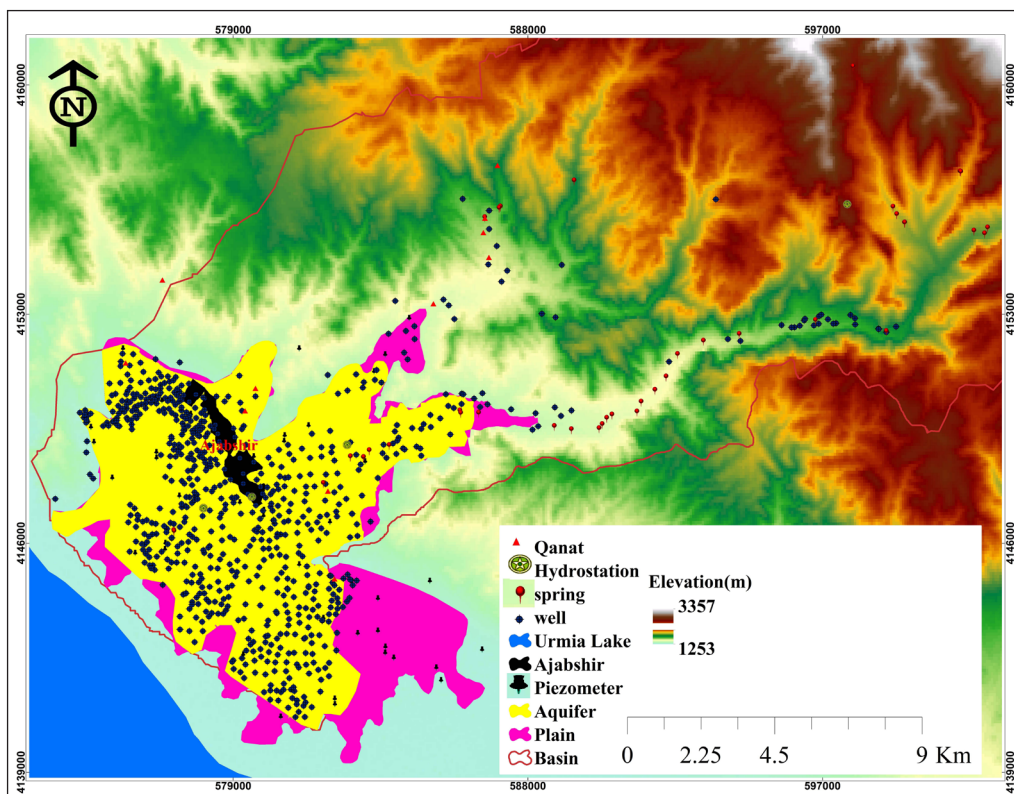


شکل ۳- خطوط هم‌پتانسیل تراز و جهت جریان آب‌زیرزمینی منطقه مورد مطالعه.

Figure 3. Contour and direction of groundwater flow of the study area.

آذربایجان شرقی، متوسط بارندگی سالانه در ارتفاعات و دشت، از ۵ ایستگاه باران‌سنجی ینگجه، شیشوان، عجب‌شیر، هرگلان و خانیان در طول دوره آماری ۲۶ ساله (۱۳۷۰-۱۳۹۶) در جدول ۱ ارائه شده و متوسط دمای سالانه نیز در این دشت ۱۳/۵ درجه سانتی‌گراد است. با توجه به هیدروگراف معرف در شکل ۵ افت متوسط در آبخوان این دشت در دراز مدت (۱۴۰۰-۱۳۸۶) ۱/۵ متر و در کوتاه مدت (۱۴۰۰-۱۳۹۹)، ۰/۸۴ متر بوده است.

تعداد ۶۲۲ حلقه چاه فعال در دشت عجب‌شیر وجود دارد (بیشتر آن‌ها به صورت چاه‌های نیمه‌ژرف می‌باشند و درصد کمی به صورت ژرف حفر گردیده‌اند) که بیشتر برای مصارف آشامیدن و کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در ارتفاعات شمال‌خاوری در محدوده مطالعاتی ۲۰ چشمه و در سمت شمال‌باختری نزدیک به انتهای دشت ۱ چشمه وجود دارد و تنها ۸ رشته قنات در منطقه مورد مطالعه، فعال می‌باشند (شکل ۴). طبق داده‌های به‌دست آمده از سازمان آب منطقه‌ای استان



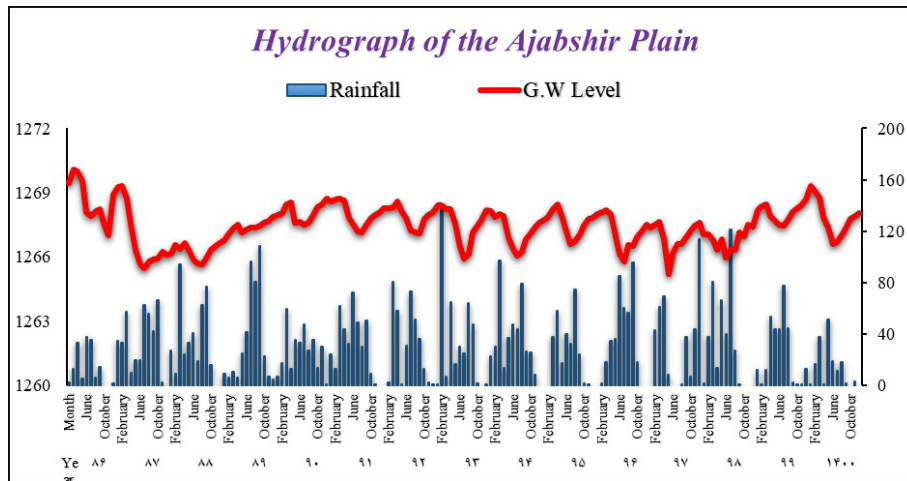
شکل ۴- نقشه منابع آب منطقه مورد مطالعه.

Figure 4. Water resources map of the study area.

جدول ۱- متوسط بارندگی سالانه ارتفاعات و دشت عجب‌شیر (میلی‌متر).

Table 1. Average annual precipitation of Ajab-Shir highlands and plains (mm).

Station name	mean annual precipitation (mm)	Geographical coordinates	
		Y UTM	UTM X
Yengije	375.27	4156360	597753
Ajabshir	252.6	4147414	579568
Shishvan	256.06	4147073	578086
Khaniyan	237	4149005	582478



شکل ۵- هیدروگراف معرف دشت عجب شیر.

Figure 5. Long term average water levels of the Ajab-Shir Plain.

۲- روش پژوهش

۲-۱- بررسی پتانسیل آسیب‌پذیری کیفی با استفاده از گالدیت

هم‌پوشانی شده و به پهنه‌بندی نقشه شاخص پتانسیل آسیب‌پذیری آبخوان به شوری می‌انجامد.

$$VIGALDIT = Gr \cdot Gw + Ar \cdot Aw + Lr \cdot Lw + Dr \cdot Dw + Ir \cdot Iw + Tr \cdot Tw \quad (1)$$

در رابطه اشاره شده در بالا، *VIGALDIT* پتانسیل آسیب‌پذیری شوری آبخوان، *r* رتبه و *w* وزن هر کدام از پارامترها می‌باشد. محدوده وزن و رتبه در پهنه‌بندی نقشه آسیب‌پذیری گالدیت به ترتیب ۱ تا ۴ و ۲/۵ تا ۱۰ است که به ترتیب از کم خطر تا پر خطر در نظر گرفته شده است. به‌طور عموماً، محدوده شاخص آسیب‌پذیری *VIGALDIT* نیز از ۴۵ تا ۱۸۰ است (جدول ۲).

