

Journal of Water and Wastewater, Vol. 32, No. 3, pp: 94-112

Application of Aquifer Surface Recharge in the Modification of GALDIT Method to Assess the Risk of Seawater Intrusion in Qom Aquifer

F. Faal¹, H. R. Ghafouri², S. M. Ashrafi³

1. PhD. Student, Dept. of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
(Corresponding Author) faalfateme@gmail.com
2. Prof., Dept. of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
3. Assist. Prof., Dept. of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

(Received Oct. 17, 2020 Accepted Jan. 13, 2021)

To cite this article:

Faal, F., Ghafouri, H. R. Ashrafi, S. M. 2021. "Application of aquifer surface recharge in the modification of GALDIT method to assess the risk of seawater intrusion in Qom aquifer" Journal of Water and Wastewater, 32(3), 94-112. Doi: 10.22093/wwj.2020.251996.3072. (In Persian)

Abstract

A realistic understanding of aquifer vulnerability to seawater intrusion is one of the important prerequisites for coastal aquifer management. The GALDIT method is a proper tool that, despite considering the qualitative, hydrogeological, and geological characteristics of the aquifer, has not considered the role of aquifer surface recharge. The Qom-Kahak study area is a part of the salt lake catchment, which is located in the arid and desert part of central Iran. Due to the shortage of surface and groundwater resources in the region, some of the drinking and industrial needs of Qom city are met from water outside the study area. This study, by adding the aquifer surface recharge parameter introduces the GALDITR model to evaluate the Qom aquifer vulnerability to saltwater intrusion from the Salt Lake. Then, the analytical hierarchy process method is used to review the weight of GALDITR model parameters according to the characteristics of the studied aquifer. Based on the obtained results, the high rank of the aquifer surface recharge parameter in a large part of the aquifer led to an increase in the area of moderate vulnerability of the GALDITR model compared to the GALDIT method. In the GALDITR-AHP model, the parameters of distance from the shore, groundwater level above the lake, and the impact of seawater intrusion gained more weight than other parameters, respectively. With increasing the low vulnerability area in the GALDITR-AHP model, the aquifer vulnerability near Qom city decreased. The vulnerability index of GALDITR-AHP,

GALDITR, and GALDIT models showed the highest correlation with chloride ion values at observation points, respectively. The results showed that areas with high and moderate vulnerability in the eastern part of Qom aquifer covering about 14 % of the total aquifer area are more prepared for seawater intrusion and can be considered as the expansion of seawater wedge for monitoring and optimal management of coastal aquifer.

Keywords: Saltwater Intrusion, Vulnerability Mapping, GALDIT, Aquifer Surface Recharge, AHP, Qom Aquifer.

مجله آب و فاضلاب، دوره ۳۲، شماره ۳، صفحه: ۹۴-۱۱۲

کاربرد تغذیه سطحی آبخوان در اصلاح روش GALDIT برای ارزیابی خطر پیشروی آب شور در آبخوان قم

فاطمه فعال^۱، حمیدرضا غفوری^۲، سید محمد اشرفی^۳

- ۱- دانشجوی دکترا، گروه عمران، دانشکده مهندسی عمران و معماری، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
 (نویسنده مسئول) faalfateme@gmail.com
 ۲- استاده، گروه عمران، دانشکده مهندسی عمران و معماری، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
 ۳- استادیار، گروه عمران، دانشکده مهندسی عمران و معماری، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

پذیرش ۹۹/۱۰/۲۴

(دریافت ۹۹/۷/۲۶)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام فرمایید:

فعال، ف.، غفوری، ح. ر.، اشرفی، س. م.، ۱۴۰۰، کاربرد تغذیه سطحی آبخوان در اصلاح روش GALDIT برای ارزیابی خطر پیشروی آب شور در آبخوان قم "مجله آب و فاضلاب، ۳۲(۳)، ۹۴-۱۱۲. Doi: 10.22093/wwj.2021.251996.3072

چکیده

درک واقع بینانه آسیب پذیری آبخوان نسبت به پیشروی آب شور یکی از پیش نیازهای مهم مدیریت آبخوان های ساحلی است. روش GALDIT ابزار مناسبی است که علی رغم در نظر گرفتن خصوصیات کیفی، هیدروژئولوژیکی و زمین شناسی آبخوان، نقش تغذیه سطحی آبخوان را در نظر نگرفته است. محدوده مطالعاتی قم- کهک بخشی از حوضه آبریز دریاچه نمک است که در بخش خشک و بیابانی ایران مرکزی قرار گرفته است. به علت کمبود منابع آب های سطحی و زیرزمینی منطقه، بخشی از نیازهای شرب و صنعت شهر قم از آب های خارج از این محدوده مطالعاتی تأمین می شود. در این پژوهش با افزودن پارامتر تغذیه سطحی آبخوان، روش GALDIT معرفی شد و آسیب پذیری آبخوان ساحلی قم به پیشروی آب شور دریاچه نمک ارزیابی شد. سپس با توجه به ویژگی های آبخوان مورد بررسی از روش تحلیل سلسله مراتبی برای بازبینی وزن پارامترهای مدل GALDIT استفاده شد. بر اساس نتایج به دست آمده، رتبه زیاد پارامتر تغذیه سطحی آبخوان در بخش وسیعی از آبخوان، منجر به افزایش وسعت ناحیه با آسیب پذیری متوسط مدل GALDIT نسبت به روش GALDIT شد. در مدل GALDIT-AHP، پارامترهای فاصله از خط ساحلی، تراز سطح آب زیرزمینی نسبت به سطح دریاچه و تأثیر آب شور پیشروی کرده به ترتیب وزن بیشتری از سایر پارامترها گرفتند. با افزایش وسعت ناحیه با آسیب پذیری کم در مدل GALDIT-AHP، آسیب پذیری آبخوان در حوالی شهر قم به پیشروی آب شور کاهش یافت. شاخص آسیب پذیری مدل های GALDIT-AHP، GALDIT و GALDIT به ترتیب بیشترین هم بستگی را با مقدار کلر در نقاط مشاهده ای نشان دادند. نتایج پژوهش نشان داد که نواحی با آسیب پذیری زیاد و متوسط در بخش شرقی آبخوان قم با وسعت حدود ۱۴ درصد از کل مساحت آبخوان مستعد پیشروی آب شور بوده و می توانند به عنوان محدوده گسترش آب شور برای پایش و مدیریت بهینه آبخوان ساحلی در نظر گرفته شوند.

واژه های کلیدی: پیشروی آب شور، ارزیابی آسیب پذیری، GALDIT، تغذیه سطحی آبخوان، AHP، آبخوان قم

۱- مقدمه

بسیاری از آبخوان‌های ساحلی به دلیل برداشت نامناسب و عوامل دیگر در معرض پیشروی آب شور قرار گرفته‌اند. پیشروی آب شور می‌تواند موجب کاهش کیفیت آب شیرین در دسترس شود. مدیریت و پایش کیفیت آب زیرزمینی آبخوان و محدوده اندرکنش آب شور و شیرین و بررسی تغییرات آن یکی از مهم‌ترین مسائل پیش روی مدیران و تصمیم‌گیران منابع آب به شمار می‌رود و بنابراین تعیین مناطق پرخطر از نظر پیشروی آب شور بسیار ضروری به نظر می‌رسد. بنابراین تهیه نقشه آسیب‌پذیری آبخوان می‌تواند ابزار مناسبی برای بررسی تغییرات محدوده اندرکنش آب شور و شیرین و مدیریت منابع آب زیرزمینی سواحل باشد.

روش‌های ارزیابی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی به سه گروه روش‌های آماری، شبیه‌سازی، شاخص و هم‌پوشانی تقسیم می‌شوند. در روش شاخص و هم‌پوشانی نقشه‌های پارامترهای مختلف منطقه برحسب میزان تأثیر آنها در انتقال آلاینده ترکیب می‌شوند. این روش به دلیل توصیف صریح آسیب‌پذیری، نیاز به داده کمتر و نیز استفاده آسان، یکی از محبوب‌ترین روش‌ها برای ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان محسوب می‌شود. روش GALDIT یکی از روش‌های شاخص و هم‌پوشانی است که برای ارزیابی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی به پیشروی آب شور در نواحی ساحلی توسعه یافته است. چکادی و لبوفا در سال ۲۰۰۱ این روش را برای ترسیم نقشه آسیب‌پذیری آبخوان ساحلی توسط سیستم رتبه‌بندی عددی برای ارزیابی میزان گسترش پیشروی آب شور پیشنهاد کردند (Chachadi and Lobo Ferreira, 2001, Chachadi, 2005).

این روش بر مبنای ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی (تراز سطح آب زیرزمینی، ضخامت آبخوان)، ریخت‌شناسی (فاصله از ساحل)، هیدرودینامیکی (قابلیت انتقال) و شیمیایی (تأثیر پیشروی‌های دریایی) استوار است (Hallal et al., 2019).

نقشه آسیب‌پذیری تهیه شده توسط این مدل می‌تواند ابزار مناسبی برای مدیریت منابع آب زیرزمینی ساحلی باشد. بسیاری از آبخوان‌های ساحلی در سرتاسر جهان با استفاده از مدل GALDIT بررسی شدند، مانند سیستم‌های مهم آب‌های زیرزمینی در هند (Chachadi and Lobo Ferreira, 2001, Seenipandi et al., 2019)، لبنان (Zaarour, 2017)، الجزایر (Mahrez et al., 2018, Hallal et al., 2019)، کره جنوبی

(Chang et al., 2019)، یونان (Mavriou et al., 2019) و ایتالیا (Kazakis et al., 2019). این مدل همچنین برای ارزیابی پیشروی آب شور در برخی از آبخوان‌های ساحلی کشور ایران از جمله آبخوان ساحلی ارومیه (Nakhaei et al., 2015)، آبخوان ساحلی آذرشهر (Gorgij and Moghaddam, 2017)، آبخوان قائم‌شهر-جویبار (Motevalli et al., 2018)، آبخوان دشت کاشان (Mirzavand et al., 2018)، سه آبخوان ساحلی در جنوب دریای خزر (Parizi et al., 2019) و آبخوان ساحلی قره‌سو-گرگان‌رود (Bordbar et al., 2019) استفاده شده است.

