



## Using Fuzzy Logic and AHP Models to Modify GALDIT Model in Coastal Aquifer Vulnerability Assessment

M. Bordbar<sup>1</sup>, A. Neshat<sup>2\*</sup> and S. Javadi<sup>3</sup>

### Abstract

As a source of drinking water, groundwater is very important in coastal aquifers. Groundwater vulnerability maps can be used in order to protect the quality of groundwater resources. Therefore, in this study, GALDIT model was applied to assess and determine vulnerable areas to seawater intrusion in Gharesoo-Gorgan Rood coastal aquifer. The GALDIT model is a type of rating models and needs to be calibrated for each study area. The novelty of this study was to use the Fuzzy Logic model to modify the GALDIT model. In addition, the weights of this model were modified by Analytical Hierarchy Process (AHP). The Pearson's correlation coefficient was used to validate the results. Correlation coefficient between Fuzzy-AHP and GALDIT-AHP models with TDS concentration was 0.63 and 0.51, respectively. As a result, Fuzzy-AHP model is the optimal model for the study area. The results of the vulnerability map indicated that areas in the northwest and west of aquifer are highly vulnerable to the seawater intrusion. The Fuzzy Logic model can be used as an effective way to modify the GALDIT model and ensure its results.

**Keywords:** Vulnerability, AHP, GIS, Fuzzy Logic.

Received: May 2, 2018

Accepted: January 3, 2019

## استفاده از مدل‌های Fuzzy Logic و AHP برای اصلاح مدل GALDIT در ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان ساحلی

مژگان بردبار<sup>۱</sup>، امین‌رضا نشاط<sup>۲\*</sup> و سامان جوادی<sup>۳</sup>

### چکیده

آب‌های زیرزمینی در نواحی ساحلی به عنوان منبع تأمین‌کننده آب شرب از اهمیت زیادی برخوردار هستند. نقشه‌های آسیب‌پذیری آب زیرزمینی می‌توانند در راستای حفاظت از کیفیت منابع آب زیرزمینی استفاده شوند. از این رو در این مطالعه، مدل GALDIT برای ارزیابی و تعیین نواحی آسیب‌پذیر در آبخوان ساحلی قره‌سو-گرگانرود نسبت به پیشروی آب شور به کار رفته است. مدل GALDIT از مدل‌های رتبه‌ای می‌باشد و در هر منطقه بایستی کالیبره شود. نوآوری این مطالعه استفاده از مدل Fuzzy Logic به منظور اصلاح مدل GALDIT است. علاوه بر این وزن‌های این مدل، با روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) اصلاح شد. سپس از ضریب همبستگی پیرسون برای اعتبارسنجی نتایج استفاده گردید. نتایج ضریب همبستگی بین مدل Fuzzy-AHP و GALDIT-AHP با غلظت TDS به ترتیب ۰/۶۳ و ۰/۵۱ حاصل شد. در نتیجه مدل بهینه برای ناحیه مورد مطالعه مدل Fuzzy-AHP می‌باشد. نقشه آسیب‌پذیری نهایی نشان داد که نواحی شمال غرب و غرب آبخوان آسیب‌پذیری زیاد به پیشروی آب شور دارند. مدل Fuzzy logic می‌تواند به عنوان روشی کارآمد جهت اصلاح مدل GALDIT به کار رود و می‌توان به نتایج حاصل از آن اطمینان نمود.

**کلمات کلیدی:** آسیب‌پذیری، AHP، GIS، Fuzzy Logic.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۷/۲/۱۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۷/۱۰/۱۳

1- M.Sc. graduate in GIS/RS, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

2- Assistant Professor, Department of GIS/RS, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. Email: [neshat.aminreza@srbiau.ac.ir](mailto:neshat.aminreza@srbiau.ac.ir)

3- Assistant Professor, Department of Irrigation and Drainage, Aburaihan Campus, University of Tehran, Iran.

\*- Corresponding Author

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، ایران.

۲- استادیار گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، ایران.

۳- استادیار گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، ایران.

\*- نویسنده مسئول  
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان تابستان ۱۳۹۸ امکانپذیر است.

گسترده ساحلی اجرا شود (Trabelsi et al., 2016). از دیگر ویژگی‌های این روش ترکیبی از تجزیه و تحلیل آب‌های زیرزمینی و پیشروی آب شور است (Saidi et al., 2013). تاکنون مطالعاتی برای ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان‌های ساحلی با استفاده از مدل Recinos et al., 2015; و GIS صورت گرفته است (Saidi et al., 2013; Najib et al., 2012; Saidi et al., 2013; Allouche et al., 2017; Trabelsi et al., 2016). به عنوان مثال Recinos et al. (2015) به کاربرد شاخص آسیب‌پذیری GALDIT در آبخوان یونان در طی دوره‌های زمانی مختلف پرداختند. نتایج حاصل نشان داد پارامترهای ارتفاع سطح آب زیرزمینی بالاتر از سطح دریا و تاثیر کیفی پیشروی آب دریا به دلیل استفاده بیش از حد از آبیاری به شدت تغییر یافته‌اند. در این تحقیق مدل GALDIT با توجه به خصوصیات هیدروژئولوژیکی منطقه اصلاح نگردیده است. در مطالعه‌ای مشابه، Najib et al. (2012) از روش GALDIT برای تعیین نواحی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی در مراکش استفاده نمودند. نتایج حاصل نشان داد که آسیب‌پذیری آبخوان از خط ساحلی وجود دارد و تا ۳ کیلومتری دشت می‌رسد. در این مطالعه صحت‌سنجی نتایج مدل GALDIT انجام نشده است. از آنجایی که مدل‌های شاخص‌گذاری و هم‌پوشانی از مدل‌های رتبه‌ای می‌باشند، می‌توان از روش تحلیل سلسله مراتبی جهت ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان استفاده نمود. تاکنون در سایر نقاط جهان، محققین مختلف با استفاده از این روش به بررسی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی پرداخته‌اند (Gorgij and Moghaddam, 2016; Sener and Darvaz, 2013; Neshat et al., 2014a; Neshat et al., 2015a; Kardan Moghaddam et al., 2017). از طرفی دیگر، طبقه‌بندی در روش‌های شاخص رتبه‌ای براساس روش بولین می‌باشد. در طبقه‌بندی به روش بولین باید مرز بین طبقات مشخص شود. شاخص‌های آسیب‌پذیری دارای ماهیت طیفی و دامنه‌دار می‌باشند. به همین جهت در طبقه‌بندی به روش بولین یک منطقه با کوچک‌ترین تغییر از یک طبقه به طبقه بالاتر یا پایین‌تر جابه‌جا می‌شود، که اصولاً قابل قبول و توجیه نیست. در صورتی که در روش Fuzzy با مفهوم درجه عضویت می‌تواند روشی مناسب به منظور طبقه‌بندی و رتبه‌بندی نسبت به روش بولین باشد (Malanoa and Gao, 1992).

روش Fuzzy در مطالعات بسیاری در مناطق مختلف جهت ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان به کار رفته است. از جمله Cameron and Peloso (2001) از مدل DRASTIC جهت تعیین پتانسیل آلودگی آب زیرزمینی استفاده نمودند. سپس رتبه‌بندی، طبقه‌بندی و تلفیق لایه‌ها را با روش فازی انجام دادند. در نهایت به این نتیجه رسیدند که روش فازی دارای انعطاف زیادی است و پتانسیل آلودگی را دقیق نشان

آب‌های زیرزمینی یکی از اجزاء اصلی منابع آب در بسیاری از مناطق دنیا هستند که به‌وسیله فعالیت‌های خانگی، کشاورزی یا فعالیت‌های دیگر آلوده شده‌اند (Shrestha et al., 2017). اثرات رشد جمعیت، شهرنشینی سریع، تنوع فعالیت‌های اقتصادی و کشاورزی به تخریب کمی و کیفی آب زیرزمینی کمک می‌کند (Allouche et al., 2017). آلودگی آب‌های زیرزمینی یکی از مهم‌ترین تهدیدات زیست‌محیطی می‌باشد که به‌وسیله فعالیت‌های انسانی ایجاد گردیده است (Neshat et al., 2015). تاکنون کیفیت آب در مدیریت آب زیرزمینی بیشتر مورد توجه بوده است (Neshat et al., 2014b; Ayazi et al., 2010; Pradhan, 2009).

