



دانشگاه گوارش و منابع طبیعی

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

جلد بیست و سوم، شماره دوم، ۱۳۹۵

<http://jwsc.gau.ac.ir>

ارزیابی آسیب‌پذیری سفره ساحلی با استفاده از روش GALDIT و واسنجی آن با روش AHP

*حمید کاردان مقدم^۱ و سامان جوادی^۲

^۱دانشجوی دکتری گروه مهندسی آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، آستادیار گروه مهندسی آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

تاریخ دریافت: ۹۳/۱۰/۱۰؛ تاریخ پذیرش: ۹۴/۸/۱۵

چکیده

سابقه و هدف: آب‌های زیرزمینی یکی از منابع اصلی تامین آب شرب، کشاورزی و ... می‌باشد، بنابراین توجه به امر مدیریت در سفره‌های آب زیرزمینی بسیار دارای اهمیت می‌باشد. تغییرات کیفیت منابع آب زیرزمینی به‌خصوص در مناطق خشک با توجه به روند برداشت زیاد آب و کاهش تغذیه سبب ایجاد مشکلات زیست‌محیطی در آبخوان‌های کشور شده است. با توجه به روند برداشت بی‌رویه آب از منابع آب زیرزمینی به‌ویژه در مناطق ساحلی تعادل بین جبهه‌های آب شور و شیرین در اینگونه سفره‌ها بهم خورده است. مهم‌ترین پارامترهای مؤثر جهت بررسی اثر تهاجم جبهه‌های آب شور دریا به ساحل عبارتند از نوع آبخوان اعم از آبخوان آزاد، آبخوان تحت فشار، نشتی و سایر، هدایت هیدرولیکی آبخوان، عمق سطح آب زیرزمینی بالاتر از سطح دریا، فاصله از نوار شور ساحلی، اثر پارامترهای کیفی آب شور دریا بر نوار ساحلی و ضخامت آبخوان که همه این پارامترها در یک شاخص آسیب‌پذیری به نام GALDIT ارائه و برای آسیب‌پذیری آبخوان‌های ساحلی مورد استفاده قرار می‌گیرد. از این‌رو ارزیابی راهکارهای زیست‌محیطی جهت بهره‌برداری بهینه و صحیح از سفره‌های ساحلی جهت عدم ورود آب شور از سمت دریا ضروری جلوه می‌نماید.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش آسیب‌پذیری آبخوان ساحلی آستانه- کوچصفهان که یکی از آبخوان‌های حوزه سفیدرود و ساحلی دریای خزر می‌باشد با استفاده از شاخص GALDIT مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. شاخص GALDIT یک مدل جدید و توسعه‌یافته برای بررسی و تعیین اثرات نفوذ آب شور به آبخوان ساحلی در اثر برداشت‌های بی‌رویه می‌باشد. به‌عبارت دیگر با کاربرد شاخص مذکور در این منطقه اثرات منفی آب شور و برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی بر روی آبخوان ساحلی مورد تحلیل قرار گرفت.

یافته‌ها: بررسی اولیه نتایج این شاخص بیانگر این موضوع بود که نوار ساحلی اثر منفی روی وضعیت آسیب‌پذیری منطقه داشته است. به‌منظور بررسی و واسنجی مدل آسیب‌پذیری از همبستگی بین این شاخص با غلظت TDS، نترات، کلراید و سدیم استفاده و بعد از تجزیه و تحلیل‌های آماری، پارامتر TDS جهت واسنجی با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی با استفاده از نرم‌افزار Expert choice انتخاب شد. انتخاب پارامتر TDS با توجه به شوری و املاح موجود در آب دریا که اثر مستقیمی روی ساحل می‌گذارد می‌تواند اثربخشی این شاخص آسیب‌پذیری را بیش‌تر کند. با استفاده از وزن‌های مولفه‌های مختلف خروجی مدل استخراج و وزن‌های بهینه برای منطقه برآورد گردید.

* مسئول مکاتبه: hkardan@ut.ac.ir

نتیجه‌گیری: مدل نهایی نشان داد که در نوار نزدیک به ساحل میزان آسیب‌پذیری آب زیرزمینی به آلودگی بیش‌تر از سایر مناطق در آبخوان است. نتایج تحلیل سلسله مراتبی نشان می‌دهد پارامتر فاصله از دریا معیار حساس و با اهمیتی در شاخص GALDIT بوده و پس از واسنجی مدل مشخص گردید ۳۰ درصد آبخوان در معرض جبهه‌های شور نفوذ آب دریا قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: آسیب‌پذیری، GALDIT، آبخوان آستانه کوچصفهان، TDS، تحلیل سلسله مراتبی

مقدمه

سهولت و امکان نفوذ و پخش آلودگی از سطح زمین به سفره آب زیرزمینی تعریف می‌شود. البته در سالیان آتی تعاریف متعددی از این مبحث معرفی و ارائه گردید که به‌طور کلی می‌توان آسیب‌پذیری را تمایل یا احتمال رسیدن آلاینده‌ها از یک منطقه مشخص در سطح زمین و رسیدن آن به سطح سفره آب زیرزمینی عنوان نمود. به‌طور کلی آسیب‌پذیری از نظر مفهوم به دو دسته ذاتی و ویژه تقسیم می‌گردد که در آسیب‌پذیری ذاتی نوع آسیب‌پذیری به خصوصیات آبخوان (هدایت هیدرولیکی، گرادیان هیدرولیکی و خلل و فرج و تنش‌های وارده به سیستم تغذیه، واکنش با آب سطحی، زمان حرکت از میان منطقه اشباع و بده پمپاژ) بستگی دارد و به منابع آلودگی ناشی از فعالیت‌های انسانی یا طبیعی ربطی ندارد. در آسیب‌پذیری ویژه آلاینده‌ای خاص یا گروهی از آلاینده‌های ناشی از فعالیت‌های ناشی از واکنش آلاینده‌ها با اجزای مختلف آسیب‌پذیری ذاتی، به وجود می‌آیند. یکی از مهم‌ترین مشکلاتی که در نوار ساحلی وجود دارد و در اثر افزایش برداشت از سفره‌های آب زیرزمینی این مناطق به‌شدت مشاهده می‌گردد، اثر بالآمدن آب شور و آسیب‌پذیری در این مناطق است. براساس رابطه گین-هیبرزگ در سفره‌های آزاد با برداشت ۱ متر از سطح آب زیرزمینی ۴۰ متر آب شور بالا می‌آید (۵، ۶). مطالعات