کاردان مقدم و همکاران در سال ۲۰۱۵ با مقایسه روش‌های GALDIT و DRASTIC در ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان ساحلی آستانه-کوچصفهان نشان دادند که روش GALDIT نتایج بهتری از روش DRASTIC داشته و بر مبنای آزمون پیرسون هم‌بستگی بیشتری با مجموع مواد جامد محلول^۱ دارد. مدل GALDIT برای تعیین آسیب‌پذیری آبخوان‌های ساحلی به پیشروی آب شور توسعه یافته، در حالی که مدل DRASTIC کاربرد عمومی برای همه آبخوان‌ها دارد و مناسب‌ترین مدل برای آبخوان‌های غیرساحلی است (Kardan Moghaddam et al., 2015).

بردبار و همکاران در سال ۲۰۱۹ برتری مدل GALDIT را برای ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان ساحلی قره‌سو-گرگان‌رود به پیشروی آب شور نسبت به روش‌های دیگر از جمله SINTACS و DRASTIC اثبات کردند. بیشترین آسیب‌پذیری نسبت به پیشروی آب شور در مناطق شمال غرب و غرب منطقه وجود داشته و پارامتر هدایت هیدرولیکی مؤثرترین پارامتر در ارزیابی آسیب‌پذیری منطقه مورد مطالعه آنها بوده است (Bordbar et al., 2019).

پژوهش‌های پیشین، مدل بدون انتهای^۲ GALDIT را با در نظر گرفتن شرایط منطقه مطالعاتی استفاده کردند. برخی از پژوهشگران توسط روش GALDIT اولیه، آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی منطقه مورد مطالعه خود را نسبت به پیشروی آب شور ارزیابی کردند (Mavriou et al., 2019, Gorgij and Moghaddam, 2017, Nakhaei et al., 2015).

برخی دیگر وزن و رتبه‌های مدل GALDIT را با توجه به

¹ Total Dissolved Solids (TDS)

² Open-Ended

جدول ۱- وزن و رتبه پارامترهای مدل GLADIT

Table 1. Weights and ratings for the indicators of GALDIT model

Indicators	Weights	Ratings			
		2.5	5	7.5	10
Groundwater occurrence	1	Bounded	Leaky	Unconfined	Confined
Hydraulic conductivity (m/day)	3	<5	5-10	10-40	>40
Groundwater level above Salt lake (m)	4	>2	1.5-2	1-1.5	<1
Distance from shore (m)	4	>1000	750-1000	500-750	<500
Impact of present seawater intrusion: TDS (g/L)	1	<1	1-3	3-10	>10
Aquifer thickness (m)	2	<5	5-7.5	7.5-10	>10

مدل GALDITR توسط روش تحلیل سلسله مراتبی^۲ بازبینی شد. در انتها نقشه‌های به‌دست آمده از روش‌های به‌کار گرفته شده، مقایسه و بررسی شد.

۲- روش کار

۲-۱-۱- مدل GALDIT

از ویژگی‌های ذاتی هیدروژئولوژیکی، ویژگی‌های فیزیکی آن محیط است که پتانسیل پیشروی آب شور را تحت تأثیر قرار می‌دهد. مهمترین عوامل مؤثر در پیشروی آب شور در مدل GALDIT در جدول ۱ ارائه شده است که عبارت‌اند از (Lobo Ferreira et al., 2005):

۲-۱-۱-۲- نوع آبخوان (G)

وسعت پیشروی آب شور به نوع آبخوان (آزاد، محبوس، نشتی و محدود) بستگی دارد. آبخوان تحت فشار به علت تخلیه آبی در طول زمان پمپاژ و مخروط افت بزرگتر، پتانسیل بیشتر و بنابراین آسیب‌پذیری بیشتری برای پیشروی آب شور دارد. به‌طور مشابه، آبخوان نشتی به‌علت حفظ فشار هیدرولیکی حداقل از طریق نشست از آبخوان‌های مجاور کمتر از آبخوان تحت فشار در معرض پیشروی آب شور دریا قرار دارد.

۲-۱-۲-۲- هدایت هیدرولیکی آبخوان (A)

پارامتر هدایت هیدرولیکی آبخوان بر اساس سرعت جریان در لایه‌های آبخوان برآورده می‌شود. هدایت هیدرولیکی توانایی انتقال آب از میان خاک یا سنگ تحت تأثیر گرادیان هیدرولیکی است.

خصوصیات منطقه مورد مطالعه خود تصحیح کردند (Seenipandi et al., 2019, Saravanan et al., 2019, Chang et al., 2019, Bordbar et al., 2019, Mirzavand et al., 2018, Moghaddam and Javadi, 2016, Kazakis et al., 2018, Luoma et al., 2017)

برخی از پژوهشگران پارامترهایی از جمله شیب هیدرولیکی (Gorgij and Moghaddam, 2019)، نرخ پمپاژ (Parizi et al., 2019)، کاربری اراضی (Allouche et al., 2017) و پهنه‌های آبی^۱ (Kazakis et al., 2019) را به مدل GALDIT افزودند. برخی نیز روش GALDIT را با روش‌هایی مثل DRASTIC (Allouche et al., 2017) و TAWLBIC (Motevalli et al., 2018) برای دستیابی به شاخص جامع شوری تلفیق کردند.

پارامترهای مدل GALDIT تنها به خصوصیات آبخوان تمرکز کردند، در حالی که تغذیه سطحی آبخوان به‌خصوص توسط آب‌های خارج از محدوده را در نظر نگرفتند. تغذیه آبخوان توسط آب‌های انتقال یافته از خارج از محدوده مطالعاتی، نقش به‌سزایی در کاهش آسیب‌پذیری آبخوان نسبت به پیشروی آب شور دارد. افزودن پارامتر تغذیه سطحی آبخوان به روش GALDIT می‌تواند رقیق‌سازی غلظت شوری آب زیرزمینی را توسط آب‌های شیرین تغذیه شده به آبخوان ارزیابی کند. این پژوهش روش جدید GALDITR را برای ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان‌های ساحلی نسبت به پیشروی آب شور معرفی می‌کند. همچنین از آنجا که تاکنون آسیب‌پذیری آبخوان قم نسبت به پیشروی آب شور ارزیابی نشده است، نقشه آسیب‌پذیری این آبخوان توسط روش معرفی شده تهیه شده و تعداد و وسعت گسترش نواحی آسیب‌پذیر در آن تعیین شد. سپس با توجه به شرایط منطقه مورد مطالعه، وزن پارامترهای

² Analytical Hierarchy Process (AHP)

¹ Water Bodies

۲-۱-۶- ضخامت آبخوان (T)

ضخامت آبخوان نقش مهمی در تعیین گستردگی و بزرگی پیشروی آب شور در نواحی ساحلی دارد. هرچه ضخامت آبخوان بیشتر باشد گستردگی پیشروی آب شور بیشتر خواهد بود.

این شش پارامتر در ترکیب با همدیگر برای ارزیابی پتانسیل پیشروی آب شور توسط روش GALDIT استفاده می‌شوند. وزن تعیین شده برای هر پارامتر نشان‌دهنده اهمیت نسبی آن در فرایند پیشروی آب شور است. در این پژوهش از وزن‌های ارائه شده توسط چکادی برای وزن‌دهی به پارامترهای مدل GALDIT استفاده شد. همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، مهم‌ترین پارامتر در این مدل دارای وزن ۴ و کم‌اهمیت‌ترین آنها دارای وزن ۱ است. در این پژوهش، تمام پارامترهای مدل GALDIT به جز پارامتر I، رتبه مشابهی با مدل اصلی معرفی شده توسط چکادی داشتند. چندین شاخص برای رتبه‌بندی پارامتر I معرفی شده است (Chachadi and Lobo Ferreira, 2001, Chachadi, 2005).

اطلاعات موردنیاز برای تعیین این پارامتر می‌تواند توسط تحلیل داده‌های شیمیایی، استفاده از گزارش‌های تاریخی و یا پرس‌وجو از کشاورزان و مردم محلی تأمین شود (Chachadi, 2005).

شاخص آسیب‌پذیری نهایی مدل GALDIT را می‌توان با جمع کردن حاصل ضرب رتبه هر پارامتر در وزن مربوط به آن و تقسیم کردن آن بر مجموع وزن پارامترها محاسبه کرد. آسیب‌پذیری آبخوان به پیشروی آب شور بر اساس مقدار این شاخص برآورد می‌شود. هر چقدر مقدار این شاخص کمتر باشد آسیب‌پذیری ناحیه موردنظر به پیشروی آب شور کمتر خواهد بود. بنابراین با محاسبه شاخص GALDIT هر سلول آبخوان شبکه‌بندی شده به رتبه‌های ۲/۵ (کمترین آسیب‌پذیری)، ۵، ۷/۵ و ۱۰ (بیشترین آسیب‌پذیری) تقسیم خواهد شد.

۲-۲- معرفی روش GALDITR

روش GALDIT به بررسی تأثیر خصوصیات کیفی، هیدروژئولوژیکی و زمین‌شناسی آبخوان در آسیب‌پذیری آبخوان نسبت به پیشروی آب شور پرداخته است، اما پارامتر تغذیه سطحی آبخوان را که نقش مهمی در کیفیت آب‌های زیرزمینی ایفا می‌کند در نظر نگرفته است. در روش DRASTIC نیز که کاربرد عمومی

بنابراین جبهه پیشروی آب شور تحت تأثیر مقدار هدایت هیدرولیکی است. در یک فشار هیدرولیکی ثابت، هر چه هدایت هیدرولیکی آبخوان بیشتر باشد، جبهه آب شور به مقدار بیشتری به درون آبخوان پیشروی خواهد کرد. یکی از دلایل هدایت هیدرولیکی بالا می‌تواند شکل‌گیری مخروط افت پس از پمپاژ باشد که سبب پیشروی حجم زیاد آب شور به درون آبخوان ساحلی می‌شود.

