نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، سال اول، شماره پیاپی ۱، بهار ۱۳۹۳

صفحات ۶۵-۵۳

تحلیل فضایی مخاطرات طبیعی ناشی از برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی در آبخوان ساحلی ارومیه

محمد نخعی،دانشیار هیدروژئولوژی ، دانشگاه خوارزمی تهران*

میثم ودیعتی، دانشجوی دکتری هیدروژئولوژی، دانشگاه تبریز

دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۱۲/۵ پذیرش نهایی: ۱۳۹۳/۴/۱۰

چکیده

آب زیرزمینی بخش زیرسطحی و حیاتی چرخه هیدرولوژیکی را تشکیل می‌دهد که تحت تأثیر فرآیندهای هیدرولوژیکی، بوم‌شناسی و بیوژئوشیمیایی قرار می‌گیرد. مدیریت مناسب و کارآمد منابع آب زیرزمینی پیش‌نیاز تعیین تغییرات کیفی و کمی آن است. منابع آب زیرزمینی اغلب با درگیری‌هایی همچون مخاطرات طبیعی و فعالیت‌های انسانی روبه‌روست. در چند سال اخیر، برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی از آبخوان ارومیه باعث پایین آمدن کیفیت آب زیرزمینی و، همچنین، هجوم آب شور به آبخوان ارومیه شده است. به دلیل اثرات زیست‌محیطی جبران‌ناپذیر و وخیم شدن شرایط آبخوان، مطالعه خطرهای طبیعی و آسیب‌پذیری آب زیرزمینی بسیار ضروری است. در این پژوهش، با استفاده بررسی‌های هیدروشیمیایی، سیستم اطلاعات جغرافیایی و تصمیم‌گیری چند معیار وزن‌دار، نقشه آسیب‌پذیری، برای تعیین روند کاهش کیفیت آب زیرزمینی به علت نفوذ آب شور و برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی، طراحی شده است. شش لایه مؤثر بر ارزیابی مخاطرات طبیعی شامل کل املاح محلول، دبی چاه پمپاژ، ضخامت آبخوان، افت آب زیرزمینی، هدایت هیدرولیکی آبخوان و فاصله از ساحل یکپارچه شده و وزن و رتبه‌های مختلف برای آن‌ها معین شد. نتایج پژوهش نشان داد: مخاطرات طبیعی در شرق و شمال شرق آبخوان به علت نفوذ آب شور دریاچه ارومیه و برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی بسیار بالا است.

واژگان کلیدی: آبخوان ارومیه، دریاچه ارومیه، مخاطرات طبیعی، هیدروژئولوژی.

---

* نویسنده مسئول Nakhaei@khu.ac.ir

مقدمه

نوار ساحلی دریاچه ارومیه بیش از ۲۰۰ کیلومتر طول دارد و بیشتر بخش‌های آن را زمین‌های کشاورزی تشکیل می‌دهد. جمعیت نسبتاً فراوانی در این منطقه ساکن هستند. تقاضا و استفاده بیش از حد منابع آب زیرزمینی این نواحی را با کمبود منابع

آب روبرو کرده است. به سبب مدیریت نادرست، آبخوان‌های ساحلی سریع‌تر از آبخوان‌هایی که با دریا ارتباط ندارند در معرض مخاطرات طبیعی هستند (Bear et al. ۱۹۹۹) در طول سواحل دریاچه ارومیه، هر روزه، کیفیت و کمیت منابع آب رو به کاهش است. بخش عمده‌ی آب شیرین، که برای مقاصد مختلفی در نواحی ساحلی مصرف می‌شود، استخراج شده از منابع آب زیرزمینی است. استخراج بدون برنامه و بیش از حد مجاز آب زیرزمینی در نواحی ساحلی خطر نفوذ آب شور و آلودگی آبخوان و در کنار آن نمک‌زایی زمین‌های کشاورزی را افزایش داده است. دخالت انسان در رژیم هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی سواحل منجر به نفوذ آب شور و آلودگی منابع آب زیرزمینی سواحل شده است. تجربه نشان داده است، احیای آبخوان آب زیرزمینی، که آب شور دریاچه به آن نفوذ کرده است، نه تنها دشوار است، بلکه در بسیاری از موارد غیراقتصادی خواهند بود. بنابراین، مدیریت و پایش کیفیت آب و محدوده نفوذ آب شور از اهمیت بالایی برخوردار است.