تعیین نواحی آسیب‌پذیر می‌تواند کمک مؤثری در جلوگیری از آلودگی آب‌های زیرزمینی باشد. از این‌رو روش‌های بسیاری جهت ارزیابی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی وجود دارد که به سه گروه روش‌های شاخص‌گذاری، روش‌های آماری و روش‌های فرآیندی تقسیم می‌شود (Neshat et al., 2014c; Javadi et al., 2017; Soltani et al., 2018; Neshat and Pradhan, 2017; Riebeiro et al., 2017; Jafarighariehali et al., 2012). روش‌های آماری طیفی از آمار خلاصه ساده یا توصیفی تا تجزیه و تحلیل‌های پیچیده از غلظت آلاینده‌های مورد نظر را شامل می‌شود. روش‌های فرآیند مینا به رویکردهایی که یا شبیه‌سازی می‌کنند یا فرآیندهای فیزیکی حرکات آب و بخش‌های مرتبط و انتقال آلاینده‌ها در محیط‌زیست را در نظر می‌گیرند اشاره دارد. این نگرش‌ها معمولاً شامل استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی فرآیند که توزیع آسیب‌پذیری را بر اساس حرکات آب و محلول‌ها محاسبه می‌کنند؛ می‌باشند. روش‌های شاخص‌گذاری به‌طور مستقیم رتبه‌های عددی را برای توصیف‌های فیزیکی مختلف جهت ایجاد طیف وسیعی از گروه‌های آسیب‌پذیری اختصاص می‌دهند (Riebeiro et al., 2017; Jafari et al., 2016). احتمال حرکت آلاینده‌ها از طریق زمین و رسیدن به منابع آب زیرزمینی با استفاده از روش‌های ارزیابی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی مشخص می‌شود (Neshat and Pradhan, 2015b). مدل‌های آسیب‌پذیری آب زیرزمینی شامل پارامترهای مشابه هستند که با داده‌های مختلف به کار می‌روند (Neshat and Pradhan, 2015a). یکی از روش‌های شاخص‌گذاری و هم‌پوشانی به‌منظور ارزیابی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی روش GALDIT می‌باشد که توسط Chachadi and Lobo-Ferreira (2001) گسترش یافت. از مزایای این روش هزینه کم، نیاز به حجم داده کم و جمع‌آوری آسان اطلاعات است که می‌تواند در مناطق

## ۲- مواد و روش

### ۲-۱- ناحیه مورد مطالعه

ناحیه مورد مطالعه در استان گلستان واقع شده است (شکل ۱). آبخوان ساحلی قره سو-گرگانرود در بخش شرقی رشته کوه البرز با وسعت ۴۳۷۹ کیلومترمربع می باشد. حدود ۵۷٪ از وسعت دشت گرگان-گنبد آبخوان آزاد با آب شیرین شکل گرفته است. تغذیه سفره آب شیرین جلگه ساحلی گرگان به وسیله رودخانه های پرآب دائمی، نزولات جوی و جریان ورودی زیرزمینی که از ارتفاعات وارد دشت می شوند انجام می یابد. در اولین دوره آماربرداری از منابع آب زیرزمینی دشت گرگان-گنبد در سال ۱۳۴۶ مقدار بهره برداری سالانه ۳۶۰ میلیون مترمکعب بوده که در سال آبی ۸۵-۱۳۸۴، ۱۰۵۷/۳۹۵ میلیون مترمکعب برآورد شده است. کیفیت آب زیرزمینی در این منطقه از جنوب به سمت شمال و از شرق به سمت غرب کاهش می یابد. ارتفاع بارندگی در محدوده گرگان و قره سو به ترتیب ۵۷۴/۸ و ۲۴۵/۲ میلی متر است. حداکثر دمای منطقه ۴۹ درجه سانتی گراد می باشد.

### ۲-۲- روش ارزیابی آسیب پذیری GALDIT

در روش GALDIT آسیب پذیری آبخوان ساحلی بر اساس خصوصیات هیدروژئولوژیکی آبخوان ارزیابی می شود. شش پارامتر این روش شامل نوع آبخوان، هدایت هیدرولیکی آبخوان، ارتفاع سطح آب زیرزمینی بالاتر از سطح دریا، فاصله از خط ساحلی، تأثیر کیفی پیشروی آب دریا در نواحی ساحلی و ضخامت آبخوان می باشند. در بحث آسیب پذیری برخی از پارامترها نسبت به سایر عوامل اهمیت بیشتری دارند. بر این اساس به هر پارامتر با توجه به اهمیت نسبی آن نسبت به سایر عوامل وزنی از یک تا چهار اختصاص داده می شود. به مهم ترین عامل وزن چهار و کم اهمیت ترین آن وزن یک نسبت داده می شود. علاوه بر این هر پارامتر به بازه هایی تقسیم بندی می شوند. هر پارامتر در محدوده ۲/۵، ۵، ۷/۵ و ۱۰ رتبه بندی می گردد. رتبه ۲/۵ آسیب پذیری کم و رتبه ۱۰ آسیب پذیری زیاد را نشان می دهد (جدول ۱). مقادیر شاخص آسیب پذیری از مجموع ضرب هر پارامتر رتبه بندی شده در وزن آن به دست می آید که در رابطه ۱ نشان داده شده است (Chachadi, 2005):

$$\text{GALDIT Index} = \frac{\sum_{i=1}^6 \{(W_i)R_i\}}{\sum_{i=1}^6 W_i} \quad (1)$$

در اینجا، رتبه و وزن هر پارامتر به ترتیب با  $R_i$  و  $W_i$  است. این شاخص درجه آسیب پذیری آب زیرزمینی نسبت به پیشروی آب شور در آبخوان ساحلی را تعیین می نماید. اندازه نسبی آسیب پذیری به آلاینده موجب ایجاد شاخص مورد نظر می شود.

می دهد. Dixon (2005) نقشه آسیب پذیری آبخوان رود Mississippi را با استفاده از منطق Fuzzy تهیه کرد. وی با هدف بهبود مدل DRASTIC نقشه های پتانسیل آلودگی را با استفاده از اطلاعات ساختار خاک و کاربری اراضی تهیه نمود. نتایج وی نشان داد که استفاده از پارامتر خاک در نقشه آسیب پذیری با استفاده از مدل Fuzzy تطابق خوبی با مشاهدات میدانی دارد. پیش بینی برای مدل آسیب پذیری Fuzzy که با استفاده از اطلاعات شاخص بارگیری آفت کش ها تولید شده بود، به میزان قابل توجهی بهبود نیافت. استفاده از اطلاعات کودهای شیمیایی در این مدل نیازمند شناسایی بیشتر است، که از نقاط ضعف این مطالعه است. (Pathakat et al. (2008) از روش DRASTIC و تکنیک Fuzzy به منظور ارزیابی آسیب پذیری آبخوان کاتماندو استفاده نمودند. نتایج مدل DRASTIC نشان داد که در برخی نواحی اختلاف مقادیر پارامترها با یک محدوده یکسان را نادیده می گیرد و اثر تغییرات فاکتورهای هیدروژئولوژیکی بر آسیب پذیری را در نظر نمی گیرد. در صورتی که روش Fuzzy در تعیین آسیب پذیری کارآمدتر و کاربردی تر است. (Duhalde et al. (2018) به مقایسه سه روش DRASTIC، GOD و Ekv برای ارزیابی آسیب پذیری دره ای در شیلی پرداختند. در این مطالعه تکنیک Fuzzy برای مواجهه با عدم قطعیت مربوط به پارامترهای هیدروژئولوژیکی، به کار رفت. نتایج حاصل نشان داد که بیشترین آسیب پذیری در بخش غربی منطقه وجود دارد و از غرب به سمت شرق آسیب پذیری در حال کاهش است. علاوه بر این روش Fuzzy آسیب پذیری را بهتر از روش های معمول ارزیابی می کند. از مطالعات فوق می توان به این نتیجه رسید که روش های تصمیم گیری چندمعیاره و مدل Fuzzy به عنوان مدل های کاربردی در طول سال های اخیر استفاده می شوند. علاوه بر این GIS می تواند به عنوان یک ابزار کمکی برای تهیه نقشه های آسیب پذیری استفاده شود.

با توجه به خلاهای تحقیقاتی که برای اصلاح مدل GALDIT وجود دارد. از اینرو این مطالعه برای اولین بار به کاربرد مدل Fuzzy logic در اصلاح این مدل برای ارزیابی آسیب پذیری آبخوان ساحلی قره سو-گرگانرود در استان گلستان پرداخته است. همچنین، وزن های این مدل با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی اصلاح گردید. جهت ارزیابی دقیق تر آسیب پذیری و شناخت نواحی آسیب پذیر در آبخوان ساحلی مدل های Fuzzy و AHP با هم تلفیق گردیدند. سپس نقشه های ترکیبی GALDIT-AHP و Fuzzy-AHP برای ناحیه مورد مطالعه تهیه و مقایسه شد.