چهارچوب گالدیت برای نخستین بار توسط چاچادی و لوبوفیرا (Chachadi and Lobo Ferreira, 2001)، برای ارزیابی و تعیین پتانسیل آسیب‌پذیری آبخوان‌های ساحلی به پیشروی آب شور پیشنهاد شد که روشی مبتنی بر روش‌های شاخص و هم‌پوشانی است. این چهارچوب شامل شش پارامتر نوع آبخوان (G)، هدایت هیدرولیکی آبخوان (A)، ارتفاع سطح آب‌زیرزمینی از سطح دریا (L)، فاصله از خط ساحلی (D)، تاثیر کیفی پیشروی آب شور (I) و ستبرای آبخوان (T) می‌باشد که با استفاده از رابطه (۱) تمامی پارامترهای یاد شده به صورت لایه رستری با هم،

جدول ۲- رتبه و وزن‌دهی مربوط به هر کدام از پارامترهای روش گالدیت (Chachadi, 2005).

Table 2. Rate and weight of each parameter of the GALDIT method (Chachadi, 2005).

Groundwater occurrence		Aquifer hydraulic Conductivity(m/d)		G.W L. above the sea level (m)		Distance from the shoreline(m)		Impact of existing status of SWI Status		Thickness of the aquifer (m)	
rate	Range	rate	Range	Rate	Range	Rate	Range	Rate	Range	Rate	Range
10	Confined aquifer	10	>40	10	<1	10	<500	10	>2	10	>10
7.5	Unconfined aquifer	7.5	10-40	7.5	1-1.5	7.5	750-500	7.5	2-1.5	7.5	7.5-10
5	Leaky confined aquifer	5	5-10	5	1.5-2	5	1000-750	5	1.5-1	5	5-7.5
2.5	Bounded aquifer	2.5	<5	2.5	>2	2.5	>1000	2.5	<1	2.5	<5
1		3		4		4		4		2	
Weights assigned to parameters											

روش‌ها و مدل‌های بهینه‌سازی، از چهار روش منطق فازی (ساجنو)، الگوریتم ژنتیک (GA)، الگوریتم درخت تصمیم (MSP) و الگوریتم Random Subspace (RS) استفاده شده است.

۲-۲- بهینه‌سازی روش گالدیت

در این مطالعه برای بهینه‌سازی چهارچوب گالدیت برای رفع خطاهای ناشی از اعمال نظرات کارشناسانه و کاهش عدم قطعیت پارامترهای مؤثر، از میان موارد گوناگون

۲-۳- منطق فازی یا تئوری فازی

روش منطق فازی برای اولین بار توسط پروفیسور لطفی‌زاده در سال ۱۹۶۵ مطرح گردید (Zadeh, 1965). اساس منطق فازی بر پایه مجموعه‌های فازی استوار است و همچنین نظریه کلاسیک مجموعه‌ها در علم ریاضیات را بسط داده است و عضویت درجه‌بندی شده را ارائه می‌دهد. 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 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 ۱ است (رابطه ۲).

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

منطق فازی شامل سه روش لارسن، ممدانی و ساجنو است که عمدتاً از مدل‌سازی ساجنو به دلیل ثابت و خطی بودن روند آن استفاده می‌شود (Sugeno, 1985). برای مدل‌سازی با این روش ابتدا داده‌های ورودی به صورت توابع عضویت نشان داده، سپس با استفاده از قوانین عملگرهای فازی (قوانین اگر... آنگاه) توابع عضویت را به داده‌های خروجی مرتبط می‌شوند. 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 می‌باشند (Calvo and Estrada, 2009; Tayfu et al., 2014; Nadiri et al., 2018, 2019). برای بهینه‌سازی گالدیت با روش‌های هوش مصنوعی شاخص پتانسیل شوری (GALDIT) را ابتدا باید با فرمول زیر اصلاح نمود و سپس به فرایند بهینه‌سازی ادامه داد (Nadiri et al., 2017a, b; 2018).

$$CSVI = \frac{(GALDIT)_{\max}}{(TDS)_{\max}} * (TDS)_i \quad (3)$$

CSVI نشان‌دهنده شاخص آسیب‌پذیری گالدیت تصحیح شده، $(GALDIT)_{\max}$ بیشینه مقدار شاخص گالدیت، $(TDS)_{\max}$ بیشینه مقدار TDS و $(TDS)_i$ مقدار TDS می‌باشد.

۲-۴- الگوریتم ژنتیک (GA)

الگوریتم ژنتیک برای نخستین بار توسط هالند در سال ۱۹۷۵ معرفی شد (Goldberg, 1989). الگوریتم ژنتیک، برگرفته از علم ژنتیک و نظریه تکامل داروین و بر اساس بقای سازگارترین‌ها با انتخاب طبیعی استوار است. رایج‌ترین کاربرد آن، استفاده به عنوان تابع بهینه‌کننده است. الگوریتم ژنتیک به‌طور معمول برای ایجاد راه‌حل‌های باکیفیت بالا به منظور 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). 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 به صورت الگوریتمیک 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 جهش 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 شاهد بهبودی تازه‌ای نباشیم. مجموعه‌ای از پارامترهای هدف به صورت اتفاقی برای جمعیت که با تعداد ثابتی تعیین شده‌اند 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 تک‌ها به تک‌های اعضای جمعیت انجام می‌گیرد تا سازگارترین نسل جایگزین نسل‌های پیشین شود. در این مطالعه از الگوریتم ژنتیک به منظور بهینه‌سازی وزن پارامترهای گالدیت (GALDIT) استفاده شده است. متغیرهای تصمیم مسئله، وزن‌های مربوط به هفت پارامتر مؤثر در برآورد

شاخص پتانسیل شوری است. تابع هدف روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک در رابطه (۴) آورده شده است. این تابع همان ضریب همبستگی بین TDS و شاخص آسیب‌پذیری شوری (GALDIT) 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 بالا، F : تابع هدف مسئله بهینه‌سازی، V_i : شاخص آسیب‌پذیری گالدیت مربوط به نقطه، \bar{V} : میانگین شاخص‌های آسیب‌پذیری گالدیت، S_i : مقادیر TDS نقطه، \bar{S} : میانگین TDS و n نیز تعداد داده می‌باشد.