واژه‌ی آسیب‌پذیری به پتانسیل درجه تخریب، همراه با در نظر گرفتن خطری مشخص، اشاره دارد (Varnes, ۱۹۸۴). برای مسائل آب زیرزمینی، لوبو فریرا و کاربال (Lobo-Ferreira and Carbal, ۱۹۹۱) آسیب‌پذیری را حساسیت کیفیت آب زیرزمینی به آلودگی وارد شده به آبخوان، با در نظر گرفتن ویژگی‌های ذاتی آبخوان، تعریف کردند. بنابراین، آسیب‌پذیری آبخوان از آلاینده‌های مختلف یا هجوم آب شور به آبخوان‌های ساحلی، موضوع تحلیل بسیاری از محققان مختلف شده است (Chachadi et al., ۲۰۰۲; Cardona et al., ۲۰۰۴; Panagopoulas et al., ۲۰۰۶). مدل‌های برهم‌نهی[۱] بر اساس روی هم قراردادن نقشه‌های که دارای مشخصه‌های فیزیکی هستند همراه با امتیازدهی به هر یک از آن‌ها تهیه می‌شود (NRC, ۱۹۹۳). در مطالعات هیدروژئولوژیکی، پتانسیل بالایی در کاربرد روش‌های مبتنی بر تحلیل فضایی وجود دارد. اولین تلاش‌ها برای ارزیابی مخاطرات طبیعی آبخوان مربوط به انتخاب مناطق مناسب برای دفن زباله است (Le Grand, ۱۹۶۴). مطالعات متنوع دیگری نیز در ارزیابی مخاطرات طبیعی آب زیرزمینی انجام شده است (Foster and Hirata ۱۹۸۸; Van Stempvoort et al.۱۹۹۲; Adams and Foster ۱۹۹۲). تاکنون مدل‌های آسیب‌پذیری متنوعی در زمینه آلودگی آبخوان معرفی شده است. مدل دراستیک یکی از روش‌های ساده و مفید ارزیابی آلودگی آبخوان است که الر و همکاران (Aller et al., ۱۹۸۷) معرفی کردند. این مدل‌ها بیشتر بر اساس ویژگی‌های سطحی است و کمتر ویژگی‌های زیرسطحی آبخوان را بررسی می‌کند. تاکنون، مطالعات مشابهی نیز، در زمینه‌ی مدل دراستیک، در کشورمان انجام شده است (عزیزی و محمدزاده، ۱۳۹۲؛ نخعی و همکاران، ۱۳۹۲). در مطالعه‌ی دیگری قره محمودلو و ناصری (۱۳۸۷) به بررسی نفوذ آب شور در آبخوان شهر ساری به کمک روش‌های هیدروشیمیایی پرداختند. نتایج پژوهش نشان داد: در برخی مناطق آب شور به آبخوان ساحلی نفوذ کرده است. تاکنون، مطالعات شایان ذکری در زمینه تحلیل فضایی تغییرات کیفیت آب زیرزمینی در آبخوان‌های ساحلی و آلودگی آبخوان‌های ساحلی ناشی از نفوذ آب شور صورت نگرفته است.