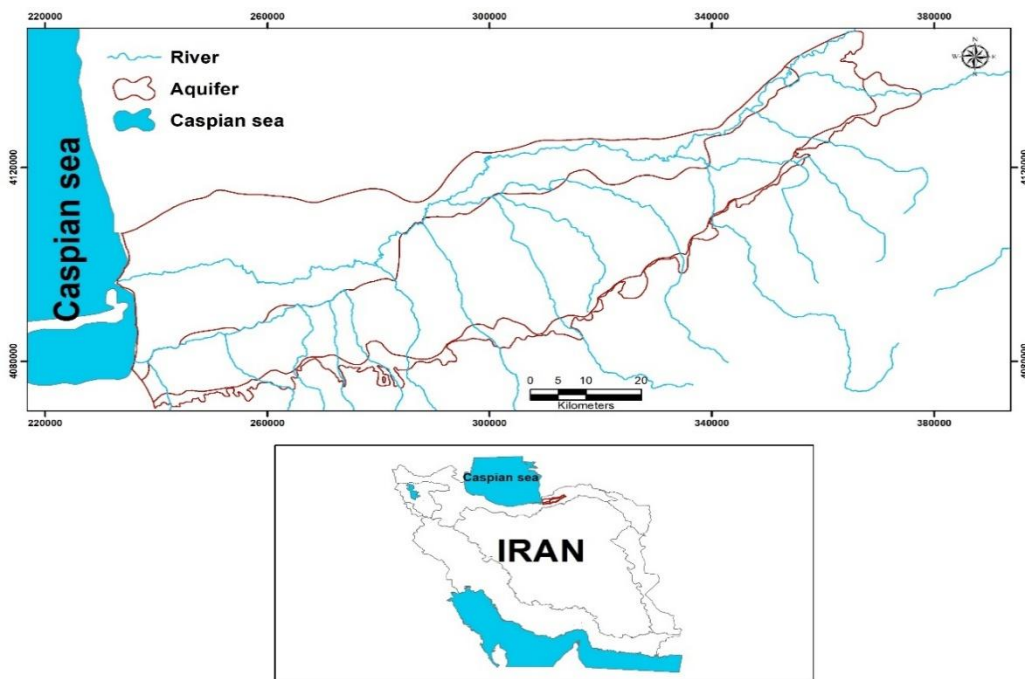


Fig. 1- Geographical location of case study area

شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

ارتفاع سطح آب زیرزمینی بالای سطح آب دریا: مهم‌ترین پارامتر در ارزیابی آسیب‌پذیری، سطح آب زیرزمینی نسبت به ارتفاع دریا است. این اختلاف ارتفاع تأمین‌کننده فشار حرکت جبهه آب شور به سمت دریا است. رابطه گیبین-هرزبرگ بیان می‌کند با برداشت هر متر آب شیرین ذخیره شده بالای ارتفاع متوسط دریا، ۴۰ متر آب شور بالا می‌آید. از این رو اگر سطح آب دریا افزایش یابد موجب کاهش تخلیه میزان آب زیرزمینی به دریا شده و در نهایت پیشروی آب شور به آبخوان ساحلی افزایش خواهد یافت. اگر ارتفاع سطح آب زیرزمینی بالاتر از سطح دریا، کاهش یابد؛ آسیب‌پذیری آبخوان افزایش خواهد یافت.

فاصله از خط ساحلی: پیشروی آب شور به آبخوان ساحلی، زمانی که شرایط هیدروژئولوژیکی آبخوان برای انتقال مناسب باشد؛ به بیشترین مقدار می‌رسد. تأثیر حرکات جزر و مد با فاصله از ساحل کمتر می‌شود. هر چه فاصله از خط ساحلی بیشتر باشد، آسیب‌پذیری آبخوان کاهش می‌یابد.

تأثیر کیفی پیشروی آب دریا در نواحی ساحلی: بر اثر برداشت آب زیرزمینی غلظت TDS افزایش می‌یابد، که موجب پیشروی آب شور به آبخوان ساحلی می‌شود. نسبت  $CL/HCO_3$  به‌عنوان معیاری برای شناسایی گسترش آب شور به آبخوان ساحلی است. به این دلیل

پس از محاسبه شاخص GALDIT، نواحی آسیب‌پذیر آبخوان تعیین می‌گردد. شاخص آسیب‌پذیری بزرگتر بیانگر آسیب‌پذیری بیشتر آبخوان است. در زیر هر کدام از پارامترها به اختصار تشریح شده است.

نوع آبخوان: آب‌های زیرزمینی معمولاً در سازندهای زمین‌شناسی ایجاد می‌شوند. آبخوان‌ها به چهار گروه آبخوان تحت‌فشار، آزاد، نشتی و محدود طبقه‌بندی می‌شوند. پیشروی آب شور به نوع آبخوان بستگی دارد. آبخوان تحت‌فشار بیشترین رتبه را در بین آبخوان‌های دیگر دارد که دلیل آن مخروط افت بزرگتر در این آبخوان می‌باشد. داده‌های مربوط به این پارامتر از نقشه‌های زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی تهیه شد.

هدایت هیدرولیکی: هدایت هیدرولیکی از ویژگی‌های آبخوان است که حرکت آب از طریق خلل و فرج و شکاف‌ها را نشان می‌دهد. پیشروی آب شور تحت تأثیر هدایت هیدرولیکی آبخوان است. هر چه هدایت هیدرولیکی آبخوان بیشتر باشد، پیشروی آب شور به آبخوان بیشتر خواهد بود. هدایت هیدرولیکی زیاد به دلیل پمپاژ و ایجاد مخروط افت بزرگتر می‌تواند سبب پیشروی آب شور به آبخوان ساحلی شود. بیشترین مقدار پیشروی آب شور در فصول خشک که تغذیه ناشی از بارندگی صفر است، رخ می‌دهد.

که، کلراید در آب زیاد می‌باشد و مقدار کمی در آب زیرزمینی وجود دارد و برعکس.

**ضخامت آبخوان:** فاصله بین سطح ایستابی تا لایه نفوذناپذیر را ضخامت آبخوان تشکیل می‌دهد. نقشه ضخامت آبخوان با استفاده از لاگ سنگ‌شناسی تولید می‌شود.

### ۳-۲- روش Fuzzy

در همه روش‌های ارزیابی آسیب‌پذیری، عدم قطعیت ناشی از خطای اطلاعاتی و متغیر بودن پارامترهای هیدروژئولوژیکی نسبت به زمان و مکان می‌باشد (Anonymous, 1993). بنابراین ایجاد مدلی برای مقابله با عدم قطعیت می‌تواند ابزار مناسبی برای مدیریت آبخوان‌ها باشد. با توجه به اینکه تلفیق لایه‌ها در مدل GALDIT با منطق بولین صورت می‌گیرد، موجب ایجاد خطا در مقادیر مرزی گردیده و تغییرات جزئی در مقادیر عوامل موجب جابه‌جایی از یک طبقه به طبقه دیگر می‌شود که قابل توجه نمی‌باشد. از اینرو روش Fuzzy موجب افزایش دقت نتایج به ویژه در مناطق مرزی می‌گردد و تغییرات تدریجی بهتر مشخص می‌شود. از طرف دیگر، هدف نهایی تهیه نقشه آسیب‌پذیری منطقه است که جهت هم‌پوشانی، لایه‌ها بایستی هم‌مقیاس باشند. پارامترهای مختلف در مقیاس‌های متفاوتی اندازه‌گیری می‌شوند، که می‌توانند به صورت کمی (هدایت هیدرولیکی، ارتفاع سطح آب زیرزمینی و غیره) اندازه‌گیری شده باشند. برای اعمال تحلیل‌های تصمیم‌گیری باید ارزش‌های موجود در نقشه‌های معیار تغییر کنند و تبدیل به واحدهای قابل مقایسه شوند. یعنی برای تلفیق نقشه‌های معیار مختلف، بایستی مقیاس‌ها قابل مقایسه باشند. مفهوم توابع عضویت Fuzzy می‌تواند برای تولید نقشه‌های معیار قابل مقایسه استفاده شوند (Malczewski, 1999). بنابراین از روش Fuzzy نیز برای هم‌مقیاس‌سازی نقشه‌های معیار استفاده شد. در هر نقشه فاکتور فازی، ارزش هر یک از کلاس‌ها و واحدهای مکانی موجود با درجات

عضویت Fuzzy حد واسط بین صفر تا یک نشان داده شد. به‌منظور تهیه نقشه فاکتور فازی در این پژوهش، با تعریف توابع خطی و با توجه به اثر مثبت و یا منفی هر پارامتر و در نظر گرفتن معیارها و ضوابط ارائه شده در ArcGIS از رابطه (۲) اجرا گردید:

$$r_{ij} = \frac{X_{ij} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (2)$$

$$r_{ij} = \frac{\max(x_j) - X_{ij}}{\max(x_j) - \min(x_j)}$$

که در اینجا،  $X_{ij}$  مقدار فاکتور  $r_{ij}$ ،  $\max(x_j)$  و  $\min(x_j)$  به ترتیب مقادیر بیشینه و کمینه فاکتور نام مربوط به مدل GALDIT و  $r_{ij}$  مقدار عضویت هستند.