۲-۱-۳- ارتفاع سطح آب زیرزمینی نسبت به سطح آب دریای مجاور (L)

ارتفاع سطح آب زیرزمینی نسبت به سطح دریای مجاور یکی از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در ارزیابی پیشروی آب شور است. زیرا این اختلاف ارتفاع، تأمین‌کننده فشار هیدرولیکی حرکت جبهه آب شور به سوی آبخوان است. طبق رابطه گای-بن-هرزبرگ به ازای هر متر آب زیرزمینی که بالاتر از سطح دریا/دریاچه مجاور قرار دارد، ستونی از آب شیرین در همان نقطه به ارتفاع ۴۰ متر تا سطح اندرکنش وجود خواهد داشت (Strack, 1976).

بنابراین اگر سطح آب دریاچه شور مجاور بالا بیاید مقدار آب زیرزمینی تخلیه شده به دریاچه کاهش و به دنبال آن زبانه آب شور پیشروی کرده در آبخوان ساحلی افزایش خواهد یافت. اما هرچه ارتفاع سطح آب زیرزمینی بالاتر از سطح آب دریاچه مجاور باشد خطر آسیب‌پذیری آبخوان کاهش خواهد یافت.

۲-۱-۴- فاصله عمودی محل موردنظر تا خط ساحلی (D)

پیشروی آب شور زمانی که آبخوان نزدیک ساحل است و شرایط هیدروژئولوژیکی آبخوان برای انتقال مناسب است به بیشترین مقدار خود خواهد رسید. فاصله عمودی نقطه موردنظر تا خط ساحلی، فاصله هوایی عمود بر خط ساحلی در نظر گرفته می‌شود.

۲-۱-۵- بزرگی و گستردگی آب شور پیشروی کرده (I)

با بهره‌برداری از آبخوان و ایجاد تنش، تعادل هیدرولیکی طبیعی موجود میان آب شور و شیرین برهم می‌خورد و آب شور به سوی آبخوان ساحلی حرکت می‌کند. با توجه به برداشت آب زیرزمینی و پیشروی آب شور، غلظت TDS افزایش می‌یابد.

زیرزمینی توسط شوری آب دریا، رتبه ۲/۵ که کمترین آسیب پذیری را کسب می کنند. مقدار کمتر از ۱۰/۱۶ سانتی متر در سال در رتبه ۱۰ با بیشترین آسیب پذیری قرار می گیرند. به مقدار تغذیه سطحی بین ۱۰/۱۶ تا ۱۷/۷۸ سانتی متر در سال رتبه ۷/۵ و مقدار بین ۱۷/۷۸ تا ۲۵/۴ سانتی متر در سال رتبه ۵ تعلق می گیرد. همان طور که در جدول ۲ مشاهده می شود با در نظر گرفتن وزن ۱ برای پارامتر تغذیه سطحی آبخوان، وزن و رتبه بقیه پارامترهای مدل GALDITR مشابه با مدل GALDIT در نظر گرفته می شوند.

۲-۳- روش AHP

روش AHP یکی از مهم ترین روش های موجود در تصمیم گیری های چندمعیاره است که برای اولین بار توسط آقای ساعتی در سال ۱۹۸۰ ارائه شده است (Saaty, 1980). روش AHP ابتدا با ایجاد درخت سلسله مراتبی، پیچیدگی موجود در ساختار مسئله را ساده می کند. سپس با تشکیل ماتریس مقایسات زوجی و با در نظر گرفتن اصول معکوسی، همگنی، وابستگی و اصل انتظارها، به تعیین اولویت معیارها می پردازد.

پس از انجام مقایسات زوجی وزن نسبی هر معیار محاسبه می شود. در روش AHP میزان نرخ ناسازگاری کمتر از ۰/۱ به عنوان حد قابل قبول از میزان ناسازگاری بین ایده های مختلف تعریف می شود. در این پژوهش از نرم افزار Expert Choice برای اجرای روش AHP برای ارزیابی و بهینه کردن وزن پارامترهای مدل GALDITR در آبخوان ساحلی قم با در نظر گرفتن کمترین میزان نرخ ناسازگاری استفاده شد.

برای ارزیابی آسیب پذیری آبخوان های غیرساحلی دارد، تغذیه خالص آبخوان به منظور ارزیابی در اثر انتقال ماده آلاینده به صورت عمودی به سطح ایستابی آبخوان در نظر گرفته شده است (Aller et al., 1987).

در مورد پیشروی آب شور در آبخوان های ساحلی از آنجا که ورود عمودی ماده آلوده کننده به داخل آبخوان مطرح نیست بنابراین افزودن پارامتر تغذیه آبخوان در روش GALDIT می تواند اثر رقیق سازی غلظت شوری آب زیرزمینی توسط آب های شیرین تغذیه کننده آبخوان را ارزیابی کند. هرچه مقدار تغذیه سطحی آبخوان بیشتر باشد احتمال آلودگی آب های زیرزمینی توسط آب شور دریا کمتر می شود. زمانی که تغذیه آبخوان به مقدار کافی زیاد باشد که باعث کاهش غلظت شوری و افزایش سطح ایستابی به اندازه کافی شود، در آن زمان پتانسیل آلودگی آب زیرزمینی کاهش می یابد.

این پژوهش پارامتر تغذیه سطحی آبخوان را به پارامترهای مدل GALDIT افزود و روش جدید GALDITR را معرفی کرده است. این پارامتر توسط تغذیه حاصل از بارندگی و آب های سطحی انتقالی تعیین می شود. آب های سطحی انتقالی، آب های انتقال یافته از خارج محدوده مطالعاتی هستند که از منابع مختلفی مانند سدها و یا آب های سطحی و زیرزمینی حوضه های آبریز دیگر برای مصارف کشاورزی، شرب و یا صنعت به محدوده مطالعاتی انتقال می یابند.

رتبه بندی پارامتر تغذیه سطحی آبخوان مشابه با روش DRASTIC در نظر گرفته شده است. مقدار تغذیه آبخوان بیشتر از ۲۵/۴ سانتی متر در سال با بیشترین تأثیر بر کاهش آلودگی آب

جدول ۲- وزن و رتبه پارامترهای مدل GALDITR

Table 2. Weights and ratings for the indicators of GALDITR model

Indicators	Weights	Ratings			
		2.5	5	7.5	10
Groundwater occurrence	1	Bounded	Leaky	Unconfined	Confined
Hydraulic conductivity (m/day)	3	<5	5-10	10-40	>40
Groundwater level above Salt lake (m)	4	>2	1.5-2	1-1.5	<1
Distance from shore (m)	4	>1000	750-1000	500-750	<500
Impact of present seawater intrusion: TDS (g/L)	1	<1	1-3	3-10	>10
Aquifer thickness (m)	2	<5	5-7.5	7.5-10	>10
Surface recharge (cm/year)	1	>25.4	17.78-25.4	10.16-17.78	<10.16

۲-۴- معرفی منطقه مطالعاتی

محدوده مطالعاتی قم- کهک بخشی از حوضه آبریز دریاچه نمک بوده که در شمال مرکزی کشور ایران و در شرق و جنوب شهر قم بین مختصات جغرافیایی $50^{\circ} 43'$ تا $51^{\circ} 32'$ طول شرقی و $34^{\circ} 09'$ تا $34^{\circ} 44'$ عرض شمالی گسترده شده است. محدوده مطالعاتی قم از شمال به محدوده‌های مطالعاتی مسیله، شریف‌آباد و ساوه، از جنوب به محدوده‌های مطالعاتی دلیجان- محلات و کاشان، از غرب به محدوده مطالعاتی سلفچگان و از شرق به محدوده مطالعاتی دریاچه نمک محدود شده است. وسعت کل محدوده مطالعاتی قم 1816 کیلومتر مربع است که 718 کیلومتر مربع آن را ارتفاعات و 1098 کیلومتر مربع را دشت تشکیل می‌دهد. آبخوان آبرفتی آن با وسعت تقریبی 437 کیلومتر مربع حدود 39 درصد مساحت کل دشت را در بر می‌گیرد (Ranjbar and Mahjouri, 2018).

از نظر زمین‌شناسی دشت قم تقریباً با ارتفاعات بخش‌های نفوذناپذیر سازند قم و مارن و آهک مارنی میوسن محصور گشته و از قسمت شرقی با پهنه مسطح کویری دریاچه نمک و از جنوب شرق نیز با دشت کاشان ارتباط هیدرولیکی دارد (Nazari and Nakhaei, 2006).

شکل ۱ موقعیت محدوده مطالعاتی قم- کهک (آبی رنگ) و مدل شبکه‌بندی شده آبخوان قم (قرمز رنگ) را در نقشه جغرافیایی نشان می‌دهد. مرز ورودی آبخوان در نواحی شمال غرب و جنوب

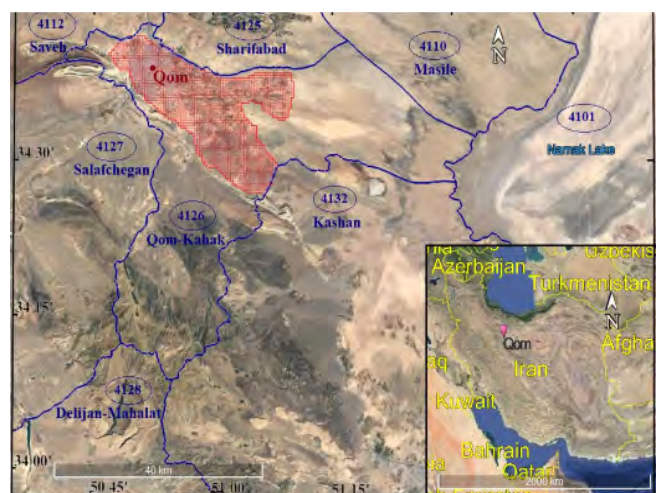


Fig. 1. Geographical location of Qom aquifer and Salt (Namak) lake

شکل ۱- موقعیت جغرافیایی آبخوان قم و دریاچه نمک

آن در مجاورت ارتفاعات اصلی محدوده مطالعاتی همسایه است. رواناب‌های ورودی از این ارتفاعات به‌علاوه نزولات آسمانی باعث تغذیه این آبخوان آبرفتی می‌شود. محدوده پهنآوری از مرزهای شمالی و بخشی از مرزهای شرقی و غربی نیز به دلیل عدم نفوذپذیری به‌عنوان مرز بدون جریان در نظر گرفته می‌شوند.

