



Print ISSN: 2251-7480
Online ISSN: 2251-7400

Journal of
Water and Soil
Resources Conservation
(WSRCJ)

Web site:
<https://wsrcj.srbiau.ac.ir>

Email:
iauwsrcj@srbiau.ac.ir
iauwsrcj@gmail.com

Vol. 12
No. 4 (48)
Summer 2023

Received:
2023-01-01

Accepted:
2023-01-13

Pages: 29-41



Point Sources Pollution Index Development in Well Capture Zones with Mathematical Modeling Approach (Case study: Meshgin Shahr plain)

Mohsen Heydaroghli¹, Hossein Saadati^{2*} and Ebrahim Fatayi³

1) Ph.D. Candidate, Department of Environmental Sciences, Ardabil Branch, Islamic Azad University, Ardabil, Iran.
2) Assistance Professor Department of Environmental Sciences, Ardabil Branch, Islamic Azad University, Ardabil, Iran.
3) Professor Department of Environmental Sciences, Ardabil Branch, Islamic Azad University, Ardabil, Iran.
*Corresponding author email: h.saadati@iauardabil.ac.ir

Abstract:

Background and Aim: It is possible to identify the areas of plains that are highly vulnerable to contaminating wells by modeling, integrating, and developing indicators. The presence of polluting points in these areas will bring and intensify the risk of contamination of wells. The main goal of this research is to develop and provide a new index to determine the vulnerable levels around the wells that can cause the pollution of drinking and agricultural wells and, consequently, the pollution of the aquifer. In this research, the combination of point pollutant sources density was used as a risk index and well capture zones as a vulnerability index. This method is more accurate than other methods because it takes into account features such as discharge, natural damping, soil, aquifer hydraulic conductivity, land use, landcover, and distribution of wells, and it is a combination of vulnerability index and risk index.

Method: In the present research, the vulnerability of Meshgin shahr's plain's aquifer with an area of 614 square kilometers is estimated using the combination of two factors of the density of polluting sources in the areas of the rivers and the well capture zones. First, the density of point pollution sources such as industries, villages, gas stations, as an index of potential polluting sources in Mashgin Shahr's plain's rivers is determined by Karnal method in GIS environment. Then, numerical modeling is done to determine the well capture zones using MODFLOW and MODPATH models. The statistical data of 10 years from 2011 to 2020 is divided into three categories. The first 8 years are used for the calibration, and the last 2 years were used for model validation. Modeling was performed for stable state. Then the parameters of hydraulic conductivity, recharge and anisotropy are subjected to sensitivity analysis. In the next step, using the MODPATH model and based on the results of the MODFLOW model, well capture zones or areas with high vulnerability are estimated in different periods. By combining the density layer of point pollutants in the rivers' protection area and well capture zones, the developed pollution index of the plain is obtained.

Results: The density of pollutants in the region varied from zero to 0.998 items per square kilometer, so that the highest density is in the southwest of the plain, around the important cities of the region. In 16% of the total surface of the plain, there is no capture of pollution by wells. The final capture with 25% of the plain has the largest share and the 10-year capture with less than 1% of the plain has the lowest share. The results of the final index shows that the entire level of the plain is in the range of low risk, and about 50% of the level of the Meshgin's plain is in the range of low vulnerability. The results of this index are validated based on the density of two important pollutants, nitrate and chloride, which have a positive correlation with the vulnerability index. Two potential pollutants are selected as accuracy parameters to confirm the result of the index developed in this research. Nitrate is considered in rural and agricultural areas, which are affected by agricultural fertilizers and sewage. Chloride also indicates pollution in industrial and commercial places. The results show that the relationship between the two parameters of chlorine and nitrate is almost linear, so that the Pearson correlation coefficient for nitrate is 0.58 and for chloride is 0.49.

Conclusion: The results of this research indicated that in the plains' management in order to protect the wells' water quality, the combination of the risk index of point pollutants in the rivers and the vulnerability of the well capture zones can play an important role, and in the industrial development of Mashgin Shahr plain, priority should be given to areas with lower risk. Due to the fact that there are no industrial towns or units in Mashgin Plain, it is not possible to evaluate the risk classes of this index with the spatial changes of groundwater pollution, and it is recommended that this index be used and evaluated in industrial plains. The index presented in this research is simpler compared to other developed indices in the field of aquifer pollution, however; for more accuracy, the weight of the effect can be determined for any point or non-point pollutant, or other parameters can be used.

Keywords: Aquifer vulnerability, Point pollutions, Well Capture Zone, Meshgin Shahr



توسعه شاخص آلودگی منابع نقطه‌ای در سطوح گیرش چاه‌ها با رویکرد مدل‌سازی ریاضی

(مطالعه موردی: آبخوان مشگین‌شهر)

محسن حیدراوغلی^۱، حسین سعادت^{۲*} و ابراهیم فتابی^۳

۱) دانشجوی دکتری، گروه محیط زیست، واحد اردبیل، دانشگاه آزاد اسلامی، اردبیل، ایران.

۲) استادیار، گروه محیط زیست، واحد اردبیل، دانشگاه آزاد اسلامی، اردبیل، ایران.

۳) استاد، گروه محیط زیست، واحد اردبیل، دانشگاه آزاد اسلامی، اردبیل، ایران.

* ایمیل نویسنده مسئول: h.saadati@iauardabil.ac.ir

چکیده:

زمینه و هدف: مشخص ساختن سطوحی از دشت‌ها که دارای آسیب‌پذیری زیادی برای آلوده کردن چاه‌ها هستند، با مدل‌سازی، تلفیق و توسعه شاخص‌ها، امکان‌پذیر است. وجود نقاط آلاینده در این پهنه‌ها خطر آلودگی چاه‌ها را به همراه داشته و تشدید خواهد کرد. هدف اصلی این تحقیق توسعه و ارائه شاخص جدید برای تعیین سطوح آسیب‌پذیر اطراف چاه‌ها است که می‌تواند باعث آلودگی چاه‌های شرب و کشاورزی موجود در دشت‌ها و به تبع آن آلودگی آبخوان گردند. در این تحقیق از ترکیب تراکم منابع نقطه‌ای آلاینده‌ها به‌عنوان شاخص ریسک و گیرش آلودگی چاه‌ها به‌عنوان شاخص آسیب‌پذیری استفاده شد. این روش نسبت به سایر روش‌ها دقیق‌تر است زیرا ویژگی‌هایی مانند تغذیه، میرایی طبیعی، خاک، رسانایی آبخوان، کاربری و پوشش اراضی و توزیع چاه‌ها را در نظر می‌گیرد و تلفیقی از شاخص آسیب‌پذیری و شاخص ریسک است.

روش تحقیق: در تحقیق حاضر، آسیب‌پذیری آبخوان دشت مشگین‌شهر به مساحت ۶۱۴ کیلومترمربع با استفاده از تلفیق دو عامل تراکم منابع آلاینده در پهنه‌های حریم رودخانه‌ها و محدوده گیرش چاه‌ها برآورد شد. بدین منظور ابتدا تراکم منابع آلاینده نقطه‌ای مانند صنایع، روستاها، ایستگاه‌های پمپ‌بازین به‌عنوان شاخص منابع بالقوه آلاینده در محدوده حریم رودخانه‌های دشت مشگین‌شهر به روش کرنال در محیط GIS مشخص گردید. سپس مدل‌سازی عددی برای تعیین مناطق گیرش چاه با استفاده از مدل MODFLOW و MODPATH انجام شد. داده‌های آماری ۱۰ ساله از سال ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۹ به دودسته تقسیم شد. ۸ سال اول برای واسنجی و ۲ سال آخر برای اعتبارسنجی و صحت‌سنجی مدل، در حالت پایدار استفاده شد. سپس پارامترهای هدایت هیدرولیکی، تغذیه و ناهمسانگردی، به منظور انجام دقیق‌تر و راحت‌تر واسنجی، تحلیل حساسیت شد. در مرحله بعد با استفاده از مدل MODPATH و بر پایه نتایج مدل MODFLOW سطوح گیرش چاه‌ها یا مناطق با آسیب‌پذیری بالا در دوره‌های زمانی مختلف، برآورد شد. با تلفیق لایه تراکم آلاینده‌های نقطه‌ای در حریم رودخانه‌ها و سطوح گیرش چاه، شاخص توسعه‌یافته آلودگی دشت به دست آمد.

یافته‌ها: مقدار پارامتر تراکم آلاینده‌ها در منطقه از صفر تا ۰/۹۹۸ مورد در کیلومترمربع متغیر بود به‌طوری‌که بیشترین مقدار تراکم در جنوب غربی دشت در اطراف شهرهای مهم منطقه قرار دارد. در ۱۶ درصد از سطح کل دشت، هیچ‌گونه گیرش آلودگی توسط چاه‌ها وجود ندارد و گیرش نهایی با ۲۵ درصد از سطح دشت، بیشترین سهم و گیرش ۱۰ ساله با کمتر از یک درصد از سطح دشت، کمترین سهم را دارد. نتایج شاخص نهایی نشان داد کل سطح دشت در محدوده ریسک کم قرار داشته و حدود ۵۰ درصد از سطح دشت مشگین‌شهر در محدوده آسیب‌پذیری ناچیز قرار داشت. نتایج این شاخص بر اساس غلظت دو آلاینده مهم نیترات و کلراید اعتبارسنجی شد که همبستگی مثبتی با شاخص آسیب‌پذیری داشت. دو ماده آلاینده بالقوه به‌عنوان پارامترهای صحت‌سنج برای تأیید نتیجه شاخص توسعه‌یافته در این تحقیق انتخاب شد. در مناطق روستایی و کشاورزی، که تحت تأثیر کود کشاورزی و فاضلاب است، نیترات به‌عنوان معیار در نظر گرفته شد. کلراید هم‌نشان‌دهنده آلودگی در مکان‌های صنعتی و تجاری است. نتایج نشان می‌دهد که رابطه بین شاخص ارائه‌شده با دو پارامتر کلر و نیترات به‌صورت تقریباً خطی است، بطوریکه ضریب همبستگی پیرسون برابر ۰/۵۸ برای نیترات و ۰/۴۹ برای کلراید برآورد شد.