### ۴-۲- روش AHP

روش AHP توسط ساعتی در سال ۱۹۸۰ (Saaty, 1980) که در تصمیم‌گیری چندمعیاره، با سلسله مراتب سازنده استفاده می‌شود؛ گسترش یافت. بخش اصلی AHP ساخت یک سری ماتریس مقایسه زوجی (PCM) است که اجازه مقایسه بین معیارهای مختلف را می‌دهد. وزن و رتبه هر معیار و زیرمعیار، ارزیابی آن‌ها را آسان می‌کند و اهمیت آن در دستیابی به هدف را نشان می‌دهد (Neshat et al., 2014a; Neshat et al., 2018). در این روش یک سلسله مراتب ایجاد کرده و سپس مقایسات زوجی صورت می‌گیرد. ماتریس زوجی بر اساس اهمیت هر عامل از یک تا نه تشکیل می‌شود (جدول ۲). شاخص سازگاری (CI) از رابطه ۳ به دست می‌آید:

$$CI = \frac{(\lambda_{max} - n)}{(n-1)} \quad (3)$$

نسبت ناسازگاری (CR) از رابطه ۴ محاسبه می‌شود:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (4)$$

در اینجا، RI شاخص تصادفی است که به تعداد عناصر مقایسه شده بستگی دارد. اگر  $CR < 0.1$  باشد نشان‌دهنده یک سطح منطقی در مقایسات زوجی می‌باشد.

**Table 1- Ratings and weights for the GALDIT mode (Chachadi, 2005)**  
**جدول ۱- رتبه‌بندی و وزن‌دهی مدل GALDIT (Chachadi, 2005)**

parameter	Weight	2.5	5	7.5	10
Groundwater occurrence	1	Bounded aquifer	Leaky confined aquifer	Unconfined aquifer	Confined aquifer
Aquifer hydraulic conductivity	3	<5	5-10	10-40	>40
Level of groundwater	4	>2.0	1.5-2	1.5-1	<1.0
Distance from shoreline	4	>1000	750-1000	500-750	<500
Impact of existing seawater intrusion	1	<1.0	1.0-1.5	1.5-2	>2.0
Thickness of aquifer	2	<5	5-7.5	7.5-10	>10

در این رابطه،  $Z * (X_0)$  مقادیر برآورد شده،  $n$  تعداد نقاط،  $Z(X_i)$  مقادیر اندازه‌گیری شده در نقطه  $X_i$ ،  $\lambda_i$  وزن کریجینگ است.

### ۳- نتایج و بحث

لایه‌های آسیب‌پذیری پارامترهای GALDIT در محیط نرم‌افزار ArcGIS با اندازه سلول  $10 \times 10$  متر تهیه گردید. نقشه نوع آبخوان نشان داد که منطقه مورد مطالعه از دو نوع آبخوان آزاد و تحت فشار تشکیل شده است که براساس جدول ۱ به ترتیب رتبه  $7/5$  و  $10$  را به خود اختصاص می‌دهند. نقشه هدایت هیدرولیکی آبخوان از تقسیم نقشه ضریب قابلیت انتقال (T) بر نقشه ضخامت آبخوان (B) به دست می‌آید. داده‌های مربوط از آزمایش‌های پمپاژ تهیه گردید. نقشه هدایت هیدرولیکی آبخوان در ۴ محدوده طبقه‌بندی گردید که بیشترین میزان آن در محدوده  $10-40$  m/day می‌باشد. نقشه پارامتر ارتفاع سطح آب زیرزمینی بالاتر از سطح دریا از داده‌های تراز آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه و درون‌یابی کریجینگ دست آمد. مقادیر این نقشه از  $3/3-3/1$  تا  $1/95$  متر می‌باشد. کمترین مقدار آن در قسمت غرب منطقه مورد مطالعه در مجاورت دریا است. نقشه فاصله از خط ساحلی از ابزار Buffer در نرم‌افزار ArcMap تهیه شد. بر اساس جدول رتبه‌بندی GALDIT از رتبه  $2/5$  (آسیب‌پذیری کم) تا رتبه  $10$  (آسیب‌پذیری زیاد) طبقه‌بندی می‌گردد. این نقشه نشان داد که نواحی نزدیک به خط ساحلی بیشترین آسیب‌پذیری به پیشروی آب شور را دارد. در فواصل بیشتر از  $1000$  متر از خط ساحلی میزان آسیب‌پذیری در حال کاهش است. نقشه پارامتر کیفی پیشروی آب دریا در نواحی ساحلی از درون‌یابی کریجینگ حاصل شد. نقشه تاثیر کیفی پیشروی آب دریا در نواحی ساحلی نشان داد که کمترین میزان  $CL/HCO_3$  در نواحی شرق و جنوب آبخوان وجود دارد. نقشه پارامتر ضخامت آبخوان از اختلاف نقشه عمق سطح آب و ضخامت آبخوان با استفاده از درون‌یابی کریجینگ به دست آمد. این نقشه نشان داد که نواحی غرب منطقه کمترین ضخامت را دارند (شکل ۲). نقشه نهایی آسیب‌پذیری GALDIT از هم‌پوشانی شش پارامتر این مدل به دست آمد و به  $4$  کلاس آسیب‌پذیری کم تا بسیار زیاد تقسیم‌بندی گردید. شکل ۴ نشان داد که نواحی غرب، شمال غرب و جنوب غرب در کلاس آسیب‌پذیری زیاد- بسیار زیاد قرار می‌گیرند. در حالی که نواحی شرق و جنوب آبخوان در کلاس آسیب‌پذیری کم قرار دارند و  $14$  درصد از منطقه را می‌پوشاند (شکل ۵). براساس نقشه نهایی شوری در نواحی دور از دریا مشاهده شد. عواملی از قبیل رشد جمعیت و توسعه کشاورزی تاثیر زیادی بر اکوسیستم و منابع طبیعی در منطقه مورد مطالعه دارد. در مطالعه‌ای مشابه که توسط Gontara et al. (2016) با استفاده از مدل GALDIT در تونس انجام گردید، پیشروی آب شور در نواحی

Table 2- The Saaty rating scale for AHP method (Saaty, 1980)

جدول ۲- مقایسات زوجی ساعتی برای روش تحلیل سلسله مراتبی (Saaty, 1980)

Preference level	Numerical value
Extremely preferred	9
Very strongly preferred	7
Strongly preferred	5
Moderately preferred	3
Equally preferred	1
Intermediate values	2, 4, 6, 8

### ۲-۵- روش زمین‌آمار

برآوردها از طریق زمین‌آمار شامل دو مرحله است که مرحله اول تشخیص و مدل‌سازی ساختار مکانی است. در این مرحله ساختار مکانی متغیرها با استفاده از واریوگرام صورت می‌گیرد. در مرحله دوم زمین‌آمار با استفاده از روش‌های کریجینگ نسبت به برآورد و پیش‌بینی نقاط مجهول استفاده می‌شوند. این روش‌ها با در نظر گرفتن موقعیت مکانی نقاط و ارتباط بین آن‌ها از کارایی بیشتری برای تجزیه و تحلیل برخوردار هستند. تجزیه و تحلیل ساختار تغییرات مکانی با استفاده از واریوگرام صورت می‌گیرد. واریوگرام‌ها برای تعیین همبستگی و دامنه وابستگی مکانی استفاده می‌شوند.

