

## Research Paper



## New Z-Number-Based Method for Specialized Groundwater Vulnerability Assessment

### Case studies: The Ardabil and Qorveh-Dehgolan plains



Sana Maleki <sup>\*1</sup>, Vahid Nourani <sup>2</sup>, Hessam Najafi <sup>3,4</sup>



This paper is an open access and licenced under the CC BY NC licence.



DOI:10.22034/HYD.2024.59132.1713

**Reference to this article:** Maleki, Sana; Nourani, Vahid; Najafi, Hessam. (2024). New Z-Number-Based Method for Specialized Groundwater Vulnerability Assessment (Case studies: The Ardabil and Qorveh-Dehgolan plains). *Hydrogeomorphology*, 11(38): 98 – 122.

## Keywords

**Groundwater, DRASTIC, Data mining, Fuzzy Logic, Z-numbers, Ardabil plain, Qorveh-Dehgolan plain.**

**Receive Date:** 2023/12/03

**Accept Date:** 2024/02/26

**Available:** 2024/00/00

## A B S T R A C T

Systems for assessing groundwater vulnerability are designed to protect groundwater resources from pollution. The DRASTIC method is a well-known approach for determining groundwater susceptibility. One drawback of the DRASTIC method is that it relies on expert judgment to rank parameters, which introduces uncertainty. This study used a new generation of Fuzzy Logic (FL), called the Z-number theory, to estimate the specific vulnerability of aquifers and address this uncertainty. The specific vulnerability of the Ardabil and Qorveh-Dehgolan aquifers was estimated using two scenarios: the DRASTIC parameters as inputs and nitrate concentration values as output. The vulnerability of the aquifer was also evaluated by comparing the results of the proposed models with those of the DRASTIC model, which served as a benchmark. The analysis showed that the Z-number Based Modeling (ZBM), which considered data reliability and weighted the rules appropriately, produced higher-quality results than the classic FL. In the Ardabil plain, the ZBM yielded results that were 53% better (using seven inputs) and 184% better (using four inputs) compared to the classic FL. In the Qorveh-Dehgolan Plain (QDP), the ZBM produced results that were 127% better (using seven inputs) and 311% better (using four inputs) than the classic FL. The irregularity and non-linearity of the data, such as the high coefficient of variation (CV) in the Ardabil plain compared to the QDP, may contribute to the high CV value in the plains. Therefore, in plains with high CV, the quality of the extracted Z-number-based rules may be lower.

**\* Corresponding Author: Sana Maleki**

**E-mail:** [snamaleki@yahoo.com](mailto:snamaleki@yahoo.com), [s.maleki99@ms.tabrizu.ac.ir](mailto:s.maleki99@ms.tabrizu.ac.ir)

1. MSc. in Civil and Environmental Engineering, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Iran.

2. Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Iran. [nourani@tabrizu.ac.ir](mailto:nourani@tabrizu.ac.ir)

3. Ph.D. in Water Resources Engineering, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Iran.

4. PostDoc, College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, China. [HessamNajafi@tabrizu.ac.ir](mailto:HessamNajafi@tabrizu.ac.ir)

## Extended Abstract

### Introduction

In most of the world's semi-arid regions, groundwater is an important and primary source of fresh water. Sustainable management of groundwater resources necessitates an efficient monitoring approach. Groundwater vulnerability assessment is one of the most effective and realistic methods for preventing groundwater contamination (Panagopoulos et al., 2006). As a measure of an aquifer's capacity to draw contaminants from the earth and disperse them throughout the groundwater system, vulnerability is a relative, dimensionless, and unpredictable property (Babiker et al., 2005). Conceptually, aquifer vulnerability is separated into intrinsic and specific vulnerabilities (Gogu & Dassargue, 2000). The term "intrinsic vulnerability" describes the potential for contamination in any area without taking specific contaminants into account (Almasri, 2008). However, specific vulnerability emphasizes the susceptibility of groundwater to particular pollutants, such as nitrate pollution (Stigter et al., 2006). Using the DRASTIC model in the GIS, the vulnerability of the aquifers in the Ardabil Plain and the Qorveh-Dehgolan Plain (QDP) was initially assessed in this study. Then, the proposed method was developed to assess groundwater-specific vulnerability (nitrate concentration) using the classic Fuzzy Logic (FL) and the novel Z-number-Based Modeling (ZBM) method. Finally, the suggested method's performance was assessed using evaluation criteria. The outcomes were then compared to those of the DRASTIC model, which served as the benchmark model.

### Methodology

The proposed approach in this study was applied to two plains to evaluate its capability in two different conditions. In this paper, the first and second study areas were the QDP and the Ardabil plain, which are respectively located in western and northwestern of Iran.

Various approaches have been put forth globally to assess the vulnerability of groundwater. The Point Count System Model (PCSM) is employed by the majority of studies. For assessing groundwater susceptibility, the most popular PCSM is the DRASTIC method (Aller et al., 1985). Because expert judgment is used to determine the weights of the variables, assessing groundwater vulnerability using weighting and overlapping methods may increase the uncertainty of the final vulnerability estimations. Consequently, the partial ability of FL methods to reflect such uncertainty makes them a potentially better option than conventional methods. However, such uncertainty can only be partially reflected by the conventional FL, which only provides constraints and lacks reliability. Due to their dependence on constraints and information reliability, Z-numbers can offer important insights into the uncertainty of experts in engineering problems (Akbarian Saravi et al., 2019). This study used the DRASTIC model in the GIS to assess the vulnerability of aquifers in the Ardabil Plain and the QDP. Then, the proposed method was developed to assess groundwater vulnerability using the classic FL and the novel ZBM method in two scenarios. In the first scenario, all seven DRASTIC model parameters were used as inputs, compared to only four parameters used in the second one. In both cases, the model's output was the nitrate concentration, which might be an accurate indicator of the plain's real pollution. The evaluation results of the proposed method were then compared with those from the DRASTIC model.

### Results and Discussion

The findings indicated that, the DRASTIC vulnerability index ranged from 63 to 160 for the Ardabil plain, was versus that of 39 and 146 for the QDP. Based on the QDP's pollution risk map, the western sections of the plain have a higher risk of pollution, while the majority of the plain (85%) has a low risk of pollution. Moreover, most parts of the Ardabil plain have low pollution risk covering 72% of the plain area. The accuracy of the DRASTIC model in predicting vulnerability classes was verified by calculating the Total Accuracy (TA) and Heidke Skill Score (HSS) criteria based on nitrate concentrations in wells and comparing the predicted vulnerability index with the proposed model results. The findings show that only 26% and 17%, respectively, of the vulnerability index classes predicted by the DRASTIC model match the nitrate

concentration classes in the Ardabil Plain and the QDP. The evaluation of the results also indicated that the ZBM could improve the results by 53% (for the first scenario), 184% (for the second scenario) in the Ardabil Plain, and 127% (for the first scenario), 311% (for the second scenario) in the QDP compared to the classic fuzzy method. Therefore, the ZBM is a reliable approach for estimation due to its ability to take data reliability into account. As expected, the vulnerability assessment results from the proposed model were significantly better, given that the DRASTIC model is unsupervised, and that using expert opinions to rank parameters may reduce the accuracy of vulnerability prediction.

## Conclusions

Aquifer vulnerability estimation is a complex and uncertain natural threat. The use of expert opinions in weighting and ranking parameters makes traditional overlapping models, such as the DRASTIC model, unable to control this uncertainty. Therefore, it is crucial to develop models that can manage this uncertainty, especially for arid to semiarid regions such as Iran. Since aquifers play a vital role in the hydro-climatic cycle of the Ardabil Plain and QDP, this study utilized DRASTIC parameters to create a model that could estimate the classified specific vulnerability (nitrate contamination) of these aquifers. Due to the inadequate performance of point predictions in these cases, an approach was developed for the class prediction of vulnerability in both plains using the concept of Z-numbers. Based on the obtained results, and the determination of estimation reliability, the ZBM outperformed the conventional FL approach. Furthermore, the ZBM can accurately estimate the specific vulnerability of aquifers even with fewer input parameters, as demonstrated in the outcomes of the second scenario of the proposed model. It is recommended to model additional quality parameters, such as phosphate, due to the reliable results of the Z-number application for aquifer vulnerability modeling. This method is also applicable in other engineering domains to improve the overall performance of engineering models by considering the reliability of the event.

## References

- Akbarian Saravi, N., Yazdanparast, R., Momeni, O., Heydarian, D., Jolai, F. (2018). Location optimization of agricultural residues-based biomass plant using Z-number DEA. *Journal of Industrial and Systems Engineering*, 12(1), 39-65.
- Aller, L., Thornhill, J. (1985). DRASTIC: a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency.
- Almasri, M. N. (2008). Assessment of intrinsic vulnerability to contamination for Gaza coastal aquifer, Palestine. *Journal of Environmental management*, 88(4), 577-593.
- Babiker, I. S., Mohamed, M. A., Hiyama, T., Kato, K. (2005). A GIS-based DRASTIC model for assessing aquifer vulnerability in Kakamigahara Heights, Gifu Prefecture, central Japan. *Science of the Total Environment*, 345(1-3), 127-140.
- Gogu, R. C., Dassargues, A. (2000). Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods. *Environmental geology*, 39, 549-559.
- Panagopoulos, G. P., Antonakos, A. K., Lambrakis, N. J. (2006). Optimization of the DRASTIC method for groundwater vulnerability assessment via the use of simple statistical methods and GIS. *Hydrogeology Journal*, 14, 894-911.
- Stigter, T. Y., Ribeiro, L., Dill, A. C. (2006). Evaluation of an intrinsic and a specific vulnerability assessment method in comparison with groundwater salinisation and nitrate contamination levels in two agricultural regions in the south of Portugal. *Hydrogeology journal*, 14, 79-99.

## مقاله پژوهشی



## روش جدید مبتنی بر اعداد Z برای ارزیابی آسیب پذیری ویژه آب های زیرزمینی مطالعه موردی: دشت های اردبیل و قروه-دهگلان



ثناملکی\*<sup>۱</sup>، وحید نورانی<sup>۲</sup>، حسام نجفی<sup>۳</sup>



این مقاله به صورت دسترسی باز و با لایسنس CC BY NC کرییتیو کامانز قابل استفاده است.



ارجاع به این مقاله: ملکی، ثنا، نورانی، وحید؛ نجفی، حسام (۱۴۰۳). روش جدید مبتنی بر اعداد Z برای ارزیابی آسیب پذیری ویژه آب های زیرزمینی (مطالعه موردی: دشت های اردبیل و قروه-دهگلان). هیدروژنومورفولوژی، ۱۱ (۳۸): 98 – 122.

DOI:10.22034/HYD.2024.59132.1713



## چکیده

سیستم های ارزیابی آسیب پذیری آب های زیرزمینی برای دستیابی به روشی مناسب برای حفاظت از این منابع در برابر آلاینده ها توسعه یافته اند. یکی از روش های شناخته شده برای تعیین حساسیت آب های زیرزمینی، روش DRASTIC است. از آنجایی که ارزیابی آلودگی آب های زیرزمینی اغلب با عدم قطعیت همراه است، مطالعه حاضر از مفهوم اعداد Z به عنوان نسل جدیدی از منطق فازی برای تخمین آسیب پذیری ویژه آبخوان ها استفاده کرده است. در این مطالعه، از پارامترهای مدل DRASTIC (ورودی ها) و مقادیر غلظت نترات (خروجی) در دو سناریو برای برآورد آسیب پذیری ویژه آبخوان های دشت های اردبیل و قروه-دهگلان استفاده شد و نتایج به دست آمده با نتایج مدل DRASTIC به عنوان مدل معیار مقایسه شد. تجزیه و تحلیل نتایج نشان داد که مدل سازی مبتنی بر اعداد Z به دلیل در نظر گرفتن قابلیت اطمینان داده ها و تخصیص وزن مناسب به قوانین، کیفیت نتایج را نسبت به منطق فازی کلاسیک به میزان ۵۳ درصد (برای سناریوی اول)، ۱۸۴ درصد (برای سناریوی دوم) در دشت اردبیل و ۱۲۷ درصد (برای سناریوی اول)، ۳۱۱ درصد (برای سناریوی دوم) در دشت قروه-دهگلان بهبود بخشید. همچنین بر اساس نتایج، ممکن است کیفیت قوانین استخراج شده برای مدل مبتنی بر اعداد Z در دشت هایی با ضریب تغییرات داده بالاتر، پایین باشد (برای مثال ضریب تغییرات داده بالای دشت اردبیل نسبت به دشت قروه-دهگلان در این مطالعه)، بنابراین در این شرایط، نتایج مدل مبتنی بر اعداد Z ممکن است بهبود قابل توجهی نسبت به نتایج منطق فازی مرسوم نداشته باشد. روش پیشنهادی در این مطالعه به دلیل قابلیت بالای آن می تواند برای طراحی کنترل کننده های هوشمند مدیریت آب زیرزمینی مورد استفاده قرار گیرد.

## کلیدواژه ها

آب زیرزمینی، دراستیک، داده کاوی، منطق فازی، اعداد Z، دشت اردبیل، دشت قروه-دهگلان.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۰۷

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۱/۲۹

\* نویسنده مسئول: ثنا ملکی

رایانامه: s.maleki99@ms.tabrizu.ac.ir ، snamaleki@yahoo.com

۱- کارشناسی ارشد مهندسی عمران- محیط زیست، گروه مهندسی آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز.

۲- استاد گروه مهندسی آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز. nourani@tabrizu.ac.ir

۳- دکتری مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز. HessamNajafi@tabrizu.ac.ir

۴- دانشجوی فوق دکتری، کالج علوم و مهندسی محیط زیست، دانشگاه نانکای، چین.