نتیجه‌گیری: نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که در مدیریت اراضی دشت‌ها، به‌منظور حفاظت از کیفیت آب چاه‌ها، ترکیب شاخص خطر آلاینده‌های نقطه‌ای در حریم رودخانه‌ها و آسیب‌پذیری سطوح گیرش چاه‌ها، نقش مهمی می‌تواند داشته باشد و در توسعه صنعتی دشت مشگین‌شهر، بایستی اولویت تخصیص با مناطقی باشد که دارای ریسک پایین‌تر هستند. با توجه به اینکه در دشت مشگین‌شهر، شهرک و واحدهای صنعتی وجود ندارد، ارزیابی طبقات ریسک این شاخص با تغییرات مکانی آلودگی آب‌های زیرزمینی مقدر نبود و توصیه می‌شود که این شاخص در دشت‌های صنعتی استفاده و ارزیابی گردد. شاخص ارائه‌شده در این تحقیق در مقایسه با شاخص‌های توسعه‌یافته دیگر درزمینه آلودگی‌های آبخوان، ساده‌تر بوده ولی می‌توان برای دقت بیشتر برای هر نوع آلاینده نقطه‌ای و یا غیر نقطه‌ای وزن اثر هم تعیین کرد و یا از پارامترهای دیگر دخیل در آلودگی آبخوان هم استفاده کرد.

کلیدواژه‌ها: آسیب‌پذیری آبخوان، آلاینده‌های نقطه‌ای، سطوح گیرش چاه، مشگین‌شهر



مقدمه

یکی از برنامه‌های مهم در مدیریت اراضی دشت‌ها و آلودگی آب‌های زیرزمینی، تعیین مناطق آسیب‌پذیر اطراف چاه‌ها است که باعث نفوذ آلودگی‌های سطحی به مناطق غیراشباع و در نهایت سفره‌های آب زیرزمینی می‌شود. منابع آلاینده نقطه‌ای با شدت بیشتر از منابع غیر نقطه‌ای می‌توانند باعث آلودگی منابع آبی شوند در همین راستا این نوع منابع در این تحقیق انتخاب و با استفاده از تلفیق دو نوع مدل، مورد ارزیابی قرار گرفتند (Saadati et al., 2020). استفاده تلفیقی از شاخص‌های دقیق و جامع بر پایه مدل‌های شبیه‌سازی آب‌های زیرزمینی و انتقال آلاینده‌ها، نیاز به پوشش داده‌های مناسب هیدروژئولوژیکی و ژئوشیمیایی دارند (Rahmati et al., 2022). به دلیل عدم وجود این داده‌ها در مقیاس منطقه‌ای، استفاده از مدل‌های یک‌بعدی معمول است (Chowdhury et al., 2003 ; Connell & Daele. 2003). آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی از داده‌های نظارتی محاسبه می‌شود و اغلب با خصوصیات آبخوان‌ها در ارتباط است (Chowdhury et al., 2003; Abbasi et al., 2021).

در تحقیقی دیگر توسط نوبر^۱ و همکاران برای ارزیابی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی یک سفره آبخوان ساحلی در شمال شرقی برزیل، بر اساس یک روش تلفیقی، ارائه شده است. از روش دراستیک برای تعیین آسیب‌پذیری ذاتی آب زیرزمینی استفاده شد. نقطه قوت این تحقیق استفاده از یک روش سلسله مراتبی فازی برای تعیین نوع و شدت اثر منابع بالقوه آلاینده از جمله منابع گسترده و نقطه‌ای است. مدل سازی عددی نیز برای تعیین مناطق گیرش چاه با استفاده از MODFLOW و MODPATH انجام شد (Nobre et al., 2007). ادغام این عوامل برای ارزیابی خطرات آلودگی آب زیرزمینی و شناسایی مناطقی پر خطر نیز در تحقیق دیگری استفاده شده است (Nobre et al., 2004). در تحقیقی که توسط جودوی و خزائی انجام شد از مدل دراستیک برای ارزیابی آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان و از مدل‌سازی عددی جریان آب زیرزمینی توسط کد Modflow و ردیابی حرکت ذرات در آبخوان توسط کد MODPATH برای تعیین ناحیه گیرش چاه‌ها استفاده شده است. با تلفیق نتایج هر دو مدل در محیط GIS نقشه ریسک آلودگی آب زیرزمینی در محدوده شهرستان فیروزه در استان خراسان رضوی به صورت ناحیه‌ای و در محدوده ناحیه گیرش چاه‌های آب شرب تعیین شده ولی خطر آلاینده‌ها در نظر گرفته نشده است (Jodvi & Khazaei, 2015).

تحقیق دیگری با موضوع ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان با استفاده از روش ترکیبی انجام شد و آسیب‌پذیری آبخوان دشت خوی با ترکیب روش‌های DRASTIC، SINTACS، ارزیابی شد (Nadiri et al., 2018). هرکدام از روش‌ها و مدل‌های ارزیابی

ریسک و آسیب‌پذیری، خصوصیات ذاتی خود را داشته و نتایج متفاوتی را ارائه می‌کنند (Mitra & Chowdhury, 2019; Farhadi et al., 2020). لذا به دلیل برخی تفاوت‌های ذاتی در نتایج این مدل‌ها (Ghomi Avili. & Makaremi, 2020) در این تحقیق با استفاده از روش ترکیبی از مزایای دو روش به صورت هم‌زمان استفاده شده است. صحت سنجی نتایج با نیترات آبخوان نشان داد که روش ترکیبی برای ارزیابی آسیب‌پذیری این منطقه مناسب‌تر است.

برای شناسایی رودخانه‌های آلوده در مالزی تحقیقی انجام دادند. این مطالعه امکان استفاده از تحلیل مبتنی بر ضریب ریسک زمانی و مکانی (RQ) را برای ارزیابی دقیق وضعیت فعلی سرشاخه‌ها در حوضه آبریز رودخانه کلانگ را بررسی نمود. مطالعه با استفاده از مجموعه داده‌های موجود در تقاضای اکسیژن بیوشیمیایی (BOD)، تقاضای اکسیژن شیمیایی (COD)، کل جامدات معلق (TSS) و آمونیاک (NH₃) برای ارزیابی کیفیت آب در ۳۰ مکان استراتژیک انجام گرفته است. تجزیه و تحلیل آلودگی آمونیاک نه تنها بر اساس حد تعیین شده برای سلامت رودخانه، بلکه امکان استفاده از آب برای فعالیت‌های تفریحی و حفظ جمعیت ماهی‌ها نیز مورد توجه قرار گرفت؛ را در برمی‌گیرد. سلامت رودخانه کلانگ با استفاده از رویکرد ماتریس ریسک (RMA) بر اساس فراوانی و اثرات مخاطره‌ای با کد رنگی مرتبط ارزیابی شد. با استفاده از RMA توسعه یافته، سطح خطر برای هر پارامتر در هر مکان ارزیابی و به صورت جداگانه با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) ترسیم گردید (Mohtar et al., 2019). تحقیقی باهدف ارزیابی ریسک و آسیب‌پذیری آبخوان در دشت اردبیل با تلفیق سه شاخص تراکم آلاینده‌ها، دراستیک اصلاح شده و گیرش چاه‌ها انجام گردید بطوریکه در آن تحقیق تراکم آلاینده‌ها در محدوده زیرحوضه‌ها محاسبه شد ولی در تحقیق حاضر برای اعمال اثر دقیقتر آلودگی، تراکم در محدوده‌های بافری رودخانه‌ها اعمال گردید. در نهایت مطابق نتایج شاخص موردنظر در دشت اردبیل در محدوده ریسک کم قرار داشت (Saadati et al., 2020).

برای پیش‌بینی شاخص آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی در برابر آلودگی نیترات در دو سطح مدل‌سازی از الگوریتم‌های یادگیری ماشینی جدید استفاده شد. در این تحقیق، مدل‌های رگرسیون یادگیری ماشین (ML) هوشمند پیش بینی کننده جدید k-Neighborhood (KNN)، مجموعه درختان بسیار تصادفی (ERT) و مجموعه رگرسیون (Bagging (BA) در مدل‌سازی دو سطحی برای بهبود مدل DRASTIC-LU در آبخوان Miryang واقع در کره جنوبی استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان داد که مدل گروه BA برای پیش‌بینی مقادیر GPVI دقیق‌تر از مدل‌های KNN مستقل و گروه ERT بود؛

به دست آمده است. ادغام داده‌های موردنظر، پهنه‌بندی خطر در منطقه موردنظر را فراهم کرده است (Saadati, 2015). تمام پارامترها به‌عنوان نقشه‌های موضوعی با وضوح ابعاد سلولی ۵۰ متر در قالب رستری تهیه شدند و تلفیق نقشه‌ها با استفاده از GIS انجام گردید. نتایج با مقایسه شاخص نهایی کیفیت آب زیرزمینی با داده‌های اندازه‌گیری شده کیفی از جمله مقدار نترات در آب زیرزمینی، مورد تحلیل و صحت‌سنجی قرار گرفت (Johnston et al., 2001).

توزیع منابع نقطه‌ای با روش تراکم کرنل^۴ در هر کیلومتر مربع، به دست آمد. منابع آلاینده نقطه‌ای که در ۶ گروه تقسیم شدند، شامل ۳۷۱ نقطه صنعتی، ۱۴۳ روستا، ۱۸ ایستگاه خدمات بنزین، یک مورد مکان دفن پسماند، یک مورد تصفیه-خانه فاضلاب شهری و یک مورد کشتارگاه در دشت، بود. شاخص منابع آلاینده^۵ در این تحقیق از روش تحلیل زمین‌آماري منطقه‌ای^۶ به منظور استخراج تراکم منابع آلاینده‌ی نقطه‌ای در حریم‌های رودخانه‌ای استفاده شد.