دریاچه نمک با وسعت حدود 2000 کیلومتر مربع در واقع بقایای یک دریاچه خشک شده قدیمی است. این دریاچه نمکی با تراز متوسط 810 متر از سطح دریاهای آزاد و افت میانگین سالانه 1 متر در آب زیرزمینی املاح فراوانی را به علت تبخیر تدریجی در خود جای داده است (Mirzavand et al., 2018). در دریاچه نمک فقط در فصل زمستان ممکن است آب یافت شود و در تابستان قشر ضخیمی از نمک در آن وجود دارد که با داشتن TDS بیش از 35 گرم بر لیتر جزء شورابه‌ها به حساب می‌آید (Robinove et al., 1958).

بیان آب زیرزمینی آبخوان آبرفتی محدوده مطالعاتی قم- کهک برای سال آبی $1385-1386$ در جدول ۳ ارائه شده است. بیان منفی سالانه آبخوان قم، شیب هیدرولیکی و در پی آن جهت جریان را از دریاچه نمک به آبخوان تغییر داده است. بنابراین قسمت شرقی دشت قم تحت تأثیر پیشروی آب شور از طریق دریاچه نمکی و در نتیجه کاهش کیفیت آب قرار داشته و آبخوان قم به‌عنوان آبخوان ساحلی داخلی در نظر گرفته می‌شود (Mirzavand et al., 2018). از حدود سال 1385 به بعد استان قم با خشکسالی شدید مواجه شد و در صورت عدم انتقال آب از خارج محدوده مطالعاتی به آن، دچار بحران شدید کم‌آبی می‌شد. بنابراین برای بررسی اثر شرایط تغذیه‌ای آبخوان بر آسیب‌پذیری آن نسبت به پیشروی آب شور، در این پژوهش از داده‌های موجود در سال 1385 برای تعیین تراز سطح آب و غلظت شوری آبخوان قم استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تعیین پارامتر مدل‌های GALDIT و GALDITR برای آبخوان قم

غلظت TDS و غلظت کلراید معمولاً به‌عنوان شاخص‌های اولیه پیشروی آب شور شناخته می‌شوند. بر اساس جداول طبقه‌بندی آب بر اساس شوری، مقدار TDS برابر 1 گرم بر لیتر

جدول ۳- بیان آب زیرزمینی آبخوان آبرفتی محدوده مطالعاتی قم- کهک در سال ۱۳۸۵ برحسب میلیون مترمکعب

Table 3. Groundwater balance of alluvial aquifer Qom-Kahak study area for 2006 in million cubic meters

Balance area (square kilometers)	Inflows						Outflows						Net balance	
	Lateral inflow	Recharge from precipitation	Return flows from dam 15 Khardad	Return flows of drinking water transferred from outside the basin	Return flows from surface runoff	Total inflow	Agricultural abstraction	Municipal abstraction	Sewage transferred to Sharifabad area (outside the basin)	Natural groundwater discharge	Evaporation from the aquifer	Drainage		Total outflows
437	37	10.6	41.1	9.4	10.4	109	120.4	5.3	6.3	0	0	0	132	-23.5



Fig. 2. Rating of parameter G (aquifer type) in the GALDIT model for Qom aquifer

شکل ۲- پارامتر نوع آبخوان (G) در مدل GALDIT برای آبخوان قم

هدایت هیدرولیکی و پس از آن بهره‌برداری از آبخوان بوده است (Qom Regional Water Company, 2011). نقشه هدایت هیدرولیکی (K) آبخوان قم با استفاده از تلفیق نقشه هم‌قابلیت انتقال آبخوان (T) و نقشه ضخامت لایه آبدار (b) در رابطه $T=Kb$ به دست آمد. بیشترین مقدار هدایت هیدرولیکی افقی در آبخوان آبرفتی حدود ۵۰ متر در روز در شهر قم و کمترین مقدار آن حدود ۰/۳ متر در روز در نواحی شرقی آبخوان است. بنابراین همان طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، سلول‌های شبکه با مقدار هدایت هیدرولیکی کمتر از ۵، بین ۵ تا ۱۰، بین ۱۰ تا ۴۰ و بیشتر از ۴۰ متر در روز به ترتیب رتبه‌های ۲/۵، ۵، ۷/۵ و ۱۰ را برای پارامتر A دریافت کردند.

به‌عنوان بیشترین حد مجاز شوری برای مصرف شرب در نظر گرفته می‌شود (Robinove et al., 1958, Jiao and Post, 2019). اما در حالی که وضعیت پیشروی آب شور تنها با متغیرهای فیزیکی همچون غلظت کلراید و هد هیدرولیکی می‌تواند برآورد شود، نقشه‌های آسیب‌پذیری با در نظر گرفتن خصوصیات کیفی، هیدروژئولوژیکی و زمین‌شناسی آبخوان توصیف واقعی‌تری از پیشروی آب شور ارائه می‌کنند. این پژوهش برای اولین بار به معرفی روش GALDIT می‌پردازد که پارامتر تغذیه سطحی آبخوان را نیز برای طبقه‌بندی آبخوان ساحلی قم به مناطق آسیب‌پذیر به پیشروی آب شور استفاده کرد. بنابراین هر سلول آبخوان شبکه‌بندی شده با اندازه ۵۰۰ × ۵۰۰ متر بر اساس آسیب‌پذیری آن به پیشروی آب شور به رتبه‌های ۲/۵ (کمترین آسیب‌پذیری)، ۵، ۷/۵ و ۱۰ (بیشترین آسیب‌پذیری) تقسیم می‌شود. به این منظور پارامترهای مدل GALDIT به شرح زیر استفاده شدند:

نوع آبخوان (G): آبخوان قم بر اساس اطلاعات ژئوالکتریک از رسوبات آبرفتی منفصل و یکسان تشکیل شده که بر روی سنگ بستر نفوذناپذیر قرار گرفته است و هیچ‌گونه تغییرات افقی و عرضی در آن وجود ندارد. بنابراین آبخوان مورد مطالعه به صورت یک لایه آزاد در نظر گرفته می‌شود (Qom Regional Water Company, 2011). همان طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، رتبه ۷/۵ برای پارامتر نوع آبخوان در تمامی سلول‌های شبکه تخصیص یافت. هدایت هیدرولیکی آبخوان (A): با توجه به تحلیل حساسیت انجام شده بر روی پارامترهای مختلف تأثیرگذار در مدل ریاضی، بیشترین عامل تأثیرگذار بر منابع آبی موجود در سفره ضریب

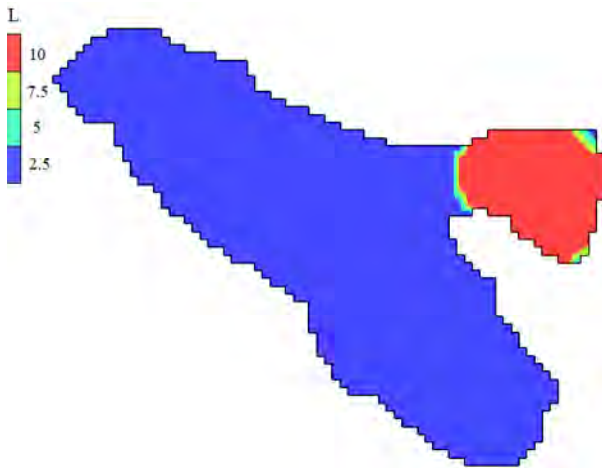


Fig. 5. Rating of parameter L (groundwater level above sea level) in the GALDIT model for Qom aquifer
 شکل ۵- پارامتر ارتفاع سطح آب زیرزمینی نسبت به سطح آب دریا (L) در مدل GALDIT برای آبخوان قم

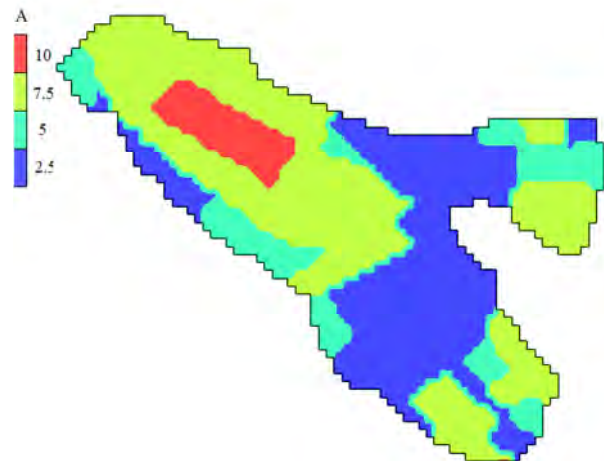


Fig. 3. Rating of parameter A (aquifer hydraulic conductivity) in the GALDIT model for Qom aquifer
 شکل ۳- پارامتر هدایت هیدرولیکی آبخوان (A) در مدل GALDIT برای آبخوان قم

فاصله عمودی محل مورد نظر تا خط ساحلی (D): خط ساحلی در شرق این آبخوان آبرفتی و در مجاورت با پهنه مسطح کویری دریاچه نمک در نظر گرفته شد.

بنابراین با استفاده از ابزار بافر در نرم افزار ArcMap نقشه فاصله از ساحل تهیه شد و سپس تمامی سلول های آبخوان به فواصل کمتر از ۵۰۰، ۷۵۰، ۱۰۰۰ و بیشتر از ۱۰۰۰ متر نسبت به خط ساحلی رتبه بندی شدند. نقشه حاصل از رتبه بندی پارامتر D در منطقه مورد مطالعه در شکل ۶ نشان داده شده است.