## مقدمه

آب در هر جامعه بیولوژیکی در جهان نقش حیاتی ایفا می‌کند و توسعه اقتصادی و اجتماعی یک منطقه عمدتاً به در دسترس بودن آب با کیفیت بستگی دارد. منابع آب زیرزمینی به دلیل استعداد آلودگی کمتر و همچنین ظرفیت ذخیره بالا نسبت به آب‌های سطحی، منبع مهم و اولیه آب شیرین در اکثر نقاط جهان، به‌ویژه در مناطق نیمه‌خشک (مانند ایران) به شمار می‌آیند. در سال‌های اخیر شهرنشینی و گسترش فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی منجر به آلودگی آب‌های زیرزمینی، به‌ویژه نسبت به نترات، فلزات سنگین و ترکیبات آلی شده است (فیضی زاده و همکاران، ۱۴۰۰: ۲۵۱۶). از آنجایی که سرعت جریان آب در این منابع کمتر از آب‌های سطحی است در صورت آلودگی، زمان زیادی طول می‌کشد تا آب آلوده از این سیستم خارج شود پس جلوگیری از آلودگی این منابع امری ضروری به نظر می‌رسد. یکی از کارآمدترین روش‌های پایش کیفیت آب‌های زیرزمینی، بررسی و تحلیل پتانسیل آلودگی و شناسایی مکان‌هایی است که بیشترین خطر آلودگی را دارند. در نتیجه، ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی برای شناسایی مناطق حساس آبخوان برای مدیریت منابع آب زیرزمینی امری ضروری است. تعاریف بسیاری از آسیب‌پذیری آبخوان و پیامدهای آن در هیدروژئولوژی ارائه شده است، از جمله تعریف کمیته ملی ایالات متحده (استیگر و همکاران<sup>۱</sup>، ۱۳۸۴: ۷۹). این کمیته آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی را به‌عنوان امکان یا احتمال رسیدن آلاینده‌ها به مکان خاصی در سیستم آب زیرزمینی به دنبال حضور آن‌ها در برخی مناطق بالای سطح سفره آب زیرزمینی تعریف می‌کند (الماسری، ۱۳۸۶: ۵۷۷) که از نظر مفهومی به دودسته آسیب‌پذیری ویژه و ذاتی تقسیم می‌شود (گوگو و داسارگو<sup>۲</sup>، ۱۳۷۸: ۵۴۹). آسیب‌پذیری ذاتی عبارت است از حساسیت آبخوان به عوامل طبیعی و ذاتی که وابسته به خصوصیات هیدروژئولوژیکی، هیدرولوژی، زمین‌شناسی یک منطقه و مستقل از ماهیت آلاینده است (الماسری<sup>۳</sup>، ۱۳۸۶: ۵۷۷). از سوی دیگر، آسیب‌پذیری ویژه، حساسیت آب‌های زیرزمینی را نسبت به یک آلودگی خاص یا گروهی از آلاینده‌ها مورد ارزیابی قرار می‌دهد و در بررسی آن خصوصیات آلاینده‌ها و ارتباط آن‌ها با اجزای مختلف آبخوان مدنظر است.

بسیاری از روش‌های مختلف برای ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی در سراسر جهان با استفاده از مدل‌های سیستم شمارش نقطه‌ای (PCSM)<sup>۴</sup> توسعه یافته‌اند. روش DRASTIC شناخته‌شده‌ترین روش PCSM برای ارزیابی ریسک آب‌های زیرزمینی است که جزو روش‌های هم‌پوشانی و ارزش‌گذاری نیز هست (آلر<sup>۵</sup>، ۱۳۶۳) که در آن، اطلاعات حاصل از پارامترهای مختلف به‌صورت تلفیقی مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند و سپس توسط سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)<sup>۶</sup> مورد پردازش قرار می‌گیرند. سامانه اطلاعات جغرافیایی، به دلیل ویژگی‌ها و توانایی‌های منحصربه‌فرد خود، می‌تواند به‌عنوان ابزاری سودمند برای این روش مورد استفاده قرار گیرد. این سامانه قابلیت جمع‌آوری، ذخیره‌سازی و تجزیه و تحلیل هم‌زمان پارامترها را دارد و نمایش داده‌های مکانی را در مدت‌زمان کوتاه فراهم می‌سازد (فیضی زاده و همکاران، ۱۴۰۰: ۲۵۱۶). با توجه به اهمیت موضوع آسیب‌پذیری آبخوان‌ها و ارزیابی توانایی روش‌ها و مدل‌های مختلف در این زمینه، تاکنون پژوهش‌های مختلفی در سراسر جهان صورت گرفته است و نتایج نشان داد که ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان با استفاده از رویکرد DRASTIC در سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) منجر به دستیابی به نتایج قابل قبولی می‌شود (شکور و همکاران، ۱۳۹۸: ۱؛ قوش و همکاران<sup>۷</sup>، ۱۳۹۹: ۱۲۲۵؛ پاتل و همکاران<sup>۸</sup>، ۱۴۰۰: ۵۱۹۰؛ یو و همکاران<sup>۹</sup>، ۱۴۰۰: ۱۲۷۵۳۸؛ چاکرابورتی و همکاران<sup>۱۰</sup>، ۱۴۰۰: ۱).

از مزایای روش DRASTIC می‌توان به هزینه کم و در دسترس بودن داده‌ها اشاره کرد. با این حال، قضاوت متخصص برای تعیین وزن و رتبه پارامترها استفاده می‌شود که به طور بالقوه عدم قطعیت نقشه‌های آسیب‌پذیری نهایی را افزایش می‌دهد. ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی در برابر آلودگی یک سیستم پیچیده است و تعیین وضعیت واقعی آن در آینده دشوار است. اکثر محققان حذف ویژگی‌های جزئی، افزودن ویژگی‌های ارزشمند و اصلاح ضرایب مدل را ضروری می‌دانند (آنتوناکوس و لامبراکیس<sup>۱۱</sup>، ۱۳۸۵: ۲۸۸). برخی نیز ادغام مدل DRASTIC با سایر مدل‌های آسیب‌پذیری را به‌عنوان راه‌حل مناسب پیشنهاد کرده‌اند که وزن پارامترهای DRASTIC در این

1- Stigter et al

2- Gogu and Dassargue

3- Almasri

4- Point Count System

Models

5- Aller

6- Geographic

Information Systems

7- Ghosh et al

8- Patel et al

9- Yu et al

10- Chakraborty et al

11- Antonakos and  
Lambrakis

روش‌ها بر اساس تجزیه و تحلیل غلظت نیترات و رتبه‌بندی پارامترها بررسی می‌شوند. در برخی از مطالعات، رتبه و وزن پارامترهای DRATIC به ترتیب با شناسایی چگونگی ارتباط هر پارامتر با غلظت آلاینده (مانند نیترات) و با استفاده از آنالیز حساسیت اصلاح شده است. در سال‌های اخیر، مدل‌های یادگیری ماشین (ML) از جمله منطق فازی (FL)، فازی عصبی (NF)، و شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) برای ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی و بهبود نتایج روش‌های هم‌پوشانی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از بین این روش‌ها، منطق فازی به دلیل ظرفیت بالای آن برای رسیدگی به عدم قطعیت سیستم، اخیراً به طور گسترده برای تجزیه و تحلیل فرایندهای پیچیده که در مدل‌سازی آبی - اقلیمی رایج است، مورد استفاده قرار گرفته است (نورانی و همکاران، ۱۴۰۱: ۱). مدل‌های فازی می‌توانند به طور مؤثر جنبه‌هایی از داده‌ها را تعیین کنند که به وضوح تعریف نشده‌اند و اساساً قطعی نیستند. مروری بر تاریخچه کاربرد منطق فازی نشان داد، مطالعات مختلف از قابلیت منطق فازی برای ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی در مناطق مختلف استفاده کردند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد، منطق فازی ابزاری قابل اعتماد برای مدیریت شرایط پیچیده و مبهم، ساده‌سازی تصمیم‌گیری و بهبود ادغام عوامل متعدد مورد نیاز برای برآورد آسیب‌پذیری است (دوهالده و همکاران<sup>۵</sup>، ۱۳۹۶: ۱؛ کدخدایی و همکاران، ۱۳۹۸؛ بعلوشا و همکاران<sup>۶</sup>، ۱۳۹۹: ۱۲۸۸؛ بیاتی خطیبی و همکاران، ۱۴۰۰: ۱۰۸؛ نوین پور و همکاران، ۱۴۰۰: ۱).

همان‌طور که قبل‌تر بحث شد، پیچیدگی و عدم قطعیت‌های مرتبط با رویدادهای آبی - اقلیمی به‌طور کلی و ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی، به طور خاص، می‌تواند پیش‌بینی وضعیت واقعی آن‌ها در آینده را دشوار کند. با وجود استفاده گسترده از روش‌های مختلف منطق فازی مرسوم، در فرایند مدل‌سازی و تصمیم‌گیری، بررسی اطمینان‌پذیری اطلاعات تحلیل شده بسیار مهم است (گلوخود<sup>۷</sup>، ۱۳۹۴: ۷). مثلاً در منطق فازی وقتی گفته می‌شود «اگر شیب زمین تند باشد، آسیب‌پذیری آبخوان کم می‌شود» چقدر اطمینان وجود دارد که شیب زمین تند است؟ مشکل عمده تئوری‌های آنالیز و تصمیم‌گیری سنتی این است که آن‌ها توانایی مواجهه با موقعیت‌هایی که احتمال وقوع در آن‌ها کم است را ندارند. به طور دقیق‌تر، این روش‌ها برای مواجهه با احتمالات دقیق یا مجموعه واضح توزیع احتمالات تهیه شده‌اند (علیف<sup>۸</sup>، ۱۳۹۲). از آن جایی که تصمیم‌گیری و مدل‌سازی بر مبنای اطلاعات با عدم قطعیت بالا بیهوده است در نتیجه توسعه مدلی که قابلیت اطمینان داده‌ها و اطلاعات را هم در نظر بگیرد امری ضروری به نظر می‌رسد (گلوخود، ۱۳۹۴: ۷).

به‌منظور غلبه بر این محدودیت منطق فازی، پروفیسور زاده (۱۳۸۹: ۲۹۲۳) رویکرد اعداد Z را به‌عنوان نسل جدیدی از منطق فازی مرسوم معرفی کرد که اخیراً توجه زیادی را به خود جلب کرده است. به‌عنوان نمونه برای مثال بالا، "اگر شیب زمین بسیار تند باشد که به‌ندرت اتفاق می‌افتد، به‌احتمال زیاد آسیب‌پذیری آبخوان بسیار کم خواهد بود." (به ندرت اتفاق می‌افتد) و (به احتمال زیاد) به ترتیب بخش‌های قابلیت اطمینان شیب زمین و آسیب‌پذیری آبخوان هستند. بخش قابلیت اطمینان رویکرد اعداد Z به‌دقت متغیرهای ورودی و قوانین اشاره دارد و این تفاوت اصلی بین مدل‌های فازی مرسوم و مدل مبتنی بر اعداد Z است. اعداد Z می‌توانند بینش ارزشمندی در مورد عدم قطعیت کارشناسان در مسائل مهندسی ارائه دهند؛ زیرا بر مبنای محدودیت‌ها و قابلیت اطمینان اطلاعات هستند (اکبریان ساروی و همکاران، ۱۳۹۶: ۳۹). برای مثال نورانی و همکاران (۱۳۹۹: ۱۲۶۱۹۸) و نجفی و همکاران (۱۴۰۰: ۱) از مدل مبتنی بر اعداد Z به ترتیب برای پایش خشکسالی و مدل‌سازی بارش از پارامترهای اقبانوسی-جوی در مقیاس بزرگ استفاده کردند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد که عدد Z با در نظر گرفتن عدم قطعیت و قابلیت اطمینان داده‌ها و هم چنین تخصیص وزن مناسب برای قوانین می‌تواند تخمین‌های قابل اعتمادتری از منطق فازی مرسوم را ارائه دهد.

مدل پیشنهادی در این پژوهش برای دو دشت اردبیل و قره - دهگلان توسعه یافته است تا توانایی‌ها و قابلیت‌های آن در شرایط مختلف سنجیده شود. از نوآوری‌های این مطالعه می‌توان به بررسی تأثیر پراکندگی و بی‌نظمی داده‌ها (بر اساس ضریب تغییرات داده (CV)) بر عملکرد مدل پیشنهادی و هم چنین گسترش مدل پیشنهادی در دو سناریو اشاره کرد. به دلیل پیچیدگی و عدم قطعیت موجود در فرایندهای ارزیابی آلودگی آبخوان و تنوع داده‌های مورد استفاده برای مدل‌سازی آسیب‌پذیری، کشف رابطه احتمالی بین پارامترهای آبی

1- Machine learning  
2- Fuzzy Logic  
3- Neuro-Fuzzy

4- Artificial Neural Network  
5- Duhalde et al

6- Baalousha et al  
7- Glukhoded  
8- Aliev

9- Coefficient of variation

- اقلیمی با استفاده از روش‌های مرسوم (مانند رگرسیون خطی و غیرخطی و همبستگی) دشوار است. به‌عنوان جایگزینی برای روش‌های سنتی برای انجام تخمین‌های کوتاه‌مدت، ابزار داده‌کاوی ممکن است روش مناسبی باشد (نورانی و همکاران، ۱۴۰۲: ۱۳۰۸۵۹). هم‌چنین مطالعات قبلی آسیب‌پذیری سفره‌های زیرزمینی را بر اساس پیش‌بینی‌های نقطه‌ای مورد ارزیابی قرار داده‌اند. پیش‌بینی نقطه‌ای با پیچیدگی فرایندهای آبی - اقلیمی یا همبستگی کم پارامترها سازگاری چندانی ندارد؛ بنابراین پیش‌بینی کلاس ممکن است جایگزین مناسبی در چنین موقعیت‌هایی باشد (دانیا و ناگش کومار<sup>۱</sup>، ۱۳۸۷: ۱۹۳). در نتیجه در این مطالعه پیش‌بینی کلاس یا طبقه آسیب‌پذیری مدنظر بوده است. علاوه بر این، در این مطالعه درجه پایایی یا قابلیت اطمینان اعداد Z با استفاده از ارزیابی قوانین انجمنی تعیین شده است.

## مواد و روش

### موقعیت منطقه مورد مطالعه

#### دشت اردبیل

اولین محدوده مطالعاتی موردنظر در این پژوهش، آبخوان دشت اردبیل است. شکل (۱. الف) موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. آبخوان اردبیل را می‌توان به‌صورت حوضه بسته‌ای که از رسوبات آبرفتی انباشته‌شده و در میان ارتفاعات سبلان، تالش و بزقوش واقع شده است، در نظر گرفت. تنها خروجی منابع آبی دشت در سمت شمال غربی آن واقع است. پایین‌ترین نقطه در منطقه مورد مطالعه مربوط به دشت است که ۱۱۰۸ متر از سطح دریا ارتفاع دارد و بالاترین آن مربوط به بخشی از کوه سبلان که دارای ۴۷۸۸ متر ارتفاع است. حداکثر تراز آب زیرزمینی حدود ۱۴۳۵ متر در جنوب شرقی دشت و حداقل آن ۱۲۹۵ متر در شمال غربی دشت است (ضیایی و همکاران، ۱۴۰۰: ۱۲۷). جهت جریان آب زیرزمینی در دشت اردبیل از جنوب شرق به سمت شمال غرب است. ضریب ذخیره این آبخوان حدود ۶ درصد بوده و آبخوان از نوع آزاد به شمار می‌آید. تعداد ۵۳ چاه پیژومتری برای پیش‌سطح آب زیرزمینی و ۳۲ چاه پیژومتری برای پیش‌پارامترهای ژئوشیمیایی در دشت موجود هستند.