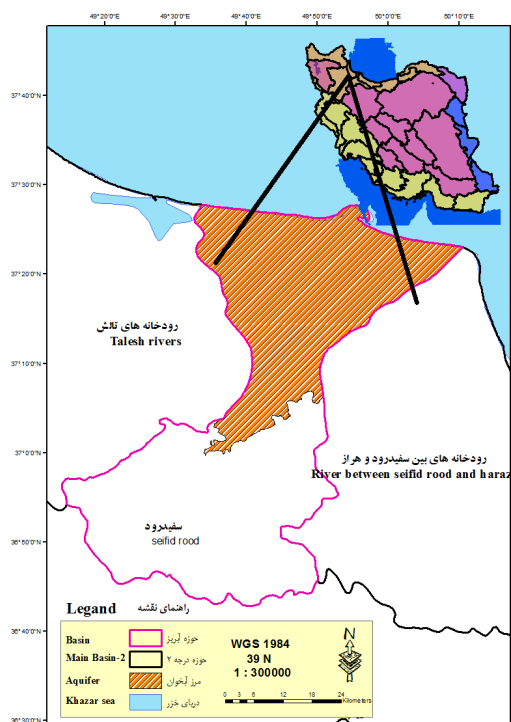
امروزه در مناطق خشک و نیمه‌خشک دنیا که با کمبود منابع آب سطحی مواجه می‌باشند، منابع آب زیرزمینی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (۱۳). از طرف دیگر توسعه روزافزون جوامع بشری و گسترش فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی سهم عمده‌ای در آلودگی‌های محیط زیست به‌خصوص در بخش آب در بردارد (۱۱). در این بین آبخوان‌های محصور نشده و نفوذپذیر پتانسیل بالایی جهت آلودگی و آسیب‌پذیری داشته (۸) و در نتیجه برآورد آسیب‌پذیری می‌بایست بر مبنای یک اصول علمی پایه‌ریزی شود تا خروجی مطالعه از اعتبار بالایی برخوردار باشد. در حال حاضر روش‌های متعددی جهت تعیین آسیب‌پذیری ارائه شده است که می‌توان به روش‌های PI, SI, SINTACS, DRASTIC, AVI, GODS, IRISH, WESPA, EPIK, GALDIT, PESTICIDE, MAIA و غیره اشاره نمود که هر کدام از آن‌ها در شرایط خاص و با داده‌های متفاوتی به‌دست می‌آید. آسیب‌پذیری نوعی خصوصیت نسبی، بدون بعد و غیرقابل اندازه‌گیری است و به ویژگی‌های آبخوان، محیط زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی آن بستگی دارد (۱). آسیب‌پذیری در هیدروژئولوژی برای اولین بار توسط مارگات در سال ۱۹۷۰ مطرح گردید که در آن، آسیب‌پذیری آبخوان،

دراستیک و GALDIT برای مشخص کردن آسیب‌پذیری و آلودگی آب زیرزمینی در جزیره کاپاس در اثر بالا آمدن آب شور پرداختند. نتایج آن مطالعه نشان داد که هر دو مدل به خوبی پهنه آلودگی و تجاوز آب شور را در آبخوان نشان داده اما همبستگی غلظت نترات با شاخص دراستیک بیش‌تر از شاخص GALDIT می‌باشد. همچنین در مناطق غربی اثر بالا آمدن آب شور بیش‌تر به چشم می‌آید (۹). در این مطالعه به منظور بررسی آسیب‌پذیری آبخوان آستانه کوچصفهان که در جنوب دریای خزر واقع است و با در نظر گرفتن اثر شوری آب دریا و شور شدن اراضی در وضعیت آسیب‌پذیری، از شاخص GALDIT استفاده و مورد واسنجی با استفاده از روش AHP انجام پذیرفت.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: آبخوان آستانه - کوچصفهان با مساحت ۱۳۰۰ کیلومترمربع یکی از زیرحوزه‌های آبریز سفیدرود و تالش - تالاب انزلی بوده که در جنوب غربی دریای خزر بین طول شرقی ۴۹ درجه و ۲۰ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۱۰ دقیقه و عرض شمالی، ۳۶ درجه و ۴۰ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۳۰ دقیقه قرار دارد. این حوزه از شمال به دریای خزر، از شرق به محدوده مطالعاتی لاهیجان - چابکسر و حوزه‌های منجیل و طالقان - الموت در جنوب و فومنات در غرب محدود می‌باشد. شکل ۱ موقعیت این آبخوان را در سطح کشور نشان می‌دهد.

گسترده‌ای در این زمینه و اثرات جزر و مد انجام شده اما در مطالعات در بحث آسیب‌پذیری مناطق ساحلی و ارائه شاخص کیفی کم‌تر بدان پرداخته شده است. یکی از شاخص‌های آسیب‌پذیری در آب زیرزمینی که کاربرد آن بسیار رایج شده است شاخص دراستیک می‌باشد اما با توجه به عدم در نظر داشتن مسائل مربوط به بالا آمدن آب شور در مناطق ساحلی ناکارآمد بوده، از این‌رو در این مطالعه از شاخص GALDIT استفاده شده است. این شاخص از ۶ پارامتر تشکیل شده که اثرات بالا آمدن آب دریا را در آبخوان به خوبی نشان می‌دهد. در سال‌های اخیر از این شاخص در نقاط مختلف دنیا استفاده شده است، به طوری که در مطالعه‌ای نجیب و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از مدل GALDIT اقدام به تعیین عرصه‌های آسیب‌پذیر در مناطق ساحلی مراکش کردند. نتایج آن‌ها بیانگر خطر بالا در حاشیه مناطق ساحلی و مناطق نزدیک به مرزهای رودخانه الریبا بود که تا عمق ۳ کیلومتری داخل ساحل نیز نفوذ می‌کند (۱۰). در پژوهشی دیگر ایلینا گابریل برابن (۲۰۱۲) اقدام به پهنه‌بندی آسیب‌پذیری در منطقه بارلند مولداوی کرده و نتایج بیانگر رابطه رگرسیونی بالای غلظت نترات با نتایج مدل می‌باشد (۷). در مطالعه‌ای دیگر ریکنوز و همکاران (۲۰۱۴) در جنوب یونان به توسعه مدل GALDIT در سال‌های ۱۹۹۲ تا ۲۰۰۶ به صورت دینامیک پرداخته و نتایج آن‌ها نشان داد که علاوه بر افزایش شوری در منطقه، سطح آب زیرزمینی سفره در پی‌زومترها نیز افت داشته است (۱۲). همچنین در پژوهشی کورا و همکاران (۲۰۱۴) به ارزیابی مدل‌های



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه.