روش کریجینگ یک روش‌یابی خطی و براساس میانگین متحرک وزنی است. این روش مقادیر برآورده شده و میزان خطای تخمینی در هر نقطه را مشخص می‌نماید. علی‌رغم تمام مزایای این روش، نرمال کردن تغییرات در هنگام تخمین موجب می‌گردد که واریانس نمونه‌های برآورد شده نسبت به نقاط واقعی تغییرات کمتری داشته باشد (Xu et al., 2006). مدل کریجینگ در همبستگی مکانی بین داده‌ها نقش اساسی دارد. این درون‌یابی به تعداد نقاط نمونه‌برداری و فاصله نقاط از یکدیگر بستگی دارد. بهترین تخمین‌گر خطی ناریب باید حداقل واریانس از خطای برآورد شده داشته باشد. امروزه تعداد زیادی از روش‌های کریجینگ از قبیل کریجینگ ساده، کریجینگ معمولی، کریجینگ جهانی و کوکریجینگ استفاده می‌شوند (Trabelsi et al., 2016). روش کریجینگ معمولی از مهم‌ترین تخمین‌گرهای زمین‌آمار و بهترین تخمین‌گر خطی ناریب است (Goovaerts, 1997). این روش نسبت به روش‌های دیگر کریجینگ بیشترین کاربرد را دارد. این درون‌یابی جهت برآورد مستقل از اندازه‌گیری‌های واقعی میدانی صورت می‌گیرد. در این روش مقادیر نقطه مجهول از مقادیر معلوم اطراف و از یک مدل واریوگرام به دست می‌آید. درون‌یابی کریجینگ معمولی از رابطه ۵ به دست می‌آید:

$$Z * (X_0) = \sum_{i=1}^N n \lambda_i Z(X_i) \quad (5)$$

لایه ضخامت آبخوان منطقه نشان می‌دهد که هر چه به یک نزدیک‌تر می‌شویم آسیب‌پذیری نیز بیشتر می‌شود (شکل ۳). روش Fuzzy می‌تواند هم‌مقیاس‌سازی نقشه‌های پارامترهای GALDIT را مطلوب نماید. در روش AHP براساس نظرات کارشناسان ماتریس وزن‌دهی برای شش پارامتر مدل GALDIT تشکیل گردید. سپس وزن هر عامل در ماتریس در نرم‌افزار Expert choice به‌دست‌آمد (جدول ۴). برای کاهش خطای تصمیم‌گیری و انتخاب صحیح وزن‌ها از چندین نظر کارشناسی برای وزن‌دهی به روش AHP استفاده شد. میزان سازگاری به منظور جلوگیری از تصادفی بودن نظرات کارشناسی استفاده شد. در این مطالعه نرخ سازگاری برابر ۰/۰۹ به دست آمد. نقشه نهایی GALDIT-AHP از ضرب هر لایه مدل GALDIT در وزن متناظر آن از روش AHP و هم‌پوشانی تهیه شد. نقشه نهایی نشان داد که منطقه مورد مطالعه به چهار کلاس آسیب‌پذیری کم (۸٪)، متوسط (۳۸٪)، زیاد (۳۱٪) و بسیار زیاد (۲۳٪) تقسیم شده است. پس از تولید نقشه معیارها به روش Fuzzy، هر لایه در وزن متناظر آن که با AHP محاسبه شده است ضرب گردید و از مجموع تمام نقشه‌ها نقشه نهایی آسیب‌پذیری Fuzzy-AHP منطقه به دست آمد (شکل ۴).

نقشه نهایی نشان داد بیشترین آسیب‌پذیری در شمال غرب و غرب منطقه مورد مطالعه وجود دارد.

دورتر از دریای مدیترانه مشاهده شد. در مطالعه‌ای دیگر (Allouche et al. 2017) آسیب‌پذیری آبخوانی در تونس را با بهره‌گیری از مدل GALDIT ارزیابی نمودند. نتایج نشان داد که در نواحی ساحلی بیشترین حساسیت به پیشروی آب شور نسبت به نواحی دیگر دارند و در برخی نواحی غیر ساحلی (شمال و جنوب آبخوان) پیشروی آب شور وجود دارد.

برای تهیه لایه‌ها به روش Fuzzy، ابتدا نوع تابع هر پارامتر تعریف شد (جدول ۳). سپس خروجی حاصل از هر مرحله، لایه رستری است که برای هر لایه اطلاعاتی بر اساس طبقه‌بندی و ضوابط تعریف‌شده، ارزش‌هایی بین صفر و یک در نظر گرفته شد. لایه هدایت هیدرولیکی منطقه به نقشه فازی بر مبنای صفر و یک تبدیل شد و پس از انجام مراحل به نقشه فاکتور فازی تبدیل گردید. این نقشه نشان داد که هر چه به یک نزدیک‌تر می‌شویم آسیب‌پذیری بیشتر می‌شود. لایه ارتفاع سطح آب زیرزمینی بالاتر از سطح دریا نشان داد که قسمت شمال غرب، غرب و جنوب غرب منطقه بیشترین آسیب‌پذیری به پیشروی آب شور را دارد. هر چه به یک نزدیک‌تر می‌شویم آسیب‌پذیری نیز بیشتر می‌شود. لایه فاصله از خط ساحلی بر مبنای فاصله رستری شد. این نقشه نشان‌دهنده این است که خط نزدیک به ساحل بیشترین آسیب‌پذیری به آب شور را دارد. یعنی هر چه به یک نزدیک‌تر می‌شویم آسیب‌پذیری نیز بیشتر می‌شود. لایه تأثیر کیفی پیشروی آب شور نشان داد هر چه به صفر نزدیک‌تر می‌شویم آسیب‌پذیری نیز کمتر می‌شود.

**Table 3- Fuzzy functions for GALDIT model**  
جدول ۳- توابع Fuzzy مدل GALDIT

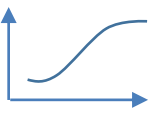
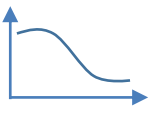
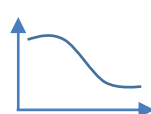
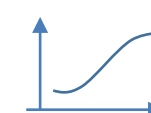
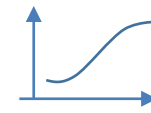
Factor	Function type	Function type
Aquifer hydraulic conductivity	Increasing linear function	
Level of groundwater	Decreasing linear function	
Distance from the shoreline	Decreasing linear function	
Impact of existing seawater intrusion	Increasing linear function	
Thickness of aquifer	Increasing linear function	