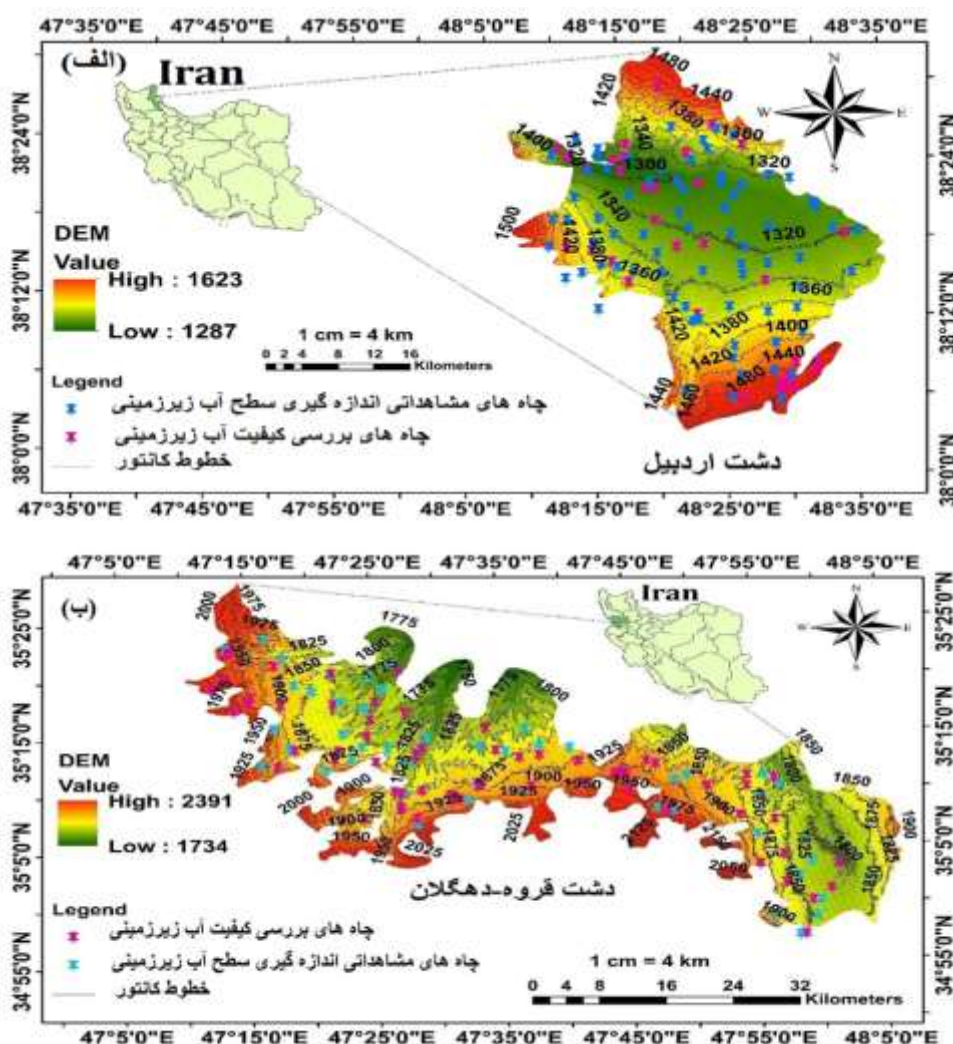
#### دشت قروه\_دهگلان

دشت قروه\_دهگلان دومین محدوده مطالعاتی در این پژوهش می‌باشد که نقشه موقعیت جغرافیایی منطقه و موقعیت چاه‌های پیژومتری دشت در شکل (۱. ب) نشان داده شده است. این دشت با داشتن سه سفره آبرفتی نامحدود که عبارتند از: چهار دولی، قروه و دهگلان، مساحتی حدود ۱۲۷۰ کیلومترمربع در استان کردستان دارد. بر اساس آزمایش‌ها پمپاژ انجام شده در دشت، قابلیت انتقال آبخوان قروه\_دهگلان بین ۵۰ تا ۱۴۹۲ مترمربع در روز متغیر است و محدوده هدایت هیدرولیکی آبخوان بین ۳۴ تا ۹۰ متر در روز است. مقدار متوسط ضریب ذخیره آبخوان حدود ۱۰۷ درصد است. جهت کلی جریان آب زیرزمینی از غرب دشت به سمت شرق است. تعداد ۵۴ چاه پیژومتری برای پیش‌سطح آب زیرزمینی و ۴۲ چاه پیژومتری برای پیش‌پارامترهای ژئوشیمیایی در دشت موجود هستند. بر اساس مطالعات انجام شده در منطقه از جمله مطالعات ژئوفیزیک، داده‌های آزمایش‌های پمپاژ و لاگ‌های حفاری می‌توان نتیجه گرفت که آبخوان شامل قسمت‌های مختلفی از رس، گراول، ماسه و قلوه‌سنگ تشکیل شده است. درصد و مقدار مواد درشت‌دانه در حاشیه دشت از موارد دیگر بیشتر است و از اندازه دانه‌ها هرچه به سمت مرکز دشت می‌رویم کاسته می‌شود.

#### ضرورت ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان‌ها در این دشت‌ها

قروه - دهگلان که بزرگ‌ترین دشت حاصلخیز کردستان است به دلیل منابع آبی زیرزمینی نیز قابل توجه است و مهم‌ترین منبع تأمین آب شرب کشاورزی، صنعتی و شهری است. نفوذ سموم کشاورزی و کودهای شیمیایی به درون منابع آب زیرزمینی (از طریق آب باران

و رواناب) باعث آلودگی این منابع شده است. بر اساس نتایج آنالیز ۴۲ حلقه چاه برای پایش پارامترهای ژئوشیمیایی در این دشت، غلظت نیترات بین ۷/۰۵ تا ۳۶/۹ میلی گرم بر لیتر (بر اساس داده‌های موجود) متغیر است. علاوه بر این، بررسی منابع آب زیرزمینی در این دشت سطوح بالای آرسنیک را به ویژه در قسمت جنوب شرقی (چهاردولی) نشان می‌دهد (سفری و همکاران، ۱۳۹۴). در نتیجه، منابع آب زیرزمینی در دشت قروه-دهگلان در معرض آلودگی قرار گرفته اند. همچنین نقشه کاربری اراضی دشت اردبیل نشان می‌دهد که اراضی کشاورزی بیشتر مساحت دشت را پوشش می‌دهند. در نتیجه، کشاورزی یکی از رایج‌ترین فعالیت‌ها در این دشت به شمار می‌رود؛ بنابراین استفاده از آفت‌کش‌ها، علف‌کش‌ها، حشره‌کش‌ها و کودهای نیترا ته پتانسیل آلودگی آب‌های زیرزمینی را افزایش می‌دهد. باتوجه به نتایج بررسی ۳۲ حلقه چاه برای پایش پارامترهای ژئوشیمیایی در دشت اردبیل، غلظت نیترات بین ۲/۱ تا ۴۵/۲ میلی گرم بر لیتر (بر اساس داده‌های موجود) متغیر است. همچنین به دلیل شرایط توپوگرافی، طبیعی و اقلیمی خاص، حوضه آبی این دشت نشان از حساسیت و آسیب‌پذیری آن دارد. باتوجه به رشد روزافزون معضل آب‌های زیرزمینی در ایران در دهه‌های اخیر و تأمین آب این دو دشت برای مصارف مختلف از جمله کشاورزی و شرب، تهیه نقشه‌های آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی، شناسایی مناطق با پتانسیل آلودگی بالا و اتخاذ تدابیر مناسب برای مدیریت این منابع ضروری به نظر می‌رسد.



شکل (۱): نقشه موقعیت جغرافیایی و موقعیت چاه‌ها: (الف) دشت اردبیل، (ب) دشت قروه-دهگلان.

Figure (1): The Geographical location map and positions of piezometers: (a) The QDP, Kurdistan, (b) The Ardabil plain, Ardabil.



## داده ها و اطلاعات

در این مطالعه از پارامترهای DRASTIC به عنوان داده های ورودی و غلظت نیترات به عنوان خروجی برای توسعه مدل پیشنهادی استفاده شده است که داده های مربوطه متعلق به سال آبی ۹۷-۹۸ بوده و از سازمان آب منطقه ای و جهاد کشاورزی شهر های اردبیل و کردستان تهیه شدند. لازم به ذکر است که برای پیش بینی مقادیر نقاط نامعلوم از روی نقاط معلوم روش های درون یابی مختلف از جمله روش کریجینگ معمولی و ( $IDW^1$ ) مورد ارزیابی قرار گرفتند که با توجه به نتایج سعی و خطا در نهایت از روش کریجینگ معمولی برای درون یابی داده استفاده شد. همچنین لازم به ذکر است که جدول ۱ اطلاعات بیشتری درباره داده های کمی مورد استفاده در این تحقیق ارائه می دهد. ضریب تغییرات (CV) میزان نوسانات داده ها نسبت به میانگین را با تقسیم انحراف معیار بر میانگین اندازه گیری می کند. چنانچه مقدار CV افزایش یابد، پراکندگی داده ها نیز افزایش می یابد.

جدول (۱): خلاصه آماری توصیفی از داده های هر دو دشت.

Table (1): Descriptive statistical summary of the data in both plains.

منطقه مورد مطالعه	پارامتر	میانگین	حداکثر	حداقل	انحراف معیار	ضریب انحراف داده (CV)
دشت اردبیل	عمق تا سطح ایستابی (متر)	۱۲/۸۴	۶۰/۵۲	۰/۵۶	۱۳/۰۲	۱/۰۱
	تغذیه خالص (سانتی متر/سال)	۵۰/۳۲	۷۴/۶۰	۴۴/۶۹	۲/۶۰	۰/۰۵
	شیب (/.)	۱/۴۲	۱۳/۱۲	۰/۰۶	۱/۴۶	۱/۰۲
	هدایت هیدرولیکی (متر/روز)	۷/۱۷	۱۵/۲۱	۰/۵۵	۴/۵۲	۰/۶۳
دشت قروه-دهگلان	غلظت نیترات (میلی گرم/لیتر)	۲۱/۴۷	۴۳/۹۶	۳/۲۶	۶/۷۲	۰/۳۱
	عمق تا سطح ایستابی (متر)	۳۷/۲۹	۹۰/۶۴	۸/۳۷	۱۳/۵۸	۰/۳۶
	تغذیه خالص (سانتی متر/سال)	۳۷/۸۸	۵۰/۸۶	۲۹/۲۴	۲/۸۶	۰/۰۷
	شیب (/.)	۱/۴۹	۹/۴۹	۰/۱۶	۰/۹۸	۰/۶۵
	هدایت هیدرولیکی (متر/روز)	۴/۵۴	۱۶/۶۸	۰/۴۹	۲/۱۲	۰/۴۶
	غلظت نیترات (میلی گرم/لیتر)	۱۸/۴۴	۳۶/۱۹	۷/۵۲	۴/۸۳	۰/۲۶

CV \* (ضریب تغییرات) =  $\frac{\sigma}{\mu}$  و  $\mu$  به ترتیب نشان دهنده انحراف معیار و میانگین داده ها هستند.

## رویکرد DRASTIC

روش پیشنهادی در این پژوهش با استفاده از پارامترهای DRASTIC برای برآورد آسیب پذیری ویژه آبخوان های دشت های اردبیل و قروه - دهگلان توسعه یافته است. در ادامه به طور مختصر رویکرد DRASTIC و پارامترهای آن شرح داده شده است. در سال های اخیر، بسیاری از محققان آسیب پذیری آب های زیرزمینی را به روش های مختلف ارزیابی کرده اند. روش های وزن دهی و هم پوشانی ساده ترین و محبوب ترین روش ها برای تخمین حساسیت آبخوان ها به آلودگی هستند. در این روش ها، پارامترها بر اساس تأثیر آنها بر آلودگی آب های زیرزمینی رتبه بندی می شوند (گوگو و داسارگوس، ۱۳۷۸: ۵۴۹). شاخص آسیب پذیری DRASTIC یک روش مبتنی بر روش های هم پوشانی است که در آن اطلاعات پارامترهای مختلف به صورت موازی تجزیه و تحلیل شده و سپس توسط GIS پردازش می شود. به هر یک از این پارامترها بسته به تأثیر آن بر آلودگی، رتبه ای از ۱ تا ۱۰ اختصاص می یابد که در آن یک به عنوان کمترین و ده بالاترین خطر آلودگی آب های زیرزمینی در نظر گرفته می شود. همچنین هر پارامتر به دلیل اهمیت نسبی آن در انتقال آلاینده به سیستم آب زیرزمینی در یک ضریب وزنی ۱ تا ۵ ضرب می شود که وزن های عددی توسط آلر و همکاران ارائه شده است (آلر، ۱۳۶۳). سپس آسیب پذیری

1- Inverse Distance Weighted

آب‌های زیرزمینی در برابر آلودگی با استفاده از مقدار شاخص DRASTIC ارزیابی می‌شود که باتوجه به وزن و رتبه اختصاص یافته به هر پارامتر به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$DI = DrDw + RrRw + ArAw + SrSw + TrTw + IrIw + CrCw \quad (1)$$

در رابطه فوق DI نشان‌دهنده شاخص آسیب‌پذیری نهایی، D، R، A، S، T، I و C نشان‌دهنده هفت پارامتر مؤثر در ارزیابی آسیب‌پذیری به روش DRASTIC و اندیس‌های r و w به ترتیب نشان‌دهنده رتبه و وزن اختصاص یافته به هر پارامتر هستند. نتیجه یک نقشه جغرافیایی است که بیانگر مناطق حساس به آلودگی آب‌های زیرزمینی است.