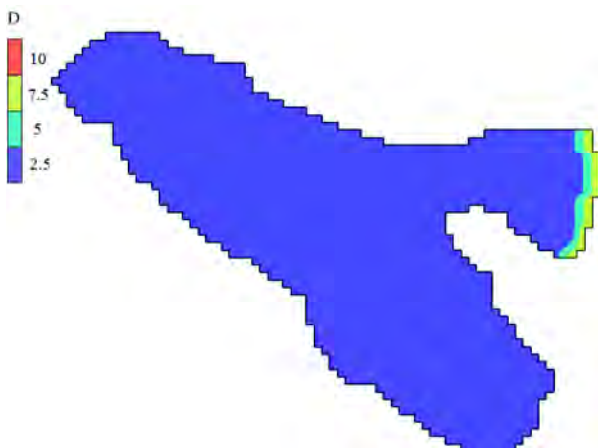


Fig. 6. Rating of parameter D (distance from shore) in the GALDIT model for Qom aquifer
 شکل ۶- پارامتر فاصله عمودی محل مورد نظر تا خط ساحلی (D) در مدل GALDIT برای آبخوان قم

ارتفاع سطح آب زیرزمینی نسبت به سطح آب دریا/دریاچه مجاور (L): نقشه تراز آب زیرزمینی آبخوان قم در سال ۱۳۸۵ در شکل ۴ ارائه شده است. جهت حرکت آب زیرزمینی در این منطقه از شمال غرب با تراز ۹۰۶ متر از سطح دریاها آزاد به سمت شرق آبخوان با تراز ۸۱۰ متر در بخش مجاور دریاچه نمک و تراز ۸۳۰ متر در بخش مجاور دشت کاشان است. بنابراین تراز اولیه سطح آب زیرزمینی نسبت به تراز سطح آب دریاچه نمک مجاور برحسب متر به عنوان یکی دیگر از عوامل مؤثر در روش GALDIT محاسبه شد. نقشه این پارامتر، در شکل ۵ نشان داده شده است.

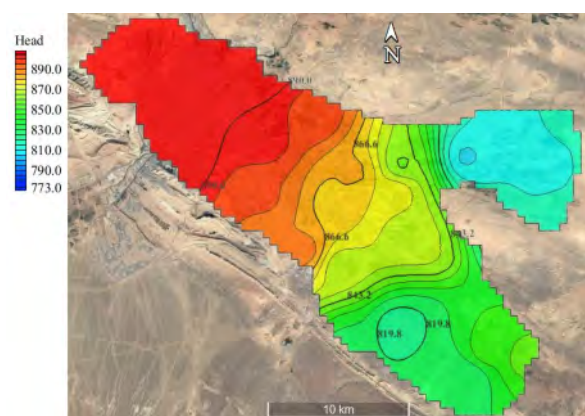


Fig. 4. Groundwater level of Qom aquifer in meters for 2006
 شکل ۴- نقشه تراز آب زیرزمینی (متر) آبخوان قم در سال ۱۳۸۵



Fig. 7. Rating of parameter I (impact of the existing status of seawater intrusion) in the GALDIT model for Qom aquifer

شکل ۷- پارامتر بزرگی و گستردگی آب شور پیشروی کرده (I) در مدل GALDIT برای آبخوان قم

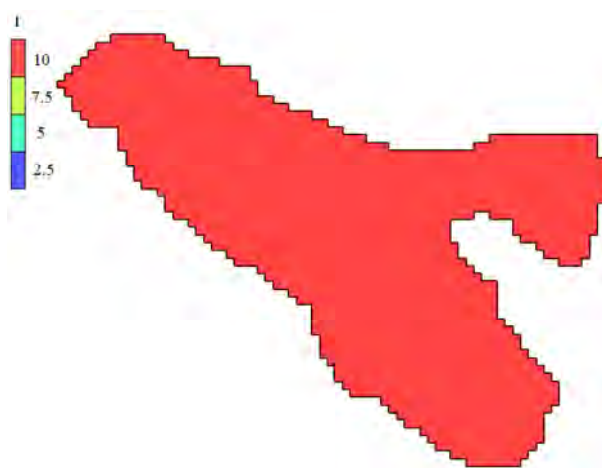


Fig. 8. Rating of parameter T (thickness of the aquifer) in the GALDIT model for Qom aquifer

شکل ۸- پارامتر ضخامت آبخوان (T) در مدل GALDIT برای آبخوان قم

گرفته شد.

تغذیه سطحی آبخوان (R): برای تهیه نقشه تغذیه سطحی آبخوان، تغذیه حاصل از بارندگی و آب‌های خارج از محدوده که در محاسبه بیلان آبخوان نقش داشته‌اند با هم جمع می‌شوند. در مورد آبخوان قم علاوه بر تغذیه آبخوان از ریزش‌های آسمانی، حجم آب برگشتی از مصارف شرب و صنعت تأمین شده توسط منابع خارج از

بزرگی و گستردگی آب شور پیشروی کرده (I): از میان پارامترهای روش GALDIT چندین شاخص برای تعیین اهمیت پارامتر I وجود دارد. چکادی و لبوفا در سال ۲۰۰۱ غلظت کلراید (Cl)، نسبت $Cl / [HCO_3 + CO_3]$ (ضریب ریویل^۱)، و هدایت الکتریکی را برای رتبه‌بندی پارامتر I پیشنهاد دادند (Chachadi and Lobo Ferreira, 2001). به هر حال چندین پژوهش نسبت‌های یونی متفاوت از نسبت اصلی ریویل را برای تعیین موقعیت موجود آبخوان پیشنهاد دادند، شامل نسبت Cl/HCO_3 (Lobo Ferreira et al., 2005)، غلظت کلراید (Selmi, 2013)، هدایت الکتریکی (Luoma et al., 2017، Gontara et al., 2016) و نسبت SO_4/Cl (Gontara et al., 2016)

از طرف دیگر، شوری آب معمولاً توسط غلظت TDS گزارش می‌شود. مقدار TDS به سهولت قابل اندازه‌گیری بوده و اطلاعات مناسب و پیوسته‌ای از آن در دسترس است. این پژوهش از غلظت TDS آب زیرزمینی برحسب گرم بر لیتر برای رتبه‌بندی پارامتر I برحسب طبقه‌بندی شوری رایینو و همکاران در سال ۱۹۵۸ استفاده می‌کند (Robinove et al., 1958). بنابراین غلظت TDS در آب زیرزمینی به کمتر از ۱ (بدون شوری/آب شیرین)، ۱ تا ۳ (شوری اندک)، ۳ تا ۱۰ (شوری متوسط) و بیشتر از ۱۰ گرم بر لیتر (بسیار شور) طبقه‌بندی شده و به ترتیب مقدار رتبه‌بندی ۲/۵، ۵، ۷/۵ و ۱۰ به سلول‌های آبخوان اختصاص می‌یابد.

غلظت TDS در آبخوان قم بر اساس مقدار اندازه‌گیری شده در سال ۱۳۸۵ برای پارامتر I در این پژوهش استفاده شد. کمترین غلظت شوری در بخش جنوبی آبخوان با مقدار حدود ۰/۸۶ گرم بر لیتر قرار دارد. بیشترین غلظت TDS در بخش شرقی آبخوان حدود ۱۱/۱ گرم بر لیتر اندازه‌گیری شد. شکل ۷، پارامتر بزرگی و گستردگی آب شور پیشروی کرده برای آبخوان قم را نشان می‌دهد. ضخامت آبخوان (T): حداقل ضخامت آبرفت حدود ۳۵ متر در بخش‌های غربی آبخوان و حداکثر ضخامت آن با فاصله گرفتن از سازندهای سنگی حدود ۲۸۰ متر در نواحی مرکزی آبخوان است (Qom Regional Water Company, 2011). بنابراین مطابق شکل ۸، رتبه ۱۰ برای پارامتر T در تمامی سلول‌های شبکه در نظر

¹ Revelle Coefficient

۲-۳- نقشه آسیب‌پذیری آبخوان قم با استفاده از روش GALDIT

شاخص نهایی GALDIT برای هر سلول شبکه با تقسیم مجموع وزنی پارامترهای تعیین شده مدل بر وزن کل به دست می‌آید. بر مبنای این شاخص آبخوان قم به سه ناحیه با آسیب‌پذیری کم (کمتر از ۵)، متوسط (بین ۵ تا ۷/۵) و زیاد (بیشتر از ۷/۵) طبقه‌بندی شد. نقشه آسیب‌پذیری آبخوان مورد بررسی با کاربرد روش GALDIT در شکل ۱۰ و درصد مساحت نواحی آسیب‌پذیری آن در جدول ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، ناحیه با آسیب‌پذیری کم با وسعت حدود ۴۱/۵ درصد نواحی مرکزی، جنوب شرقی و بخش‌هایی از غرب آبخوان را فرا گرفته است. ناحیه با آسیب‌پذیری متوسط با وسعت حدود ۵۷/۵ درصد قسمتی از منطقه شرقی آبخوان و بخش بزرگی از غرب آبخوان در محدوده شهر قم را فرا گرفته است. ناحیه بسیار آسیب‌پذیر به صورت نوار باریکی حاشیه مرز مجاور دریاچه نمک را پوشانیده است.