Table 4- Modified GALDIT model using AHP method

جدول ۴- مدل اصلاح شده GALDIT با روش AHP

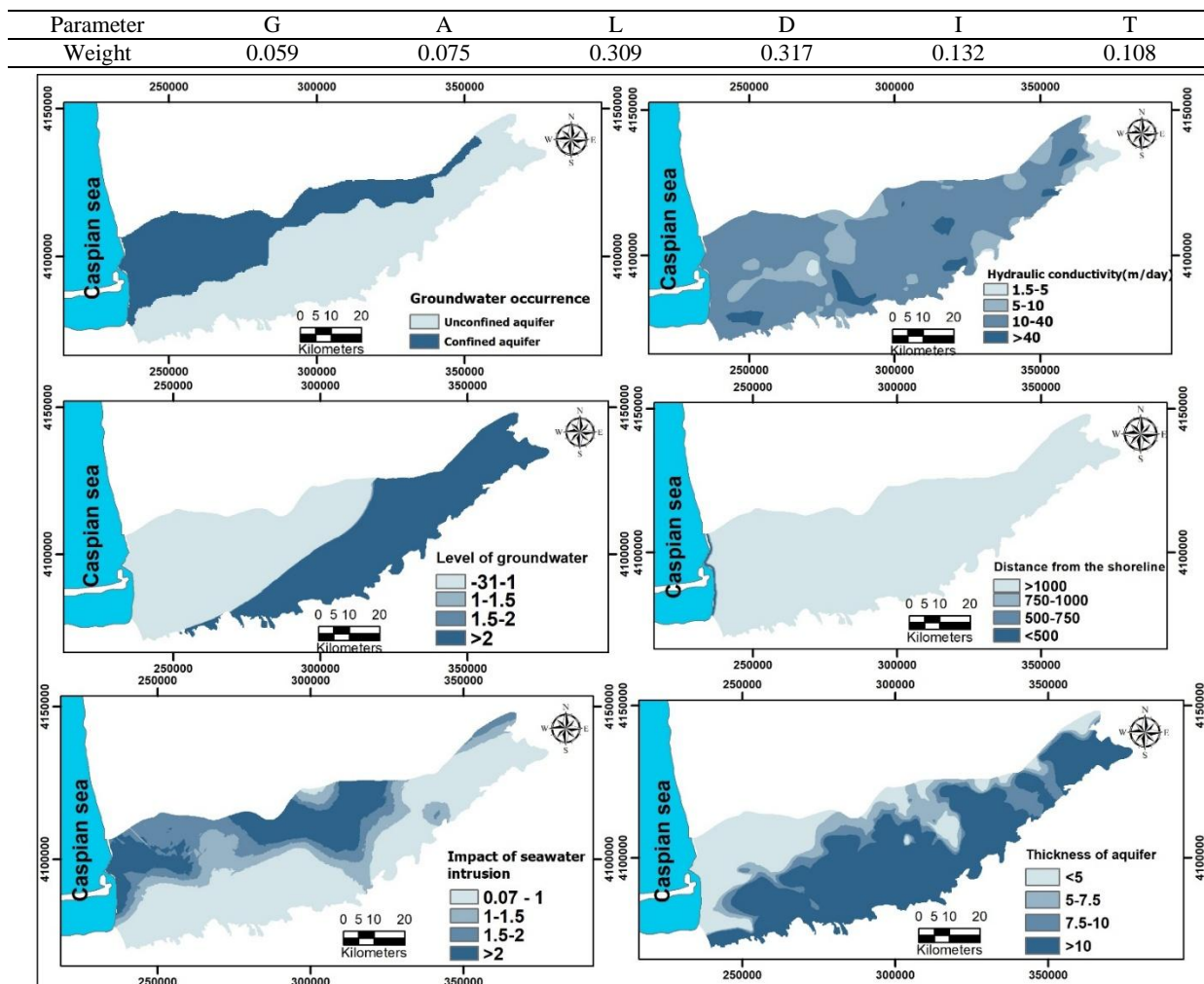


Fig. 2- GALDIT parameters

شکل ۲- پارامترهای GALDIT

در منطقه مورد مطالعه از درون یابی کریجینگ معمولی به دست آمد (شکل ۶). با توجه به شکل ۶ میزان TDS در ناحیه مورد مطالعه در محدوده ۳۹۵۷/۴۴-۴۷۶/۹ mg/l می باشد. میزان TDS موجود در آب های زیرزمینی در نواحی کم عمق آبخوان در قسمت شمال غربی و غرب آبخوان، در امتداد خط ساحلی بیش از سایر مناطق آبخوان می باشد. این مقادیر بالای TDS نشان دهنده پیشروی شوری می باشد. در حالی که کمترین میزان TDS در نواحی شرقی منطقه مورد مطالعه مشاهده شد. این موضوع با طبقه بندی آسیب پذیری آبخوان مورد مطالعه، که با روش Fuzzy حاصل شد، تطابق دارد و نتایج به دست آمده از مدل ها را تایید می کند. همانطور که در شکل ۴ مشاهده می شود، نقشه حاصل از ترکیب روش های Fuzzy و AHP نشان داد

در این نواحی ارتفاع سطح آب زیرزمینی کم، فاصله از خط ساحلی کمتر از ۵۰۰ متر و آبخوان از نوع تحت فشار می باشد. این نقشه به چهار کلاس آسیب پذیری کم (۲۰٪)، متوسط (۲۰٪)، زیاد (۲۵٪) و بسیار زیاد (۳۵٪) تقسیم بندی می شود (شکل ۵). استفاده از روش Fuzzy حالت تغییرات تدریجی برای هر پارامتر را بهتر مشخص می نماید.

### ۳-۱- صحت سنجی مدل

با توجه به اینکه روش GALDIT از روش های ارزیابی آسیب پذیری در نواحی ساحلی می باشد برای صحت سنجی از غلظت TDS استفاده شد. در نمونه های برداشت شده از ۵۳ چاه موجود در منطقه مورد مطالعه، فقط مقدار TDS اندازه گیری شد. نقشه توزیع غلظت TDS



مدیریت و حفاظت از منابع آب زیرزمینی در نظر گرفته شوند. پس از تهیه لایه‌های مدل GALDIT در محیط نرم‌افزار ArcGIS نقشه نهایی این مدل تهیه گردید. نتایج حاصل نشان داد که ناحیه به ۴ کلاس آسیب‌پذیری کم تا بسیار زیاد تقسیم‌بندی می‌شود. همچنین، قسمت‌های شمال غرب، جنوب غرب و غرب ناحیه آسیب‌پذیری زیاد تا بسیار زیاد به پیشروی آب شور در منطقه را دارد که نشان‌دهنده این است که ناحیه مستعد آلودگی ناشی از پیشروی آب شور می‌باشد. در واقع، در نواحی با آسیب‌پذیری بیشتر، آب شور گسترش می‌یابد. نقشه GALDIT-AHP نیز به چهار کلاس آسیب‌پذیری کم تا بسیار زیاد تقسیم‌بندی گردید که نواحی غرب، شمال غرب و جنوب غرب منطقه در کلاس آسیب‌پذیری زیاد تا بسیار زیاد می‌باشد.

ترکیبی از مدل‌های Fuzzy و AHP برای اصلاح مدل GALDIT استفاده گردید. نقشه Fuzzy-AHP به چهار کلاس آسیب‌پذیری کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد تقسیم‌بندی شد.

در نواحی شمال غرب، جنوب غرب و غرب منطقه بیشترین آلودگی وجود دارد.

برای تعیین میزان همبستگی دو متغیر از ضریب همبستگی پیرسون استفاده شد. نتایج حاصل از این صحت‌سنجی نشان داد که ضریب همبستگی بین مدل Fuzzy-AHP و GALDIT-AHP با غلظت TDS به ترتیب ۰/۶۳ و ۰/۵۱ می‌باشد. در نتیجه مدل بهینه برای ناحیه مورد مطالعه مدل Fuzzy-AHP انتخاب شد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه مدل GALDIT به منظور تعیین آسیب‌پذیری آبخوان ساحلی قره سو-گرگانرود به کار رفته است. هدف از این مطالعه استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) در اجرای مدل‌های GALDIT و Fuzzy در ناحیه مورد مطالعه است. استفاده از روش‌های اصلاح شده مدل‌های آسیب‌پذیری می‌تواند به عنوان ابزاری مفید برای