### منطق فازی (FL)

ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان با استفاده از روش DRASTIC باتوجه به داده‌های مختلف استفاده شده در این روش و تعیین وزن بر اساس نظر متخصص می‌تواند با عدم قطعیت همراه باشد. رویکرد منطق فازی به دلیل قابلیت آن در در نظر گرفتن عدم قطعیت، روش مناسبی برای رسیدگی به مشکلات پیچیده و مبهم و بهبود ادغام متغیرهای متعدد برای برآورد آسیب‌پذیری به نظر می‌رسد. در منطق فازی هر بیان و عبارتی را می‌توان به صورت فازی بیان نمود و درستی هر عبارتی نیز از درجه اهمیت ویژه‌ای برخوردار است که روش فازی بر مبنای به کارگیری همین عبارات زبانی است. منطق فازی داده‌های ورودی را با استفاده از تئوری مجموعه‌های فازی به خروجی تبدیل می‌کند (زاده، ۱۳۴۳: ۳۰). این مجموعه‌ها امکان عضویت جزئی از ۰ تا ۱ را فراهم می‌کنند و برای غلبه بر ابهام ذاتی، با توابع عضویت با مرزهای مبهم و انتقال پیش‌رونده بین مجموعه‌های تعریف شده نشان داده می‌شوند (گوتیرز-استرادا و همکاران<sup>۱</sup>، ۱۳۸۲: ۱۸۳). در نتیجه، منطق فازی به خوبی برای تخمین عوامل محیطی، هیدروژنولوژیکی و هیدرولوژیکی (به عنوان مثال، آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی) در معرض عدم قطعیت و ابهام سازگار است. از آنجایی که کشاورزی یکی از فعالیت‌های قابل توجه در هر دو دشت است و استفاده از کودهای نیتراة و سموم کشاورزی احتمال افزایش غلظت نیترات در آب‌های زیرزمینی را افزایش می‌دهد، در این مطالعه از غلظت نیترات برای تخمین آسیب‌پذیری ویژه آبخوان‌ها استفاده شد. همچنین در صورت موجود بودن داده‌ها می‌توان از پارامترهای کیفی دیگر به عنوان خروجی (پیش بینی شونده) استفاده کرد. ساختار کلی یک قانون اگر-آنگاه روش فازی ممدانی (ممدانی<sup>۲</sup>، ۱۳۵۵: ۱۱۸۲) برای تخمین غلظت نیترات به شرح زیر است:

Rule i: If (D belongs to  $MF_D^i$ ) and (R belongs to  $MF_R^i$ ) and (A belongs to  $MF_A^i$ ) and (S belongs to  $MF_S^i$ ) and (T belongs to  $MF_T^i$ ) and (I belongs to  $MF_I^i$ ) and (C belongs to  $MF_C^i$ ) then ( $NO_3$  belongs to  $MF_{NO_3}^i$ ).

که در آن  $NO_3$  خروجی قانون  $i$  هست،  $MF_D^i$  تابع عضویت پارامتر D،  $MF_R^i$  تابع عضویت پارامتر R،  $MF_A^i$  تابع عضویت پارامتر A،  $MF_S^i$  تابع عضویت پارامتر S،  $MF_T^i$  تابع عضویت پارامتر T،  $MF_I^i$  تابع عضویت پارامتر I،  $MF_C^i$  تابع عضویت پارامتر C و  $MF_{NO_3}^i$  تابع عضویت پارامتر خروجی یعنی غلظت نیترات می‌باشند.

### شرح مفهوم اعداد Z

همان‌طور که عنوان شد نظریه اعداد Z اولین بار توسط زاده در سال ۱۳۸۹ مطرح گردید (زاده، ۱۳۸۹: ۲۹۲۳). او از این نظریه برای ایجاد اطلاعاتی خلاصه به منظور تصمیم‌گیری در فعالیت‌های روزمره بهره جست و مثال‌های ساده‌ای را ارائه کرد. به طور معمول، اجزای یک عدد Z به زبان طبیعی توصیف می‌شود و عدد Z یک زوج مرتب از اعداد فازی A و B است که به صورت  $Z=(A, B)$  بیان می‌شود. A (بخش محدودیت) یک تخمین تقریبی از مقدار X و B (بخش قابلیت اطمینان) یک تخمین تقریبی از قابلیت اطمینان A است. کمی‌سازی

این متغیرهای زبانی هدف اصلی در اعداد Z است که تحقق این هدف با به کارگیری سه روش امکان پذیر است که عبارتند از: تبدیل اعداد Z به اعداد متداول فازی (کانگ و همکاران، ۱۳۹۰)، جمع جداگانه قسمت A و B اعداد Z (گلوخود و سمتانین، ۲، ۱۳۹۴: ۷)، تبدیل اعداد Z به اعداد  $Z^+$ ، جمع اعداد  $Z^+$  و تبدیل آن ها به یک عدد Z (علیف، ۱۳۹۳ و ۱۳۹۴: ۱۵۸۹). از نظر سادگی محاسبات، روش اول و دوم از ساده ترین روش ها هستند؛ اما مقداری از اطلاعات در این روش ها از بین می رود و برای تمام اعداد فازی قابل اجرا نیستند. روش سوم از نظر محاسبات روش پیچیده ای است؛ اما از بین رفتن اطلاعات در این روش بسیار کم است. در نتیجه یکی از اهداف اصلی این پژوهش توسعه کدی در نرم افزار MATLAB برای مدل سازی آسیب پذیری ویژه آبخوان ها و پیش بینی غلظت نیترات با استفاده از روش سوم است.

### ارزش گذاری استدلالات مبتنی بر قوانین "اگر - آنگاه" اعداد Z

مسئله درون یابی قوانین Z توسط زاده به عنوان یک مسئله چالش برانگیز مطرح شد (تاکاگی، ۳، ۱۳۷۱: ۱۱۶). این مسئله تعمیم درون یابی قوانین فازی است (کوچی، ۴، ۱۳۶۹: ۱۱۵). یک مسئله درون یابی اعداد Z در ادامه آورده شده است. با در نظر گرفتن قوانین زیر:

If  $X_1$  is  $Z_{X1,1} = (A_{X1,1}, B_{X1,1})$  and ... and  $X_m$  is  $Z_{Xm,1} = (A_{Xm,1}, B_{Xm,1})$ , then Y is  $Z_Y = (A_{Y,1}, B_{Y,1})$ .

If  $X_1$  is  $Z_{X1,2} = (A_{X1,2}, B_{X1,2})$  and ... and  $X_m$  is  $Z_{Xm,2} = (A_{Xm,2}, B_{Xm,2})$ , then Y is  $Z_Y = (A_{Y,2}, B_{Y,2})$ .

.

If  $X_n$  is  $Z_{X1,n} = (A_{X1,n}, B_{X1,n})$  and ... and  $X_m$  is  $Z_{Xm,n} = (A_{Xm,n}, B_{Xm,n})$ , then Y is  $Z_Y = (A_{Y,n}, B_{Y,n})$ .

و همین طور مشاهده فعلی (ورودی):

$X_1$  is  $Z'_{X1} = (A'_{X1}, B'_{X1})$  and ... and  $X_m$  is  $Z'_{Xm} = (A'_{Xm}, B'_{Xm})$

هدف پیدا کردن ارزش Y ها برای محاسبه خروجی مشاهده فعلی است، (m) تعداد اعداد Z هر قانون و n تعداد قوانین است؛ بنابراین خروجی  $Z'_y$  بصورت زیر خواهد بود (کوچی، ۱۳۶۹: ۱۱۵):

$$Z'_y = \sum_{j=1}^{nn} w'_j \cdot Z_{Y,j} = \sum_{j=1}^{nn} w'_j (A_{Y,j}, B_{Y,j}) \quad (2)$$

به طوریکه:

$$w'_j = (w_j) / \left( \sum_{j=1}^{nn} w_j \right) \quad (3)$$

که nn تعداد قوانین انتخاب شده است (قوانین با وزن بالا). همچنین:

$$w_j = (1/\rho_j) / \left( \sum_{j=1}^n 1/\rho_j \right), j = 1, \dots, n \quad (4)$$

$$\rho_j = \sum_{i=1}^m D(Z'_{Xi}, Z_{Xi,j}) \quad (5)$$

$$D(Z_1, Z_2) = d(A_1, A_2) + d(B_1, B_2), \quad (6)$$

که در آن:

$$d(A_1, A_2) = \sup\{d_H(A_1^\alpha, A_2^\alpha) \mid 0 < \alpha \leq 1\} \quad (7)$$

که در آن،  $d_H$  نشان دهنده فاصله هاسدورف فازی است.

$$d_H(A_1 \cdot A_2) = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} \alpha d_H^\alpha(A_1 \cdot A_2) \quad (8)$$

که در آن،  $U$  نشان دهنده اتحاد مجموعه‌های کلاسیک است.

که  $Z_{jz}$  عدد  $Z$  مربوط به خروجی قانون  $j$  می‌باشد،  $W_j$  به ازای  $j=1, \dots, n$  ضرایب درون یابی خطی می‌باشد و  $n$  تعداد قوانین می‌باشد.  $D$  فاصله بین  $i$ -امین بخش قانون  $j$ -ام و  $i$ -امین بخش ورودی می‌باشد. بنابراین  $\rho$  فاصله بین بردار ورودی و بردار های پیشین قانون  $j$ -ام را محاسبه می‌کند. قوانین باتوجه به روابط (۲-۸) وزن دار می‌شوند و فقط قوانین با وزن بالا (با تعریف یک حد آستانه دینامیک، مثلاً وزن هیچ قانونی انتخاب شده ای کمتر از  $0.9$  بیشترین وزن نباشد) به رابطه (۲) اعمال می‌شوند. قابل ذکر است که باتوجه به اصل سوپرپوزیشن ( $w'_1 + w'_2 + \dots + w'_n = 1$ ) قوانین انتخاب شده دوباره بر اساس رابطه (۳) وزن دار می‌شوند. اگرچه یک قانون با وزن کم تأثیر منفی کمی بر خروجی دارد، اما ترکیب هم‌زمان چندین قانون کم وزن می‌تواند تأثیرات منفی قابل توجهی بر خروجی داشته باشد. به همین دلیل و به منظور کاهش هزینه محاسباتی، در روش اتخاذ شده در این پژوهش، تنها قوانین با وزن بالا (قوانینی که کمتر از  $0.8$  یا  $0.9$  وزن حداکثر نباشند، باتوجه به رخداد مورد پیش بینی) انتخاب شده‌اند.

#### مدل پیشنهادی

از آنجایی که ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان‌ها به‌عنوان یک فرایند آبی-اقلیمی شامل عدم قطعیت است، توسعه مدلی برای کنترل و غلبه بر چنین عدم قطعیتی برای مدیریت منابع آب زیرزمینی امری حیاتی است. مدل مبتنی بر اعداد  $Z$  به‌عنوان نسل جدیدی از منطق فازی مرسوم، می‌تواند با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان داده‌ها بر این عدم قطعیت غلبه کند. مدل پیشنهادی در این مطالعه برای ارزیابی و تخمین آسیب‌پذیری ویژه آبخوان‌های دشت‌های اردبیل و قروه-دهگلان با استفاده از پارامترهای DRASTIC و غلظت نترات گسترش یافت. این مطالعه باهدف مقایسه نتایج مدل‌های DRASTIC، فازی مرسوم، و مبتنی بر اعداد  $Z$  انجام شد.

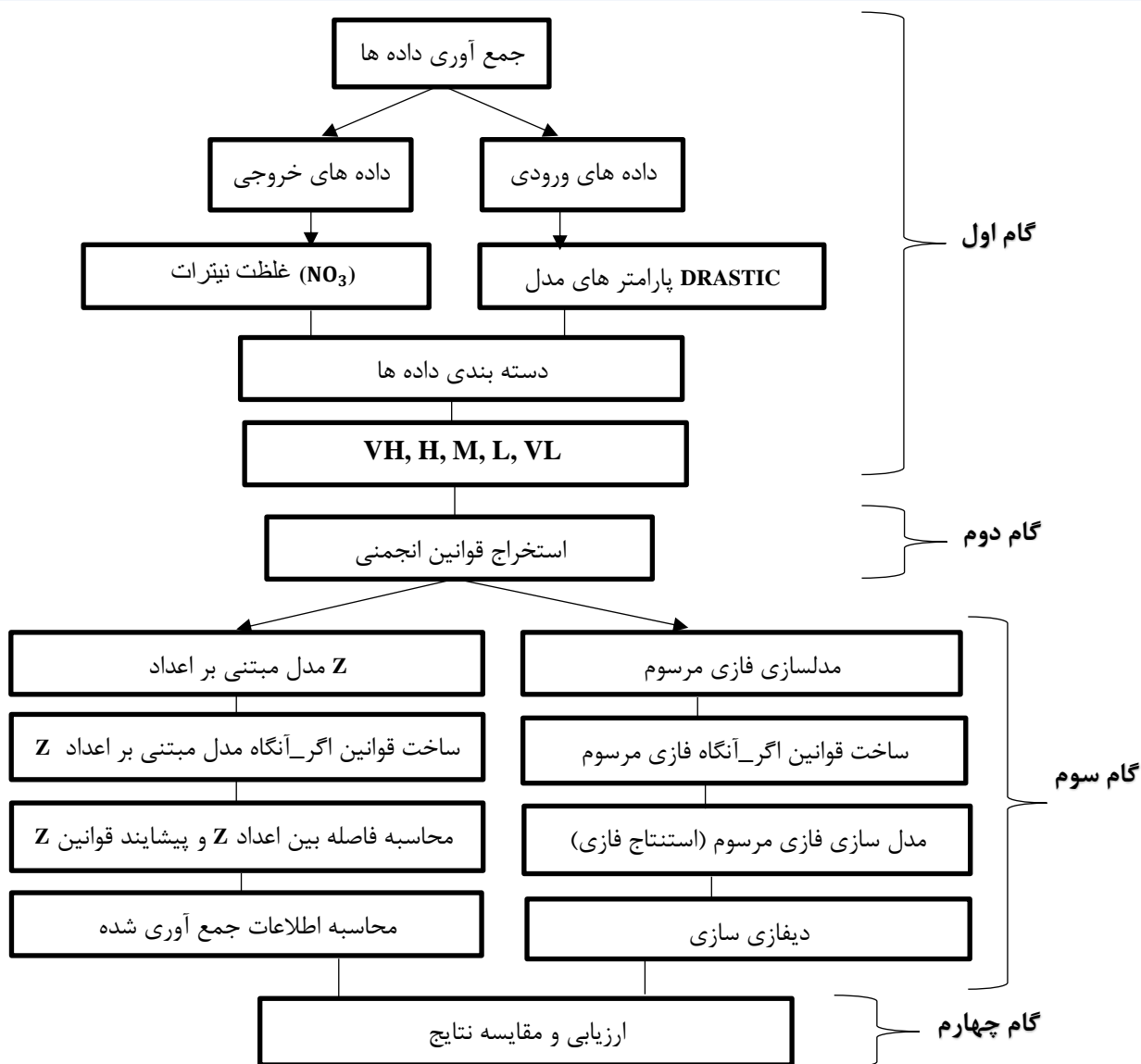
روش پیشنهادی در این مطالعه، همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده است، شامل چهار گام (یعنی آماده‌سازی داده‌ها، استخراج قوانین ارتباط، مدل‌سازی فازی مرسوم و مدل مبتنی بر اعداد  $Z$ ، و سپس تجزیه و تحلیل و مقایسه نتایج) است. در این تحقیق از دو نوع داده کمی و کیفی استفاده شده است. در گام اول، داده‌های کمی بر اساس میانگین و انحراف معیار به پنج کلاس بسیار کم (VL)، کم (L)، متوسط (M)، زیاد (H) و خیلی زیاد (VH) تقسیم شدند (با استفاده از رابطه  $\mu \pm i\sigma$  که به ترتیب نشان دهنده میانگین و انحراف معیار داده‌ها هستند) (نورانی و همکاران، ۱۳۹۹: ۱۲۶۱۹۸). مقادیر مختلف  $i$  ارزیابی شدند (به‌عنوان مثال، به مهر و همکاران، ۱۳۹۵: ۳۹۷؛ نورانی و همکاران، ۱۳۹۹: ۱۲۶۱۹۸ و نجفی و همکاران، ۱۴۰۰: ۱ مراجعه کنید)، به‌عنوان مثال،  $i = -0.5, 0, 0.5, 1, 1.5$  (پنج کلاس) و  $i = -1.5, -1, -0.5, 0, 0.5, 1, 1.5$  (هفت کلاس) و  $i = -0.5, 0, 0.5, 1, 1.5$  (پنج کلاس). برای دسته‌بندی داده‌ها از نظر کارشناس (و همچنین روش آزمون و خطا) استفاده شد. در این مطالعه، بهبود قابل توجهی در کیفیت قوانین تولید شده توسط آستانه  $i = -1, -0.5, 0, 0.5, 1$  مشاهده شد. تعداد داده‌های ورودی و خروجی طبقه‌بندی شده می‌تواند کمتر یا بیشتر باشد. برخی از داده‌ها ذاتاً کیفی هستند (مانند مواد تشکیل‌دهنده آبخوان، خاک و ناحیه غیراشباع) و بر اساس نظر کارشناس طبقه‌بندی شدند. هدف از این دسته‌بندی ایجاد بهترین قوانین ممکن بود. فرایند مدل‌سازی فازی (همچنین مدل مبتنی بر اعداد  $Z$ ) بر قوانین اگر-آنگاه متکی است. یافتن الگوها در داده‌های متنوع پیچیده است. الگوهای غالب در میان مجموعه داده‌های بزرگ را می‌توان با استفاده از ابزار داده‌کاوی (قوانین انجمنی) کشف کرد (نورانی و همکاران، ۱۳۹۹: ۱۲۶۱۹۸). بنابراین در گام دوم از ابزارهای داده‌کاوی برای کشف الگوهای بین داده‌های ورودی و خروجی برای ایجاد قوانین اگر-آنگاه استفاده شد. قوانین مناسب (بر اساس معیارهای پشتیبان و اطمینان) تنها در صورتی ممکن است