Figure 1. Case study in Iran.

وضعیت هجوم جبهه‌های آب شور و اثر آن به صورت روابط زیر بیان می‌شود (۵، ۶).

$$\left. \begin{aligned} \rho_B &= \rho_s g h_s \\ \rho_A &= \rho_f g (h_s + h_f) \end{aligned} \right\} \begin{aligned} \rho_s g h_s &= \rho_f g h_f + \rho_f g h_s \\ \rho_s h_s &= \rho_f h_f + \rho_f h_s \end{aligned} \quad (1)$$

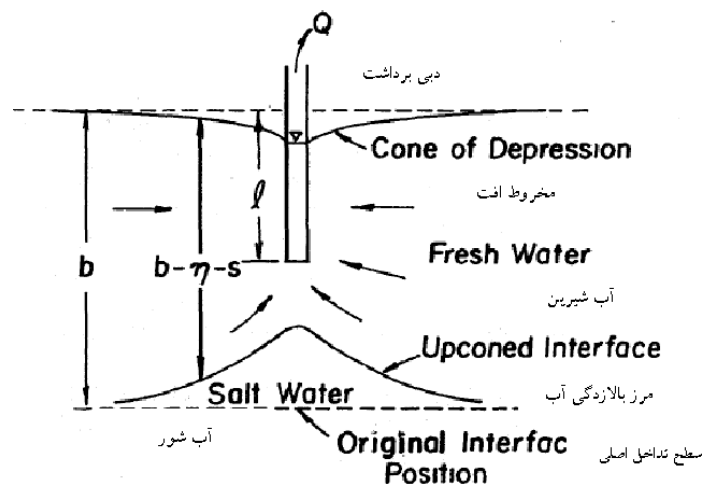
$$h_s = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} h_f = \frac{\rho_f}{\Delta \rho} h_f \xrightarrow{\frac{\rho_f}{\Delta \rho} = 40} h_s = 40 h_f$$

که در آن، ρ چگالی آب، g شتاب گرانش زمین، h ارتفاع، اندیس، s مربوط به آب شور و اندیس f مربوط به آب شیرین. با در نظر داشتن چگالی آب شور ۱۰۲۵ گرم بر سانتی‌مترمکعب و چگالی آب شیرین ۱۰۰۰ گرم بر سانتی‌مترمکعب و براساس روابط بالا برداشت بی‌رویه آب سبب ایجاد مخروط افت شده که عمق فصل مشترک h_s چهل برابر h_f می‌باشد. یعنی به‌ازای ۱ متر افت در چاه ۴۰ متر آب شور بالا می‌آید.

بررسی هجوم جبهه‌های آب شور به آبخوان‌های

ساحلی: مدیریت منابع آب در نواحی ساحلی بسیار قابل اهمیت است بنابراین برداشت مناسب از سفره‌های آب شیرین بایستی به‌صورتی مدیریت شود تا کم‌ترین آسیب زیست‌محیطی را داشته باشد. حتی مسائلی در ارتباط با سدهای زیرزمینی در این مناطق مطرح می‌شود تا جلوی نفوذ بیش‌تر آب شور دریا را بگیرد. هجوم جبهه‌های آب شور^۱ (تهاجم) در این پدیده به شکل یک گوه^۲ است و فصل مشترک آب شور- شیرین می‌تواند از چند متر تا چندین متر ضخامت داشته باشد. بهره‌برداری از آبخوان‌های ساحلی از یک حساسیت خاصی برخوردار است که این حساسیت را سایر آبخوان‌های دیگر ندارند و آن مسئله تهاجم آب شور به آب شیرین بوده که رفع آن آسان نیست.

- 1- Intrusion
- 2- Wedge



شکل ۲- تهاجم جبهه‌های آب شور بر اثر برداشت آب.

Figure 2. Intrusion in the coastal aquifer due to discharge.

منطقه می‌شود. این مدل از ۶ پارامتر که مخفف کلمه GALDIT می‌باشد تشکیل شده است که حرف G به نوع آبخوان، A هدایت هیدرولیکی آبخوان، L ارتفاع آب زیرزمینی که بالاتر از سطح آب دریا قرار دارد، D فاصله تا ساحل دریا، I تأثیر کیفی تجاوز آب دریا در نوار ساحلی و T ضخامت آبخوان می‌باشد. در ذیل هر کدام از پارامترها به اختصار تشریح شده است.

الف) نوع آبخوان: در این روش سفره‌های آب زیرزمینی با توجه به طرز قرار گرفتن لایه‌های زمین‌شناسی قابلیت ذخیره و استخراج داشته و به لایه‌های آزاد، تحت فشار، نشتی، محدود تقسیم‌بندی می‌شوند. از آنجایی که گسترش تجاوز آب شور به خصوصیات طبیعی و نوع آبخوان بستگی دارد، از این‌رو در آبخوان‌های آزاد شرایط طبیعی لایه پایین اثربخشی بالایی در تداخل جبهه‌های آب شور با آب شیرین دارد. پارامتر G در این مدل بایستی براساس نوع آبخوان منطقه مورد مطالعه بررسی شود. آبخوان‌های تحت فشار به دلیل مخروط افت بزرگ‌تر در طول زمان پمپاژ از حساسیت بالاتری برخوردار است.