روش Kernel Density تراکم عرضه‌ها را در یک منطقه محاسبه می‌کند. می‌توان آن را برای هر دو عرضه نقطه و خط استفاده کرد. تراکم کرنال تراکم عرضه‌ها را در اطراف هر نقطه به صورت خروجی پیکسلی محاسبه می‌کند. از نظر مفهومی، یک سطح منحنی صاف اطراف هر نقطه ایجاد می‌شود. مقدار ارزش در محل نقطه بالاترین است و با افزایش فاصله از نقطه کاهش می‌یابد و در فاصله انتهای شعاع جستجو به مرکزیت نقطه، به صفر می‌رسد. تابع کرنال بر اساس تابع کرنال کوارتیک توصیف شده است (Silverman, 2018).

به‌عنوان مثال، اگر واحدهای ورودی متر باشند، واحدهای سطح خروجی به‌طور پیش‌فرض کیلومتر مربع خواهند بود. رابطه ۱ نحوه محاسبه تراکم کرنال برای نقاط و نحوه تعیین شعاع جستجوی پیش‌فرض در فرمول تراکم کرنال را مشخص می‌کند.

$$Density = \frac{1}{(radius)^2} \sum_{i=1}^n \left[\frac{3}{\pi} \cdot pop_i \left(1 - \left(\frac{dist_i}{radius} \right)^2 \right)^2 \right] \quad (1)$$

for $dist_i < radius$

$i \in \mathbb{N}$ نقاط ورودی هستند. فقط نقاطی در مجموع درج می‌گردد که در فاصله شعاع (x,y) باشند.

pop_i مقدار فیلد جمعیت نقطه management است که یک پارامتر اختیاری است.

$dist_i$ فاصله بین نقطه i و مکان (x,y) است. شاخص سطوح گیرش چاه‌ها در منطقه مورد مطالعه، از طریق مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی منطقه‌ای با استفاده از نرم‌افزار Modflow (McDonald & Harbaugh, 1996) و نرم‌افزار MODPATH (Pollock, 1989) تهیه شده است. مساحت دشت، منطقه‌ای حدود ۶۱۴ کیلومتر مربع را در

بنابراین، مدل‌سازی ML دوسطحی، می‌تواند یک رویکرد عالی برای مدیریت فعال منابع آب زیرزمینی در برابر آلودگی باشد (Elzain et al., 2022).

مدل‌سازی پارامترهای هیدروژئولوژیکی برای ارزیابی آلودگی و آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی در آبخوان کاشان با ملاحظات خطر برای سلامت انسان انجام گردید. برای انجام این کار، فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) و روش‌های تحلیل آماری فازی برای وزن دهی، رتبه‌بندی و استانداردسازی پارامترها بر اساس نظرات تحقیقاتی کارشناسان و سیستم‌های Ad-Hoc استفاده شد. نتایج نشان داد که پارامترهای تغذیه خالص، محیط خاک، محیط غیراشباع، هدایت هیدرولیکی و محیط آبخوان بیشترین سهم و تأثیر را بر آلودگی آب‌های زیرزمینی ایجاد کرده‌اند (Samadi, 2022).

هدف این تحقیق ارائه یک شاخص توسعه‌یافته جدید برای ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی^۲ بر اساس ترکیب دو شاخص خطر تراکم منابع نقطه‌ای آلاینده‌ها، مسیر گیرش آلودگی با استفاده از فرآیند مدل‌سازی عددی است. این روش نسبت به سایر روش‌های موجود پیشرفت مهمی دارد زیرا ویژگی‌هایی را که در طول مسیر آلاینده از منبع به گیرنده مانند تغذیه، میرایی طبیعی، خاک، رسانایی آبخوان، کاربری و پوشش اراضی و توزیع چاه‌ها را در نظر می‌گیرد و تلفیقی از شاخص آسیب‌پذیری و شاخص ریسک است به‌طوری که روش تراکم کرنال در محدوده‌های بافری رودخانه‌ها لحاظ شد، که بعنوان نوآوری این تحقیق می‌باشد. در نهایت روشی برای آزمایش و اعتبارسنجی مدل ارائه می‌شود. در روش ارائه شده، امکان شناسایی مناطق گیرش با بالاترین خطر و تأثیر بر روی چاه‌های بهره‌برداري بوجود می‌آید. این مناطق نیاز به ارزیابی و نظارت بیشتر استفاده از اراضی برای محافظت از آب‌های زیرزمینی را دارد. روش جدید ارائه شده به ارزیابی مناطق حفاظت از چاه کمک کرده و نه تنها فرآیند انتقال آلاینده‌ها بلکه منابع آلوده‌کننده احتمالی و شیوه‌های استفاده از اراضی در منطقه تأثیر چاه‌ها را با مفهوم جدیدی با ارائه شاخص ریسک آلودگی‌های آب‌های زیرزمینی، مورد ارزیابی قرار می‌دهد.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق از شاخص ریسک منابع نقطه‌ای و سطوح آسیب‌پذیر گیرش آلودگی، به‌عنوان روش پیشنهادی برای ارزیابی آبخوان و آب‌های زیرزمینی، استفاده شد. تراکم منابع آلاینده نقطه‌ای مانند صنایع، روستاها، ایستگاه‌های پمپ‌بنزین در زیرحوضه‌ها به‌عنوان شاخص ریسک منابع آلاینده‌ی نقطه‌ای استفاده شد. شاخص پهنه‌بندی چاه^۳ (Staboulzidis et al., 2017) از تعیین منطقه گیرش چاه با استفاده از مدل‌سازی عددی

اگر تغییر در پارامتر ورودی باعث تغییر بزرگی در خروجی مدل شود، مدل به آن پارامتر، حساس است. شیوه رایج در تحلیل حساسیت این است که فقط یک پارامتر ورودی تغییر داده شود. در این مطالعه با استفاده از بسته PEST از نرم‌افزار GMS حساسیت مدل نسبت به پارامترهای مختلف سنجیده شد (Ghadir et al., 2020).

شاخص نهایی ارزیابی ریسک و آسیب‌پذیری، احتمال مصرف آب‌های زیرزمینی آلوده‌شده از طریق منابع آلاینده موجود در سطح زمین توسط چاهها را نشان می‌دهد. این شاخص با ادغام لایه شاخص منابع آلاینده و مناطق گیرش چاهها، با استفاده از رابطه ۲، به دست می‌آید:

$$WCPI = \text{Wells Capture zone} \times \text{Point Pollution}$$

(نمایه Point Pollution) شاخص آلودگی نقطه‌ای ×

رابطه (۲)

برای حذف مناطقی که در معرض خطر نیستند، نماد ضرب لازم است. در زنجیره منبع-مسیر-گیرنده، اگر یکی از پارامترها موجود نباشد (به‌عنوان مثال، منبع نقطه‌ای یا چاه) خطری وجود نخواهد داشت. در نتیجه، اگر شاخص منبع نقطه‌ای یا چاه برابر صفر باشد، شاخص خطر نیز صفر می‌شود. مقادیر پایین ریسک بدان معنی است که احتمال آلودگی آب‌های زیرزمینی احتمال بسیار کمی وجود دارد. از طرف دیگر، مقادیر بالاتر، احتمال انتزاعی بیشتری را برای آلودگی آب نشان می‌دهند (Nobre, 2007). مطابق فرمول شاخص ارائه‌شده در این تحقیق مقدار شاخص منطقه گیرش^۹ بین یک تا ده است و مقدار شاخص منابع نقطه‌ای آلاینده نقطه‌ای^{۱۰} از صفر تا ده می‌رسد. به‌عبارتی دیگر حداکثر تعداد منابع نقطه‌ای آلاینده در هر کیلومترمربع، ۱۰ مورد و بیشتر از آن می‌تواند باشد در نتیجه محدوده‌ای شاخص هم از صفر تا ۱۰۰ و بیش از ۱۰۰ می‌رسد که البته مقدار حداکثر این شاخص خیلی بندرت برآورد می‌شود و نشان‌دهنده خطر آلودگی غیرقابل تحمل است. طبقه‌بندی کمی و کیفی ریسک این شاخص هم در ۵ طبقه به‌صورت جدول شماره ۱ بود.

جدول ۱ طبقه‌بندی کمی و کیفی ریسک شاخص توسعه یافته WCPI

| ردیف | مقدار کمی ریسک | طبقه کیفی ریسک |
|------|----------------|----------------|
| ۱ | ۰-۲۵ | کم |
| ۲ | ۲۶-۵۰ | متوسط |
| ۳ | ۵۱-۷۵ | زیاد |
| ۴ | ۷۶-۱۰۰ | خیلی زیاد |
| ۵ | <۱۰۰ | غیرقابل تحمل |

صحت سنجی شاخص ارائه‌شده مرحله مهم دیگر برای این تحقیق بود. در روش پیشنهادی منابع عدم قطعیت بسیاری وجود دارد. این مدل‌سازی مستلزم دستیابی به پارامترهای

برمی‌گیرد و به ۶۶۵۶ سلول فعال با ابعاد ۳۰۰ متر تقسیم می‌شود. مرزهای مدل، آبخوان دشت مشکین می باشد. یک بانک اطلاعاتی از ۲۲ گمانه در ۴ مقطع محلی گردآوری شد تا امکان تفسیر لایه‌های آب در آبخوان فراهم شود. تغذیه به عنوان یکی از شرایط مرزی از سطح زمین در نظر گرفته شد. مرز پایین آبخوان سازند رسی، که عملاً غیرقابل نفوذ بود. اطلاعات ورودی مدل، مانند تغذیه و هدایت هیدرولیک افقی^۷، بر اساس اطلاعات جمع‌آوری‌شده به دست آمد.