۲-۵- الگوریتم Random Subspace (RS)

این الگوریتم به عنوان یک الگوریتم یادگیری موازی برای بهبود عملکرد طبقه‌بندی در روش‌های داده‌کاوی ارائه شده است. این الگوریتم ابتدا از طریق تقسیم داده‌های مکانی به تعداد داده‌های کوچک‌تر با ویژگی‌های مکانی مشخص و سپس اجرای الگوریتم مینا برای هر دسته از داده‌های کوچک‌تر و ترکیب نتایج آن‌ها سبب افزایش عملکرد در طبقه‌بندی می‌گردد. این الگوریتم یک روش فرعی را برای طبقه‌بندی‌های پایه آموزشی ایجاد می‌کند و به عنوان یک برتری، نمونه‌های مختلف از فضای مشخصه به جای فضای نمونه استفاده می‌شود (Skurichina and Duin, 2002). مشکل برآزش بیش از حد داده‌های آموزشی برای طبقه‌بندی در درختان تصمیم‌گیری با بالاترین دقت را می‌توان با استفاده از زیرفضای تصادفی بر طرف کرد (Hosseini et al., 2020). بنابراین، از مجموعه داده‌های آموزشی اصلی، فضای فرعی به طور تصادفی انتخاب می‌شود و از طریق ترکیبی از روش‌های رای‌گیری، نتیجه نهایی ایجاد می‌شود.

۲-۶- الگوریتم درخت تصمیم (MSP)

درخت تصمیم برای انجام پیش‌بینی، ساختاری مشابه درخت ایجاد می‌کند به این صورت که ابتدا کار خود را با استفاده از تمام نمونه‌های آموزشی شروع می‌کند و متغیری که بهترین دسته‌بندی را انجام می‌دهد انتخاب می‌کند و زیرمجموعه‌هایی تشکیل می‌دهد. شاخه‌های درخت نتیجه آزمونی است که در هر مرحله توسط الگوریتم بر روی گره‌های میانی صورت می‌گیرد. پیش‌بینی‌ها نیز در برگ‌های درخت ظاهر می‌شوند (Debeljak and Džeroski, 2011). مدل درختی MSP قابلیت پیش‌بینی متغیرهای پیوسته عددی از روی پارامترهای عددی را دارد و نتایج پیش‌بینی شده به صورت مدل‌های رگرسیون خطی ظاهر می‌شوند. معیار تقسیم در یک گره بر اساس انتخاب انحراف معیار مقادیر خروجی که به آن گره می‌رسند به عنوان معیاری از خطا است. با آزمودن هر پارامتر در گره کاهش مورد انتظار در خطا ایجاد می‌شود. کاهش انحراف معیار با رابطه (۵) محاسبه می‌شود (Wang and Witten, 1996).

$$SDR = \frac{m}{|T|} \times \beta(i) \times \left[sd(T) - \sum_{i \in (L,R)} \frac{|T_i|}{T} \times sd(T_i) \right] \quad (5)$$

که در آن، SDR کاهش انحراف معیار است. T نشان‌دهنده سری نمونه‌هایی است که به گره می‌رسد، m تعداد نمونه‌هایی است که برای این پارامتر گم شده ندارند، $\beta(i)$ یک عامل اصلاحی است و TL و TR مجموعه‌هایی هستند که از تقسیم بر روی این پارامترها به وجود می‌آیند. مرحله آخر ساخت مدل‌های درختی هموارسازی است که برای جبران ناپیوستگی‌هایی که به ناچار میان مدل‌های خطی همجوار در برگ‌های درخت هرس شده اتفاق می‌افتد صورت می‌گیرد (Wang and Witten, 1996).

۲-۷- اجرای مدل

۲-۷-۱- تهیه نقشه لایه‌های ورودی روش گالدیت (GALDIT)

برای ارزیابی پتانسیل آسیب‌پذیری آبخوان دشت عجب‌شیر شش پارامتر، نوع آبخوان (G)، هدایت هیدرولیکی آبخوان (A)، ارتفاع سطح آب‌زیرزمینی (L)،

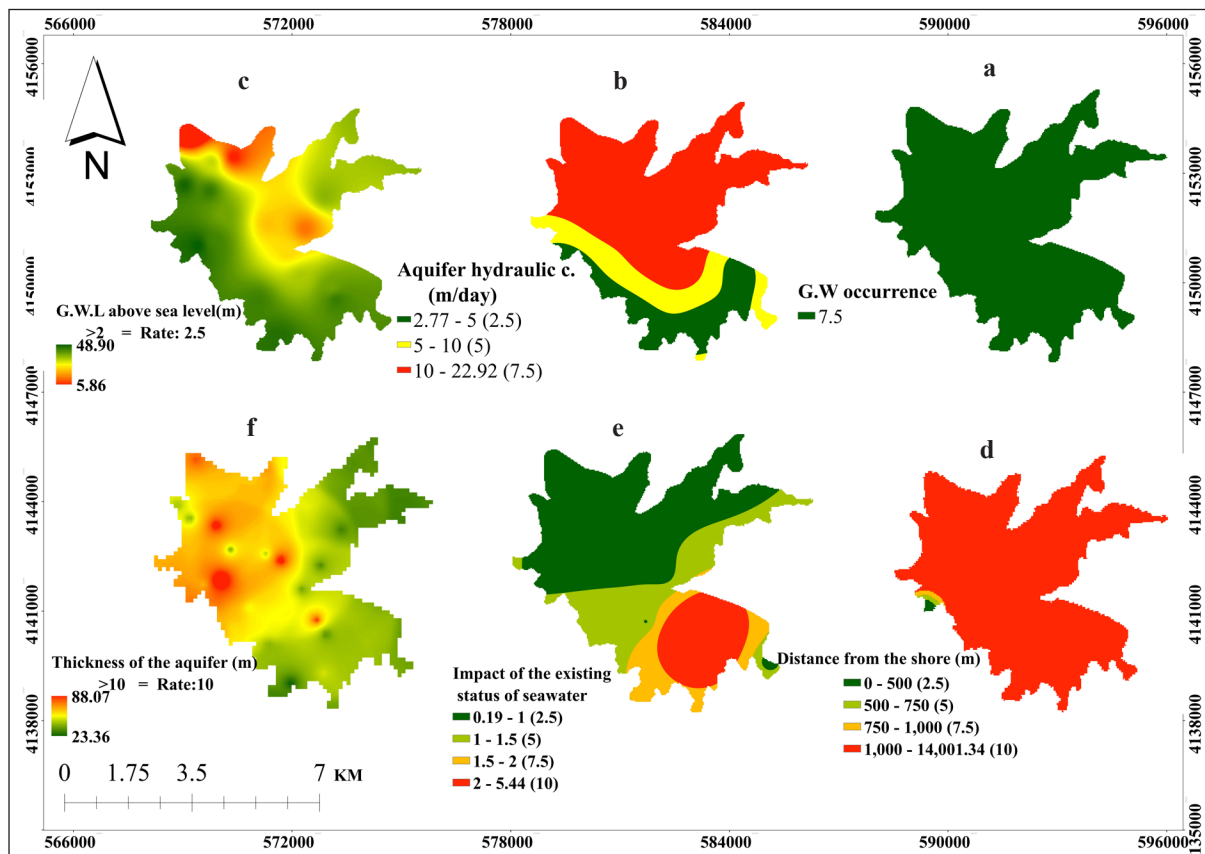
آنجایی که انتهای دشت و نزدیکی ساحل نهشته‌های ریزدانه می‌باشد، دارای هدایت هیدرولیکی کم است (شکل ۶).