هدف از این پژوهش ارزیابی مخاطرات طبیعی ناشی از برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی در آبخوان ساحلی ارومیه است تا بتوان تغییرات کیفیت آب زیرزمینی آبخوان ساحلی و، همچنین، خطر نفوذ آب شور در آبخوان ساحلی را بررسی کرد. به علت برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی در نواحی ساحلی، آب شور دریاچه به سمت آبخوان‌های ساحلی هجوم آورده و باعث کاهش کیفیت آب زیرزمینی شده است. همچنین، به علت برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی در مناطق مرکزی دشت، بر اثر پدیده‌ی بالاآمدگی[۲]، آب شور

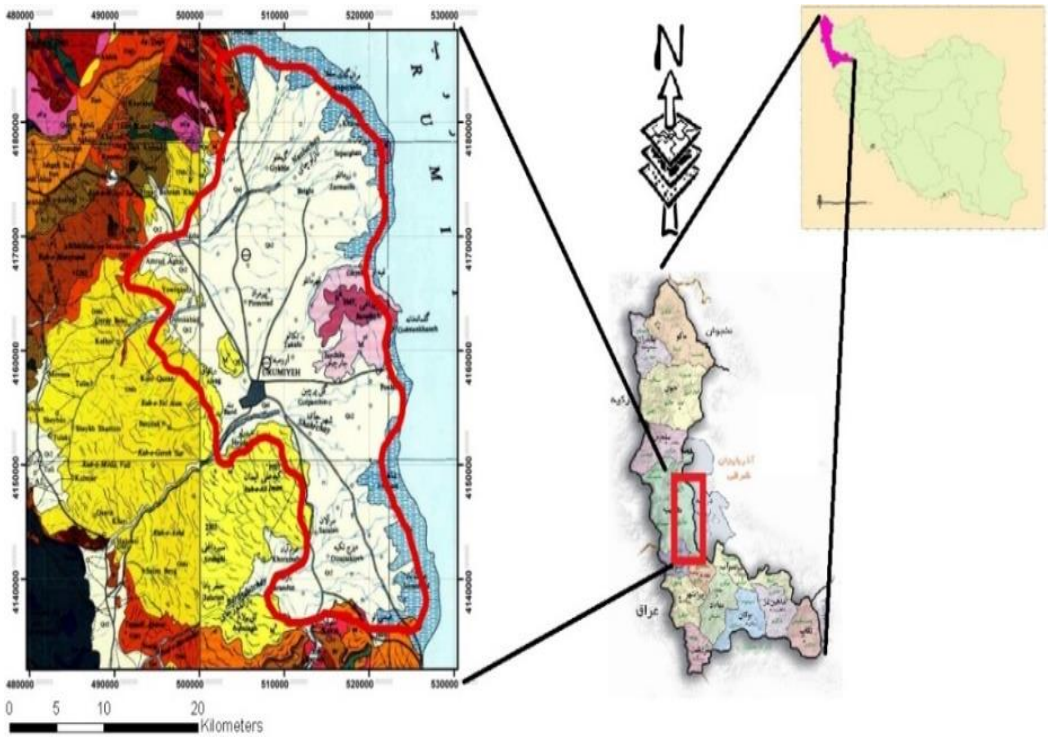
---

[۱] Overlay
[۲] Upcoming

از کف آبخوان بالا آمده و کیفیت آب زیرزمینی کاهش یافته است. مدیریت و پایش تغییرات کیفیت آب زیرزمینی و محدوده‌ی اختلاط آب شور و شیرین یکی از مهم‌ترین مسائل پیش روی مهندسین علوم آب و تصمیم‌گیران است. از این رو، بررسی فضایی مناطق در معرض مخاطرات طبیعی بسیار ضروری است.