مدل GALDIT: آلودگی آب زیرزمینی در اثر شور شدن و پیشروی آب دریا در دو دهه اخیر به شدت افزایش یافته است. تغییر در سطح آب‌های زیرزمینی ناشی از برداشت بی‌رویه با توجه به ارتفاع متوسط سطح آب دریا در طول ساحل تأثیر بسیاری در کیفیت آب آبخوان داشته، از این‌رو توجه به برداشت بی‌رویه از آب زیرزمینی به‌خصوص در مناطق نزدیک به ساحل و پایش مداوم حد ایترفاز از اهمیت بسیاری برخوردار است. جهت آسیب‌پذیری آبخوان‌های ساحلی از مدل GALDIT که اولین بار در سال ۲۰۰۱ توسط چاچادرو و لوبو فریرا در نواحی ساحلی کشور پرتغال مورد ارزیابی قرار گرفت، در این پژوهش استفاده می‌شود (۳، ۴). این مدل به‌عنوان یکی از روش‌های آسیب‌پذیری در نواحی ساحلی به‌خصوص در نوار دریای مدیترانه مورد استفاده قرار گرفت چرا که غلظت بالای کل جامدات محلول در آب‌های شور سبب تغییرات غیرآلی در آبخواهای ساحلی و اخلاص در زندگی روزمره مردم این مناطق می‌شود. تجاوز آب شور سبب کاهش حجم ذخیره آب شیرین و افزایش غلظت جامدات محلول و یونها در آب و در نهایت افزایش درجه استاندارد آب شرب

در آبخوان تحت فشار:

$$L = \frac{K.B^2}{2q\delta} \quad L > B \quad (2)$$

$$\delta = \frac{\rho_{fresh}}{\rho_{sea} - \rho_{fresh}} \approx 40 \quad (3)$$

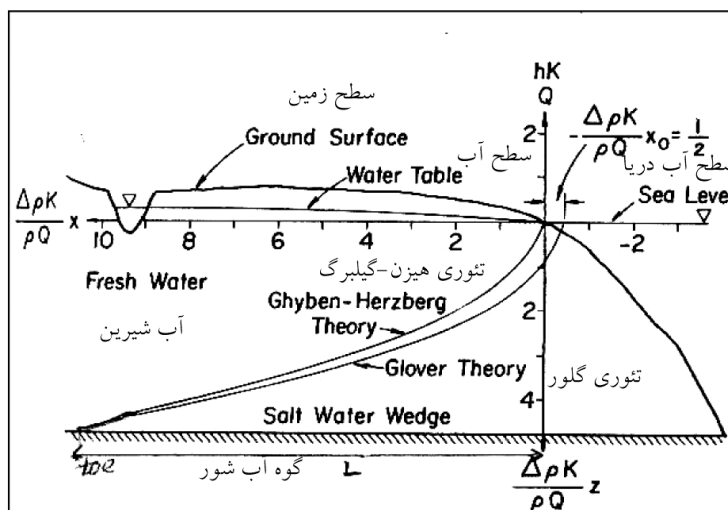
در آبخوان آزاد:

$$q = \left[\frac{KB^2}{2L} \right] \cdot \left[\frac{1+\delta}{\delta^2} \right] - \frac{WL}{2} \quad (4)$$

$$L = 0.0257 \left[\frac{KB^2}{2q} \right] \quad \text{If } W=0 \quad (5)$$

که در آن، K هدایت هیدرولیکی، B ضخامت منطقه اشباع، ρ چگالی آب و W تغذیه طبیعی.

ب) هدایت هیدرولیکی: پارامتر هدایت هیدرولیکی آبخوان براساس سرعت جریان در لایه‌های آبخوان برآورد می‌شود. هدایت هیدرولیکی توانایی انتقال آب در آبخوان می‌باشد که در نتیجه تخلخل مؤثر در رسوبات و ذرات تشکیل‌دهنده آبخوان است. مقدار بالای هدایت هیدرولیکی سبب عریض شدن سطح مخروط افت در هنگام پمپاژ می‌شود. در این مطالعه با استفاده از آزمایش‌های ژئوفیزیک مقدار ضریب انتقال T برآورد و با تقسیم این مقدار بر ضخامت آبخوان B مقدار هدایت هیدرولیکی برآورد می‌شود. $(K = T/B)$ همچنین بین گسترش تجاوز آب شور (L) و جریان آب زیرزمینی شیرین به طرف دریا (q) رابطه‌ای وجود دارد (شکل ۲). بین جریان آب شیرین به طرف دریا و تغذیه طبیعی آبخوان تفاوت عمده‌ای وجود دارد. براساس رابطه بیر^۱ و وروجت^۲:



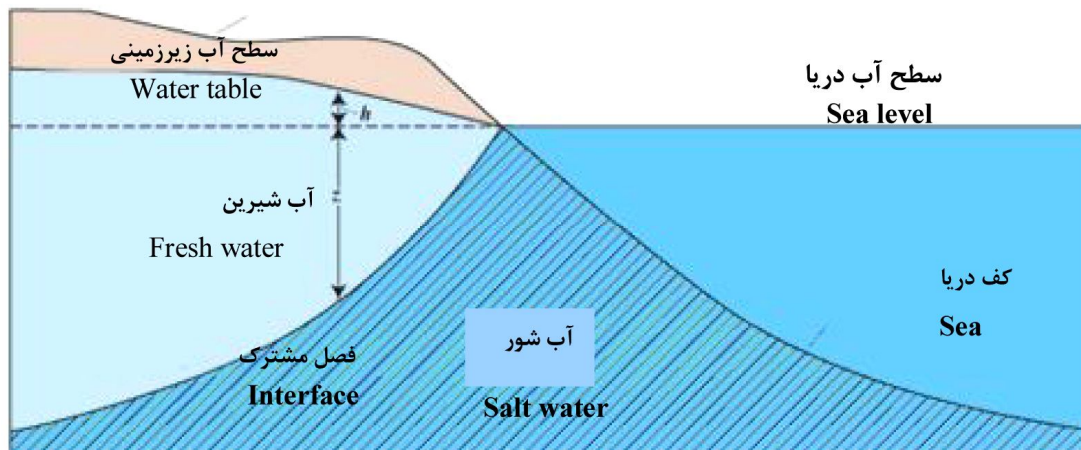
شکل ۳- طول تجاوز آب شور در ناحیه ساحلی.

Figure 3. Length of seawater intrusion in the coastal aquifer.

1- BEAR
2- VERRUJIT

هرزبرگ به ازای هر متر برداشت آب شیرین ذخیره شده در بالای ارتفاع متوسط دریا، ۴۰ متر سطح آب شور بالا می‌آید.

ج) ارتفاع سطح آب زیرزمینی بالای سطح آب دریا: سطح آب زیرزمینی نسبت به میانگین ارتفاع دریا یکی از مهم‌ترین پارامترها در ارزیابی حساسیت به تجاوز آب شور دریا می‌باشد. طبق رابطه گیبس



شکل ۴- نمای تهاجم آب دریا در نوار ساحل.

Figure 4. Seawater intrusion in the coastal aquifer.