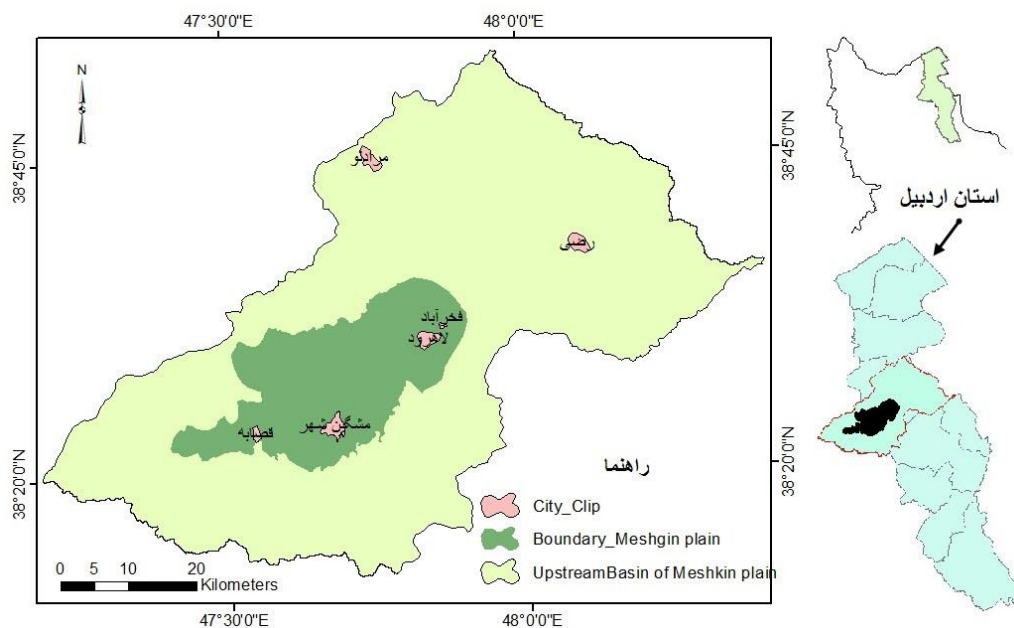
داده‌های عمق آب و هدایت هیدرولیک از پایگاه داده‌های ۲۲ حلقه چاه مشاهداتی دشت مورد مطالعه به دست آمد. برای تهیه مقادیر هدایت هیدرولیک، نیاز به استفاده از روش‌های زمین‌آماری در مورد نقشه‌های کمی برای توصیف ساختار مکانی این متغیرهای منطقه‌ای ضروری بود. روش کریجینگ معمولی (Journel & Huijbregts, 1978)، (Bachmaier & Backes, 2008) برای درون‌یابی و برون‌یابی داده‌ها در حوزه منطقه اتخاذ شد و فرض بر این بود که متغیرها به‌طور نرمال توزیع می‌شوند. نقشه خطوط کنتور از برآوردهای کریجینگ بر اساس الگوی شبکه ۵۰ × ۵۰ متر تولید شد.

در ابتدای مدل‌سازی از یک مدل مفهومی با ورود لایه‌های GIS از جمله، لایه مرز آبخوان با بخش‌های ورودی و خروجی به محدوده، لایه تغذیه، هدایت هیدرولیکی، چاه‌های مشاهداتی و بهره‌برداری استفاده شد. پس از اجرای مدل MODFLOW، برای کالیبراسیون در شرایط پایدار، از آمار ۲۱ چاه پایشی و مشاهداتی استفاده شد. سپس از مدل MODPATH برای تعیین مسیر حرکت آب‌های زیرزمینی و نیز آلاینده‌های داخل آن‌ها استفاده شد تا مناطق گیرش هر چاه تعیین گردد.

مسیر آلاینده‌ها از مبدأ به سمت گیرنده است که شامل مناطق اشباع و غیراشباع می‌شود. ولی در این مطالعه، زمان حرکت آلاینده‌ها فقط در منطقه اشباع به‌عنوان منطقه گیرش نشان داده‌شده است. در این تحلیل از مسیر نفوذ عمودی استفاده‌نشده است. بسته به ضخامت و ماهیت ذاتی مواد منطقه غیراشباع، زمان حرکت واقعی از مبدأ به سمت گیرنده، بیشتر از زمان شبیه‌سازی شده بود. هدف در اینجا مشخص کردن مناطق گیرش و منشأ رسیدن آب به چاه بوده، بنابراین شرایط جریان حالت پایدار برای مدل منطقه‌ای در نظر گرفته شد و فرض شد یک مدل ردیابی ذرات برای این مطالعه کافی است (Bakhtiari, 2015). تحلیل حساسیت^۸ برای این شاخص در جهت به کمیت درآوردن عدم قطعیت‌های موجود در مدل واسنجی شده انجام گرفت. تحلیل حساسیت جزء مراحل اساسی مدل‌سازی بوده که به‌وسیله تغییر در پارامترهای مدل (مانند هدایت هیدرولیکی افقی و عمودی، ضریب ذخیره، آبدهی ویژه، تغذیه) و بررسی تأثیر این تغییر بر خروجی مدل، انجام گردید.

دریای آزاد در جنوب شرقی دشت و کمترین ارتفاع در خروجی دشت در شمال غربی دشت مشگین قرار دارد. منابع تأمین آب زیرزمینی دشت از رودخانه‌های قره‌سو که از جنوب شرقی، اهر چای که از جنوب غربی و خیابو (مشگین) چای که از جنوب وارد دشت می‌شود اشاره کرد. بر اساس داده‌های ایستگاه‌های آبیاری مشگین، ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۹ میزان متوسط سالیانه بارش ۲۸۴ میلی‌متر است. با توجه به اطلاعات هواشناسی و بر اساس روش اقلیم‌نمای آمبرژه، اقلیم منطقه نیمه‌خشک سرد تعیین شد. بر اساس اطلاعات ژئوفیزیکی و حفاری‌های اکتشافی در منطقه، آبخوان دشت مشگین شهر از نوع آزاد است. جهت عمومی جریان آب زیرزمینی در آبخوان از سمت جنوب به شمال بوده و به طور کلی شیب هیدرولیکی در بخش مرکزی دشت نسبت به قسمت‌های شرقی و غربی دشت بیشتر است. همچنین عمق آب زیرزمینی به‌طور کلی از جنوب به سمت شمال دشت کمتر می‌شود. بخش اعظم دشت را آبرفت‌های قدیمی تشکیل می‌دهند که به‌صورت تراس‌های قدیمی نمایان هستند. حداکثر ضخامت این آبخوان آبرفتی در مرکز دشت به سمت جنوب، حدود ۸۰ متر و متوسط آن ۳۰ متر است که به‌طرف حاشیه دشت تا ۱۰ متر کاهش می‌یابد. مواد اصلی تشکیل‌دهنده آبخوان شامل شن، ماسه و سیلت و رس و در دامنه‌ها، ذرات تشکیل‌دهنده آن‌ها بیشتر دانه‌درشت هستند و با حرکت به مرکز دشت دانه ریزتر می‌شوند. متوسط ضریب ذخیره آبخوان ۴ درصد و حداکثر و حداقل قابلیت انتقال آبخوان به ترتیب ۵۰۰ و ۳۰ مترمربع بر روز ذخیره دشت برآورد شده است (Saadati et al., 2009; Gudari, 2011).

آزمایشگاهی و میدانی بوده که در معرض خطاهای اندازه‌گیری می‌باشد. توسعه مدل‌های ادراکی و مفهومی ذاتاً کیفی هستند و تعریف شرایط مرزی و ناهمگونی‌های آبخوان همه در معرض عدم قطعیت‌ها هستند. پهنه‌بندی داده‌های مکانی با استفاده از GIS نیز در معرض عدم اطمینان قرار دارد به‌طوری‌که درون‌یابی و برون‌یابی داده‌های منطقه‌ای با استفاده از زمین‌آمار، دست‌کاری نقشه‌ها با وضوح مکانی مختلف، تبدیل داده‌ها از فرمت برداری به فرمت رستری نتایج مختلفی را در پی داشته باشد (Nobre, 2007). یکی از روش‌های آزمایش عملکرد مدل توسعه‌یافته، مقایسه نتایج مدل با داده‌های کیفیت آب‌های زیرزمینی است. متأسفانه، اطلاعات مربوط به کیفیت آب به پارامترهای ساده‌ای مانند ترکیبات اصلی یونی محدود می‌شود. شاخص کیفی، توسط دو پارامتر نترات و کلراید، مطابق پیشنهاد ملا و کالین (Melloul & Collin, 1998; Bear & Cheng, 2010)، اعتبارسنجی شد. کلرید نشان‌دهنده نفوذ آب‌شور، جریان برگشتی از آب آبیاری و همچنین آلودگی ناشی از زباله و فاضلاب است. علاوه بر این، آبراهه‌های آلوده و دریاچه‌هایی در داخل دشت به دلیل سرعت بالای تبخیر نیز برای آبیاری اراضی استفاده می‌شود. بنابراین، اکثر این آب و پساب‌ها نشان‌دهنده خطر شور شدن آب‌های زیرزمینی هستند. نترات عمده‌تأ حاصل از پساب شهری و شیوه‌های کشاورزی با استفاده از کودهای نیترا، است. این تحقیق در آبخوان دشت مشگین شهر با مساحت تقریبی ۶۱۴ کیلومتر مربع انجام گرفت. مساحت کل حوزه آبخیز بالادست آن به همراه دشت حدود ۲۳/۲۵۹۶ کیلومتر مربع است. قله سبلان با ارتفاع ۴۸۱۱ متر از سطح