داده ها و روش کار

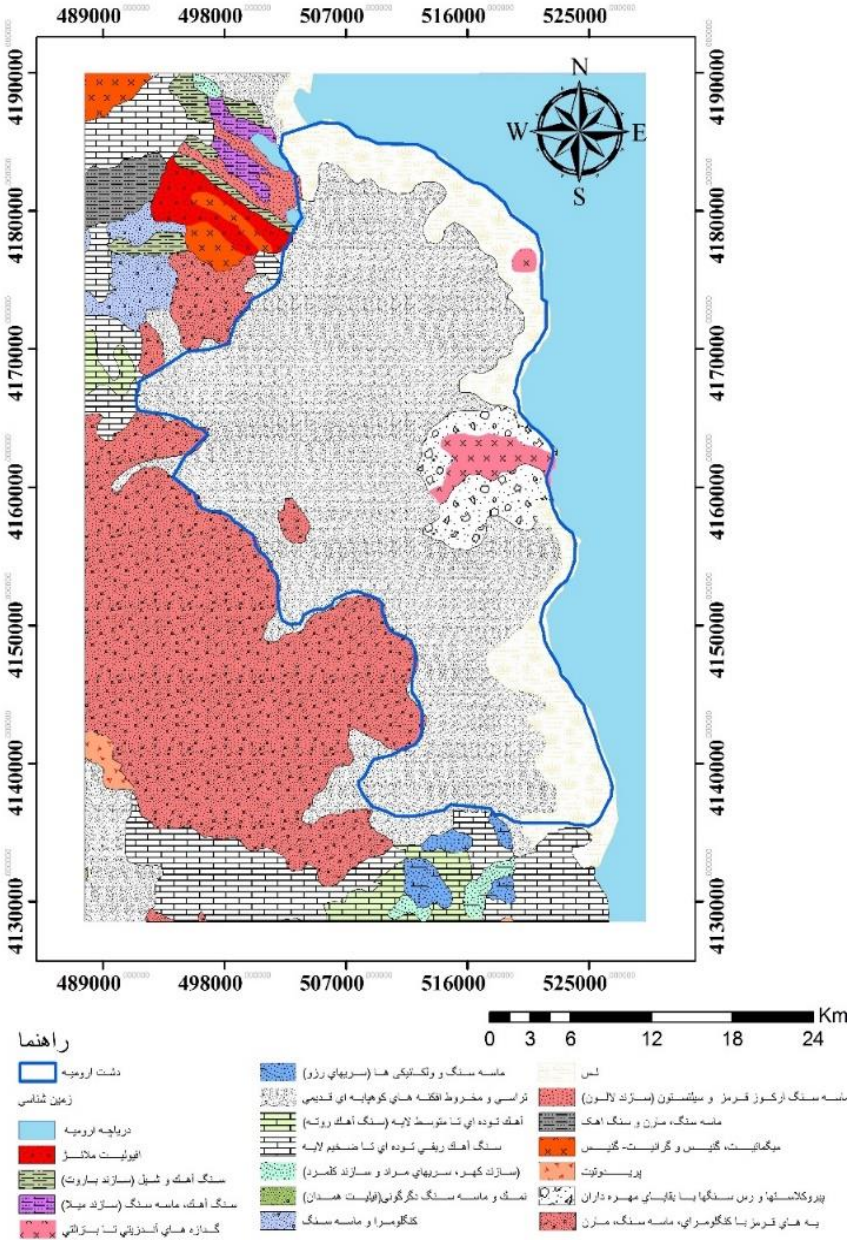
منطقه‌ی مورد مطالعه نوار ساحلی دشت ارومیه، بین طول جغرافیایی ۴۴ درجه و ۲۰ دقیقه تا ۴۵ درجه و ۲۰ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۷ درجه و ۶ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۳۰ دقیقه، است. دشت ساحلی ارومیه از شمال به حوضه‌ی آبریز زولاچای و خرخره چای، از شرق به دریاچه‌ی ارومیه، از جنوب به حوضه‌ی آبریز گادارچای و از غرب به کوه‌های مرزی ایران و ترکیه محدود می‌شوند. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی محدوده مطالعاتی دشت ارومیه را نشان می‌دهد.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی دشت ارومیه