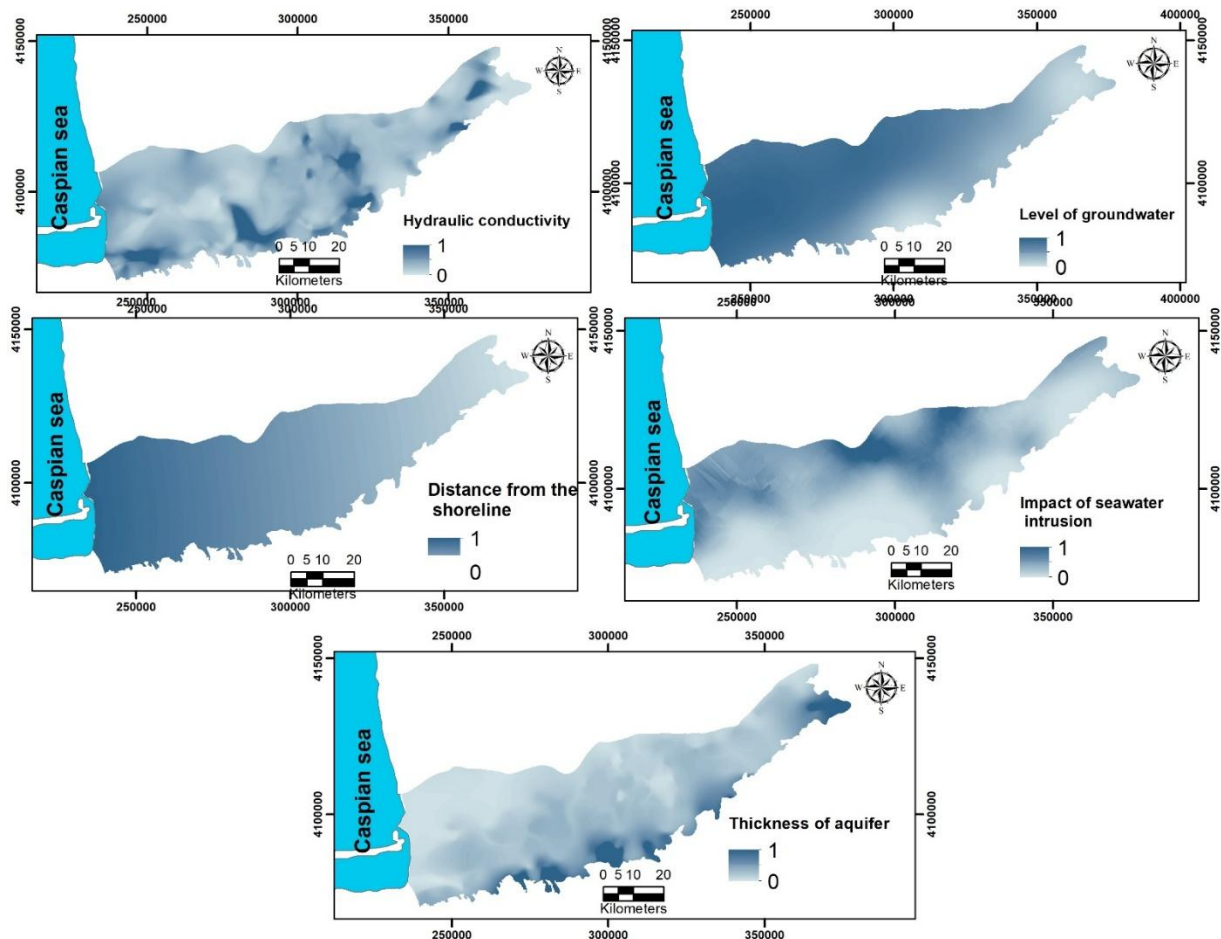


Fig. 3- Fuzzy-GALDIT maps  
شکل ۳- نقشه‌های فازی GALDIT

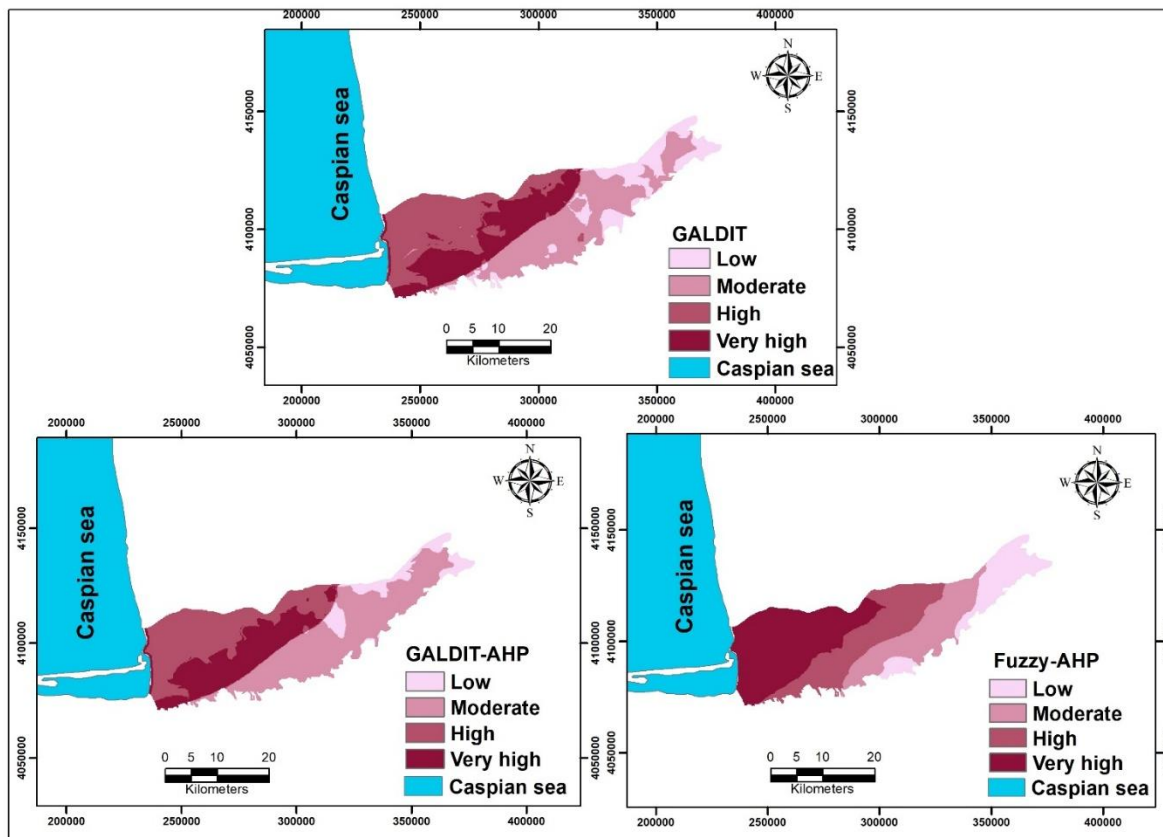


Fig. 4- Vulnerability maps  
 شکل ۴- نقشه‌های آسیب‌پذیری

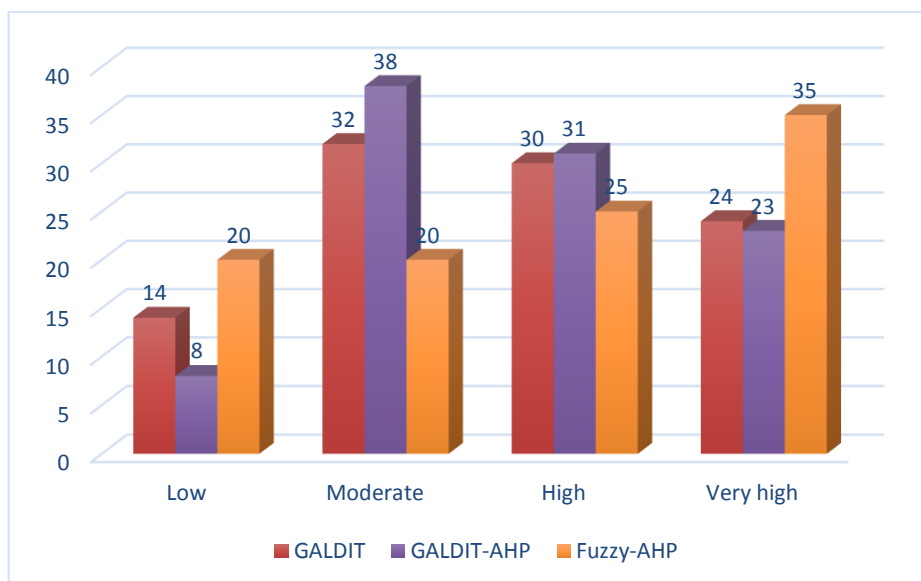


Fig. 5- Percentage of vulnerable areas obtained from different methods  
 شکل ۵- درصد نواحی آسیب‌پذیر به روش‌های مختلف

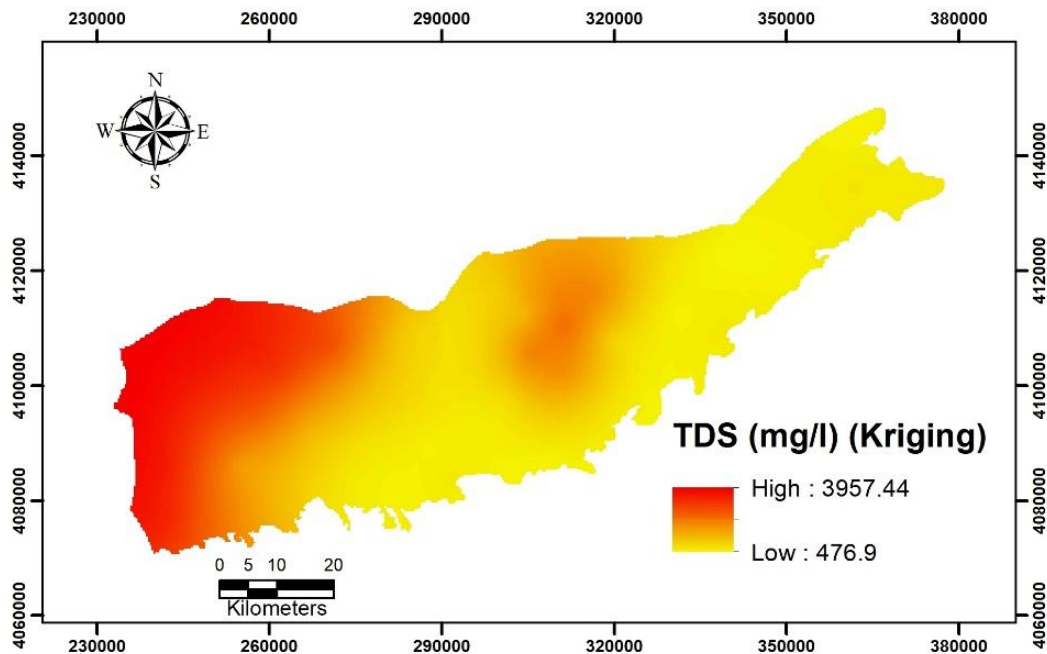


Fig. 6- Spatial distribution of TDS concentration

شکل ۶- توزیع مکانی غلظت TDS

Ayazi MH, Pirasteh S, Arvin AKP, Pradhan B, Nikouravan B, Mansor S (2010) Disasters and risk reduction in groundwater Zagros Mountain Southwest Iran using geoinformatics techniques. *Disaster Adv* 3(1):51-57