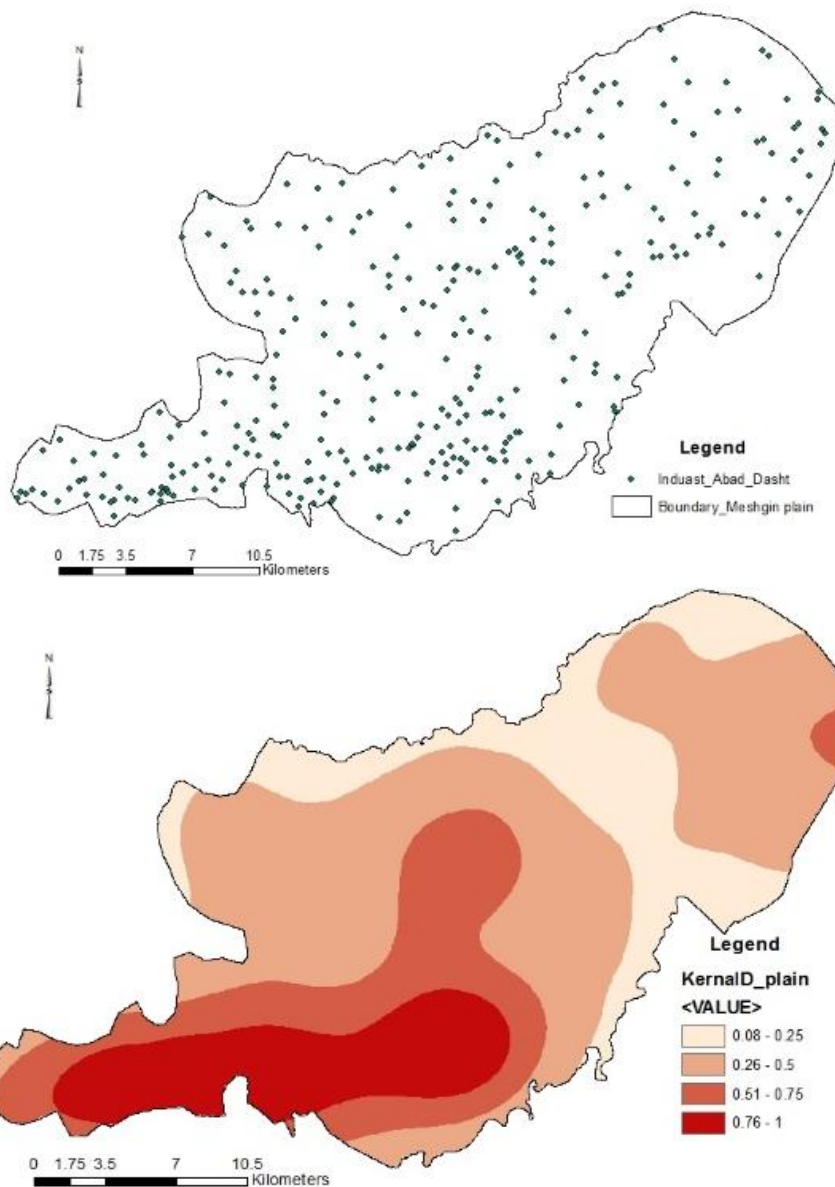


شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه دشت مشگین شهر

نتایج و بحث

پهنه‌بندی شاخص منابع آلاینده نقطه‌ای بر اساس برآورد پارامتر تراکم و منطقه بندی آن در حریم رودخانه‌ها در دشت مورد مطالعه به دست آمد. تراکم آلاینده‌های نقطه‌ای از روش کرنال در محیط GIS به دست آمد. مقدار این پارامتر در منطقه از صفر تا ۰/۹۹۸ مورد در کیلومتر مربع متغیر بود و بیشترین مقدار تراکم در جنوب و غرب دشت در اطراف شهرهای مشگین و قصابه بود که به دلیل صنعتی نبودن شهرستان مشگین تراکم کمی محسوب می‌شود. در شکل ۵ نقشه‌های تراکم، وزن هر منبع و خروجی شاخص PPSI ارائه شده است.

بر اساس نقشه‌های موجود عمق آب زیرزمینی در مناطق جنوبی دشت مشگین شهر (اراضی شمالی روستاهای سارباغلا، جعفرآباد، بالوجه میرک و عور) حدود ۱۳۵ متر، در غرب دشت (اراضی روستای هیق) حدود ۴۰ متر، در شرق دشت (اراضی روستاهای چیقان، دده بیگلوو کنگرلو حدود ۲۰ متر و در نواحی خروجی آب زیرزمینی (روستای تنیق و هلی) و همچنین نواحی مرکزی دشت (اراضی مقاتلوکندی، پاشالو، علی محمد لو و باریس) کمتر از ۲۰ متر است. موقعیت منطقه، زیرحوضه‌ها و شهرها در شکل ۱ مشخص شده است.



شکل ۲. تراکم (تعداد در کیلومتر مربع) منابع آلاینده به روش کرنال (پایین)، نقشه نقاط آلاینده در سطح دشت (بالا)

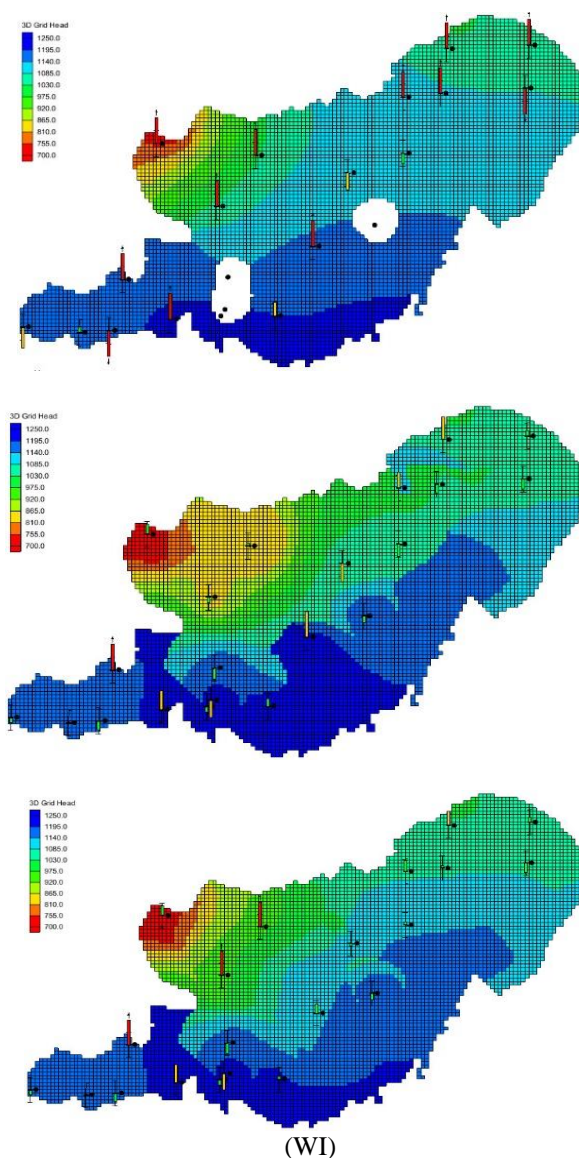
جدول ۲.۲ اجزا و مقادیر بیان دشت مشگین شهر بر حسب مترمکعب در روز

| اجزاء بیلان | ورودی (مترمکعب) | ورودی (مترمکعب) |
|-------------------|-----------------|-----------------|
| رودخانه | ۲۰۷۹۶۹ | -۱۱۲۳۴۷ |
| چاه ها | - | -۱۲۶۴۵۹ |
| تغذیه | ۱۴۵۹۲۶ | - |
| جریان‌های مرزی آب | ۸۵۶۲۴۹ | -۱۱۰۵۸۹۱ |
| زیرزمینی | | |
| مجموع | ۱۲۴۰۸۱۴ | -۱۳۴۴۶۹۷ |
| ورودی - خروجی | ۱۰۳۸۸۳ | |

هدف واسنجی در مجاورت هر یک از چاه مشاهده‌ای می‌توان به وضعیت واسنجی پس از هر اجرای مدل پی برد. نتایج واسنجی و اعتبار سنجی مدل در شکل ۳ ارائه شده است. برای هر چاه مقدار اختلاف شبیه سازی با مشاهداتی با ۳ رنگ قرمز (اختلاف بیش از ۳ متر)، رنگ زرد (اختلاف بیش از ۱ متر)، و رنگ سبز (اختلاف کمتر از ۱ متر) نمایش داده شده است. در اجرای اولیه مدل همان‌طور که در شکل ۳ مشخص است، ۱۲ چاه دارای انترفاز بالای ۳ متر اختلاف با مقادیر مشاهده‌ای را داشتند که در مرحله بعد از واسنجی به ۱ چاه کاهش می‌یابد. ولی در مرحله اعتبار سنجی تعداد چاه‌های دارای اختلاف بیش از سه متر به ۳ عدد می‌رسد که البته بازم در این مرحله خطای کم محسوب شده و قابل قبول می باشد. آزمون واسنجی مدل با پارامترهای آماری ریشه مربع میانگین خطا^{۱۱}، میانگین خطای مطلق^{۱۲} و میانگین خطا بررسی شد که این پارامترها به ترتیب برابر ۱۳،۶۲، ۱۲،۹۱ و -۰،۵۴ برآورد شد. مطابق نتایج به‌دست‌آمده از بیلان مدل‌سازی عددی آب زیرزمینی، کل آب ورودی به دشت مشگین برابر ۱۲۴۰۸۱۴ مترمکعب در روز و کل آب خروجی از دشت برابر ۱۳۴۴۶۹۷ مترمکعب در روز هست، به‌طوری‌که هرروز ۱۰۳۸۸۳ مترمکعب در روز و حدود ۳۸ میلیون مترمکعب در سال، بیلان منفی یا کاهش مخزن در دشت اتفاق می‌افتد. اجزای بیلان آب زیرزمینی مدل سازی شده در جدول ۲ ارائه شده است.