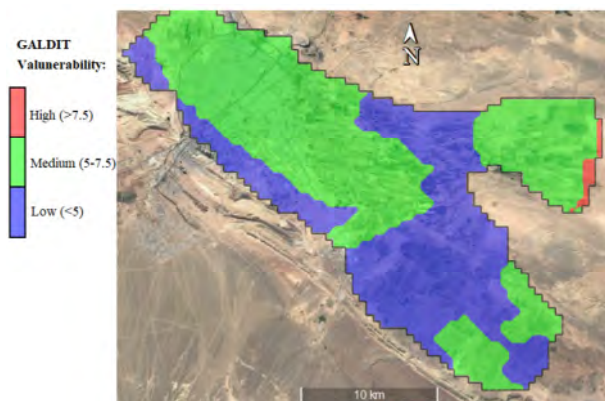


Fig. 10. Vulnerability map of Qom aquifer using GALDIT model

شکل ۱۰- نقشه نهایی آسیب‌پذیری آبخوان قم با کاربرد مدل GALDIT

جدول ۴- درصد مساحت نواحی آسیب‌پذیری توسط مدل GALDIT

Table 4. Percentage of vulnerability zones by GALDIT model

Vulnerability area	Area	
	%	Km ²
High	1.1	4.75
Medium	57.5	251.25
Low	41.5	181.25

محدوده مانند سد ۱۵ خرداد و چاه‌های محدوده علی‌آباد به‌عنوان منابع دیگر تغذیه آبخوان در محدوده شهر قم در نظر گرفته شده است. در محدوده آبخوان قم-کهنک تعداد ۱۳۳۱ حلقه چاه بهره‌برداری موجود است که دارای مصارف شرب و کشاورزی است. بنابر نتایج پژوهش‌های هیدروژئولوژی، ۴۷ درصد آب برداشت شده برای اهداف کشاورزی و ۷۵ درصد آب برداشت شده برای مصارف شرب و صنعت به آبخوان باز می‌گردد. با احتساب مقدار تخلیه خالص چاه‌ها در عوامل خروجی بیلان آبخوان، آب برگشتی از چاه‌های کشاورزی، شرب و صنعت داخل محدوده آبخوان در پارامتر تغذیه سطحی آبخوان در نظر گرفته نمی‌شود. مطابق جدول بیلان آبخوان قم برای سال آبی ۸۶-۱۳۸۵، حجم بارش متوسط سالانه در سطح آبخوان قم حدود ۱۰/۶ میلیون مترمکعب می‌باشد. حجم آب برگشتی از مصارف شرب و صنعت با منبع تأمین از سد ۱۵ خرداد حدود ۴۱/۱ میلیون مترمکعب در سال و با منبع چاه‌های خارج از محدوده حدود ۹/۴ میلیون مترمکعب در سال است که تنها در سطح شهر قم توزیع شده است (Qom Regional Water Company, 2011). نقشه حاصل از رتبه‌بندی پارامتر R در منطقه مورد مطالعه در شکل ۹ نشان داده شده است.

به این ترتیب پس از محاسبه پارامترهای مدل می‌توان نسبت به تهیه نقشه‌های ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان نسبت به پیشروی آب شور دریاچه اقدام و نواحی آسیب‌پذیر را بررسی کرد.



Fig. 9. Rating of parameter R (aquifer recharge) in the GALDITR model for Qom aquifer

شکل ۹- پارامتر تغذیه آبخوان (R) در مدل GALDITR برای آبخوان قم

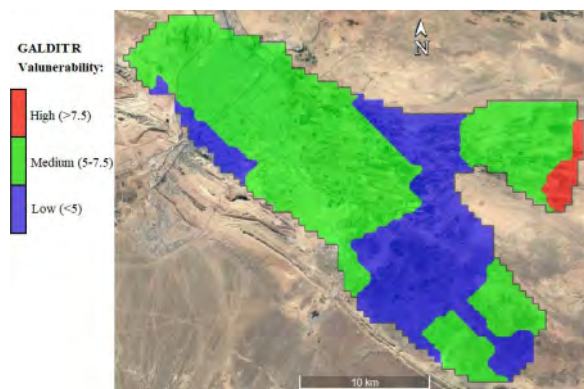


Fig. 11. Vulnerability map of Qom aquifer using GALDITR model

شکل ۱۱- نقشه نهایی آسیب پذیری آبخوان قم با کاربرد مدل GALDITR

جدول ۵- درصد مساحت نواحی آسیب پذیری توسط مدل GALDITR

Table 5. Percentage of vulnerability zones by GALDITR model

Vulnerability area	Area	
	%	Km ²
High	2.5	11
Medium	64.3	281.25
Low	33.2	145

است. ناحیه بسیار آسیب پذیر در این نقشه وسعت بیشتری را نسبت به روش GALDIT نشان داده است. این ناحیه حدود ۲/۵ درصد از کل مساحت منطقه مورد مطالعه را در حاشیه مرز مجاور دریاچه نمک در بر گرفته است.

از آنجا که در روش GALDIT ارائه شده توسط چکادی در سال ۲۰۰۵، وزن ۳ برای پارامتر هدایت هیدرولیکی در نظر گرفته شده و با توجه به تغییرات شدید این پارامتر در آبخوان مورد بررسی، نواحی مجزای آسیب پذیری متوسط در نقشه نهایی مدل های GALDIT و GALDITR تشکیل شده است. ناحیه ویژه ای که متأثر از هدایت هیدرولیکی بالا در اطراف شهر قم است با فاصله زیادی از حوالی دریاچه نمک با شوری زیاد قرار گرفته است. این می تواند وزن های ارائه شده توسط روش اصلی GALDIT را برای منطقه مورد مطالعه مورد تردید قرار دهد. بنابراین در این پژوهش سعی شد تا از روش تحلیل سلسله مراتبی برای بهینه کردن ضرایب وزنی پارامترهای مدل GALDIT و GALDITR به طور ویژه برای آبخوان قم استفاده شود.

وسعت این ناحیه کوچک حدود ۱/۱ درصد از مساحت کل منطقه مورد مطالعه است. پارامترهای هدایت هیدرولیکی آبخوان، ارتفاع سطح آب زیرزمینی نسبت به سطح آب دریا و فاصله عمودی تا خط ساحلی نقش مؤثری در گستردگی این ناحیه داشتند.

۳-۳- نقشه آسیب پذیری آبخوان قم با استفاده از روش GALDITR

شهر قم در منطقه خشک و بیابانی کشور ایران واقع است و برای تأمین آب کشاورزی، شرب و صنعت این شهر تکیه زیادی بر منابع آب زیرزمینی می شود. با کاهش کمیت و کیفیت این منابع و با توجه به کمبود منابع آب سطحی در محدوده مطالعاتی قم-کهنک، بخشی از مصارف شرب و صنعت شهر قم توسط انتقال آب های خارج از محدوده تأمین می شود. بنابراین در این پژوهش سعی شد تا اثر آب های سطحی انتقالی به آبخوان بر آسیب پذیری آن نسبت به پیشروی آب شور بررسی شود. با افزودن پارامتر تغذیه سطحی به پارامترهای مدل GALDIT روش جدیدی به نام GALDITR برای ارزیابی آسیب پذیری آبخوان قم معرفی شده است.

در این روش شاخص آسیب پذیری برای هر سلول شبکه با تقسیم مجموع وزنی پارامترهای تعیین شده مدل بر وزن کل به دست می آید. مانند روش GALDIT، آبخوان قم به سه ناحیه با آسیب پذیری کم (کمتر از ۵)، متوسط (بین ۵ تا ۷/۵) و زیاد (بیشتر از ۷/۵) بر مبنای این شاخص طبقه بندی می شود. نقشه آسیب پذیری آبخوان مورد بررسی با کاربرد روش GALDITR در شکل ۱۱ و درصد مساحت نواحی آسیب پذیری در جدول ۵ نشان داده شده است. همان طور که در شکل مشاهده می شود، ناحیه با آسیب پذیری متوسط با وسعت حدود ۶۴/۳ درصد، بخش بزرگی از غرب آبخوان و قسمتی از منطقه شرقی آبخوان را فرا گرفته است. وسعت این ناحیه نسبت به روش GALDIT به میزان ۱۲ درصد افزایش داشته است. این افزایش می تواند به کاهش درصد پارامترهای تأثیرگذار در مدل GALDIT مربوط باشد، طوری که وسعت زیاد ناحیه با رتبه بالای پارامتر تغذیه سطحی منجر به افزایش وسعت ناحیه با آسیب پذیری متوسط شده است. ناحیه با آسیب پذیری کم با وسعت حدود ۳۳/۲ درصد بخشی از نواحی مرکزی، جنوب شرقی و بخش کوچکی از غرب آبخوان را پوشانیده

توسعه سیستم‌های نوین آبیاری، اصلاح الگوی کشت محصولات زراعی و کاربرد گونه‌های گیاهی مقاوم به کم‌آبی و شوری و بازگرداندن پساب تصفیه‌خانه فاضلاب در مکان‌های مناسب برای تغذیه آبخوان در این منطقه می‌توانند راهکارهایی برای جلوگیری از گسترش پدیده پیشروی آب شور یا حداقل تثبیت وضعیت موجود باشند. با این وجود برای مدیریت آبخوان بیش از همه وجود مکان‌های مناسب پایش برای مشاهده دقیق وضعیت پیشروی و اتخاذ تصمیمات به موقع مدیریتی برای کنترل آن موردنیاز است. بنابراین انتخاب مکان مناسب پایش پیشروی آب شور به داخل آبخوان باید مورد بررسی و توجه بیشتر پژوهشگران و مدیران منابع آب زیرزمینی ساحلی قرار بگیرد.

۳-۵- اعتبارسنجی مدل‌ها

روش ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان برای کاهش حساسیت در انتخاب رتبه‌ها و افزایش اعتمادپذیری به اعتبارسنجی نیاز دارد. به این علت این پژوهش از مربع ضریب هم‌بستگی (R^2) برای ارزیابی دقت نقشه‌های آسیب‌پذیری و ارزیابی ارتباط بین مدل‌های ارائه شده و داده‌های واقعی آلودگی استفاده می‌کند. از آنجا که غلظت یون کلر نشان‌دهنده تأثیر آب شور دریاچه بر آبخوان ساحلی است به‌عنوان داده واقعی آلودگی برای اعتبارسنجی نتایج به‌دست آمده از مدل‌ها استفاده شد. به این ترتیب برای بررسی هم‌بستگی بین مقدار یون کلر در نقاط مشاهده‌ای با شاخص آسیب‌پذیری مدل‌ها از نتایج آزمایش‌های شیمیایی این یون در همان سال بررسی شد.