۳- ارتفاع سطح آب زیرزمینی از سطح دریا (L): ارتفاع سطح آب زیرزمینی بالاتر از سطح دریا، عامل بسیار مهمی در ارزیابی پتانسیل آسیب‌پذیری آبخوان در مقابل نفوذ آب دریا است. از این رو، این پارامتر زمانی از اهمیت خیلی بالایی برخوردار خواهد شد که مقادیر سطح آب زیرزمینی کمتر از سطح دریا باشد، زیرا پتانسیل آسیب‌پذیری بیشتری را در برابر نفوذ آب دریا به آبخوان ایجاد می‌کند. ارتفاع سطح آب زیرزمینی برای دشت عجب‌شیر برای سال‌های ۱۴۰۰-۹۹ مورد بررسی قرار گرفت. ارتفاع سطح آب زیرزمینی نسبت به سطح دریا ۵/۸۶ تا ۴۸/۹۰ متر محاسبه گردید. با توجه به جدول ۲ با توجه به اینکه سطح آب بیشتر از ۲ متر است، رتبه ۲/۵ را به خود اختصاص داد (شکل ۶).

فاصله از خط ساحلی (D)، تاثیر کیفی پیشروی آب شور (I) و ستبرای آبخوان (T) به روش‌هایی که در ادامه به‌طور مختصر شرح داده شده است، با توجه به رتبه و وزن دهی بیان شده در جدول ۱ در محیط ArcGIS تهیه و پهنه‌بندی شد.

۱- نوع آبخوان (G): آبخوان دشت عجب‌شیر از نوع آبخوان آزاد ساحلی است که با توجه به جدول ۲ رتبه ۷/۵ را به خود اختصاص می‌دهد. وزن در نظر گرفته شده طبق جدول ۲ نیز برای نوع آبخوان، ۱ می‌باشد (شکل ۶).

۲- هدایت هیدرولیکی آبخوان (A): هدایت هیدرولیکی از تقسیم‌پذیرترین قابلیت انتقال بر ستبرای آبخوان به دست می‌آید در منطقه مورد مطالعه هدایت هیدرولیکی به سه کلاس کم (۲/۷۷-۵)، متوسط (۵-۱۰) و زیاد (۱۰-۲۲/۹۲) به ترتیب با رتبه‌های ۲/۵، ۵ و ۷/۵ تقسیم شد. ضلع مرکزی، خاوری و شمالی منطقه دارای بیشترین هدایت هیدرولیکی می‌باشند که این مرتبط با نوع دانه‌بندی این مناطق می‌باشد. از



شکل ۶- a) Groundwater occurrence, b) Aquifer hydraulic Conductivity, c) Groundwater Level above mean the sea level (m), d) Distance from the shoreline, e) Impact of existing status of SWI status, f) Thickness of the aquifer.

آسیب‌پذیری آبخوان به نفوذ آب شور شود و مطابق جدول ۲ به چهار کلاس با رتبه‌های ۲/۵، ۵، ۷/۵ و ۱۰ تقسیم شد (شکل ۶).

۵- تاثیر وجود آب شور نفوذ کرده (I): با استفاده از داده‌های کیفی نسبت یون کلراید به مجموع کربنات و بی‌کربنات و توزیع مکانی آن‌ها در نرم‌افزار ArcMap به دست آمد. در آب دریا در بین کاتیون‌ها کلراید چیره بوده و مقدار بی‌کربنات در مقایسه

۴- فاصله از خط ساحلی (D): با استفاده از جعبه ابزار فاصله (Euclidean distance) در نرم‌افزار ArcMap توزیع مکانی لایه مربوط به فاصله از خط ساحلی محاسبه و رسم گردید. این مقادیر از نزدیک‌ترین فاصله از دریاچه (مقدار صفر) تا دورترین فاصله ۱۴۰۰۰ متر در شکل ۸ قابل مشاهده است. با نزدیک شدن به خط ساحلی، این فاصله (Euclidean distance) کاهش می‌یابد که می‌تواند سبب افزایش پتانسیل

۲-۷-۴- تهیه نقشه بهبودیافته گالدیت با الگوریتم ژنتیک

در این مطالعه با بیشینه کردن تابع هدف در الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی وزن‌ها صورت گرفت. تابع هدف، با همبستگی بین TDS و شاخص آسیب‌پذیری ایجاد شد و وزن‌های بهینه پارامترهای گالدیت به روش الگوریتم ژنتیک با بیشینه کردن تابع هدف در رابطه (۴) به دست آمد. با قرار دادن وزن‌های جدید در رابطه (۷) شاخص آسیب‌پذیری جدیدی از ترکیب روش گالدیت و الگوریتم ژنتیک (GALDIT-GA) حاصل شد. بیشترین وزن به پارامترهای تاثیر کیفی پیشروی آب شور و ارتفاع از سطح آب‌زیرزمینی از سطح دریا اختصاص یافت. شاخص آسیب‌پذیری GALDIT-GA در بازه (۴۴-۸۱) به دست آمد. در ضمن، ضریب همبستگی GALDIT-GA با TDS، ۰/۶ حاصل شد که نسبت به گالدیت بهبودی شایان توجهی در وزن‌ها نشان می‌دهد. وزن‌های جدید در رابطه (۷) آورده شده است (شکل ۸-ب).

$$VIGALDIT = Gr(2.13) + Ar(1) + Lr(4) + Dr(2) + Ir(4) + Tr(2) \quad (۷)$$

۲-۷-۵- تهیه نقشه بهبودیافته گالدیت با منطق فازی (ساجنو)

برای بهینه‌سازی با منطق فازی از روش ساجنو استفاده شده است. زیرا دارای بازدهی بیشتر و درصد خطای کمتری می‌باشد. ورودی این مدل شامل شش پارامتر اصلی گالدیت است و خروجی آن نیز طبق رابطه (۳) محاسبه شد. تمام ورودی و خروجی‌های مدل با استفاده از رابطه (۶) به بازه صفر و یک انتقال داده شدند. سپس ۲۰ درصد از داده‌ها برای آزمایش (Test) و ۸۰ درصد نیز برای آموزش (Train) در نظر گرفته شدند و در نهایت با استفاده از مدل خوشه‌سازی کاهشی مدل فازی اجرا شد. ضریب همبستگی آزمایش ۰/۷۸ با خطای (RMSE) ۰/۰۹ و آموزش ۰/۸۲ و RMSE ۰/۱ حاصل شد (جدول ۳). در مرحله آخر با درون‌یابی داده‌های خروجی فازی در نرم‌افزار ArcMap نقشه GALDIT-F به دست آمد (شکل ۸-ج). ضریب همبستگی GALDIT-F با TDS نیز ۰/۸۱۲ حاصل شد که نسبت به چهارچوب اصلی گالدیت همبستگی بهتری نشان داد (شکل ۸-د).

با آن بسیار کم است، بنابراین با فاصله گرفتن از دریا مقدار این نسبت کاهش پیدا می‌کند. نقشه حاصل شامل چهار کلاس ۰/۱۹ تا ۱، ۱ تا ۱/۵، ۱/۵ تا ۲ و ۲ تا ۵/۴۴ شد که به ترتیب رتبه‌های ۵، ۷/۵ و ۱۰ را به خود اختصاص دادند. طبق نقشه شکل ۶ بیشترین میزان این نسبت در قسمت جنوبی به ویژه جنوب باختری پراکنده شده است.