تقسیم‌بندی این پارامتر به صورت رابطه زیر بر حسب ppm پیشنهاد کردند (۳). این انتخاب آنیون‌ها به خصوص کلر براساس بارز بودن این پارامتر در آب زیرزمینی نواحی ساحلی پیشنهاد گردید.

$$\frac{Cl^-}{[CO_3^{2-} + HCO_3^-]} \quad (۶)$$

و) ضخامت آبخوان: ضخامت آبخوان یا ناحیه اشباع در آبخوان به منطقه حدفاصل سطح ایستابی تا لایه نفوذناپذیر اطلاق می‌شود. از این پارامتر در میزان و تخمین نفوذ آب دریا در مناطق ساحلی به عنوان یکی از پارامترهای مدل GALDIT استفاده می‌شود. در این مطالعه از اختلاف لایه سطح آب از لایه سنگ بستر به صورت لایه‌های رستری ناحیه اشباع برآورد و طبقه‌بندی می‌شود.

د) فاصله از ساحل دریا: اثر نفوذ آب دریا و امواج به طرف ساحل به عنوان یک حرکت موجی با دامنه تأثیر کاهشی قرار دارد. به طوری که هرچه از ساحل فاصله داشته باشیم سبب کاهش آسیب‌پذیری می‌شود. در این مطالعه با استفاده از دستور Buffer در محیط نرم‌افزار GIS کلاس‌بندی و وزن‌بندی مشخص شده در جدول ۱ برآورد می‌شود.

ه) تأثیر وضعیت موجود از نفوذ آب دریا: اگر سطح منطقه مورد مطالعه به صورت ثابت و بدون تنش باشد گرادیان هیدرولیکی متعادلی بین آب شور و شیرین در آبخوان در جریان خواهد بود. اما با توجه به روند برداشت آب و نفوذ جبهه‌های آب شور به طرف ساحل این تعادل بهم خورده و غلظت مواد نمکی افزایش یافته است. چاچادرو و لوبو فریرا (۲۰۰۱) غلظت آنیون‌های کلر، کربنات و بی‌کربنات را جهت

موجود هر یک در یک کلاس طبقه‌بندی شد و در نهایت در شکل ۵ نتایج مربوط به هر ۶ شاخص ارائه شد.

نتایج و بحث

ارزیابی شاخص GALDIT: جهت برآورد شاخص GALDIT پس از تعیین نقشه‌های آن با توجه به وزن‌های ۷ پارامتر از رابطه زیر مقدار این شاخص به دست آمد و براساس جدول ۲ تقسیم‌بندی شده است.

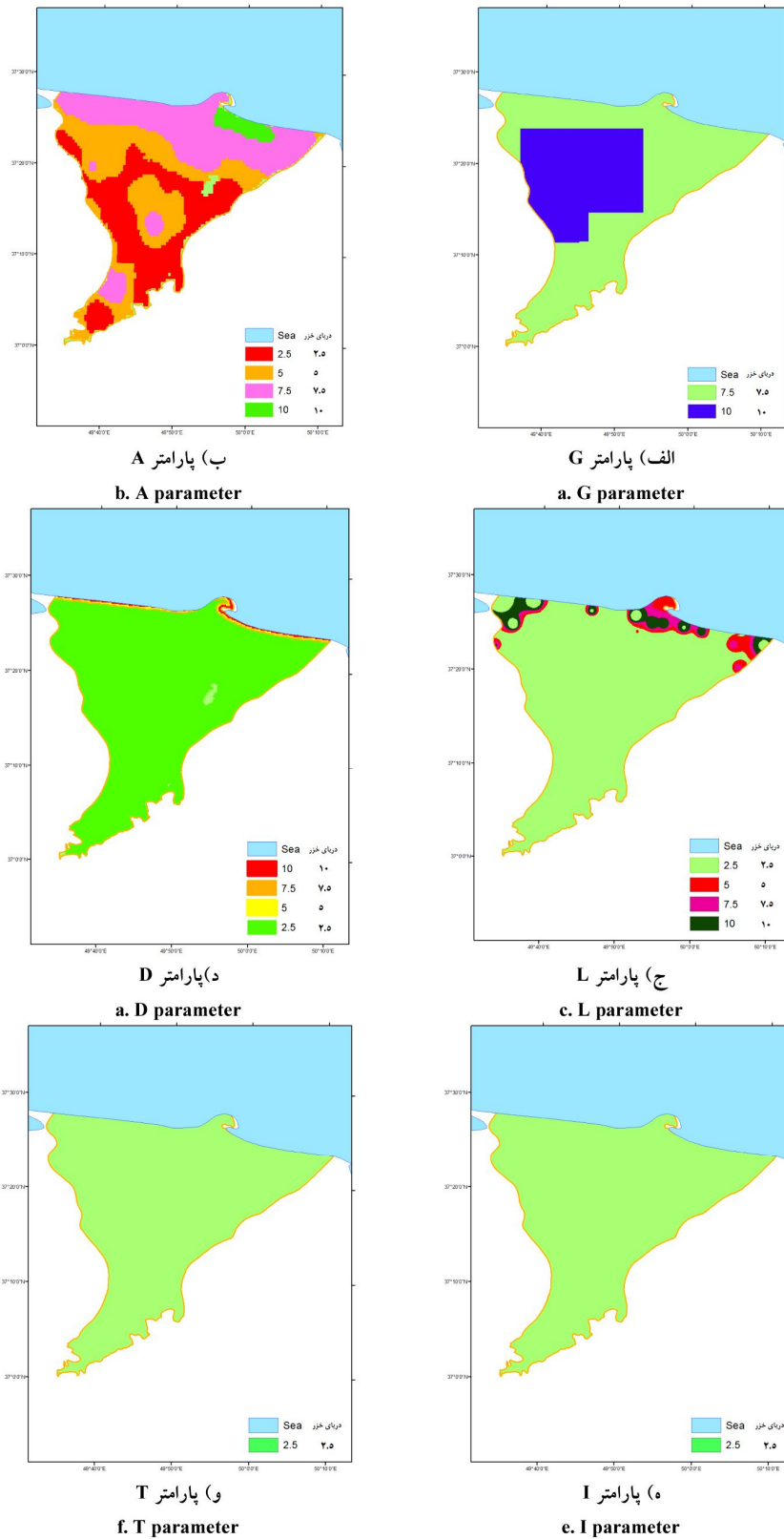
$$GALDIT = \frac{\sum_{i=1}^6 W_i R_i}{\sum_{i=1}^6 W_i} \quad (7)$$