همان‌طور که در شکل ۱۴ نشان داده شده است، هم‌بستگی مثبت بین مدل‌های GALDIT، GALDITR و GALDITR-AHP و یون کلر به ترتیب با مقدار ضریب تعیین 0.52 ، 0.55 و 0.66 مشاهده شد. با افزودن پارامتر تغذیه سطحی آبخوان، هم‌بستگی نتایج مدل GALDITR با مقدار کلر مشاهده شده نسبت به مدل GALDIT افزایش یافت. همچنین با تطبیق روش GALDITR با شرایط آبخوان مورد بررسی و بازبینی وزن پارامترهای مدل مذکور با استفاده از روش AHP، بیشترین ضریب هم‌بستگی به‌دست آمد. مقدار کم یون کلر در مناطق با آسیب‌پذیری کم قرار داشت. کمترین غلظت یون کلر با مقدار 0.14 گرم بر لیتر در بخش جنوبی آبخوان در مدل GALDIT در ناحیه با آسیب‌پذیری متوسط و در بقیه مدل‌ها در ناحیه با آسیب‌پذیری کم واقع شده است. بیشترین

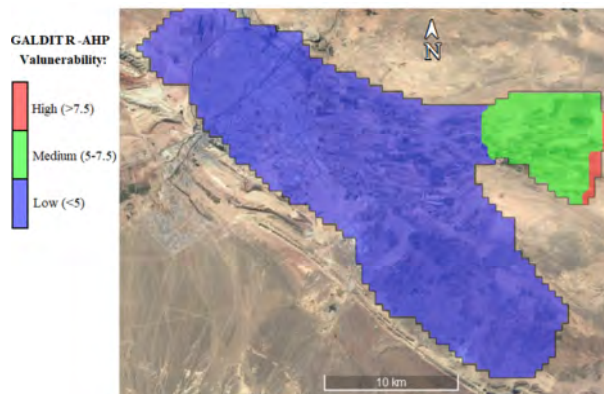


Fig. 13. Vulnerability map of Qom aquifer using AHP method in GALDITR model

شکل ۱۳- نقشه نهایی آسیب‌پذیری آبخوان قم با کاربرد روش AHP در مدل GALDITR

جدول ۷- درصد مساحت نواحی آسیب‌پذیری توسط مدل

GALDITR-AHP

Table 7. Percentage of vulnerability zones by GALDITR-AHP model

Vulnerability area	Area	
	%	Km ²
High	1.1	4.75
Medium	12.5	54.75
Low	86.4	377.75

شهر قم به رتبه کم تغییر یافته است. بر اساس نتایج به‌دست آمده، نوار مرزی شمال شرقی آبخوان با مساحت حدود $1/1$ درصد از مساحت کل آبخوان بیشترین آسیب‌پذیری را نسبت به پیشروی آب شور داشته است. منطقه با آسیب‌پذیری متوسط با مساحت حدود $12/5$ درصد از مساحت کل آبخوان در میان نواحی آسیب‌پذیری زیاد و کم قرار دارد. در نهایت بیشترین محدوده مربوط به ناحیه دارای کمترین آسیب‌پذیری با حدود $86/4$ درصد از مساحت کل آبخوان است. با مقایسه نقشه نهایی به‌دست آمده از مدل‌های GALDITR و GALDITR-AHP مشاهده می‌شود که مساحت ناحیه با آسیب‌پذیری کم در مدل GALDITR-AHP نسبت به مدل GALDITR حدود $1/5$ برابر افزایش داشته است. نتایج به‌دست آمده نشان داد که بخش شرقی آبخوان نیازمند توجه بیشتر و انجام برنامه‌های خاص مدیریتی برای کنترل پیشروی بیشتر آب شور به داخل آبخوان است. کاهش میزان برداشت از چاه‌های آبدۀ واقع در نواحی آسیب‌پذیر، افزایش کارایی آبیاری با

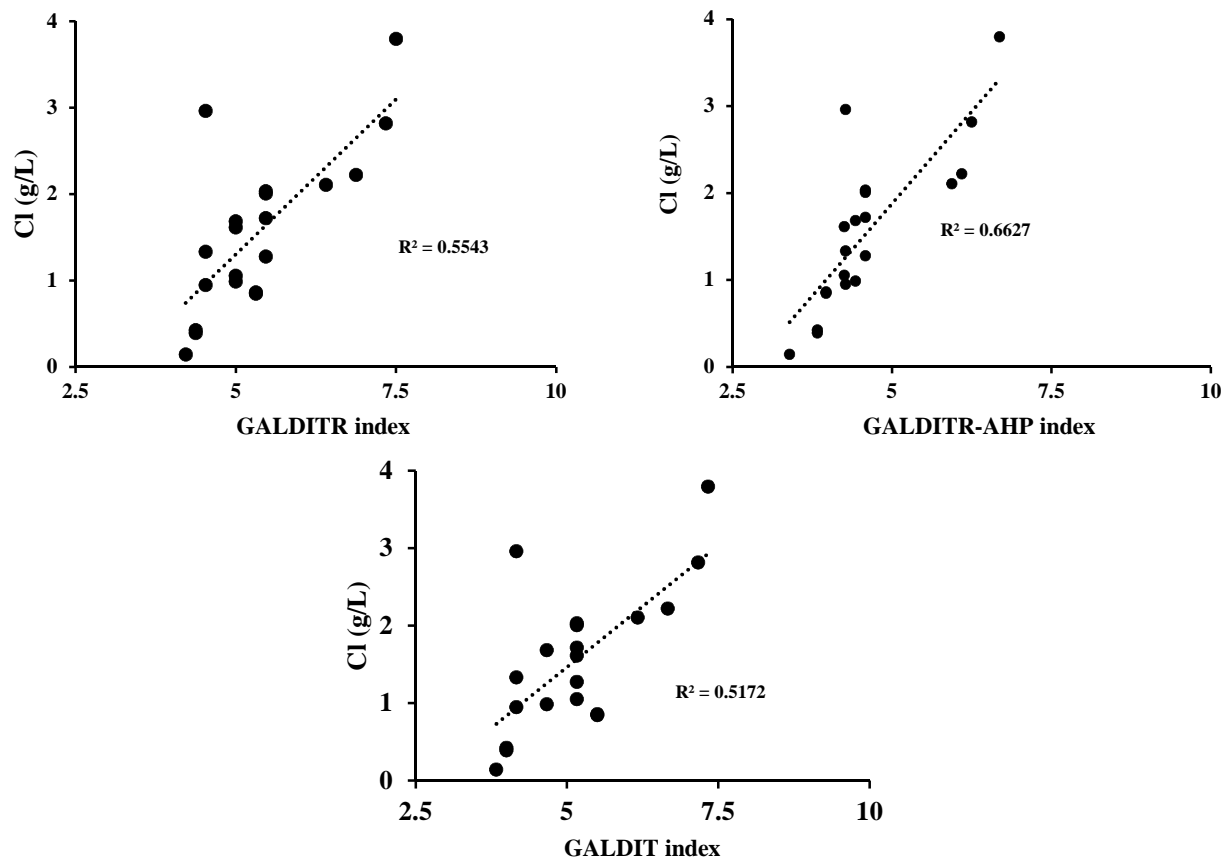


Fig. 14. Correlation between the vulnerability indices of offered models and chloride values for the study area
 شکل ۱۴- همبستگی بین مدل‌های ارائه شده و مقدار غلظت یون کلر برای منطقه مورد مطالعه

آب زیرزمینی را توسط آب‌های شیرین تغذیه شده به آبخوان ارزیابی کند. در این پژوهش، ابتدا نقشه آسیب‌پذیری آب زیرزمینی آبخوان قم برای اولین بار توسط روش GALDIT تهیه شده و تعداد و وسعت گسترش نواحی آسیب‌پذیر در آن تعیین شده است. بر اساس نتایج به دست آمده از آن، در حدود ۱، ۵۷ و ۴۲ درصد از آبخوان به ترتیب تحت تأثیر شوری بالا، متوسط و کم آب زیرزمینی قرار داشتند. پارامترهای هدایت هیدرولیکی آبخوان، ارتفاع سطح آب زیرزمینی نسبت به سطح آب دریا و فاصله عمودی تا خط ساحلی نقش مؤثری در وسعت و گستردگی این نواحی داشته‌اند.

سپس آسیب‌پذیری آبخوان قم نسبت به پیشروی آب شور با در نظر گرفتن اثر آب‌های انتقالی خارج از محدوده آبخوان در روش GALDIT بررسی شد. به این ترتیب پارامتر تغذیه سطحی آبخوان که مجموع تغذیه حاصل از بارندگی و آب‌های سطحی

غلظت یون کلر با مقدار حدود ۳/۸ گرم بر لیتر در بخش شمال شرقی آبخوان قم نمونه‌برداری شده است که در مدل GALDITR در ناحیه بسیار آسیب‌پذیر قرار گرفته است. مدل GALDITR-AHP با بیشترین ضریب همبستگی بهترین مدل برای ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان قم است و می‌توان به نتایج به دست آمده از آن در این منطقه اطمینان حاصل کرد.

۴- نتیجه‌گیری

این پژوهش به معرفی روش جدید GALDITR برای تعیین مناطق آسیب‌پذیر آبخوان ساحلی قم به پیشروی آب شور دریاچه نمک پرداخت. مدل GALDIT نقش تغذیه سطحی آبخوان بخصوص توسط آب‌های خارج از محدوده را در نظر نگرفته و تنها به خصوصیات آبخوان تمرکز کرده است. افزودن پارامتر تغذیه سطحی آبخوان در روش GALDITR می‌تواند رقیق‌سازی غلظت شوری

مدل‌های GALDIT، GALDITR-AHP و GALDITR- AHP و یون کلر به دست آمد. با افزودن پارامتر تغذیه سطحی آبخوان هم‌بستگی مدل GALDITR نسبت به مدل GALDIT افزایش یافت. بیشترین غلظت یون کلر نمونه برداری شده در بخش شمال شرقی آبخوان قم در ناحیه بسیار آسیب پذیر مدل GALDITR قرار گرفت. قابلیت اعتماد نتایج حاصل از مدل GALDITR-AHP با بیشترین مقدار هم‌بستگی اثبات شد.