ایجاد شوند که طبقه‌بندی در مرحله اول صحیح باشد. قاعده تداعی،  $A \rightarrow B$  نشان می‌دهد که B به‌عنوان یک نتیجه، هر زمان که A به‌عنوان مقدم رخ می‌دهد، با یک احتمال خاص اتفاق می‌افتد. صحت چنین قاعده‌ای را می‌توان با استفاده از معیارهای پشتیبان و اطمینان ارزیابی کرد. معیار پشتیبان نسبت وقوع هم‌زمان A و B را به کل رخدادها نشان می‌دهد (رابطه ۹). معیار اطمینان (رابطه ۱۰) نسبت وقوع هم‌زمان A و B را به تمام رخدادها نشان می‌دهد (هان و همکاران، ۱۳۸۹):

$$\text{Support}(A \rightarrow B) = P(A \cup B) \quad (9)$$

$$\text{Confidence}(A \rightarrow B) = P(A | B) = \frac{\text{support}(A \cup B)}{\text{Support}(A)} \quad (10)$$

در گام سوم، مدل مبتنی بر اعداد Z و فازی مرسوم با استفاده از الگوها و قوانین استخراج شده در گام دوم پیاده‌سازی شدند. علاوه بر این، درجه قابلیت اطمینان عدد Z با در نظر گرفتن معیار اطمینان قوانین ارتباط و فراوانی وقوع دسته‌های ورودی و خروجی (VH، H و غیره) مشخص شد. سپس از روش فاصله اعداد Z برای سنجش قوانین استفاده شد و بهترین قوانین انتخاب و ترکیب شدند. در نهایت، نتایج هر دو رویکرد فازی مرسوم و مدل مبتنی بر اعداد Z با استفاده از معیارهای ارزیابی برای هر دو دشت مورد بررسی قرار گرفتند.



شکل (۲): شکل شماتیک فرایند مدل سازی با روش پیشنهادی.

Figure (2): The Schematic of the proposed method.

### ارزیابی دقت مدل ها

خروجی پیش بینی نقطه ای (نتایج عددی یا اعداد واضح) را می توان با استفاده از معیارهای ارزیابی سنتی مانند ضریب تعیین (DC) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) ارزیابی کرد. با این حال، نمی توان از این معیارها برای ارزیابی عملکرد طبقه بندی استفاده کرد (شرقی و همکاران، ۱۳۹۹: ۲۰۱). در این مطالعه، پنج کلاس خروجی (VH, H, M, L, VL) قابل دستیابی هستند، بنابراین برای ارزیابی دقت و کارایی مدل ها از معیارهای ارزیابی TA و HSS برای ارزیابی خروجی ها استفاده شد.

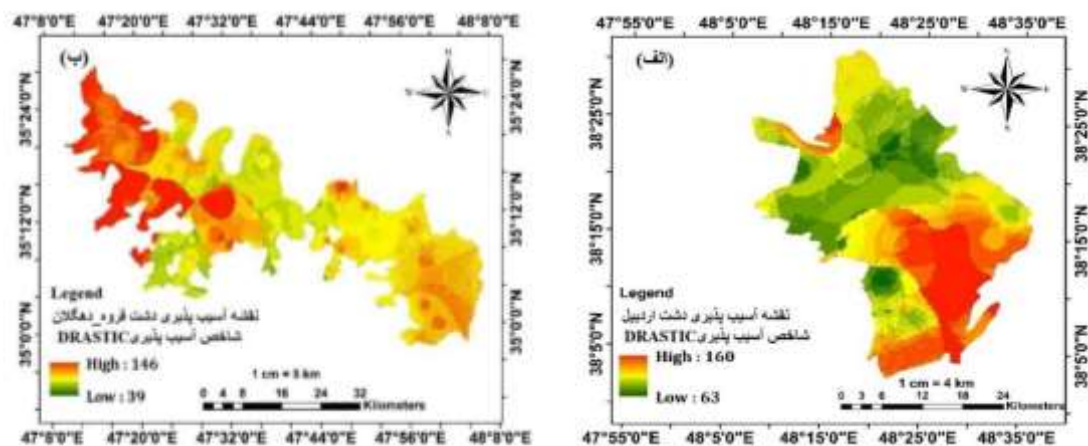
1- Determination Coefficient

2- Root Mean Squared Error

## بحث

در مطالعه حاضر آسیب‌پذیری آبخوان‌های دشت اردبیل و قروه-دهگلان ابتدا با استفاده از مدل DRASTIC در GIS مورد ارزیابی قرار گرفت. سپس روش پیشنهادی برای ارزیابی آسیب‌پذیری ویژه آبخوان‌ها و تخمین غلظت نیترات با استفاده از روش فازی مرسوم و روش جدید مدل مبتنی بر اعداد Z توسعه یافت. در نهایت، عملکرد روش پیشنهادی مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج آن با نتایج مدل DRASTIC به‌عنوان مدل معیار مقایسه شد.

برای تهیه نقشه‌های آسیب‌پذیری بر اساس مدل DRASTIC، داده‌های مورد نیاز به فرمت قابل‌قبولی برای GIS تبدیل شدند. پس از تهیه نقشه‌های هر هفت پارامتر موردنیاز در این مدل، نقشه‌ها رتبه‌بندی و وزن‌دهی شدند. در نهایت، نقشه‌های آسیب‌پذیری آبخوان‌ها با همپوشانی هفت‌لایه در GIS بر اساس رابطه (۱) ایجاد شدند و شاخص آسیب‌پذیری برای هر سلول (پیکسل)  $30 \times 30$  (متر) تعیین شد. شاخص آسیب‌پذیری DRASTIC برای دشت اردبیل بین ۶۳ تا ۱۶۰ و برای قروه-دهگلان بین ۳۹ تا ۱۴۶ به دست آمد. با توجه به شکل (۳. الف)، اکثر نقاط دشت اردبیل دارای ریسک آلودگی کم هستند. بر اساس نقشه آسیب‌پذیری قروه-دهگلان (شکل ۳. ب)، ریسک آلودگی در بخش‌های غربی دشت بیشتر است و بیشتر مناطق دشت دارای ریسک آلودگی کم تری هستند.



شکل (۳): نقشه آسیب‌پذیری روش DRASTIC: (الف) دشت اردبیل، (ب) دشت قروه-دهگلان.

Figure (3): Vulnerability map using the DRASTIC model: (a) The Ardabil plain, (b) The QDP.

همان‌طور که قبلاً هم اشاره شد، مدل پیشنهادی در این مطالعه از طریق دو سناریو مختلف توسعه داده شد. در سناریو اول هر هفت پارامتر مدل دراستیک به‌عنوان ورودی در نظر گرفته شدند؛ اما در حالت دوم فقط چهار پارامتر به‌عنوان ورودی مدل در نظر گرفته شدند. خروجی مدل در هر دو سناریو غلظت نیترات بود که نشانگر آلودگی واقعی در دشت است. چهار پارامتر از هفت پارامتر DRASTIC مورد استفاده در سناریوی دوم با در نظر گرفتن مشخصات فیزیکی پارامترها به شرح زیر انتخاب شدند:

یک فرض اساسی در مدل DRASTIC این است که بارش باعث ورود آلاینده‌ها به سیستم آب زیرزمینی می‌شود. علاوه بر این فرض، برای تخمین میزان تغذیه آبخوان می‌توان از روش پیسکوپو (پیسکوپو، ۱۳۷۹) استفاده کرد که در این مطالعه استفاده شده است (به رابطه ۱۱ مراجعه کنید). این روش بر اساس سه پارامتر بارش، نفوذپذیری خاک و شیب زمین است؛ بنابراین، بارش نقش اساسی در نفوذ و انتشار آلاینده در سیستم آب زیرزمینی دارد. و شاخص از آنجایی که پارامتر تغذیه و هدایت هیدرولیکی تقریباً دارای خصوصیت یکسان هستند و هر دو تعیین‌کننده مقدار ورود و نفوذ آب و آلاینده به یک سفره آب زیرزمینی هستند و هم چنین دسترسی به داده‌های هدایت هیدرولیکی معمولاً مشکل است، این مطالعه استفاده از شاخص تغذیه را به‌عنوان نماینده این دو پارامتر در نظر گرفت.

$$\text{نفوذ پذیری خاک} + (\text{سال/میلیمتر}) \text{ بارش} + (\%) \text{ شیب} = \text{میزان تغذیه خالص} \quad (11)$$

خاک هم مورد استفاده قرار گیرد. مدل DRASTIC برای تعیین بافت آبخوان (بافت محیط اشباع و غیر اشباع) از لاگ‌های حفاری و لوله‌گذاری استفاده می‌کند. این دو قسمت آبخوان معمولاً ترکیبی از خاک‌های ریزدانه و درشت‌دانه است. باتوجه به اینکه ظرفیت پخش آلاینده متناسب با میزان تحرک آب زیرزمینی در بستر آبخوان و محیط اشباع آبخوان است و هم چنین بافت این دو ناحیه در این مطالعه تقریباً یکسان بود، پارامتر محیط آبخوان در سناریوی دوم مدل پیشنهادی استفاده شد؛ بنابراین، بر اساس توضیحات فوق، پارامترهای ورودی برای سناریوی دوم مدل پیشنهادی (باتوجه به داده‌ها و شرایط زمین‌شناسی دشت‌ها)، عمق تا سطح ایستابی آب زیرزمینی، تغذیه خالص، مواد تشکیل‌دهنده محیط آبخوان و شیب بود. به‌طور کلی، از آنجایی که در دسترس بودن همه داده‌ها ممکن است در هر منطقه مورد مطالعه متفاوت باشد، هدف از کاهش تعداد داده‌ها، ارزیابی آسیب‌پذیری منابع آب زیرزمینی حتی در غیاب برخی داده‌ها بود.

روش‌های منطق فازی، از جمله مدل توسعه داده شده مبتنی بر اعداد Z، نیازمند تعریف متغیرهای زبانی و ساخت قوانین اگر-آنگاه است. الگوی مورد نیاز برای ایجاد قوانین اگر-آنگاه توسط قوانین انجمنی استخراج شد. برای استخراج قوانین انجمنی، ابتدا باید داده‌ها در چندین کلاس کیفی طبقه‌بندی شوند. به این ترتیب داده‌های کمی (هم ورودی و هم خروجی) هر دشت بر اساس رابطه  $\mu \pm 1\sigma$  در مجموعه‌های بازه‌ای و دامنه‌های زبانی (مانند VL، VH و ...) بر اساس میانگین و انحراف معیار آنها طبقه‌بندی شدند. داده‌های کیفی (محیط آبخوان، خاک و غیر اشباع) هم بر اساس نظر کارشناس دسته‌بندی شدند. دسته‌بندی داده‌های دشت اردبیل و قروه-دهگلان به ترتیب در جدول‌های (۲ و ۳) آورده شده است. در حالی که میزان قابلیت اطمینان به هفت محدوده خیلی خیلی زیاد (EH)، خیلی زیاد (VH)، زیاد (H)، متوسط زیاد (HM)، متوسط کم (LM)، کم (L) و خیلی کم (VL) تقسیم‌بندی شدند. قابل ذکر است که روش قوانین انجمنی متغیرهای زبانی ذکر شده را به‌عنوان یک بازه در نظر می‌گیرد، اما برای مدل‌سازی مبتنی بر منطق فازی و همچنین مدل مبتنی بر اعداد Z، این بازه‌ها باید به مجموعه‌های فازی تبدیل شوند. برای این منظور بعد از تعیین بازه‌های مربوط به داده‌ها، تابع عضویت ذوزنقه برای اعداد فازی حداقل و حداکثر در نظر گرفته شد و تابع عضویت مثلثی برای سایر اعداد فازی در نظر گرفته شد. دفترچه کد حاوی اصطلاحات زبانی پیشامدها، پیامدها و درجه‌های قابلیت اطمینان به ترتیب برای دشت‌های اردبیل و قروه-دهگلان در شکل‌های (۴ و ۵) آمده است.