برآورد پارامترهای مدل GALDIT: در این مطالعه با استفاده از نرم‌افزار مکانی GIS اقدام به کلاس‌بندی و وزن‌دهی هر یک از ۶ پارامتر مدل GALDIT براساس جدول ۱ با توجه به نوع آبخوان که آبخوان آزاد و تحت فشار است در ۲ کلاس تقسیم‌بندی شد با توجه به نتایج استخراجی از آزمایش‌های ژئوفیزیک و نفوذپذیری در منطقه نقشه هدایت هیدرولیکی منطقه ارائه شد. پارامتر D براساس فاصله از دریا با استفاده از نرم‌افزار GIS و دستور buffer و با توجه به کلاس‌بندی این شاخص در ۴ کلاس طبقه‌بندی شد. ارتفاع آب زیرزمینی که بالاتر از سطح آب دریا قرار دارند نیز با توجه به نقشه‌های آب زیرزمینی و سطح آب دریای خزر ترسیم شد. دو پارامتر T و I نیز با توجه به اطلاعات

جدول ۱- معرفی پارامترهای مدل GALDIT و وزن‌بندی آن‌ها.

Table 1. Identify GALDIT parameters and weights.

| پارامتر Parameter | وزن weight | خیلی کم Very Low | کم Low | متوسط Average | زیاد High |
|----------------------|---------------|---------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| G | 1 | آبخوان محدود Limited aquifer | آبخوان نشتی Leaky aquifer | آبخوان آزاد Unconfined aquifer | آبخوان تحت فشار Confined aquifer |
| A | 3 | < 5 | 5-10 | 10-40 | > 40 |
| L | 4 | > 2 | 1.5-2 | 1-1.5 | < 1 |
| D | 4 | > 1000 | 750-1000 | 500-750 | < 500 |
| I | 1 | < 1 | 1-1.5 | 1.5-2 | > 2 |
| T | 2 | < 5 | 5-7.5 | 7.5-10 | > 10 |



شکل ۵- پارامترهای شاخص آسیب پذیری GALDIT.
 Figure 5. Parameters of GALDIT vulnerability.

جدول ۲- کلاس بندی شاخص GALDIT بر مبنای آسیب پذیری.

Table 2. Classification of GALDIT vulnerability.

| طبقه بندی آسیب پذیری Classification of vulnerability | کلاس Class | ردیف Sort |
|---|---------------|--------------|
| آسیب پذیری کم Low vulnerability | < 5 | 1 |
| آسیب پذیری متوسط Average vulnerability | 5-7.5 | 2 |
| آسیب پذیری زیاد High vulnerability | > 7.5 | 3 |

پذیرفت. بنابراین بر این اساس میزان آسیب پذیری این روش و پارامترهای کیفی TDS، Na، Cl و NO₃ در چاه‌های نمونه برداری شده منطقه، به عنوان شاخص انتخاب و تحلیل آماری با استفاده از همبستگی بین غلظت هر پارامتر و شاخص به دست آمده GALDIT انجام پذیرفت. بر اساس نتایج به دست آمده که در جدول ۳ ارائه شده است بیشترین میزان همبستگی شاخص GALDIT با پارامتر TDS و کمترین میزان همبستگی با پارامتر نیترات به دست آمده است. بنابراین با توجه به این همبستگی و ارتباط موجود بین شاخص آسیب پذیری و غلظت پارامتر TDS در منطقه جهت ارزیابی و بهینه کردن ضرایب در معادله آسیب پذیری GALDIT از روش تحلیل سلسله مراتبی جهت افزایش کارایی مدل در آبخوان‌های ساحلی استفاده می‌شود.

به منظور بررسی وضعیت آسیب پذیری آبخوان آستانه- کوچصفهان با استفاده از برنامه Spatial Analyst tools وزن دهی و رتبه بندی هر یک از شاخص‌ها به صورت منطقه‌ای انجام و در نهایت برآورد آسیب پذیری بر اساس شاخص GALDIT در سطح این منطقه انجام شد. ارتباط پارامترهای کیفی و شاخص آسیب پذیری: یکی از روش‌های اعتبارسنجی شاخص‌های آسیب پذیری استفاده از پارامترهای کیفی و همبستگی بین غلظت پارامترهای کیفی و شاخص محاسبه شده می‌باشد. با توجه به موقعیت جغرافیایی، ساحلی بودن منطقه مورد مطالعه و اثر هجوم جبهه‌های آب شور جهت ارزیابی مدل‌های آسیب پذیری از بررسی میزان همبستگی بین شاخص‌های آسیب پذیری و میزان پارامترهای کیفی چاه‌های مورد آزمایش منطقه صورت

جدول ۳- همبستگی بین غلظت پارامترهای کیفی و شاخص GALDIT.

Table 3. Correlation between quality parameters and GALDIT Index.

| ضریب تبیین R ² | | | | شاخص Index |
|------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------|
| TDS | Cl ⁻ | Na ⁺ | NO ₃ | GALDIT |
| 0.43 | 0.4 | 0.08 | 0.015 | |

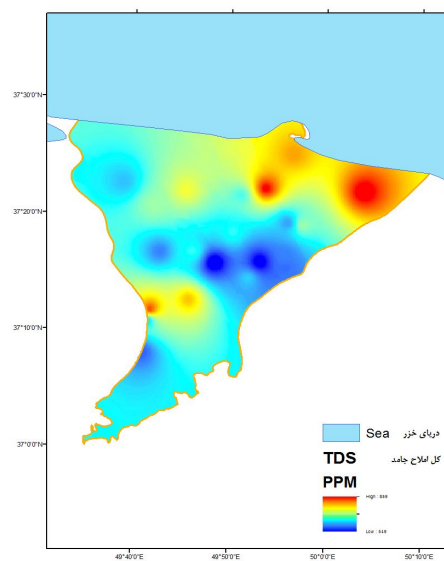
انجام پذیرفت. جهت ارزیابی و تحلیل ضرایب مدل جهت تحلیل سلسله مراتبی با استفاده از نرم افزار Expert choice با در نظر گرفتن کمترین میزان ضریب ناسازگاری انجام پذیرفت. ضریب ناسازگاری به عنوان یکی از قیدهای مهم در جهت بهینه سازی ضرایب و وزن های مدل GALDIT انتخاب شد. با توجه به نتایج به دست آمده و ارزش سنجی استفاده از روش AHP میزان ضریب ناسازگاری کم تر از ۰/۱ به عنوان گزینه برتر جهت تحلیل انتخاب می شود (جدول ۴).