همچنین نتایج نشان داد که بخش شرقی آبخوان در حال حاضر به طور ویژه تحت تأثیر پیشروی آب شور قرار دارد. منطقه بسیار آسیب پذیر و پس از آن ناحیه با آسیب پذیری متوسط استعداد زیادی برای پیشروی آب شور داشته و می‌توانند به عنوان محدوده گسترش و موقعیت گوهی آب شور برای پایش بهتر شوری برای مدیریت بهینه آبخوان ساحلی برای کنترل پیشروی آب شور به داخل آبخوان در نظر گرفته شوند.

۵- قدرت دانی

به این وسیله از حمایت مالی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز در قالب پژوهانه (Grant No. SCU C98.150) در انجام این پژوهش قدرت دانی می‌شود.

انتقالی می‌باشد به روش GALDIT اضافه شد. مشاهده شد که ناحیه با آسیب پذیری متوسط با وسعت حدود ۶۴ درصد وسعت بیشتری از آبخوان را نسبت به روش GALDIT فراگرفته است. وسعت زیاد ناحیه با رتبه بالای پارامتر تغذیه سطحی آبخوان منجر به افزایش وسعت این ناحیه شده است. وسعت ناحیه بسیار آسیب پذیر حاشیه مرز مجاور دریاچه نمک در این روش حدود ۲/۵ درصد از کل مساحت منطقه مورد مطالعه است.

سپس با توجه به شرایط منطقه مورد مطالعه، وزن پارامترهای مدل GALDITR توسط روش تحلیل سلسله مراتبی AHP مورد بازبینی قرار گرفت. در این روش پارامترهای فاصله از خط ساحلی، تراز سطح آب زیرزمینی نسبت به سطح دریاچه و تأثیر آب شور پیشروی کرده به ترتیب وزن بیشتری نسبت به سایر پارامترها گرفتند. وسعت نواحی آسیب پذیر توسط این روش تغییر کرد. ناحیه با آسیب پذیری کم به حدود ۸۶ درصد از آبخوان افزایش یافت، به طوری که آسیب پذیری آبخوان در حوالی شهر قم به پیشروی آب شور کاهش یافت.

برای اعتبارسنجی مدل‌های ارائه شده از هم‌بستگی بین مقدار یون کلر در نقاط مشاهده‌ای با شاخص آسیب پذیری مدل‌ها استفاده شد. مقدار هم‌بستگی ۰/۵۲، ۰/۵۵ و ۰/۶۶ به ترتیب برای

References

- Aller, L., Bennett, T., Lehr, J. H., Petty, R. J. & Hackett, G. 1987. DRASTIC : A standardized method for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. NWWA/Epa-600/2-87-035. US. EPA. Pub., Ada, Oklahoma, USA.
- Allouche, N., Maanan, M., Gontara, M., Rollo, N., Jmal, I. & Bouri, S. 2017. A global risk approach to assessing groundwater vulnerability. *Environmental Modelling and Software*, 88, 168-182.
- Bordbar, M., Neshat, A. & Javadi, S. 2019. A new hybrid framework for optimization and modification of groundwater vulnerability in coastal aquifer. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(21), 21808-21827.
- Chachadi, A. G. 2005. Seawater intrusion mapping using modified GALDIT indicator model-case study in Goa. *Jalvigyan Sameeksha*, 20, 29-45.
- Chachadi, A. G. & Lobo Ferreira, J. P. 2001. Sea water intrusion vulnerability mapping of aquifers using GALDIT method. *Coastin*, 4, 7-9
- Chang, S. W., Chung, I. M., Kim, M. G., Tolera, M. & Koh, G. W. 2019. Application of GALDIT in assessing the seawater intrusion vulnerability of Jeju Island, South Korea. *Water*, 11(9), 1824.
- Gontara, M., Allouche, N., Jmal, I. & Bouri, S. 2016. Sensitivity analysis for the GALDIT method based on the assessment of vulnerability to pollution in the northern Sfax coastal aquifer, Tunisia. *Arabian Journal of Geosciences*, 9, 1-15.

- Gorgij, A. D. & Moghaddam, A. A. 2016. Vulnerability assessment of saltwater intrusion using simplified GAPDIT method: a case study of Azarshahr plain aquifer, East Azerbaijan, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 9, 1-13.
- Gorgij, A. D. & Moghaddam, A. A. 2017. Assessment of saltwater pollution in Azarshahr plain groundwater, Iran: conjugating GALDIT method and geostatistics. *Journal of Water Sciences Research*, 9(1), 63-72.
- Hallal, D. D., Khelifi, M. E. A., Zahouani, S., Benamghar, A., Haddad, O., Ammari, A., et al. 2019. Application of the GALDIT method combined with geostatistics at the Bouteldja aquifer (Algeria). *Environmental Earth Sciences*, 78, 1-18.
- Jiao, J. & Post, V. 2019. *Coastal hydrogeology*, Cambridge University Press Cambridge, UK.
- Kardan Moghaddam, H., Jafari, F. & Javadi, S. 2015. Evaluation vulnerability of a coastal aquifer via GALDIT model and comparison with DRASTIC index using quality parameters. *Hydrological Sciences Journal*, 62, 137-146.
- Kazakis, N., Busico, G., Colombani, N., Mastrocicco, M., Pavlou, A. & Voudouris, K. 2019. GALDIT-SUSI a modified method to account for surface water bodies in the assessment of aquifer vulnerability to seawater intrusion. *Journal of Environmental Management*, 235, 257-265.
- Kazakis, N., Spiliotis, M., Voudouris, K., Pliakas, F. K. & Papadopoulos, B. 2018. A fuzzy multicriteria categorization of the GALDIT method to assess seawater intrusion vulnerability of coastal aquifers Nerantzis. *Science of the Total Environment*, 621, 524-534.
- Lobo Ferreira, J. P., Chachadi, A. G., Diamantino, C. & Henriques, M. J. 2005. Assessing aquifer vulnerability to seawater intrusion using GALDIT method: part 1 - application to the portuguese aquifer of Monte Gordo. *The 4th Inter-Ceptic Colloquium on Hydrology and Management of Water Resources Gtémaraes*, Portugal. 1-12.
- Luoma, S., Okkonen, J. & Korkka Niemi, K. 2017. Comparison of the AVI, modified SINTACS and GALDIT vulnerability methods under future climate-change scenarios for a shallow low-lying coastal aquifer in southern Finland. *Hydrogeology Journal*, 25, 203-222.
- Mahrez, B., Klebingat, S., Houha, B. & Houria, B. 2018. GIS-based GALDIT method for vulnerability assessment to seawater intrusion of the Quaternary coastal Collo aquifer (NE-Algeria). *Arabian Journal of Geosciences*, 11, 1-14.
- Mavriou, Z., Kazakis, N. & Pliakas, F. K. 2019. Assessment of groundwater vulnerability in the north aquifer area of Rhodes Island using the GALDIT method and GIS. *Environments*, 6, 1-11.
- Mirzavand, M., Ghasemieh, H., Sadatinejad, S. J., Bagheri, R. & Clark, I. D. 2018. Saltwater intrusion vulnerability assessment using AHP-GALDIT model in Kashan plain aquifer as critical aquifer in a semi-arid region. *Desert*, 23(2), 255-264.
- Moghaddam, H. K. & Javadi, S. 2016. Evaluation vulnerability coastal aquifer by GALDIT index and calibration by AHP method. *Journal of Water and Soil Conservation*, 23(2), 163-177. (In Persian)
- Motevalli, A., Moradi, H. R. & Javadi, S. 2018. A comprehensive evaluation of groundwater vulnerability to saltwater up-coning and sea water intrusion in a coastal aquifer (case study: Ghaemshahr-Juybar aquifer). *Journal of Hydrology*, 557, 753-773.
- Nakhaei, M., Vadiati, M. & Mohammadi, K. 2015. Evaluation of vulnerability of Urmia Lake saline water intrusion to coastal aquifer using GALDIT model. *Geosciences*, 24(95), 223-230. (In Persian)
- Nazari, A. & Nakhaei, M. 2000. Designing a mathematical model to protect the saline water intrusion into the Qom aquifer. *2nd Iran Water Resources Management Conference*, Isfahan, Iran. 1-8. (In Persian)

- Parizi, E., Hosseini, S. M., Ataie Ashtiani, B. & Simmons, C. T. 2019. Vulnerability mapping of coastal aquifers to seawater intrusion: review, development and application. *Journal of Hydrology*, 570, 555-573.
- Qom Regional Water Company, 2011. *The quality and quantity study of groundwater flow in the Qom-Kahak aquifer*. Civil Research Consulting Engineers. Qom, Iran. (In Persian)
- Ranjbar, A. & Mahjouri, N. 2018. Development of an efficient surrogate model based on aquifer dimensions to prevent seawater intrusion in anisotropic coastal aquifers, case study: the Qom aquifer in Iran. *Environmental Earth Sciences*, 77(418), 1-15.
- Robinove, C. J., Langford, R. H. & Brookhart, J. W. 1958. Saline water resources of north Dakota. *US Geographical Survey Water Supply Paper*, 364, 1418.
- Saaty, T. L. 1980. *The analytic hierarchy process*, McGraw-Hill, New York, USA.
- Saravanan, S., Parthasarathy, K. S. S. & Sivaranjani, S. 2019. Assessing coastal aquifer to seawater intrusion: application of the GALDIT method to the cuddalore aquifer, India. *In Coastal Zone Management*, 233-250.
- Seenipandi, K., Nainarpandian, C., Kandathil, R. K. & Sellamuthu, S. 2019. Seawater intrusion vulnerability in the coastal aquifers of southern India an appraisal of the GALDIT model, parameters' sensitivity, and hydrochemical indicators. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 9755-9784.
- Selmi, A. 2013. Water management and modeling of a coastal aquifer case study (Gaza strip). PhD Thesis in Earth Sciences, Univeristy of Milano Bicocca, Italy.
- Strack, O. D. L. 1976. A single-potential solution for regional interface problems in coastal aquifers. *Water Resources Research*, 12, 1165-1174.
- Zaarour, T. 2017. Application of GALDIT index in the mediterranean region to assess vulnerability to sea water intrusion. MSc Thesis, Lund University, Lund, Sweden.