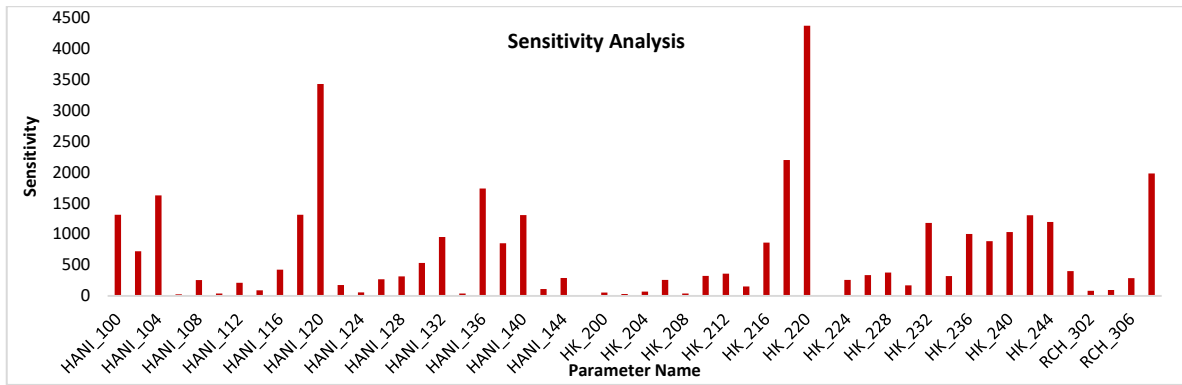
مقدار خطای ریشه مربع میانگین خطا (RMSE) در مرحله اجرای اولیه برابر ۸۴،۶۵، در مرحله واسنجی برابر ۱۳،۶۲ و در مرحله اعتبار سنجی به ۱۸،۸۱ رسید. مطابق نتایج تحلیل حساسیت در مدل واسنجی شده آبخوان محدوده مورد مطالعه، با تعیین عدم قطعیت داده‌های ورودی، سه پارامتر هدایت هیدرولیکی، تغذیه و ناهمسانگردی^{۱۳} در دامنه قابل قبول و مشخص توسط بسته PEST تغییر داده شد. حساس‌ترین پارامتر در این مدل‌سازی هدایت هیدرولیکی و سپس تغذیه بود بطوریکه کمترین تغییر در آن‌ها موجب بیشترین تغییر در واسنجی شد نتایج تحلیل حساسیت در شکل ۴ ارائه شده است. پس از اعتبار سنجی مدل عددی برای دشت مشگین،

به‌منظور برآورد ناحیه گیرش چاه‌ها از مدلی نیمه‌تحلیلی MODPATH استفاده شد که از طریق مسیرهای جریان سه‌بعدی مدل MODFLOW، ردیابی ذرات آلاینده را انجام می‌دهد (Pollock, 2012). ناحیه گیرش مدل‌سازی شده برای اکثر چاه‌ها دارای شکل کشیده با طول زیاد است که با آنچه از روش‌های دیگر تعیین حریم چاه‌ها مانند روش شعاع ثابت به‌دست‌آمده، تفاوت بسیار زیادی دارد. این موضوع اهمیت استفاده از مدل‌های عددی برای برآورد گسترش ناحیه گیرش چاه‌ها را نمایان می‌سازد.



شکل ۳. نتایج ران اولیه (بالا) واسنجی (وسط) و اعتبارسنجی (پایین) تراز آب محاسبه‌ای و مشاهده‌ای با نمودار جعبه‌ای رنگی (WI)

پس از اجرای مدل عددی MODFLOW داده‌ها به دودسته برای انجام واسنجی و اعتبار سنجی تقسیم شد. دو روش واسنجی خودکار و واسنجی دستی (سعی و خطا) به کار رفت. از مزایای انترفاز GMS در نمایش بصری میزان خطا در اختلاف پار هیدرولیکی محاسبه‌شده و شبیه‌سازی شده است که در شکل ۳ نمایش داده شده است، بدین‌صورت که با رسم یک



شکل ۴. آنالیز حساسیت سه پارامتر تغذیه‌ای (RCH)، هدایت هیدرولیکی (HK) و ناهمسانگردی (HANI)

چاه‌ها، در شکل ۴ نشان داده شده است، بر اساس جدول ۳، برای زمان‌های ۵ تا ۱۰۰ سال و برای شرایط پایدار (گیرش داخلی) ساخته شده است. در ضمن این شاخص نشانگر جزئی از پتانسیل تضعیف و میرش طبیعی است، با اینکه پارامترهای ژئوشیمیایی و فرآیندهای میکروبی اندازه‌گیری نشده‌اند ولی طول مسیر یک عامل کنترلی مهم در تعیین زمان در دسترس، برای فرآیندهای کاهش آلودگی آلاینده‌ها است (Nobre.2007).

در نتایج حاصل از شاخص آسیب‌پذیری نهایی مناطق با تراکم منابع آلاینده بالا هنگامی که نزدیک به چاه‌های بهره‌برداری قرار بگیرند، بالاترین مقادیر شاخص خطر را نشان می‌دهند. در دشت مشگین مقدار حداکثر این شاخص ۹/۹ را نشان داد که نشان از آسیب‌پذیری کم این منطقه است. باید مناطق داخل پهنه‌های گیرش چاه که دارای مقدار بالاتر شاخص هستند، برای تحقیقات بیشتر در برنامه‌های مدیریتی آب‌های زیرزمینی در اولویت قرار گیرند. نتایج این شاخص برای دشت مشگین در شکل ۴ نشان داده شده است. بیشترین مقدار

در بعضی از چاه‌ها گستردگی زیاد ناحیه گیرش مشاهده می‌شود، به طوری که مطابق جدول ۳، طول بعضی از آن‌ها به ۲ کیلومتر می‌رسد. توانایی روش ارائه شده در این تحقیق باعث می‌شود که ضعف پیش‌بینی اثر پخش آلودگی در مناطق آسیب‌پذیر آبخوان بر آلودگی منابع ارزشمند آب مانند چاه‌های آب شرب و کشاورزی در روش‌های ساده آسیب‌پذیری، رفع گردد. شناسایی این مناطق برای مدیریت منابع مختلف آب زیرزمینی و همچنین مطالعات آمایش سرزمین و تعیین حریم منابع آب زیرزمینی مانند چاه‌ها، دارای اهمیت زیاد است. در تجزیه و تحلیل حساسیت پارامترهای مختلف و مقایسه با مقادیر واقعی برای یافتن تأثیر تغییرات پارامترهای موجود در منطقه گیرش چاه، مدل برای شرایطی مختلف اجرا شد و نتایج زیر به دست می‌آید

افزایش دبی پمپاژ طول و عرض منطقه گیرش را افزایش می‌دهد. افزایش ضریب هدایت هیدرولیک طول منطقه گیرش را افزایش و عرض آن را کاهش می‌دهد. پهنه‌بندی شاخص گیرش

جدول ۳. پارامترهای مهم پهنه‌های گیرش چاه‌های دشت مشگین شهر

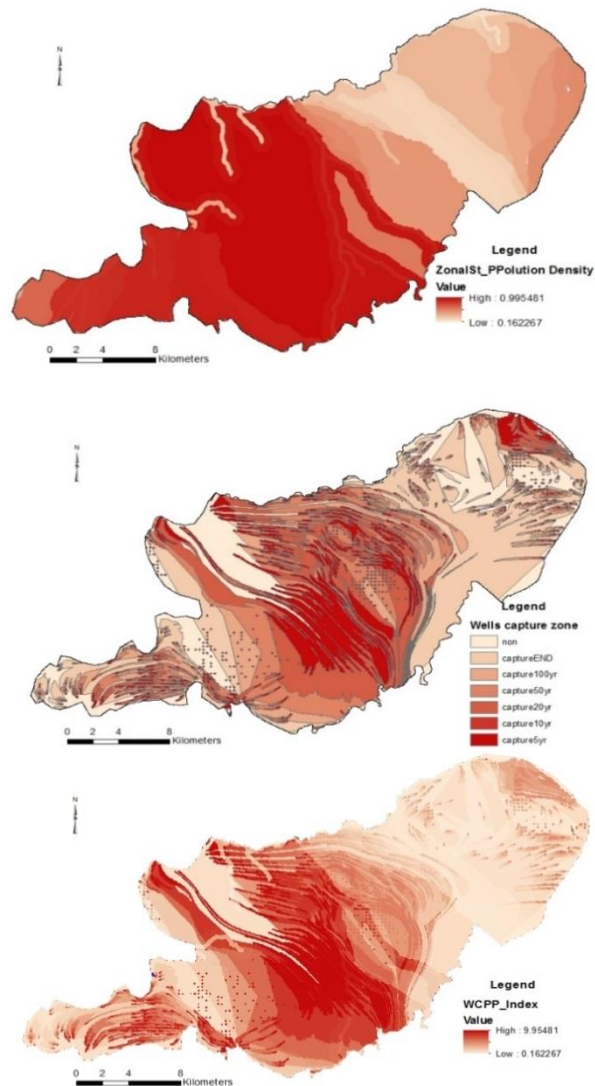
| پهنه‌های زمانی (سال) | متوسط طول مسیر گیرش km | طول کل مسیر چاه - km | کل سطح گیرش - km ² | حداکثر زمان مسیر گیرش چاه‌ها - (روز) | وزن اثر |
|----------------------------|------------------------|----------------------|-------------------------------|--------------------------------------|---------|
| 5 | 1.49 | 485.15 | 103.35 | 1825 | 10 |
| 10 | 0.031 | 9.93 | 0.02 | 3650 | 9 |
| 20 | 1.94 | 633.54 | 114.97 | 7300 | 8 |
| 50 | 1.59 | 520.18 | 86.07 | 18250 | 6 |
| 100 | 1.14 | 373.15 | 57.11 | 36500 | 4 |
| گیرش نهایی Non (بدون گیرش) | 1.60 | 521.07 | 155.15 | - | 2 |
| | - | - | 97.58 | - | 1 |