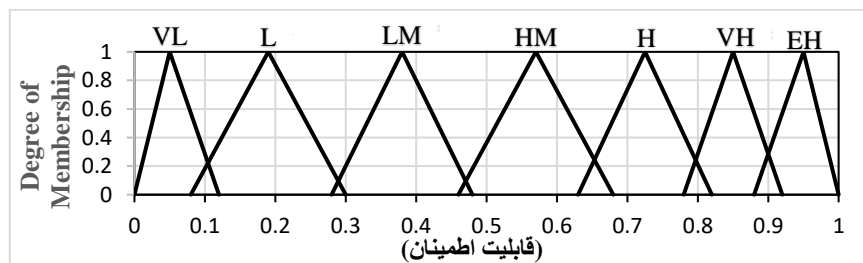
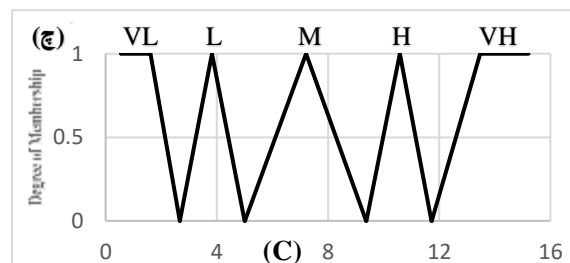
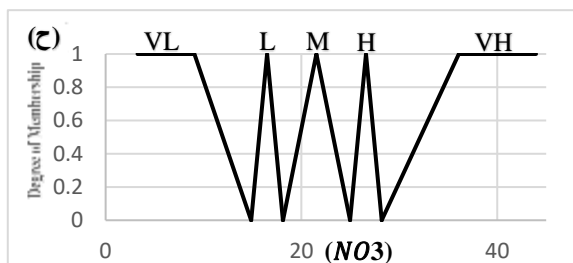
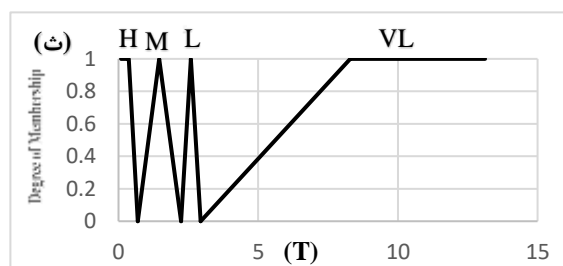
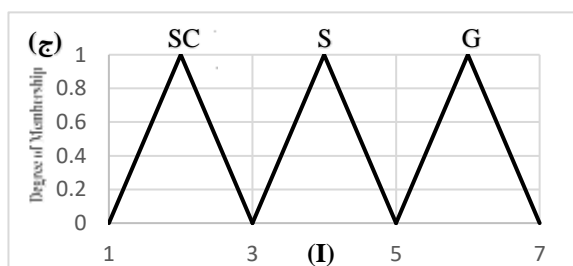
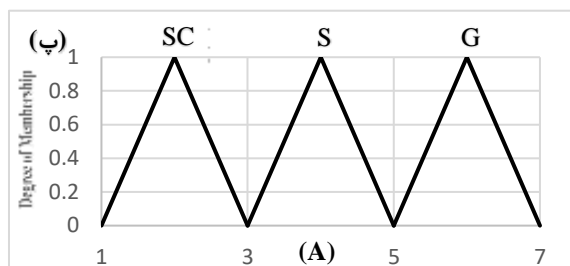
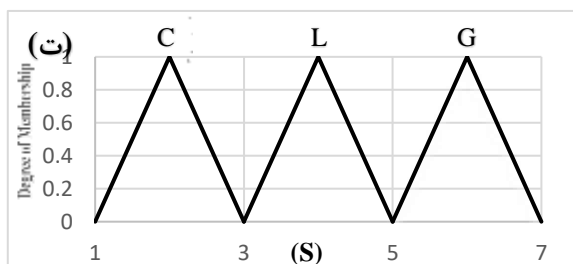
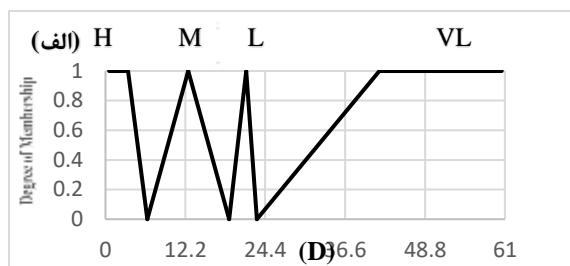
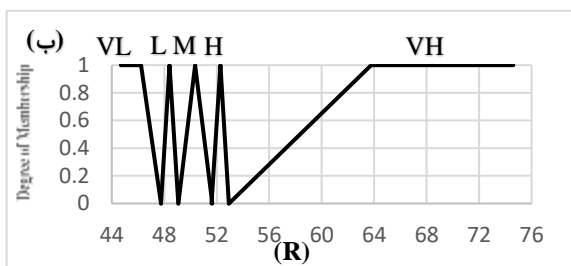
جدول (۲): طبقه‌بندی داده‌های دشت اردبیل.

Table (2): Data classification of the Ardabil plain.

داده های کمی					
VH	H	M	L	VL	
-	[۰/۵۶ ۶/۳۹]	[۶/۴۰ ۱۹/۸۹]	[۱۹/۹ ۲۳/۱۲]	[۲۳/۱۳ ۶۰/۵۲]	عمق تا سطح ایستابی (D)
[۵۲/۹۳ ۷۴/۶۰]	[۵۱/۶۷ ۵۲/۹۲]	[۴۹/۰۸ ۵۱/۶۶]	[۴۷/۷۶ ۴۹/۰۷]	[۴۴/۶۹ ۴۷/۷۵]	تغذیه (R)
-	[۰/۰۶۳ ۰/۶۹]	[۰/۷ ۲/۲۴]	[۲/۲۵ ۲/۹۴]	[۲/۹۵ ۱۳/۱۲]	شیب (T)
[۱۱/۷۳ ۱۵/۲۱]	[۹/۳۸ ۱۱/۷۲]	[۵/۰۶ ۹/۳۷]	[۲/۶۸ ۵]	[۰/۵۵ ۲/۶۷]	هدایت هیدرولیکی (C)
[۲۸/۲۱ ۴۳/۹۶]	[۲۴/۹۸ ۲۸/۲۰]	[۱۸/۱۲ ۲۴/۹۷]	[۱۴/۸۷ ۱۸/۱۱]	[۳/۲۶ ۱۴/۸۶]	غلظت نیترات
داده های کیفی					
G		S		SC	
[۵ ۷]		[۳ ۵]		[۱ ۳]	محیط آبخوان (A)
G		L		C	
[۵ ۷]		[۳ ۵]		[۱ ۳]	محیط خاک (S)
G		S		SC	
[۵ ۷]		[۳ ۵]		[۱ ۳]	محیط غیر اشباع (I)

\*G (Gravel), SIG (Silt/Gravel), SI (Silt), CL (Clay Loam), C (Clay), SL (Sandy Loam), L (Loam), SC (Silty Clay), S (Sand)





شکل (۴): دفترچه کد حاوی اصطلاحات زبانی مقادیر ورودی‌ها، قابلیت اطمینان و خروجی دشت اردبیل: الف) عمق تا سطح ایستابی، ب) تغذیه خالص، پ) محیط آبخوان، ت) محیط خاک، ث) شب، ج) محیط غیراشباع، چ) هدایت هیدرولیکی، ح) غلظت نیترات.

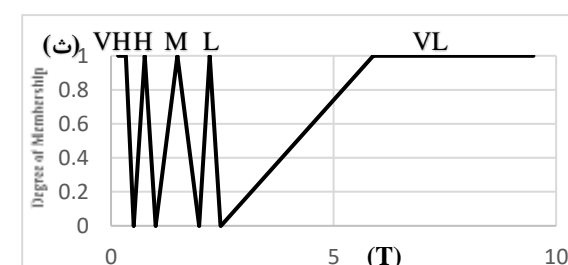
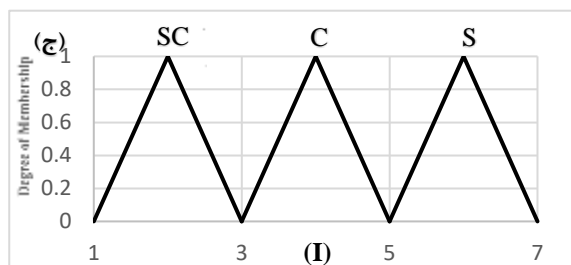
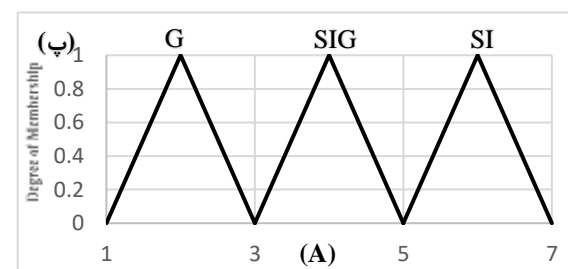
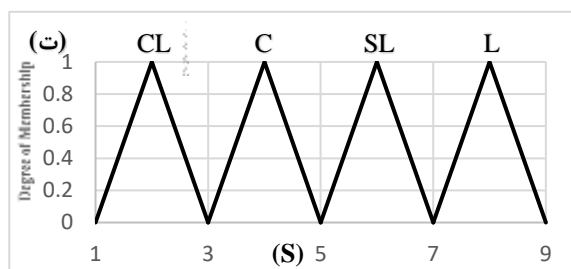
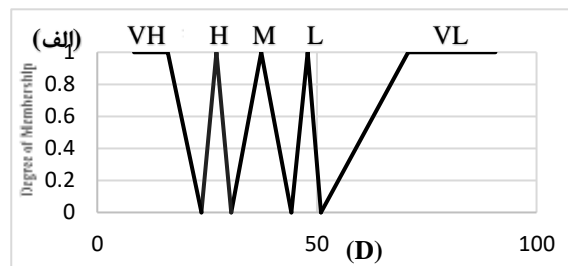
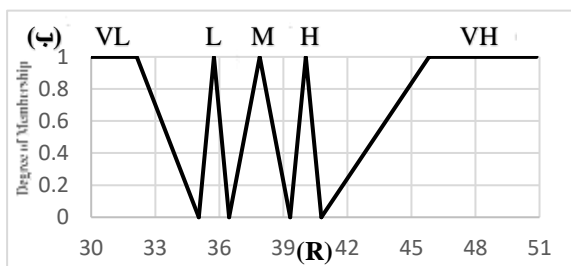
Figure (4): The codebook includes linguistic terms related to the values of the input, output, and degree of reliability in the Ardabil media, (d) Soil media, (e) Topography, (f) Impact of the vadose zone, (g) plain: (a) Depth to water level, (b) Recharge, (c) Aquifer Hydraulic conductivity and (h) NO3 concentration.

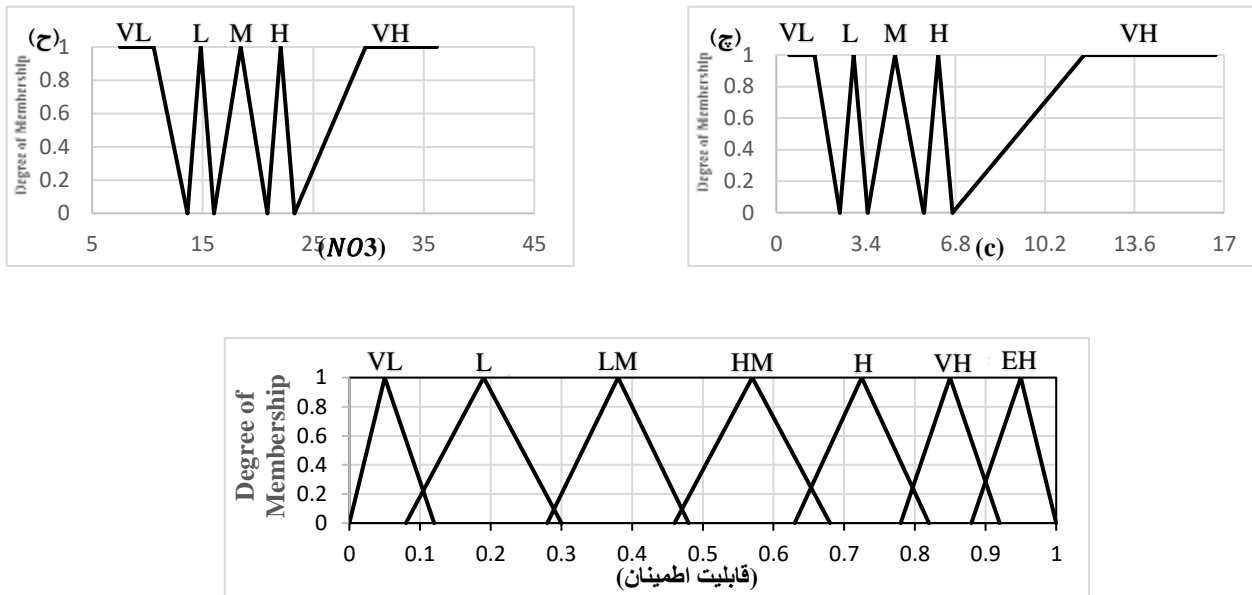
جدول (۳): طبقه‌بندی داده‌های دشت قروه\_دهگلان.

Table (3): Data classification of the QDP.

داده های کمی					
VH	H	M	L	VL	
[۸/۳۷ ۲۳/۷۲]	[۲۳/۷۳ ۳۰/۵۰]	[۳۰/۵۱ ۴۴/۱۸]	[۴۴/۱۹ ۵۰/۹۲]	[۵۰/۹۳ ۹۰/۶۴]	عمق تا سطح ایستابی (D)
[۴۰/۷۹ ۵۰/۱۸۶]	[۳۹/۳۳ ۴۰/۷۸]	[۳۶/۴۷ ۳۹/۳۲]	[۳۵/۰۴ ۳۶/۴۶]	[۲۹/۲۴ ۳۵/۰۴]	تغذیه (R)
[۰/۱۶ ۰/۵۱]	[۰/۵۲ ۱/۰۰۳]	[۱/۰۰۷ ۱/۹۸]	[۱/۹۹ ۲/۴۶]	[۲/۴۷ ۹/۴۹]	شیب (T)
[۶/۷۰ ۱۶/۶۸]	[۵/۶۱ ۶/۶۹]	[۳/۴۸ ۵/۵۹]	[۲/۴۲ ۳/۴۷]	[۰/۴۹ ۲/۴۱]	هدایت هیدرولیکی (C)
[۲۳/۳۱ ۳۶/۱۹]	[۲۰/۸۶ ۲۳/۳۰]	[۱۶/۰۳ ۲۰/۸۵]	[۱۳/۶۳ ۱۶/۰۲]	[۷/۵۲ ۱۳/۶۲]	غلظت نیترات
داده های کیفی					
SI		SIG		G	
[۵ ۷]		[۳ ۵]		[۱ ۳]	محیط آبخوان (A)
SL		C		CL	
[۵ ۷]		[۳ ۵]		[۱ ۳]	محیط خاک (S)
S		C		SC	
[۵ ۷]		[۳ ۵]		[۱ ۳]	محیط غیراشباع (I)

\* G (Gravel), SIG (Silt/Gravel), SI (Silt), CL (Clay Loam), C (Clay), SL (Sandy Loam), L (Loam), SC (Silty Clay), S (Sand)





شکل (۵). دفترچه کد حاوی اصطلاحات زبانی مقادیر ورودی‌ها، قابلیت اطمینان و خروجی دشت قروه-دهگلان: الف) عمق تا سطح ایستابی، ب) تغذیه خالص، پ) محیط آبخوان، ت) محیط خاک، ث) شیب، ج) محیط غیراشباع، چ) هدایت هیدرولیکی، ح) غلظت نیترات.