۶-ستبرای آبخوان (T): مقادیر ستبرای آبخوان با استفاده از لاگ‌های موجود در دشت، نرم‌افزار ArcMap به دست آمد. ستبرای آبخوان بیشتر از ۱۰ متر (۲۳/۶۳ - ۸۸/۰۷) می‌باشد که رتبه ۱۰ را به خود اختصاص داد (شکل ۶).

۲-۷-۲- استاندارد سازی داده‌ها

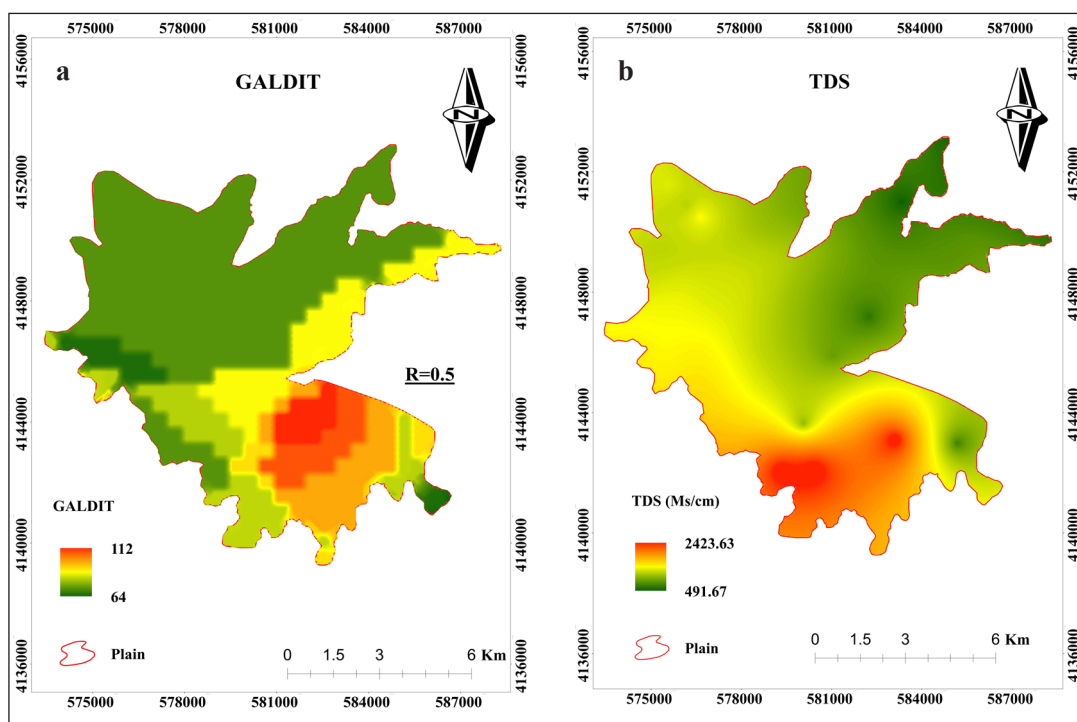
برای حذف دامنه مختلف مقادیر داده و تبدیل آن‌ها به اعدادی مابین صفر و یک، از رابطه ۶ برای استانداردسازی داده‌ها استفاده شد:

$$X_i^n = \frac{X_i - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (۶)$$

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

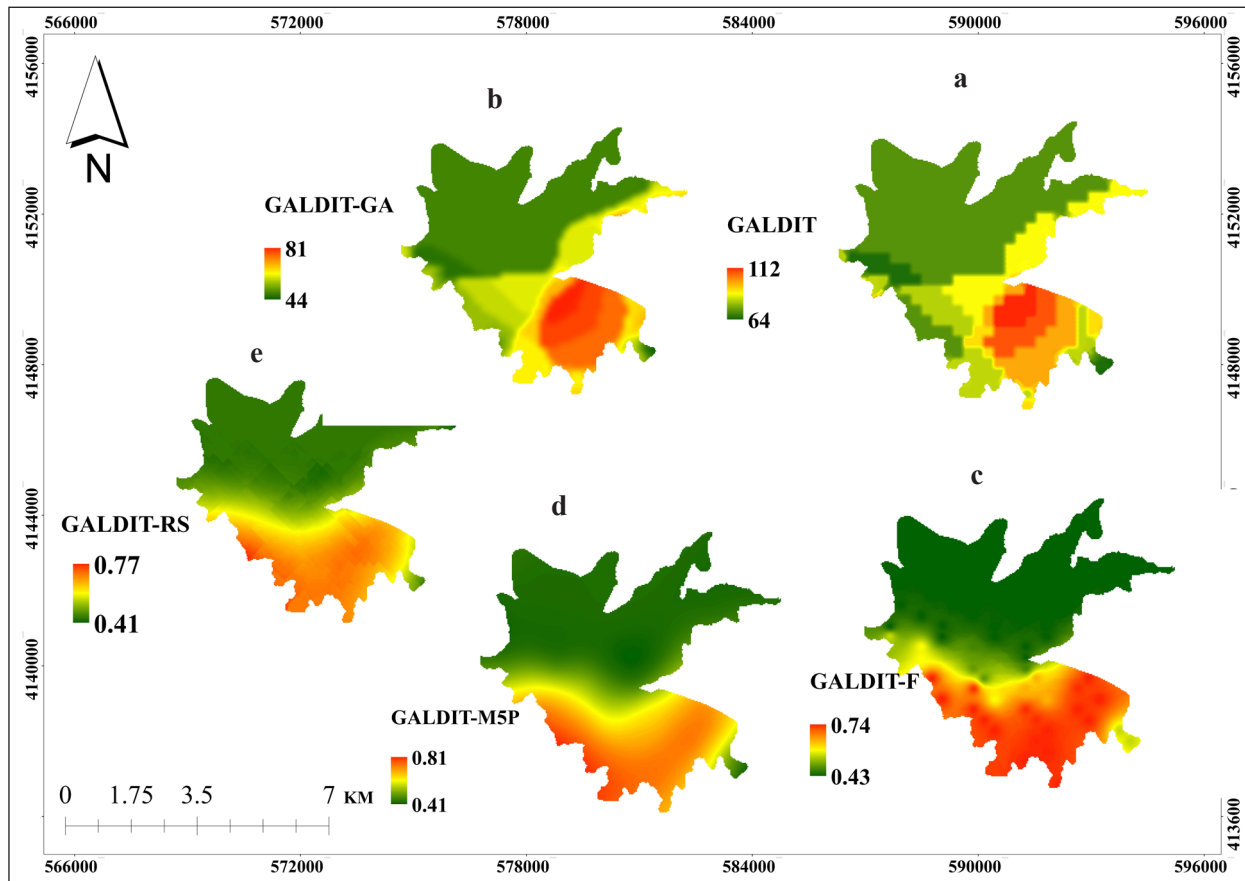
۲-۷-۳- تهیه نقشه پتانسیل آسیب‌پذیری کیفی با استفاده از گالدیت

پس از تهیه نقشه‌های شش لایه یاد شده (شکل ۶)، با وزن‌های یاد شده در جدول ۲ و مطابق با رابطه (۱)، نقشه پتانسیل آسیب‌پذیری به نفوذ آب شور از دریاچه پهنه‌بندی شد (شکل ۷-ا و شکل ۸-ا). شاخص آسیب‌پذیری گالدیت برای آبخوان دشت عجب‌شیر ۶۶ تا ۱۱۲ به دست آمد. شاخص آسیب‌پذیری به دست آمده در ۴ کلاس خیلی کم (۷۳-۶۴)، کم (۷۶-۷۳)، متوسط (۸۴-۷۶)، زیاد (۱۰۱-۸۴) و خیلی زیاد (۱۱۲-۱۰۱) تقسیم‌بندی شد. بیشترین پتانسیل آسیب‌پذیری در ضلع جنوب‌خاوری و جنوبی آبخوان دشت عجب‌شیر مشاهده گردید. با توجه به همبستگی به دست آمده از مقایسه مقادیر شاخص گالدیت با TDS، ضریب همبستگی (R) ۰/۵ حاصل شد (شکل ۷-ا و شکل ۸-ا).