نیترات و کلراید در آب زیرزمینی در ۲۳ چاه مشاهداتی مقایسه شد. مقایسه مکانی این پارامترها با شاخص به دست آمده در شکل ۵ ارائه شده است. بدین منظور ضریب همبستگی بین رسترهای شاخص ریسک با رستر نیترات و کلراید تعیین می شود و در گام بعدی رابطه بین آن ها استخراج می گردد. برای تعیین ضریب همبستگی و کوواریانس بین رسترهای موجود و همچنین برخی از پارامترهای آماری نظیر مقادیر حداقل، حداکثر، میانگین و انحراف استاندارد برای هر رستر از تحلیل گر آماری چند متغیره در محیط Arc GIS محسوب می شود، استفاده شد (Gudari, 2011). در مرحله بعد برای هر ناحیه با استفاده از مدل رگرسیون خطی و با توجه به پارامترهای آماری از قبیل میانگین، واریانس و کوواریانس مطابق جدول ۴ و رابطه ۳ ارائه شده است که نشان دهنده وجود رابطه معنی دار بین شاخص ریسک ارائه شده و آلاینده های نیترات و کلر موجود در آبخوان است. نتایج نشان می دهد که رابطه خطی برای هر دو مورد وجود دارد، بطوریکه ضریب همبستگی پیرسون برابر ۰/۵۸ برای نیترات و ۰/۴۹ برای کلراید است. رابطه خطی مقایسه آن در رابطه ۳ و متغیرهای آن در جدول ۴ ارائه شده است.

$$Y=a+bx \quad (3)$$

به منظور صحت سنجی نتایج شاخص ارائه شده با نقشه های نیترات و کلر سه لایه در کنار هم ارائه شده است. مقایسه آماری که در جدول ۴ آمده نشان از همبستگی ۰/۵۸ برای چندین هزار سلول منطقه دارد که قابل قبول است. مقایسه بصری بخش های مختلف منطقه مورد مطالعه در شکل ۸ نیز نشان می دهد که در مرکز دشت از جنوب به شمال هر سه لایه در محدوده حداکثر آلودگی قرار دارد.

تراکم آلاینده هادر جنوب غربی دشت در اطراف شهرهای مهم منطقه مثل مشگین شهر و قصابه قرار داشت. در ۱۶ درصد از سطح کل دشت، هیچ گونه گیرش آلودگی توسط چاهها وجود ندارد. گیرش نهایی بیشترین سهم و گیرش ۱۰ ساله، کمترین سهم را در آلودگی چاهها دارد. نتایج شاخص نهایی نشان داد کل سطح دشت در محدوده ریسک کم قرار داشته که حدود ۵۰ درصد از سطح دشت مشگین در محدوده آسیب پذیری ناچیز قرار داشتند.



شکل ۵ نقشه پهنه های گیرش چاهها (وسط)، تراکم نقاط آلاینده با روش کرنال و زون بندی شده بر اساس حریم رودخانه ها (بالا) و لایه خروجی شاخص نهایی ریسک آلودگی آب زیرزمینی (WCPPPI) (پایین)

به منظور انجام صحت سنجی شاخص ارائه شده، تجزیه و تحلیل هایی آماری چند متغیره^۴ در محیط GIS انجام شد. دو ماده آلاینده بالقوه به عنوان پارامترهای شاخص برای ردیابی کیفیت آب انتخاب شد. در مناطق روستایی و کشاورزی، نیترات حاصل از کود کشاورزی و فاضلاب در نظر گرفته شد. از کلر برای مکان های صنعتی و تجاری استفاده شد (Powell et al., 2003), (Silverman, 2018; Staboultzidis et al., 2017). شاخص ریسک و آسیب پذیری آب زیرزمینی با غلظت

جدول ۴. توصیف آماری و رابطه بین شاخص ریسک و نیترات در مناطق رستری دشت مشگین شهر

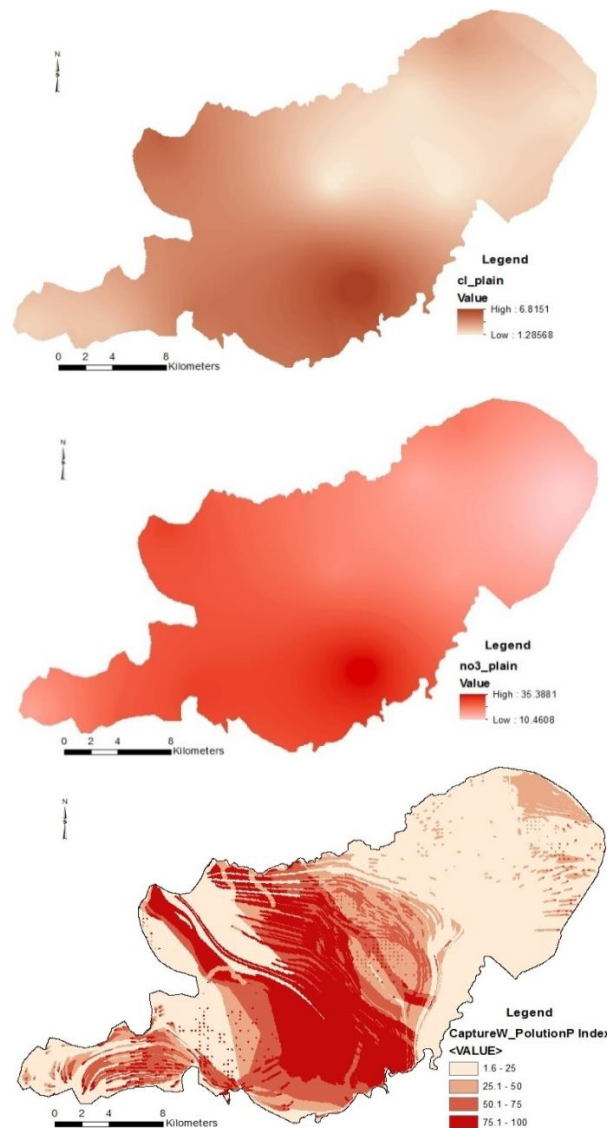
| لایه | حداقل | حداکثر | میانگین | انحراف معیار | کوواریانس همبستگی | b | a |
|---------------|-------|--------|---------|--------------|-------------------|-------|------|
| (x) کلراید | 1.28 | 6.81 | 3.25 | 1.29 | 0.49 8.23 | 13.45 | 9.46 |
| (x) نیترات | 10.46 | 35.39 | 22.19 | 5.26 | 0.58 40.32 | 19.91 | 1.67 |
| (y) شاخص ریسک | 1.62 | 99.55 | 38.7 | 31.7 | - - | | |

ویژگی اصلی: سمیت، تجزیه‌پذیری، تحرک و تعداد منابع نقطه‌ای در ارزش‌های زبانی ارزیابی‌شده و بارزهای فازی نشان داده‌شده است، ولی در تحقیق حاضر از تراکم منابع نقطه‌ای بدون وزن اثر آلاینده‌گی آنها استفاده‌شده است که می‌تواند در تحقیقات آتی تکمیل گردد. در تحقیقی که در دشت اردبیل با تلفیق سه شاخص برای ارزیابی ریسک انجام شده بود، اثر تراکم در محدوده اثر حوضه‌ها محاسبه شده بود که در این تحقیق اصلاح و در محدوده اثر بافر رودخانه‌ها برآورد شد (Saadati et al., 2020).

نتیجه‌گیری

برآورد پهنه‌بندی ریسک آب زیرزمینی، ابزاری برای تخصیص کاربری‌های اراضی مناسب و همچنین برنامه‌های مدیریت منابع آب در سراسر جهان است. این تحقیق، با استفاده از یک روش تلفیقی، ارزیابی ریسک آلودگی آب زیرزمینی برای دشت مشگین ارانه داده است که شامل یک روش تحلیل مکانی برای پهنه‌بندی تراکم منابع آلاینده و مدل‌سازی عددی برای تعیین منطقه گیرش آلودگی چاه‌ها است. تلفیق این پارامترها، در محیط GIS انجام شد که مکانیسمی برای پهنه‌بندی ریسک و شناسایی مناطقی در محدوده گیرش آلودگی را فراهم می‌کند که باید از نظر نظارت بر آب‌های زیرزمینی و مدیریت استفاده از آنها موردتوجه قرار گیرند. این روش با توجه به در نظر گرفتن عوامل متعدد در مقایسه با شاخص‌های تک پارامتری، دقت بالاتری دارد. در بیشتر سطوح دشت مشگین، مقدار این شاخص در محدوده طبقه حداقل بود. مطابق این شاخص، دشت مشگین در محدوده آسیب‌پذیری و خطر کم قرار دارد. شاخص آسیب‌پذیری ارائه‌شده در ۸۰ درصد نمونه‌ها، زیر ۵ است. ولی مقادیر حداکثر این شاخص در مناطق خاص پرجمعیت، حاشیه جاده‌ها و شهرک‌های صنعتی بود که نشان‌دهنده کیفیت پایین آب‌های زیرزمینی است و در این مناطق غلظت نیترات آب زیرزمینی در محدوده حداکثر ۳۵ (ppm) و غلظت کلراید در محدوده حداکثر ۷ (ppm) بود. این روش منجر به یک رویکرد دقیق و مقرون‌به‌صرفه برای محافظت از منابع آب آشامیدنی و کشاورزی و دستیابی به آب زیرزمینی پایدار برای نسل‌های آینده خواهد شد. این مطالعه همچنین می‌تواند به‌عنوان ابزاری برای افزایش آگاهی عمومی در مورد مسائل آب زیرزمینی در کشورهای در حال توسعه مورد استفاده قرار گیرد.