واسنجی مدل GALDIT: به منظور بررسی و اثربخش مدل GALDIT در منطقه آستانه- کوچصفهان با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) اقدام به ارزیابی وزن های پارامترهای مدل با در نظر گرفتن غلظت TDS در محدوده دشت شده است. با توجه به عدم سابقه کار بر روی مدل GALDIT واسنجی این مدل براساس پارامتر کیفی TDS انجام پذیرفت. علت انتخاب این پارامتر براساس رابطه آنها با میزان شوری آب و بالاترین رابطه همبستگی بین این غلظت و مدل GALDIT

جدول ۴- وزن های اصلاحی مدل پس از واسنجی با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی.

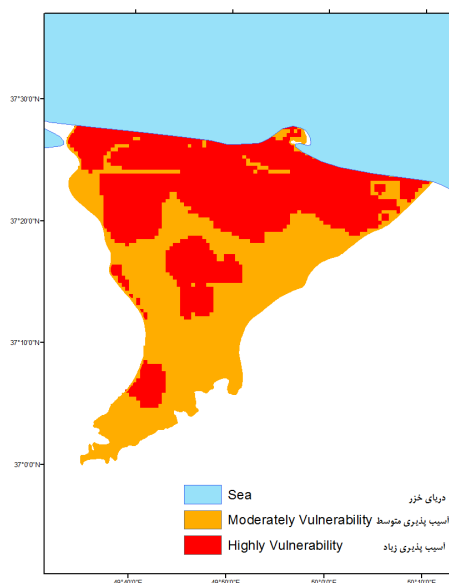
Table 4. The weight of reformatory after calibrated by AHP.

| مدل GALDIT GALDIT Model | | | |
|--|-------------------------------------|-------------------|----------------------|
| وزن با استفاده از مدل AHP Weight by AHP | وزن ارزیابی شده Evaluated weight | وزن مدل weight | پارامتر Parameter |
| 1.7 | 2.5 | 1 | G |
| 5.4 | 4 | 3 | A |
| 1.5 | 3.5 | 4 | L |
| 1.5 | 3 | 4 | D |
| 0.8 | 1 | 1 | I |
| 2.4 | 1 | 2 | T |



شکل ۶- غلظت TDS در محدوده مورد مطالعه.

Figure 6. Concentration of TDS in case study.



شکل ۷- نتایج واسنجی شده مدل Galdit.

Figure 7. Calibrated result in Galdit index.

جدول ۵- ارزیابی وزن‌های داخلی مدل Galdit.

Table 5. Evaluation internal weight of Galdit.

| وزن اصلاحی مدل Reformatory weight | وزن اصلی مدل Original weight | کلاس بندی Class | پارامتر Parameter |
|--------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|--|
| 6 | 7.5 | آبخوان آزاد Unconfined | نوع آبخوان (G) Aquifer type (G) |
| 8 | 10 | آبخوان تحت فشار Confined | |
| 5 | 2.5 | > 1000 | ارتفاع آب زیرزمینی که بالاتر از سطح دریا (D) Depth of groundwater level (D) |
| 2.5 | 5 | 750-1000 | |
| 6 | 7.5 | 500-750 | |
| 7 | 10 | < 500 | |
| 3.3 | 2.5 | < 5 | هدایت هیدرولیکی (A) Aquifer hydraulic conductivity (A) |
| 5.6 | 5 | 5-10 | |
| 7.5 | 7.5 | 10-40 | |
| 8.1 | 10 | > 40 | |
| 4.4 | 2.5 | > 2 | فاصله تا ساحل دریا (L) Distance from the coastline (L) |
| 5.2 | 5 | 1.5-2 | |
| 5.6 | 7.5 | 1-1.5 | |
| 6.3 | 10 | < 1 | |

نتیجه گیری

این مطالعه موردی نشان می‌دهد که وضعیت آسیب‌پذیری آبخوان در نوار ساحلی با توجه به پارامترهای کیفی اندازه‌گیری شده و تجاوز آب شور دریا و بالازدگی آب شور در چاه‌ها در اثر برداشت بی‌رویه و دبی بالای برداشت سبب شور شدن اراضی شده است. بنابراین استفاده از مدل‌های آسیب‌پذیری که ارتباطی بین پارامترهای کیفی در زمینه شوری آب را در نظر نمی‌گیرد نمی‌تواند اثربخشی زیادی در منطقه داشته باشد. در این مطالعه سعی بر آن شد تا ضمن معرفی روش جدید به نام GALDIT در آسیب‌پذیری مناطق ساحلی، واسنجی مدل را در آبخوان آستانه-کوچصفهان نیز انجام شود. تعیین آسیب‌پذیری در آبخوان براساس ۶ پارامتر اولیه مدل انجام پذیرفت و با توجه به همبستگی بالای بین نتایج به دست آمده از مدل و پارامتر کیفی TDS واسنجی مدل GALDIT توسط روش تحلیل سلسه مراتبی با استفاده از نرم‌افزار Expert choice انجام شد که مبنای دقت تحلیل نیز براساس ضریب ناسازگاری ۰/۰۸ مدل انجام شد. در نهایت با استفاده از وزن‌های مؤلفه‌های مختلف خروجی مدل استخراج و وزن‌های بهینه برای منطقه برآورد گردید.

نتایج حاصل از مدل GALDIT بیانگر این است که بیش از ۳۰ درصد آبخوان در بالاترین درجه آسیب‌پذیری نسبت به هجوم جبهه‌های آب شور قرار دارد و تنها ۱۰ درصد آبخوان در وضعیت عدم آسیب‌پذیری قرار دارد. همچنین نتایج مدل نشان داد که فاصله از ساحل دریا یکی از مهم‌ترین و تأثیرگذارترین پارامترها در مدل GALDIT معرفی شد. ارزیابی این شاخص در نوار ساحلی کشور می‌تواند راهکارهای زیادی در مدیریت برداشت و ممنوعیت این مناطق جهت حفر چاه داشته باشد. نتایج واسنجی مدل بیانگر افزایش دقت در وضعیت آسیب‌پذیری آبخوان ساحلی بوده و با توجه به همبستگی غلظت TDS با این شاخص می‌تواند به‌عنوان یک معیار جهت واسنجی آبخوان‌های ساحلی کشور به‌کار برده شود. با توجه به نتایج به دست آمده در آبخوان ساحلی آستانه-کوچصفهان و نتایج کیفی وضعیت آبخوان بایستی در آبخوان‌های ساحلی تمهیدات خاص مدیریتی را به‌گونه‌ای بسنجیم که اثر پیشروی آب شور دریا را تا حد ممکن تعدیل کنیم.