شکل ۷- (a) نقشه شاخص پراکنده‌گی پتانسیل آسیب‌پذیری گالدیت، (b) نقشه پراکنده‌گی مقادیر TDS در آبخوان دشت عجب‌شیر.

Figure 7-a) GALDIT vulnerability potential index map; b) Scatter map of TDS values in Ajab-Shir Plain aquifer.



شکل ۸- نقشه‌های شاخص آسیب‌پذیری (a) GALDIT، (b) GALDIT-GA، (c) GALDIT-F، (d) GALDIT-M5P، (e) GALDIT-RS.

Figure 8. Vulnerability index maps a) GALDIT, b) GALDIT-GA, c) GALDIT-F, d) GALDIT-M5P, e) GALDIT-RS.

جدول ۳- نتایج ارزیابی عملکرد بهینه‌سازی با منطق فازی (ساجنو).

Table 3. The results of evaluating the performance of optimization with fuzzy logic (Sugeno).

Evaluation criteria	RMSE	R	R ²
Train	0.093	0.78	0.61
Test	0.106	0.812	0.65

محدوده ۰/۴۱ تا ۰/۸۱ حاصل شد. ضمناً همبستگی نقشه پتانسیل آسیب‌پذیری بهینه شده با M5P (GALDIT-M5P) با مقادیر TDS، همانند GALDIT-RS، ۰/۸ به دست آمد (شکل ۸-د).

۳- داده‌ها و اطلاعات و بحث

در این مطالعه از روش گالدیت برای ارزیابی پتانسیل شوری آبخوان دشت عجب‌شیر استفاده شد و شاخص آسیب‌پذیری (۶۴-۱۱۲) به دست آمد که به چهار محدوده کم (۶۴-۷۶)، متوسط (۷۶-۸۳)، زیاد (۸۳-۱۰۱) و خیلی زیاد (۱۰۱-۱۱۲) تقسیم‌بندی شد. بیشترین شاخص آسیب‌پذیری در ضلع جنوبی و جنوب‌خاوری آبخوان دشت مشاهده شد که در این ناحیه با توجه به آمار ارائه شده توسط شرکت آب منطقه‌ای نرخ پمپاژ بالا می‌باشد. نقشه پراکندگی تخلیه چاه‌ها از چاه‌های پمپاژ در

۲-۷-۶- تهیه نقشه گالدیت بهینه شده با الگوریتم زیر فضای تصادفی

برای بهینه‌سازی GALDIT با روش RS، ۲۰ درصد از کل داده به عنوان تست و ۸۰ درصد آن نیز به عنوان آموزش انتخاب شد. نتیجه به دست آمده به عنوان خروجی مدل در نرم‌افزار ArcGIS درون‌یابی شد که شاخص آسیب‌پذیری در محدوده ۰/۴۱ تا ۰/۷۷ حاصل شد. همبستگی نقشه پتانسیل آسیب‌پذیری بهینه شده با RS (GALDIT-RS) با مقادیر TDS، ۰/۸ به دست آمد (شکل ۸-ع).

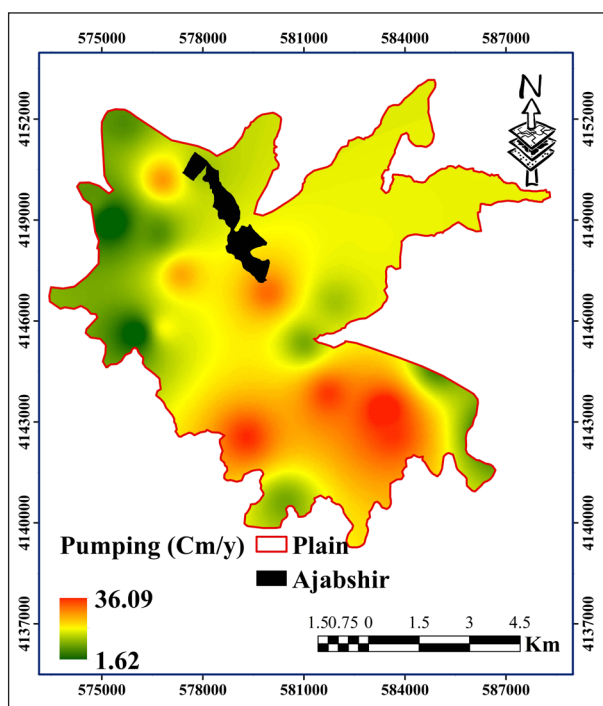
۲-۷-۷- تهیه نقشه گالدیت بهینه شده با الگوریتم درخت تصمیم

برای بهینه‌سازی GALDIT با روش M5P نیز ۲۰ درصد از کل داده به عنوان تست و ۸۰ درصد آن نیز به عنوان آموزش انتخاب شد. نتیجه به دست آمده به عنوان خروجی مدل در نرم‌افزار ArcGIS درون‌یابی شد که شاخص آسیب‌پذیری در

رفع نظرات کارشناسانه در تعیین وزن چهارچوب گالدیت و کاهش عدم قطعیت در داده‌های مورد نیاز برای پهنه‌بندی چهارچوب گالدیت، از روش‌های الگوریتم ژنتیک (GA)، منطق فازی ساجنو (F) و الگوریتم ماشین‌های یادگیری زیرفضایی تصادفی (M5P) و درخت تصمیم (RS) استفاده شد. شاخص آسیب‌پذیری به دست آمده برای GALDIT-GA در محدوده (۴۴-۸۱) به دست آمد که نتیجه همبستگی آن با TDS، ۰/۶ حاصل شد. همچنین از بین پارامترها، پارامترهای ارتفاع سطح آب زیرزمینی (L) و تاثیر وجود آب شور نفوذ کرده (I) بیشترین وزن را از بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک به خود اختصاص دادند (رابطه ۶). ضریب همبستگی نقشه GALDIT-F با TDS نیز ۰/۸۱ به دست آمد. همچنین ضریب همبستگی GALDIT-RS و GALDIT-M5P نیز ۰/۸ حاصل شد (شکل ۸). با توجه به مقایسه ضرایب همبستگی به دست آمده روش‌های به کار برده شده روش‌های GALDIT-F، GALDIT-RS و GALDIT-M5P دارای بیشترین همبستگی با TDS هستند که از بین آن‌ها نیز روش منطق فازی با تفاضل خیلی کم بهترین عملکرد را در ارزیابی پتانسیل و بهبود روش GALDIT از خود نشان داد. مدل‌های ماشین یادگیری با استفاده از هسته‌های کرنل به ویژه در مسائلی که مرزهای تصمیم پیچیده و غیر خطی عملکرد بسیار خوبی دارد و این قابلیت اجازه می‌دهد که به صورت مؤثرتری داده‌ها را تفکیک کند و عملکرد بهتری نسبت به مدل فازی و الگوریتم ژنتیک داشته باشد. لازم به یادآوری است برتری هر مدلی به شرایط داده‌ها و نوع مساله نیز بستگی دارد.