Badan Ghyben W (1889) Nota in verband met de voorgenomen putboring nabij amsterdam. *Tijdschrift van het koninklyk Instituut van Ingenieurs* 21

Cameron E, Peloso G (2001) An application of fuzzy logic to the assessment of aquifers' pollution potential. *Environmental Geology* 40(11-12):1305-1315

Chachadi AG (2005) Seawater intrusion mapping using modified GALDIT indicator model-case study in Goa. *Jalvigyan Sameeksha* 29-45

Dixon B (2005) Groundwater vulnerability mapping a GIS and fuzzy rule based integrated tool. *Applied Geography* 25(4):327-347

Duhalde DJ, Arumí JL, Oyarzún RA, Rivera DA (2018) Fuzzy-based assessment of groundwater intrinsic vulnerability of a volcanic aquifer in the Chilean Andean Valley. *Environmental Monitoring and Assessment* 190(7):390

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(5):416

این نقشه نشان داد که قسمت شمال غرب و غرب منطقه بیشترین آسیب پذیری را به آلاینده مورد نظر دارد. نتایج حاصل از صحت سنجی نشان داد که ضریب همبستگی بین مدل Fuzzy-AHP و GALDIT-AHP با غلظت TDS به ترتیب ۰/۶۳ و ۰/۵۱ می باشد. نقشه های آسیب پذیری حاصل می توانند در تصمیم گیری، برنامه ریزی، مدیریت و حفاظت از کیفیت آب زیرزمینی در آبخوان های ساحلی مفید باشند. پیشنهاد می گردد یک شبکه نظارت در منطقه نصب شود. نظارت مداوم بر فرآیند پیشروی آب شور می تواند موجب مدیریت کارآمد و مؤثر در آبخوان ساحلی مورد مطالعه گردد.

پی نوشتها

1- Pair Wise Comparison Matrices

۵- مراجع

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

Anonymous P (1993) A methodology and decision support system for evaluating. The Leaching Potential of Pesticides. U.S. Environmental Protection Agency EPA 600/S-93/010

- Bandar Abbas city, Iran. *Journal of Geomatics Science and Technology* 7(4):217-232
- Neshat A, Pradhan B (2017) Evaluation of groundwater vulnerability to pollution using DRASTIC framework and GIS. *Arabian Journal of Geosciences* 10(22):501
- Neshat A, Pradhan B (2015a) An integrated DRASTIC model using frequency ratio and two new hybrid methods for groundwater vulnerability assessment. *Natural Hazards* 76(1):543-563
- Neshat A, Pradhan B (2015b) Risk assessment of groundwater pollution with a new methodological framework: application of Dempster-Shafer theory and GIS. *Natural Hazards* 78(3):1565-1585
- Neshat A, Pradhan B, Dadras M (2014a) Groundwater vulnerability assessment using an improved DRASTIC method in GIS. *Resources Conservation and Recycling* 86:74-86
- Neshat A, Pradhan B, Javadi S (2015c) Risk assessment of groundwater pollution using Monte Carlo approach in an agricultural region: An example from Kerman Plain Iran. *Computers Environment and Urban Systems* 50:66-73
- Neshat A, Pradhan B, Pirasteh S, Shafri HZM (2014b) Estimating groundwater vulnerability to pollution using a modified DRASTIC model in the Kerman agricultural area Iran. *Environmental Earth Sciences* 71(7):3119-3131
- Neshat A, Pradhan B, Shafri HZM (2014c) An integrated GIS based statistical model to compute groundwater vulnerability index for decision maker in agricultural area. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing* 42(4):777-788
- Pathak DR, Hiratsuka A, Awata I, Chen L (2008) GIS based fuzzy optimization method to groundwater vulnerability evaluation. In *Bioinformatics and Biomedical Engineering ICBBE 2008. The 2nd International Conference on 2716-2719 IEEE*
- Pradhan B (2009) Groundwater potential zonation for basaltic watersheds using satellite remote sensing data and GIS techniques. *Open Geosciences* 1(1):120-129
- Recinos N, Kallioras A, Pliakas F, Schuth C (2014) Application of GALDIT index to assess the intrinsic vulnerability to seawater intrusion of coastal granular aquifers. *Environmental Earth Sciences* 1017-1032
- Ribeiro L, Pindo JC, Dominguez-Granda L (2017) Assessment of groundwater vulnerability in the Daule aquifer Ecuador using the susceptibility index method. *Science of the Total Environment* 574:1674-1683
- Goovaerts P (1997) Kriging vs stochastic simulation for risk analysis in soil contamination. In *geoENV I-Geostatistics for Environmental Applications*, 247-258, Springer, Dordrecht
- Gorgij AD, Asghar Moghaddam 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(2):106
- Herzberg A (1901) Die wasserversorgung einiger Nordseebader. *J Gasbeleucht Wasserversorg* 44:842-4
- Iqbal J, Gorai AK, Katpatal YB, Pathak G (2015) Development of GIS-based fuzzy pattern recognition model (modified DRASTIC model) for groundwater vulnerability to pollution assessment. *International Journal of Environmental Science and Technology* 12(10):3161-74
- Jafari F, Javadi S, Golmohammadi G, Mohammadi K, Khodadadi A, Mohammadzadeh M (2016) Groundwater risk mapping prediction using mathematical modeling and the Monte Carlo technique. *Environmental Earth Sciences* 75(6):49
- Jafarighariehali A, Kazemi GhA, Hafezimoghadas N, Mosaviasterabadi SS (2012) Application of GIS in the study of groundwater pollution in urban areas (Case study: Mashhad city). *Iran Water Resources Research* 8(2):80-86 (In Persian)
- Javadi S, Hashemy SM, Mohammadi K, Howard KWF, Neshat A (2017) Classification of aquifer vulnerability using K-means cluster analysis. *Journal of Hydrology* 549:27-37
- Kardan Moghaddam H, Jafari F, Javadi S (2017) Vulnerability evaluation of a coastal aquifer via GALDIT model and comparison with DRASTIC index using quality parameters. *Hydrological Sciences Journal* 62(1):137-146
- Malano HM, Gao G (1992) Ranking and classification of irrigation system performance using fuzzy set theory: case studies in Australia and China. *Irrigation and Drainage Systems* 6(2):129-148
- Malczewski J (1999) GIS and multicriteria decision analysis. John Willey & Sons Inc
- Najib S, Grozavu A, Mehdi K, Breabă IG, Guessir H, Boutayeb K (2012) Application of the method GALDIT for the cartography of groundwaters vulnerability aquifer of Chaouia coast (MOROCCO). University ChouaibDoukkali (Morocco) 1223-5334
- Neshat A, Dadras M, Safarpour S (2018) A GIS-based comparative study of statistical methods for timeworn urban texture susceptibility mapping in

- Soltani S, Asghari Moghadam A, Barzegar R, Kazemian N (2018) Vulnerability assessment of Kordkandi-Duzduzan Plain groundwater using calibrated DRASTIC Model. *Iran Water Resources Research* 13(4):89-99 (In Persian)
- Trabelsi N, Triki I, Hentati I, Zairi M (2016) Aquifer vulnerability and seawater intrusion risk using GALDIT, GIS and GIS case of a coastal aquifer in Tunisia. *Environmental Earth Sciences* 75(8):669
- Werner AD, Gallagher MR (2006) Characterisation of sea-water intrusion in the Pioneer Valley Australia using hydrochemistry and three-dimensional numerical modelling. *Hydrogeology Journal* 14(8):1452-1469
- Xu CY, Gong L, Jiang T, Chen D, Singh VP (2006) Analysis of spatial distribution and temporal trend of reference evapotranspiration and pan evaporation in Changjiang (Yangtze River) catchment. *Journal of Hydrology* 327(1-2):81-93
- Saaty TL (1980) *The analytic hierarchy process*. New York, NY, USA: McGraw-Hill
- Saidi S, Bouri S, Dhia HB (2013) Groundwater management based on GIS techniques, chemical indicators and vulnerability to seawater intrusion modelling: application to the Mahdia-Ksour Essaf aquifer Tunisia. *Environmental Earth Sciences* 70(4):1551-1568
- Sener E, Davraz A (2013) Assessment of groundwater vulnerability based on a modified DRASTIC model, GIS and an analytic hierarchy process (AHP) method: the case of Egirdir Lake basin (Isparta, Turkey). *Hydrogeology Journal* 21(3):701-714
- Shrestha S, Kafle R, Pandey VP (2017) Evaluation of index-overlay methods for groundwater vulnerability and risk assessment in Kathmandu Valley Nepal. *Science of the Total Environment* 575:779-790