منابع

1. Antonakos, A.K., and Lambrakis, N.J. 2007. Development and testing of three hybrid methods for the assessment of aquifer vulnerability to nitrates, based on the drastic model, an example from NE Korinthia, Greece. *J. Hydrol.* 333: 2-4. 288-304.
2. Bear, J., and Verruijt, A. 1987 *Modeling groundwater flow and pollution*. Reidel Publications, Boston.
3. Chachadi, A.G., and Lobo Ferreira, J.P. 2001. Seawater intrusion vulnerability mapping of aquifers using the GALDIT method. *Coastin.* 4: 7-9.
4. Chachadi, A.G. 2005. Seawater intrusion mapping using modified GALDIT indicator model-case study in Goa. *Jalvigyan Sameek.* 20: 29-45.
5. Ghyben, W.B. 1988. Nota in verband met de voorgenomen putboring nabij Amsterdam. *Ins. Ing. Tijdschr.* 21: 8-22.
6. Herzberg, A. 1901. Die Wasserversorgung einiger Nordseebeäder. *J. Gasbeleucht Wasserversorg.* 44: 815-819.

7. Iuliana Gabriela Breabăn, Mădălina Paiu. 2012. Application of drastic model and GIS for evaluation of aquifer vulnerability: study case Barlad city area. *Water resources and wetlands*.
8. Javadi, S., Kavehkar, N., Mousavizadeh, M.H., and Mohammadi, K. 2011. Modification of DRASTIC model to map groundwater vulnerability to pollution using nitrate measurements in agricultural areas. *J. Agric. Sci. Tech.* 13: 239-249.
9. Kura, N.U., Ramli, M.F., Ibrahim, S., Azmin Sulaiman, W., Zaharin Aris, A., Idris Tanko, A., and Zaudi, M.A. 2014. Assessment of groundwater vulnerability to anthropogenic pollution and seawater intrusion in a small tropical island using index-based methods; *Environ. Sci Pollut Res*.
10. Najib, S., Grozavu, A., Mehdi, K., Breaban, I.G., Guessir, H., and Boutayeb, K. 2012. Application of the method galdit for the cartography of groundwaters vulnerability: aquifer of Chaouia coast (Morocco). *Sci Ann Alexandru Ioan Cuza Univ Iasi Geogr Ser.* 58: 2. 77-88.
11. Rahman, A. 2008. A GIS based DRASTIC model for assessing groundwater vulnerability in shallow aquifer in Aligarh, India. *Applied Geography.* 28: 1. 32-53.
12. Recinos, N., Kallioras, A., Pliakas, F., and Schuth, C. 2014. Application of GALDIT index to assess the intrinsic vulnerability to seawater intrusion of coastal granular aquifers. *Environ. Earth Sci.* 59: 72. 1866-6299.
13. Todd, D.K. 1980. *Groundwater Hydrology*, 2nd edition, John Wiley, New York, 535p.



Gorgan University of Agricultural
Sciences and Natural Resources

J. of Water and Soil Conservation, Vol. 23(2), 2016
<http://jwsc.gau.ac.ir>

Evaluation vulnerability coastal aquifer by GALDIT index and calibration by AHP method

***H. Kardan Moghaddam¹ and S. Javadi²**

¹Ph.D. Student, Dept. of Water Engineering, University of Tehran,

²Assistant Prof., Dept. of Water Engineering, University of Tehran

Received: 12/31/2014; Accepted: 11/06/2015

Abstract

Background and Objectives: Groundwater is one of the main sources of drinking water supply, agriculture, so the management of underground water table is very important. The change quality of groundwater resources in arid areas due to the discharge of water and reduce recharge causes have shortage problems and environmental crisis for aquifers in Iran. Extreme groundwater extract has disturbed the balance of saltwater and freshwater, resulting in significant saltwater intrusion in many parts of the aquifer. The most important factors controlling seawater intrusion were found to be the following: Groundwater occurrence (aquifer type; unconfined, confined and leaky confined); Aquifer hydraulic conductivity; Depth to groundwater Level above the sea; Distance from the shore (distance inland perpendicular from shoreline); Impact of existing status of sea water intrusion in the area and Thickness of the aquifer, which is being mapped. The acronym GALDIT is formed from the highlighted letters of the parameters for ease of reference. Therefore, sustainable development is necessary to the constant demand of groundwater. In recent years, environmental assessments of groundwater resources have resulted in development of models that help identify the vulnerable zones.

Materials and Methods: In this study, investigated vulnerability of Astaneh-Koochehsfahan aquifer which is coastal aquifer located in Sefidrood Basin and adjacent to the Caspian Sea by GALDIT index. GALDIT index a new index model developed for the study of the effects of salt water intrusion into coastal aquifers is caused by irregular discharge. In other words, the use of index in this area has negative effects on the groundwater aquifers indiscriminate harvesting of salt water and beach analyzed.

Results: Initial survey results indicate that the index of negative impact on the vulnerability of the region's coastal areas. To check the calibration of the vulnerability utilized the correlation between the concentration of TDS, nitrate, chloride and sodium and the statistical analysis, the parameters for TDS calibration using Analytical Hierarchy Process(AHP) Using Software Expert choice was selected. TDS feature selection with salt and minerals found in sea water, which can have a direct impact on the effectiveness of the measure coast more vulnerable.

Conclusions: Using the weight of the different components of the model output for the region was estimated optimal and the final model showed that close to the beach bar vulnerability of groundwater to contamination than other areas of the aquifer. The result of hierarchical analysis showed a significant parameter sensitive measure the distance from the sea and after calibration model GALDIT index showed a 30 percent drop in the risk of intrusion of sea water is salty.

Keywords: Vulnerability, GALDIT, Astaneh-Koochehsfahan aquifer, TDS, Analytical hierarchy process

* Corresponding Author; Email: hkardan@ut.ac.ir