پیشنهاد می‌شود که برای تحقیقات آتی در ارزیابی شاخص منبع آلاینده، عواملی مانند باکتری و میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا، سایر آلاینده‌های آلی و متیل ترسیو بوتیل اتر نیز مورد بررسی قرار گیرد. پیشنهاد می‌شود از یک روش سلسله مراتبی فازی با در نظر گرفتن ویژگی‌هایی از جمله، سمیت، تجزیه‌پذیری، تحرک و تعداد منابع برای ارزیابی دقیق‌تر شاخص منبع بالقوه آلاینده استفاده شود.



شکل ۶ وضعیت شاخص (WCPPD) (پایین) کلر آب زیرزمینی (بالا) نیترات آب زیرزمینی (وسط) در دشت مشگین

با مقایسه و تحلیل نتایج تحقیق حاضر با تحقیق‌های مرتبط، به‌منظور بحث و بررسی نکات ضعف و قدرت این تحقیق، مشخص شد که در تحقیقی که توسط جودوی و خزاعی (Jodvi & Khazaei, 2015) در محدوده شهرستان فیروزه در استان خراسان رضوی انجام شد، شاخص منابع نقطه‌ای و غیر نقطه‌ای آلاینده‌ای در نظر گرفته نشده است. ورال و کولپین (Worrall & Kolpin, 2003) نشان می‌دهند که تعامل بین نوع آلاینده و محیط انتقال، مهمتر از در نظر گرفتن این دو عامل به‌طور جداگانه است و نتیجه می‌گیرند که آسیب‌پذیری آبخوان را نمی‌توان به‌طور مستقل از آلاینده موردنظر، محاسبه کرد که مؤید تلفیق چند شاخص است. در تحقیقی که توسط نوبر و همکاران (Nobre, 2007) برای ارزیابی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی یک سفره آبخوان ساحلی در شمال شرقی برزیل، بر اساس یک روش تلفیقی با ۳ عامل انجام شد، چهار

Reference:

- Abbasi, A., Taghavi, L., & Sarai Tabrizi, M. (2021). Qualitative Zoning of Groundwater to Assessment Suitable Drinking Water Using GIS Software in Mohammad Shahr, Meshkinshahr, and Mahdasht in Alborz Province. *Anthropogenic Pollution*, 5(1), 138-149.
- Aller, L., Lehr, J. H., Petty, R. & Bennett, T. (1987). Drastic: a standardized system to evaluate ground water pollution potential using hydrogeologic settings. *Journal of Geological Society of India*, 29(1), pp 622.
- Bachmaier, M., & Backes, M. (2008). Variogram or semivariogram? Understanding the variances in a variogram. *Precision Agriculture*, 9(3), 173-175.
- Bakhtiari Enayat, B., Malekian, A., & Selajqa, A. (2015). Assessment of groundwater vulnerability using combined methods in modified stick, logistic regression and drastic hierarchical analysis (Hashtgerd plain). *Iran Water and Soil Research (Agricultural Sciences of Iran)*, 47(2), 269-279. [In Persian]
- Bear, J., & Cheng, A. H.-D. (2010). *Modeling groundwater flow and contaminant transport* (Vol. 23): Springer.
- Chowdhury, S.H., Kehew, A.E., Passero, R.N., (2003). Correlation between nitrate contamination and groundwater pollution potential. *Ground Water*, 41 (6), 735–745.
- Connell, L.D., Daele, G., (2003). A quantitative approach to aquifer vulnerability mapping. *Journal of Hydrology*, 276(1-4), 71–88.
- Elzain, H. E., Chung, S. Y., Venkatramanan, S., Selvam, S., Ahemd, H. A., Seo, Y. K., . . . Yassin, M. A. (2022). Novel machine learning algorithms to predict the groundwater vulnerability index to nitrate pollution at two levels of modeling. *Chemosphere*, 13 (1), 71-76.
- ESRI (Environmental Systems Research Institute Inc). (2018). *Understanding GIS the ArcInfo Method*: Redland, California. ESRI Press.
- Farhadi, H., Fataei, E., & Kharrat Sadeghi, M. (2020). The Relationship between Nitrate Distribution in Groundwater and Agricultural Landuse (Case study: Ardabil Plain, Iran). *Anthropogenic Pollution*, 4(1), 50-56.
- Ghadir Zamani, M., Moridi, A., & Yazdi, J. (2020). Determining the Groundwater Quality Protection Zone by Considering the Vulnerability of Aquifer, *Iran-Water Resources Research*, 16(1):1-16. [In Persian]
- Ghomi Avili, F., & Makaremi, M. (2020). Predicting Model of Arsenic Transport and Transformation in Soil Columns and Ground Water Contamination (Case study: Gorgan Plain, Iran). *Anthropogenic Pollution*, 4(1), 57-64.
- Gudari, M. (2011). *Mathematical models of groundwater, GMS model applied training. Volume 1. Simay-e-Danesh-e-Tehran. 270 PP.* [In Persian]
- Journel, A.G., Huijbregts, C.J., (1978). *Mining Geostatistics*. New York: Academic Press.
- Jodvi, A., & Khazaei, P. (2015). Presenting a new method for assessing the risk of contamination of underground water sources based on geographic information system and numerical modeling. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 10(2), 241-251. [In Persian]
- Johnston, K., Ver Hoef, J. M., Krivoruchko, K., & Lucas, N. (2001). *Using ArcGIS geostatistical analyst* (Vol. 380): Esri Redlands.
- Meshgin Regional Water Company, (2017), *Semi-detailed studies of Meshgin plain watershed and water year balance period 1986-2017, volume five of Meshgin plain underground water table model*. Quds Niro Consulting Engineers Co. 182 pp. [In Persian]
- Nadiri AA, Akbari E, Abbas Novinpour E, Gharekhani M. 2020. Assessment of Khoy Aquifer Vulnerability Using a Combined Method. *Water and Irrigation Management*.9 (2):251-62.
- McDonald, M.C., Harbaugh, A.W., (1996). *MODFLOW-96-Use's Documentation for MODFLOW-96. An Update to the U.S. Geological Survey Modular Three-dimensional Finite Difference Groundwater Flow Model*. Open-File Report: 96-485.
- Melloul, A.J., Collin, M., (1998). A proposed index for aquifer water quality assessment: the case of Israel's Sharon region. *Journal of Environmental Management*, 54(2), 131–142.
- Mitra, A., & Chowdhury, B. (2019). Identifying Anthropogenic Factors of Groundwater Pollution through Students' Opinion in Rural West Bengal. *Anthropogenic Pollution*, 3(2), 49-59.
- Mohtar, W. H. M. W., Maulud, K. N. A., Muhammad, N. S., Sharil, S., & Yaseen, Z. M. (2019). Spatial and temporal risk quotient-based river assessment for water resources management. *Environmental Pollution*, 248, 133-144.
- Nobre, R.C.M., Nobre, M.M.M., (2004). Natural attenuation of chlorinated organics in a shallow sand aquifer. *Journal of Hazardous Materials*, 110(1-3), 129–137.
- Nobre R.C.M., Rotunno Filho O.C., Mansur W.J., Nobre M.M.M., Cosenza C.A.N. (2007). Groundwater vulnerability and risk mapping using GIS, modeling and a fuzzy logic tool. *Journal of Contaminant Hydrology*, 94(3-4), 277–292.

- Pollock, D.W., (1989). MODPATH—a computer program to complete and display pathlines using results from MODFLOW. Open-File Report. U.S. Geological Survey, Reston, VA, pp. 89–381.
- Powell, K.L., Taylor, R.G., Cronin, A.A., Barrett, M.H., Pedley, S., Sellwood, J., Trowsdale, S.A., Lerner, D.N., (2003). Microbial contamination of two urban sandstone aquifers in the UK. *Water Research*, 37(2), 339–352.
- Rahmati, H., farshchi, P., & Pournoori, M. (2022). Zoning of the southern coastal region of the IRAN based on Pollution of water resources (Case study: Minoos Island). *Anthropogenic Pollution*, 6(1), 100-108.
- Saadati, H. (2015). Evaluation of paleoclimatic changes with the help of chlorine chemical tracer in the sediments of the unsaturated region of Ardabil plain. *Watershed Engineering and Management*, 8(3), 310-321. [In Persian]
- Saadati, H., Sharifi, F., Mahdavi, M., Ahmadi, H., & Mohseni Saravi, M. (2009). Determining Origin of groundwater recharge resources, drought and wet periods by isotopic tracers in Hashtgerd plain. *Journal of Range and Watershedmanagement*, 62(1),
- Saadati, H., Malekian, A., & moghaddamnia, A. (2020). Assessment of Vulnerability Index and Risk Zoning in Ardabil Plain. *Water and Irrigation Management*, 10(1), 157-171. doi:10.22059/jwim.2020.298424.770
- Samadi, J. (2022). Modelling hydrogeological parameters to assess groundwater pollution and vulnerability in Kashan aquifer: novel calibration-validation of multivariate statistical methods and human health risk considerations. *Environmental Research*, 21(1), 113028.
- Silverman, B. W. (2018). *Density estimation for statistics and data analysis*: Routledge.
- Staboultzidis, A.-G., Dokou, Z., & Karatzas, G. P. (2017). Capture zone delineation and protection area mapping in the aquifer of Agia, Crete, Greece. *Environmental Processes*, 4(1), 95-112.
- Worrall, F., Kolpin, D.W., (2003). Direct assessment of groundwater vulnerability from single observations of multiple contaminants. *Water Resources Research*, 39 (12), 1345–1352.

یادداشت‌ها

- ¹ Nobre
- ² Wells Capture and Pollution Point Index (WCPPI)
- ³ Well Capture Index (WCI)
- ⁴ Kernal Density
- ⁵ Point Pollution Source Index (PPSI)
- ⁶ Zonal Statistics
- ⁷ Hydrolic Conductivity (HK)
- ⁸ Sensitivity analysis
- ⁹ Capture zone
- ¹⁰ PPSI
- ¹¹ rootmeansquare error (RSME)
- ¹² Mean Absolute Error (MAE)
- ¹³ anisotrasy
- ¹⁴ Multi Variate