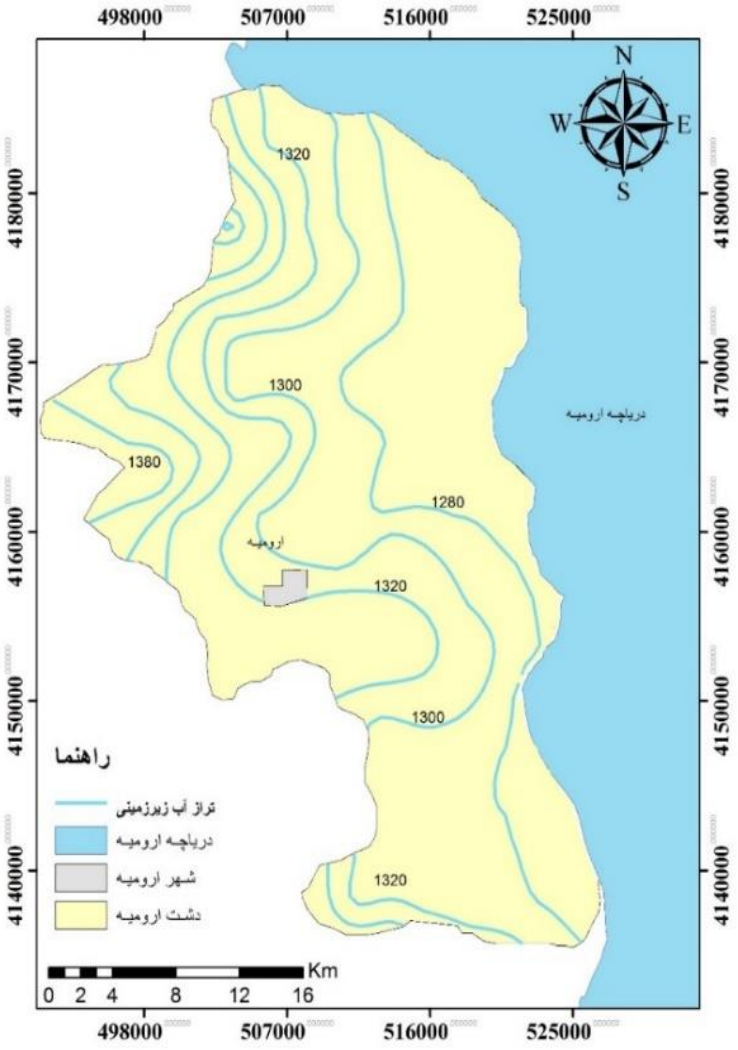
شرایط هیدروژئولوژیکی نواحی ساحلی و فعالیت‌های انسانی به میزان زیادی بر کیفیت آب زیرزمینی تأثیر خواهد داشت. اختلاط آب شور و شیرین و پسماندهای سمی باعث آلودگی آبخوان و کاهش کیفیت آب زیرزمینی شده است. تاکنون، از روش‌هایی که بتوان فاکتورهای هیدروژئولوژیکی را در آسیب‌پذیری نواحی ساحلی به نفوذ آب شور دخیل کرد کمتر استفاده شده است. بنابراین، لازم است، برای تعیین آسیب‌پذیری آبخوان سیستمی طراحی شود که بتوان با استفاده از روش‌های معتبر و رویکردی مفید، بهترین استفاده را از داده‌های موجود داشت. بنابراین، از سیستمی که دارای مشخصه‌های آسیب‌پذیری و در برگیرنده ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی، توپوگرافی و دیگر ویژگی‌های آبخوان باشد استفاده شده است.

زمین‌شناسی منطقه درک درستی از شرایط هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی حاکم بر آبخوان ارائه می‌دهد. نقشه‌ی زمین‌شناسی منطقه‌ی مطالعاتی در شکل ۲ نشان داده شده است. جنس لایه‌های رسوبی، در این محدوده‌ی مطالعاتی، بیشتر از نوع ماسه‌سنگ، شیل (سیلتی و آهکی)، دولومیت، آهک و در بخش‌هایی کنگلومرایی است. در محدوده‌ی شمال غربی دشت ارومیه، سنگ‌هایی از جنس آذر آواری و آذرین و در شرق محدوده، پادگانه‌های آبرفتی قدیمی مشاهده می‌شود.