شکل ۹ آورده شده است که نشان‌دهنده میزان تخلیه در مناطق دارای بیشترین پتانسیل شوری مطابق نقشه شاخص آسیب‌پذیری می‌باشد. همچنین مطابق نقشه ارائه شده از اختلاف افت سطح آب T بیشترین افت سطح آب نیز در این نواحی مشاهده می‌شود. بنابراین برداشت زیاد و بی‌رویه از آب زیرزمینی این مناطق سبب افت سطح آب زیرزمینی و در نتیجه افزایش جریان معکوس آب زیرزمینی شور به بالا دست شده و موجب کاهش کیفیت و افزایش شوری آب زیرزمینی در این نواحی می‌شود.

با توجه به اینکه معمولاً درجه شوری آب زیرزمینی با مقادیر TDS سنجیده می‌شود، از این رو، برای صحت‌سنجی شاخص آسیب‌پذیری گالدیت نیز، از مقادیر پراکندگی TDS استفاده شده است. ضریب همبستگی در مقایسه با شاخص آسیب‌پذیری و مقادیر TDS برابر ۰/۵ به دست آمد. با توجه به نقشه حاصل از درون‌یابی TDS، ضلع جنوب و جنوب‌باختری آبخوان دشت عجب‌شیر دارای بیشترین مقادیر TDS است (شکل ۷-ب). همچنین برای مشخص کردن پارامترهایی که در آسیب‌پذیری منطقه نقش بیشتری دارند ضریب همبستگی بین پارامترها و TDS به دست آمده که پارامترهای هدایت هیدرولیکی و تاثیر کیفی پیشروی آب شور (مقادیر نسبت $Cl/HCO_3^- + CO_3^{2-}$) به ترتیب با ۰/۶۶ و ۰/۶۴ بیشترین همبستگی را از خود نشان دادند که نشان‌دهنده حساسیت بیستر این پارامترها در میزان افزایش و کاهش پتانسیل آسیب‌پذیری منطقه مورد مطالعه می‌باشد. ضمناً برای



شکل ۹- نقشه پراکندگی تخلیه آب از چاه‌های پمپاژ.

Figure 9. Distribution map of water discharge from pumping wells.

۴- نتیجه‌گیری

GALDIT، ضلع جنوبی و جنوب‌خاوری منطقه بیشترین پتانسیل آسیب‌پذیری را نشان دادند. نقشه به دست آمده از بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک نیز تقریباً نتیجه پراکندگی نزدیک به روش GALDIT ولی با بهبودی ۰/۸۱ در ضریب همبستگی با TDS ارائه داد. گالدیت بهینه شده با منطق فازی (ساجنو)، الگوریتم زیرفضایی تصادفی و الگوریتم

برای بررسی پتانسیل شوری آبخوان دشت عجب‌شیر از چهارچوب گالدیت همچنین برای صحت‌سنجی آن از مقادیر TDS استفاده شد. برای بهبود معایب و اطمینان از قطعیت نسبی روش ذکر شده، روش‌های الگوریتم ژنتیک، منطق فازی ساجنو، الگوریتم زیرفضای انتخابی و الگوریتم درخت تصمیم به کار برده شد. با پهنه‌بندی نقشه

که شوری آبخوان عجب‌شیر از طرف دریاچه ارومیه به قسمت‌های بالایی آبخوان نیز کشیده می‌شود. جهت جلوگیری از نفوذ بیشتر این آب شور به قسمت‌های آب شیرین آبخوان بایستی مقادیر بهره‌برداری از چاه‌های پمپاژ همجوار با آب شور به مقدار زیاد کاهش یابد تا بدین وسیله سطح تراز آب شیرین بالا آمده و سبب کاهش نفوذ آب شور از طرف دریاچه و از لایه‌های شور زیرین به آبخوان گردد.

درخت تصمیم بیشترین پتانسیل را در ضلع جنوب، جنوب-باختری و جنوب‌خاوری از سمت دریاچه نشان دادند. ضریب همبستگی برای Galdit-F، Galdit-GA، Galdit-RS و Galdit-M5P با TDS به ترتیب ۰/۶، ۰/۸۱، ۰/۸ و ۰/۸ به دست آمد. بنابراین مقادیر همبستگی نیز عملکرد خوب روش‌های Galdit-F، Galdit-RS و Galdit-M5P را تایید می‌کند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد

کتابنگاری

- اصغری مقدم، الف.، ۱۳۸۹، اصول شناخت آب‌های زیرزمینی. انتشارات دانشگاه تبریز. ص ۵۰۶.
- درویش‌زاده، الف.، ۱۳۸۰، زمین‌شناسی ایران. مؤسسه انتشارات امیرکبیر، تهران. ص ۴۳۴.
- سازمان آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی، ۱۳۹۳، گزارش نهایی مطالعات آب‌های زیرزمینی دشت‌های استان آذربایجان شرقی در محیط زیست، GIS، مهندسین مشاور اول. سامانی، س.، ۱۳۹۵، بررسی هیدروژئولوژی و عدم قطعیت مدل آب‌زیرزمینی آبخوان دشت عجب‌شیر، آذربایجان شرقی. رساله دکتری، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز.
- سلطانی‌سیسی، گ.، الف.، جلال‌زاده، م.، حق‌فارس، ی.، یوسفی‌راد، الف.، ۱۳۸۴، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی ایران.
- قراداغی، م.، کتابچی، ح.، محمدولی سامانی، ج.، ۱۴۰۰، آسیب‌پذیری آبخوان ساحلی لاهیجان-چابکسر با استفاده از ارزیابی مقایسه‌ای سه شاخص SINTACS، GALDIT، و AVI. هیدروژئولوژی. doi: 10.22034/hydro.2022.12373. ۱۰۹-۱۲۰. (۲)۶