Figure (5): The codebook includes linguistic terms related to the values of the input, output, and degree of reliability in the QDP: (a) media, (d) Soil media, (e) Topography, (f) Impact of the vadose zone, (g) Hydraulic Depth to water level, (b) Recharge, (c) Aquifer conductivity and (h) NO3 concentration.

هر مدل فازی با استفاده از قوانین اگر \_ آنگاه ساخته می‌شود و این قوانین با بررسی الگوهای بین پارامترهای ورودی و خروجی ایجاد می‌شود. الگوها و قوانین در داده‌هایی با تنوع بالا به‌سختی یافت می‌شود؛ بنابراین، در این مطالعه با استفاده از ابزارهای داده‌کاوی (قوانین انجمنی) استخراج شدند (میزان قابلیت اطمینان قوانین انجمن نیز باید با استفاده از معیارهای پشتیبان و اطمینان ارزیابی شود). لیست قوانین زمانی کامل است که همه سناریوهای احتمالی در نظر گرفته شود و حداقل یک قانون وجود داشته باشد که قسمت پیشامد آن تا حدی در ارزش‌گذاری مشاهده فعلی مشارکت داشته باشد. به‌طور کلی، در روش‌های منطقی فازی متداول، برای  $n$  ورودی و  $m$  دسته برای هر کدام، تعداد قوانین می‌تواند  $m^n$  باشد (برای مدل‌سازی فعلی تا  $5^7 = 78000$ ). با این حال، در این مطالعه، برای پیش‌بینی آسیب‌پذیری ویژه در آبخوان‌ها، لیست قوانین مختلفی شامل حدود ۲۶۰ و ۴۱۱ قانون (قوانین با اطمینان بیش از ۰/۵ از قوانین استخراج شده برای هر دو دشت انتخاب شدند) به ترتیب برای دشت‌های اردبیل و قروه-دهگلان استخراج شده و ارزیابی شدند. در صورت فقدان قانون کاملاً منطبق با رخداد فعلی، روش‌های استدلال کلاسیک مبتنی بر قاعده ترکیبی روش استدلال استنباطی (تاکاگی، ۱۳۶۳؛ ممدانی، ۱۳۵۵: ۱۱۸۲؛ زاده، ۱۳۵۱: ۲۸) به اندازه کافی کارآمد نیستند تا خروجی دقیقی برای رخدادی ایجاد کنند که تحت هیچ قانون از پیش تعریف شده‌ای نیست (علیف و همکاران، ۱۳۹۳). بنابراین در این پژوهش، تکنیک استنباط مبتنی بر اعداد Z وزن‌دهی قوانین بر اساس مفهوم فاصله فازی هاسدورف و انتخاب بهترین قوانین با توجه به رخداد فعلی) استفاده شده که در چنین شرایطی می‌تواند نتایج مناسبی را شامل شود. علاوه بر این، تنها قوانین با وزن بالا در نظر گرفته شدند (قوانین با وزن بیش از ۰.۹ وزن حداکثر). خروجی مدل مبتنی بر اعداد Z، به‌عنوان یک عدد Z (دو عدد فازی شامل محدودیت و قابلیت اطمینان) باید برای مقایسه آن با نتایج مدل فازی متداول به یک عدد فازی تبدیل شود بدین منظور، عدد Z خروجی را می‌توان بر اساس قابلیت اطمینان به یک عدد فازی تبدیل کرد. بنابراین با توجه به دفترچه کد تنظیم شده، فقط خروجی‌های با قابلیت اطمینان EH برای اهداف مقایسه‌ای در نظر گرفته شد. برای مدل‌سازی فازی مرسوم، به‌منظور ایجاد قوانین اگر \_ آنگاه برای ورودی‌ها و خروجی‌های در نظر گرفته شده، در هنگام استخراج الگوها با قوانین انجمنی (داده‌کاوی)، همان‌طور که قبلاً اشاره شد فقط الگوهای با معیار اطمینان بیش از

۰/۵ انتخاب شدند. همچنین به منظور مدل سازی، مشابه با سایر مطالعات صورت گرفته از سیستم استنباط فازی ممدانی برای الزام از روش مینیمم، برای تجمیع از روش حداکثر و برای غیرفازی سازی از روش مرکز سطح استفاده شده است. باتوجه به نتایج به دست آمده در جدول (۵) مقادیر TA<sup>۱</sup> و HSS<sup>۲</sup> مدل مبتنی بر اعداد Z و فازی مرسوم (به عنوان مدل معیار) را می توان برای هر دو دشت اردبیل و قروه-دهگلان ارزیابی کرد. قابل ذکر است که معیار TA ممکن است عملکرد مدل را به صورت دقیق نشان ندهد و عملکردی جانب دارانه داشته باشد. پس به عنوان بخشی از مقایسه بین شاخص آسیب پذیری پیش بینی شده توسط مدل DRASTIC و نتایج مدل پیشنهادی، معیارهای TA و HSS نیز بر اساس غلظت نیترات در چاه ها برای ارزیابی صحت مدل DRASTIC در پیش بینی کلاس های آسیب پذیری محاسبه شدند (جدول (۴) را ببینید).

جدول (۴): مقادیر HSS و درصد TA برای ارزیابی نتایج مدل های استفاده شده در مطالعه.

Table (4): HSS values and TA percentage for the ZBM and conventional FL.

نوع مدل						سناریو	منطقه مورد مطالعه
DRASTIC		Conventional Fuzzy		Z-number			
HSS	TA	HSS	TA	HSS	TA		
۰/۰۵	۰/۲۶	۰/۵۱	۰/۷۵	۰/۷۸	۰/۷۸	۷ورودی	دشت اردبیل
-	-	۰/۱۹	۰/۶۵	۰/۵۴	۰/۶۵	۴ورودی	
-۰/۰۱۷	۰/۱۷	۰/۳۳	۰/۴۵	۰/۷۵	۰/۷۸	۷ورودی	دشت قروه-دهگلان
-	-	۰/۱۸	۰/۳۲	۰/۷۴	۰/۵۴	۴ورودی	

باتوجه به نتایج ارائه شده، مدل مبتنی بر اعداد Z عملکرد بهتری (مقادیر HSS) نسبت به روش فازی مرسوم (جدول ۴) نشان داد. هم چنین ارزیابی نتایج نشان داد که مدل مبتنی بر اعداد Z در مقایسه با روش فازی کلاسیک توانست نتایج را به میزان ۵۳ درصد (برای سناریوی اول)، ۱۸۴ درصد (برای سناریوی دوم) در دشت اردبیل و ۱۲۷ درصد (برای سناریوی اول)، ۳۱۱ درصد (برای سناریوی دوم) در دشت قروه-دهگلان بهبود بخشد؛ بنابراین، از نقطه نظر علمی، مدل مبتنی بر عدد Z به دلیل قابلیت در نظر گرفتن قابلیت اطمینان اطلاعات و عملکرد مناسب در مواجهه با شرایط نبود قانون کاملاً منطبق با رویداد فعلی، می تواند یک گزینه قابل اطمینان برای پیش بینی باشد. همچنین بر اساس جدول (۴) تنها ۲۶ درصد و ۱۷ درصد از طبقات شاخص آسیب پذیری پیش بینی شده توسط مدل DRASTIC با کلاس های غلظت نیترات به ترتیب در دشت های اردبیل و قروه-دهگلان مطابقت دارند. از آنجایی که مدل DRASTIC یک مدل هم پوشانی و نظارت نشده هست است و اعمال نظر متخصص در رتبه بندی و وزن دهی پارامترها به طور بالقوه باعث کاهش دقت پیش بینی آسیب پذیری و افزایش عدم قطعیت در فرایند مدل سازی می شود، همان طور که انتظار می رفت، نتایج ارزیابی آسیب پذیری به دست آمده از مدل پیشنهادی بسیار بهتر از مدل DRASTIC بوده است که نشان دهنده دقت پایین پیش بینی کلاس آسیب پذیری توسط مدل های هم پوشان مانند مدل DRASTIC است. زیرا مدل های نظارت شده مانند مدل فازی کلاسیک و مدل مبتنی بر اعداد Z پارامتری را به عنوان تارگت یا خروجی مدلسازی در نظر گرفته و نسبت به آن مقادیر برای آینده را پیش بینی می کنند. هم چنین باتوجه به نتایج، اگرچه نتایج مدل سازی در حالت اول (یعنی در نظر گرفتن ۷ پارامتر به عنوان ورودی) هم با مدل فازی ممدانی و هم رویکرد اعداد Z بهتر است، اما نتایج در حالت دوم (یعنی در نظر گرفتن ۴ پارامتر به عنوان ورودی) نیز قابل قبول بوده (مخصوصاً با استفاده از رویکرد اعداد Z). در نتیجه حتی با تعداد ورودی کمتر (در صورت عدم دسترسی به سایر پارامترها) می توان به پیش بینی های دقیقی از آسیب پذیری ویژه در آبخوان ها دست یافت.

باتوجه به جدول (۵) توانایی مدل های مبتنی بر اعداد Z و فازی مرسوم در پیش بینی غلظت نیترات کم ( $NO_3 \leq 14.75$ )، متوسط ( $14.75 < NO_3 \leq 28.19$ ) و زیاد ( $NO_3 > 28.19$ ) در دشت اردبیل و غلظت نیترات کم ( $NO_3 \leq 13.61$ )، متوسط ( $13.61 < NO_3 \leq 23.27$ ) و زیاد ( $NO_3 > 23.27$ ) در دشت قروه-دهگلان مورد بررسی قرار گرفته است. همانطور که در جدول (۵) مشخص است خروجی

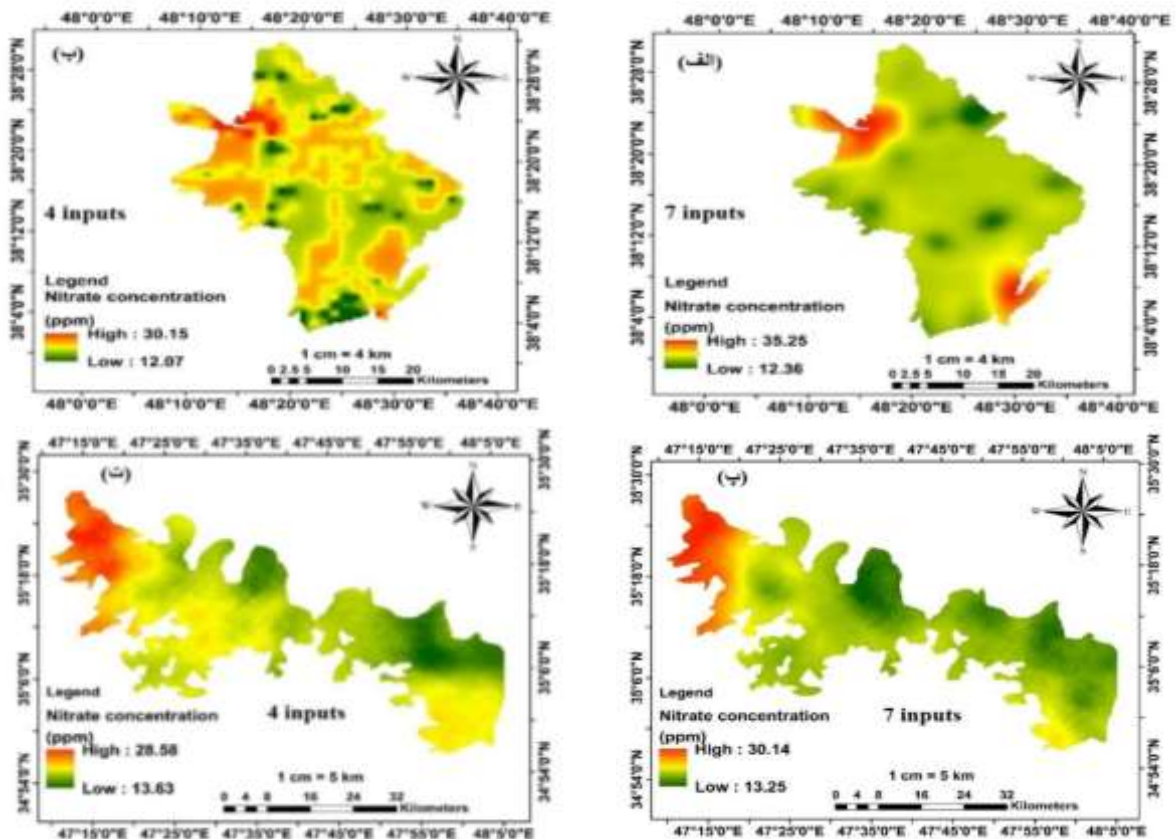
های مدل فازی مرسوم در دشت اردبیل عملکرد جانبدارانه را نشان می‌دهد و نتایج آسیب‌پذیری بالا بسیار بهتر از آسیب‌پذیری‌های کم و متوسط می‌باشد که عملکرد ضعیفی را در پیش‌بینی آسیب‌پذیری کم نشان می‌دهند. هم‌چنین در دشت قروه-دهگلان نتایج آسیب‌پذیری متوسط بهتر از آسیب‌پذیری‌های کم و بالا می‌باشد. اما، خروجی‌های مدل مبتنی بر اعداد Z عملکرد بهتر و تقریباً مشابه و قابل‌اعتمادی را برای همه دسته‌های آسیب‌پذیری کم، متوسط و زیاد نشان می‌دهد.

جدول (۵): درصد TA حاصل از مدل مبتنی بر اعداد Z و مدل فازی مرسوم برای دسته‌بندی آسیب‌پذیری‌های کم و زیاد و متوسط در هر دو دشت.

Table (5): TA percentage of the ZBM and conventional FL for low, high and medium NO<sub>3</sub> concentrations in both plains.

نوع مدل						سناریو	منطقه مورد مطالعه
Conventional Fuzzy			Z-number				
TA (high)	TA (medium)	TA (low)	TA (high)	TA (medium)	TA (low)		
۰/۸۵	۰/۷۹	۰/۵۲	۰/۷۶	۰/۹۴	۰/۸۱	۷ ورودی	دشت اردبیل
۰/۹۰	۰/۶۶	۰/۴۴	۰/۵۵	۰/۹۱	۰/۴۴	۴ ورودی	
۰/۴۷	۰/۹۰	۰/۱۸	۰/۸۳	۰/۸۴	۰/۷۸	۷ ورودی	دشت قروه-دهگلان
۰/۳۱	۰/۶۳	۰/۱۹	۰/۷۹	۰/۸۷	۰/۷۶	۴ ورودی	

در این مطالعه، پس از برآورد و تخمین مقادیر غلظت نیترات به‌عنوان آسیب‌پذیری ویژه آبخوان‌ها با استفاده از روش پیشنهادی، نقشه پهنه‌بندی غلظت نیترات برای هر دو سناریو در GIS تهیه شد (شکل ۶ را ببینید). برای این منظور، غلظت‌های برآورد شده به فرمت قابل‌قبولی برای GIS تبدیل شده و از روش کریجینگ برای درونیابی استفاده شد. سپس نقشه درونیابی شده به فرمت رستری تبدیل شد. همانطور که در شکل‌های (۶. الف و ب) نشان داده شده است، بخش کوچکی از شمال و جنوب دشت اردبیل دارای غلظت نیترات بالاتری نسبت به سایرین است و بیشتر مساحت این دشت دارای غلظت نیترات پایینی می‌باشد. هم‌چنین در دشت قروه-دهگلان غلظت نیترات بالا در قسمت‌های شمالی و شمال غربی دشت دیده می‌شود و سایر نقاط دارای غلظت نیترات کمتری هستند (شکل ۶. پ و ت).