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). doi: 10.4236/eng.2016.811067.
- Asghari Moghadam, A., 2010. *Principles of Hydrogeology*. University of Tabriz Publishing Institute. 506 P. (In Persian).
- Babiker, I.S., Mohamed, M.A., Hiyama, T., and Kato, K.A., 2005. GIS-based DRASTIC model for assessing aquifer vulnerability in Kakamigahara, Heights, Gifu Prefecture, central Japan. *Science of the Total Environment*. 2005: 345:127-140.
- Barzegar, R., Razzagh, S., Quilty, J., Adamowski, J., Kheyrollah Pour, H., and Booi, M.J., 2021. Improving GALDIT-based groundwater vulnerability predictive mapping using coupled resampling algorithms and machine learning models. *Journal of Hydrology*. doi:https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126370.
- Bordbar, M., Neshat, A., Javadi, S., Pradhan, B., and Aghamohammadi, H., 2020. Meta-heuristic algorithms in optimizing GALDIT framework: a comparative study for coastal aquifer vulnerability assessment. *Journal of Hydrology*. doi:https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124768.
- Bordbar, M., Neshat, A., Javadi, S., and Shahdany, S.M.H., 2021. A Hybrid Approach Based on Statistical Method and Meta-heuristic Optimization Algorithm for Coastal Aquifer Vulnerability Assessment. *Environmental Modelling & Assessment*. 1-14. doi:https://doi.org/10.1007/s10666-021-09754-w.
- Bouderbala, A., Remini, B., Hamoudi, S., and Pulido-Bosch, A., 2016. Assessment of groundwater vulnerability and quality in coastal aquifers: a case study (Tipaza, North Algeria) *Arab J Geosci*. 9(181). doi:10.1007/s12517-015-2151-6.
- 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. doi:10.1016/j.biosystemseng.2008.09.032.
- Chachadi, A.G., and Lobo Ferreira, J.P.C., 2001. Seawater intrusion vulnerability mapping of aquifers using the GALDIT method, *Coastin-A Coastal Policy Res News*. 1 (4):7-9. doi: 10.4236/jgis.2016.84044.
- Chachadi, A.G., 2005. Seawater intrusion mapping using modified GALDIT indicator model- case study in Goa. *Jalvignyan Sameek*. 20:29-45. doi: 10.4236/gep.2017.53015.
- Darvishzadeh, A., 2001. *Geology of Iran*. Amir Kabir Publishing Institute: Tehran. 434 P. (In Persian).
- Debeljak, M., and Džeroski, S., 2011. Decision trees in ecological modelling. *Modelling Complex Ecological Dynamics: An Introduction into Ecological Modelling for Students*. Teachers & Scientists. 197-209. doi:10.1007/978-3-642-05029-9_14.
- Dong, Y., Zhou, W., Wang, X., Lu, Y., Zhao, P., and Li, X., 2020. A new assessment method for the vulnerability of confined water: WF & PNN method. *Journal of Hydrology*. 590:125217. doi:10.1016/j.jhydrol.2020.125217.
- East Azerbaijan Regional Water Co., 2014. *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).
- Fakhri, M.S., Asghari Moghaddam, A., Nadiri, A.A., Barzegar, R., and Cloutier, V., 2024. Incorporating Hydraulic Gradient and Pumping Rate into GALDIT Framework for Salinity Hazard Assessment in Coastal Aquifers: A Case Study of Urmia Plain, Iran. PREPRINT (Version 1) available at Research Square. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4186756/v1.
- Foster, S.S.D., 1987. Fundamental concepts in aquifer vulnerability. pollution risk and protection strategy.

- Gharadaghi, M., Ketabchi, H., and Mohammad-Vali-Samani, J., 2021. Vulnerability of Lahijan-Chaboksar aquifer using comparative assessment of three indices of GALDIT, SINTACS, and AVI. *Hydrogeology*. 6(2), 109-120. (In Persian).
- Gharekhani, M., Nikoo, M. R., Nadiri, A. A., Al-Rawas, G., Sana, A., Gandomi, A. H., Nematollahi, B., and Senapathi, V., 2023. A new approach for assessing the assembled vulnerability of coastal aquifers based on optimization models. *Journal of Hydrology*, 625, 130084. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.139>.
- Goldberg, D.E., 1989. Genetic algorithms in search, optimization and machine learning, 1st Ed. Addison-Wesley Publishing Company, New York.
- Gorgij, A.D., and Asghari Moghaddam, A., 2016. Vulnerability assessment of saltwater intrusion using simplified GAPDIT method: a case study of Azarshahr Plain Aquifer, East Azerbaijan, Iran. *Arab J Geosci*. 9:106. doi:<https://doi.org/10.1007/s12517-015-2200-1>.
- Hosseini, F.S., Choubin, B., Mosavi, A., Nabipour, N., Shamshirband, S., Darabi, H., and Haghighi, A.T., 2020. Flash-flood hazard assessment using ensembles and Bayesian-based machine learning models: Application of the simulated annealing feature selection method. *science of the total environment*. 711:135161. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.135161.
- Hu, X., Ma, C., Qi, H., and Guo, X., 2018. Groundwater vulnerability assessment using the GALDIT model and the improved DRASTIC model: a case in Weibei Plain, China. *Environmental Science and Pollution Research*. 25(32):32524-32539. doi:10.1007/s11356-018-3196-3.
- Kazakis, N., Spiliotis, M., Voudouris, K., Pliakas, F.K., and Papadopoulos, B., 2018. A fuzzy multicriteria categorization of the GALDIT method to assess seawater intrusion vulnerability of coastal aquifers. *Sci. Total Environ*. 621:524-534. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.11.235.
- Mitchell, M., 1996. An Introduction to Genetic Algorithms. Massachusetts Institute of Technology. Cambridge.
- Motevalli, A., Moradi, H.R., and Javadi, S., 2018. A Comprehensive evaluation of groundwater vulnerability to saltwater up coning and seawater intrusion in a coastal aquifer (case study: Ghaemshahr-juybar aquifer). *Journal of Hydrology*, 557, 753-773.
- Nadiri, A.A., Gharekhani, M., Khatibi, R., and Asghari Moghaddam, A., 2017b. Assessment of groundwater vulnerability using supervised committee to combine fuzzy logic models. *Environ Sci Pollut Res*. 24, 8562-8577. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8489-4>.
- Nadiri, A.A., Gharekhani, M., Khatibi, R., Sadeghfam, S., and Asghari Moghaddam, A., 2017a. Groundwater vulnerability indices conditioned by Supervised Intelligence Committee Machine (SICM). *Sci Total Environ*, 1;574:691-706. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.093>.
- Nadiri, A.A., Naderi, K., Khatibi, R., and Gharekhani, M., 2019. Modelling groundwater level variations by learning from multiple models using fuzzy logic. *Hydrological Sciences Journal*, 64(2), 210-226. <https://doi.org/10.1080/02626667.2018.1554940>.
- Nadiri, A.A., Sedghi, Z., Khatibi, R., and Sadeghfam, S., 2018. Mapping specific vulnerability of multiple confined and unconfined aquifers by using artificial intelligence to learn from multiple DRASTIC frameworks. *J Environ Manage*. 1;227: 415-428. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.019>.
- Samani, S., 2016. *Hydrogeological study and uncertainty of the groundwater model of Ajab-Shir plain, East Azerbaijan. Ph.D. Thesis in Hydrogeology, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz. (In Persian)*.
- Skurichina, M., and Duin, R.P., 2002. Bagging, boosting and the random subspace method for linear classifiers. *Pattern Analysis and Applications*. 5:121-135. doi: <https://doi.org/10.1007/s100440200011>.
- Soltani Sisi, G.A., Jalalzadeh, M., Haghfarshi, E., and Yosefirad, A., 2005. *Geological survey and mineral exploration of Iran. (In Persian)*.
- Sugeno, M., 1985. *Industrial applications of fuzzy control. Elsevier Science Inc. Amsterdam*.
- 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.
- Wang, Y., and Witten, I.H., 1996. Induction of model trees for predicting continuous classes, (Working paper 96/23), Hamilton, New Zealand: University of Waikato. Department of Computer Science. doi: <https://digitalnz.org/records/432394>.
- Zadeh, L.A., 1965. Fuzzy Sets. *Information Control*. 8, 338-353. Doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X).