شکل (۶): نقشه توزیع نیترات بر اساس غلظت نیترات تخمین شده با استفاده از روش پیشنهادی: الف) دشت اردبیل (سناریوی اول)، ب) دشت اردبیل (سناریوی دوم)، پ) دشت قروه\_دهگلان (سناریوی اول)، ت) دشت قروه\_دهگلان (سناریوی دوم).

Figure (6): Nitrate distribution map using the proposed methodology: (a) the Ardabil plain (first scenario), (b) the Ardabil plain (second scenario), (c) the QDP (first scenario), (d) the QDP (second scenario).

مطالعه حاضر یک نسخه بهبود یافته از رویکرد اعداد Z را ارائه کرده است که از نظر ریاضیات، از روش برش آلفا برای ارضای تحذب اعداد فازی استفاده شده است. همچنین برای استنتاج و به دست آوردن خروجی بر اساس مشاهدات فعلی، مفهوم فاصله فازی هاسدورف با تعیین آستانه پویا برای انتخاب قوانین (انتخاب بهترین قوانین بر اساس وزن آنها) استفاده شده است. از نظر کاربرد، برای ساخت قوانین اگر-آنگاه و کشف الگوها بین ورودی و خروجی از ابزارهای داده کاوی (قوانین انجمنی) استفاده شده است. علاوه بر این، فراوانی وقوع طبقه بندی پارامترهای DRASTIC برای تعریف بخش قابلیت اطمینان اعداد Z برای کلاس های (دسته بندی) داده های ورودی استفاده شد. و از معیار اطمینان برای به دست آوردن قسمت قابلیت اطمینان اعداد Z برای کلاس های غلظت نیترات (خروجی مدل) استفاده شد. مطالعه حاضر پیشنهاد می کند از دفع آلاینده ها به ویژه پساب های صنعتی، کشاورزی، خانگی و پسماندهای کارخانه ها در مناطق با حساسیت آسیب پذیری متوسط و بالا اجتناب شود. حفر چاه آب آشامیدنی در مناطقی که پتانسیل آلودگی کمتری دارند بهتر است. برای کالیبراسیون دقیق تر مدل سازی، نظارت منظم بر غلظت نیترات موجود در چاه های آب زیرزمینی توصیه می شود.

### نتیجه گیری

به طور کلی عدم قطعیت ها و ابهامات در مسائل دنیای واقعی به خصوص در مدل سازی فرایندهای آبی-اقليمی، منطق فازی را به یک راه حل مؤثر برای مدل سازی، تحلیل و تصمیم گیری تبدیل کرده است. با این حال، عدم قطعیت و قابلیت اطمینان اطلاعات در منطق فازی مرسوم مورد بحث قرار نمی گیرند. در مقابل، اعداد Z شامل محدودیت ها و قابلیت اطمینان داده ها هستند و پتانسیل قابل توجهی در توصیف عدم قطعیت دانش بشری دارند. استفاده از اعداد Z می تواند عدم قطعیت را کاهش دهد و عینیت را بهبود بخشد. برای مثال برآورد آسیب پذیری ویژه آبخوان (آلودگی نیترات) یک فرایند طبیعی پیچیده است که با عدم قطعیت همراه است. مدل های همپوشانی کلاسیک (مانند مدل DRASTIC) به دلیل اعمال نظر متخصص در وزن دهی و رتبه بندی پارامترها نمی توانند این عدم قطعیت را به طور کامل بازتاب کنند در نتیجه توسعه مدل هایی که بتواند بر این عدم قطعیت ذاتی غلبه کند امری ضروری به نظر می رسد. مطالعه حاضر از پارامترهای DRASTIC برای توسعه مدلی استفاده کرد که بتواند آسیب پذیری ویژه طبقه بندی شده (آلودگی نیتراتی) آبخوان های دشت های اردبیل و قروه\_دهگلان را به دلیل نقش حیاتی آنها در چرخه آبی-اقليمی این دشت ها برآورد کند. این رویکرد برای پیش بینی کلاس آسیب پذیری در هر دو دشت با استفاده از مفهوم اعداد Z به دلیل عملکرد ضعیف پیش بینی های نقطه ای در این موارد توسعه داده شد. مدل پیشنهادی در دو سناریو مختلف توسعه داده شد، اولی شامل تمام هفت پارامتر مدل DRASTIC به عنوان ورودی است در حالی که در سناریوی دوم، با در نظر گرفتن خصوصیات پارامترها، تنها چهار پارامتر به عنوان ورودی معرفی شدند. با توجه به نتایج ارائه شده، مدل مبتنی بر اعداد Z به عنوان یک مدل نظارت شده به دلیل در نظر گرفتن عدم قطعیت، قابلیت اطمینان داده ها و وزن دهی مناسب به قوانین، عملکرد بهتری نسبت به روش فازی مرسوم نشان داد و توانست نتایج را به میزان ۵۳ درصد (برای سناریوی اول)، ۱۸۴ درصد (برای سناریوی دوم) در دشت اردبیل و ۱۲۷ درصد (برای سناریوی اول)، ۳۱۱ درصد (برای سناریوی دوم) در دشت قروه\_دهگلان بهبود بخشد (جدول (۴)). همچنین با توجه به نتایج سناریوی دوم مدل پیشنهادی، مدل مبتنی بر اعداد Z می تواند آسیب پذیری ویژه آبخوان ها را حتی با پارامترهای ورودی کمتر به طور دقیق تری تخمین بزند. در نتیجه نتایج قابل اعتماد کاربرد اعداد Z برای مدل سازی آسیب پذیری آبخوان، مدل سازی سایر پارامترهای کیفی مانند فلزات سنگین (به عنوان مثال، آرسنیک)، فسفات و غیره توصیه می شود. این رویکرد همچنین می تواند در زمینه های مختلف مهندسی از جمله طراحی کنترل کننده های هوشمند مدیریت آب زیرزمینی برای بهبود عملکرد کلی مدل های مهندسی با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان رویدادها اعمال شود.

- Akbarian Saravi, N., Yazdanparast, R., Momeni, O., Heydarian, D., Jolai, F., 2018. Location optimization of agricultural residues-based biomass plant using Z-number DEA. *J. Ind. Syst. Eng.* 12 (1), 39–65.
- Aliiev, R.A., Huseynov, O.H., Aliyev, R.R., Alizadeh, A.A., 2015. *The Arithmetic of Z-Numbers: Theory and Applications*. World Scientific, Singapore.
- Aliiev, R.A., Pedrycz, W., Huseynov, O.H., Eyupoglu, S.Z., 2016. Approximate reasoning on a basis of Z-number-valued if–then rules. *IEEE Trans. Fuzzy Syst.* 25 (6), 1589–1600.
- Aller, L., 1985. DRASTIC: a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory. Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency.
- Almasri, M.N., 2008. Assessment of intrinsic vulnerability to contamination for gaza coastal aquifer Palestine. *J. Environ. Manag.* 88 (4), 577–593.
- Antonakos, A.K., Lambrakis, N.J., 2007. Development and testing of three hybrid methods for the assessment of aquifer vulnerability to nitrates based on the drastic model, an example from NE Korinthia, Greece. *J. Hydrol.* 333 (2–4), 288–304.
- Baalousha, H.M., Tawabini, B., Seers, T.D., 2021. Fuzzy or non-fuzzy? a comparison between fuzzy logic-based vulnerability mapping and drastic approach using a numerical model a case study from Qatar. *Water* 13 (9), 1288.
- Bayatikhatibi, M., Rostami, F., Valizadeh Kamran, K., 2022. Investigation and Assessment of Groundwater Vulnerability to Pollution using DRASTIC Model and Fuzzy Logic. *Hydrogeomorphology*. 8(29), 108-87.
- Chakraborty, B., Roy, S., Bera, A., Adhikary, P.P., Bera, B., Sengupta, D., Bhunia, G.S., Shit, P.K., 2022. Groundwater vulnerability assessment using GIS-based DRASTIC model in the upper catchment of Dwarakeshwar river basin West Bengal, India. *Environ. Earth Sci.* 81 (1), 1–15.
- Dhanya, C.T., Kumar, D.N., 2009. Data mining for evolving fuzzy association rules for predicting monsoon rainfall of India. *J. Intell. Syst.* 18 (3), 193–210.
- Duhalde, D.J., Arumí, J.L., Oyarzún, R.A., Rivera, D.A., 2018. Fuzzy-based assessment of groundwater intrinsic vulnerability of a volcanic aquifer in the Chilean Andean Valley. *Environ. Monit. Assess.* 190 (7), 1–14.
- Feizizadeh, B., Abdollahi, Z., & Shokati, B., 2022. A GIS-based spatiotemporal impact assessment of droughts in the hyper-saline Urmia Lake Basin on the hydro-geochemical quality of nearby aquifers. *Remote Sensing*, 14(11), 2516.
- Ghosh, R., Sutradhar, S., Mondal, P., Das, N., 2021. Application of DRASTIC model for assessing groundwater vulnerability: a study on Birbhum district West Bengal, India. *Model. Earth Syst. Environ.* 7 (2), 1225–1239.
- Glukhoded, E.A., Smetanin, S.I., 2016. The method of converting an expert opinion to Z-number. *Proc. Inst. Syst. Program. RAS* 28 (3), 7–20.
- Gogu, R.C., Dassargues, A., 2000. Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods. *Environ. Geol.* 39 (6), 549–559.
- Gutiérrez-Estrada, J.C., Pedro-Sanz, E.de., López-Luque, R., Pulido-Calvo, I., 2004. Comparison between traditional methods and artificial neural networks for ammonia concentration forecasting in an eel (*Anguilla anguilla* L.) intensive rearing system. *Aquac. Eng.* 31 (3–4), 183–203.

- Han, J., Kamber, M., Pei, J., 2011. Data mining: concepts and techniques, Third. ed. Morgan Kaufmann, San Francisco.
- Kadkhodaie, I.F., Asghari, M.A., Barzegar, R., Gharekhani, M., 2020. Comparison of neural network and neuro-fuzzy techniques to improve the drastic frame work (Case Study: Shabestar plain Aquifer).
- Kóczy, L.T., Hirota, K., 1991. Rule interpolation by  $\alpha$ -level sets in fuzzy approximate reasoning. J. Busefal, Automne. URA-CNRS 46. 115–123.
- Mamdani, E.H., 1977. Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis. IEEE Trans. Comput. 26 (12), 1182–1191.
- Mehr, A.D., Nourani, V., Hrnjica, B., Molajou, A., 2017. A binary genetic programming model for teleconnection identification between global sea surface temperature and local maximum monthly rainfall events. J. Hydrol. 555, 397–406.
- Najafi, H., Nourani, V., Sharghi, E., Roushangar, K., Dąbrowska, D., 2022. Application of Z-numbers to teleconnection modeling between monthly precipitation and large-scale sea surface temperature. Hydrol. Res. 53 (1), 1–13.
- Nourani, V., Maleki, S., Najafi, H., Baghanam, A. H., 2023. A fuzzy logic-based approach for groundwater vulnerability assessment. Environmental Science and Pollution Research, 1-20.
- Nourani, V., Najafi, H., Maleki, S., Paknezad, N. J., Huang, J. J., Zhang, P., Mohammadisepasi, S., 2024. Z-number based assessment of groundwater vulnerability to seawater intrusion. Journal of Hydrology. 130859.
- Nourani, V., Najafi, H., Sharghi, E., Roushangar, K., 2021. Application of z-numbers to monitor drought using large-scale oceanic-atmospheric parameters. J. Hydrol. 598, 126198.
- Novinpour, E.A., Moghimi, H., Kaki, M., 2022. Aquifer vulnerability based on classical methods and GIS-based fuzzy optimization method (case study: Chahardoli plain in kurdistan province iran). Arabian J. Geosci. 15 (4), 1–15.
- Patel, P., Mehta, D., Sharma, N., 2022. A review on the application of the DRASTIC method in the assessment of groundwater vulnerability. Water Supply 22 (5), 5190–5205.
- Piscopo, G., 2001. Groundwater vulnerability map explanatory notes—Castlereagh Catchment. NSW department of land and water conservation, Australia.
- Shakoor, A., Khan, Z.M., Farid, H.U., Sultan, M., Ahmad, I., Ahmad, N., Mahmood, M.H., Ali, M.U., 2020. Delineation of regional groundwater vulnerability using DRASTIC model for agricultural application in Pakistan. Arab. J. Geosci. 13 (4), 1–12.
- Sharghi, E., Paknezhad, N.J., Najafi, H., 2021. Assessing the effect of emotional unit of emotional ANN (EANN) in estimation of the prediction intervals of suspended sediment load modeling. Earth Sci. Inform. 14 (1), 201–213.
- Stigter, T.Y., Ribeiro, L., Dill, A.M.M., 2006. Evaluation of an intrinsic and a specific vulnerability assessment method in comparison with groundwater salinisation and nitrate contamination levels in two agricultural regions in the south of Portugal. Hydrogeol. J. 14 (1), 79–99.
- Takagi, T., Sugeno, M., 1985. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. IEEE Trans. Systems, Man Cybern. (1), 116–132.
- Yu, H., Wu, Q., Zeng, Y., Zheng, L., Xu, L., Liu, S., Wang, D., 2022. Integrated variable weight model and improved drastic model for groundwater vulnerability assessment in a shallow porous aquifer. Journal of Hydrology 608, 127538.
- Zadeh, L.A., 1965. Electrical engineering at the crossroads. IEEE Trans. Educ. 8 (2), 30–33.



Zadeh, L.A., 1973. Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes. IEEE Transactions on systems, Man, and Cybernetics. 28–44.

Zadeh, L.A., 2011. A note on Z-numbers. Inform. Sci. 181 (14), 2923–2932.

Ziaye Shendershami, S., Esmali Ouri, A., Mostafazadeh, R., Ghorbani, A., 2021. Effective Factors in Ground Water Variations and Water Table Decrease in Ardabil Plain. Hydrogeomorphology. 8(28), 127-143.