شکل ۲. نقشه‌ی زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه

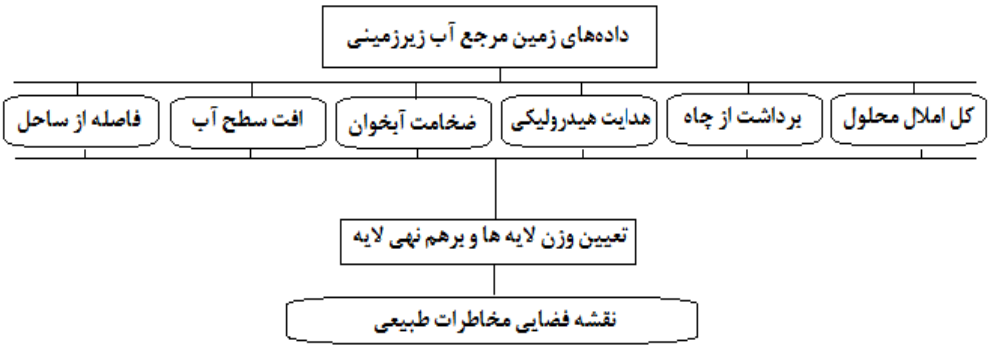
آبخوان ساحلی ارومیه از نوع آزاد است و عمدتاً از رسوبات ناشی از فرسایش کوه‌های مرزی ایران و ترکیه به شکل گرفته است. چهار رودخانه‌ی نازلوچای، باراندوز چای، شهرچای و روضه‌چای تأثیر عمده‌ای در تغذیه‌ی دشت ارومیه دارد. سطح آب زیرزمینی، ماهیانه، از طریق چاه‌های مشاهده‌ای اندازه‌گیری شده است. شکل ۳ تراز سطح آب زیرزمینی منطقه‌ی مطالعاتی دشت ارومیه را برای شهریور ۱۳۹۱ نشان می‌دهد. جهت کلی جریان آب زیرزمینی از توپوگرافی کلی منطقه پیروی می‌کند که غرب به شرق است و سرانجام در دریاچه‌ی ارومیه تخلیه می‌شود.



شکل ۳. نقشه‌ی سطح آب زیرزمینی آبخوان ارومیه (شهریور ۱۳۹۱)

روش پژوهش حاضر استفاده از مدل‌سازی فضایی برهم‌نهی مشخصه‌های مهم ارزیابی مخاطرات طبیعی ناشی از برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی با کمک نرم‌افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی است. در این پژوهش، مناطق با خطر بالای شوری آب زیرزمینی، که نیاز به طرح‌های مدیریتی دارند، مشخص می‌شود تا با پایش برداشت آب زیرزمینی از چاه‌های زیرزمینی، روند کاهش کیفیت آب زیرزمینی کنترل و مدیریت شود. نمودار روش‌شناسی پژوهش حاضر در شکل ۴ تشریح شده است. در حقیقت،

عوامل طبیعی همچون ویژگی‌های زمین‌شناسی، شیب هیدرولیکی، میزان برداشت آب زیرزمینی و کاهش تغذیه آبخوان بیش‌ترین تأثیر را بر افزایش شوری آبخوان‌های ساحلی دارند (Choudhury et al., ۲۰۰۱). برای ارزیابی مخاطرات طبیعی ناشی از برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی در منطقه‌ی مطالعه، پایگاه داده‌ی موقعیت مکانی چاه‌های مشاهداتی و بهره‌برداری آب زیرزمینی در نرم‌افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و نقشه تغییرات فضایی مشخصه‌های مدل تهیه شد.



شکل ۴. نمودار روش‌شناسی مشخصه‌های مورد استفاده در مطالعه‌ی حاضر

مشخصه‌های استفاده شده در مطالعه‌ی حاضر در مکان و زمان متفاوت است. هر یک از این مشخصه‌ها، شرایط هیدروژئولوژیکی و کیفت آبخوان را منعکس می‌کند. برداشت بی‌رویه از آبخوان، کاهش تغذیه آبخوان و نفوذ آب شور دریاچه به آبخوان در ارزیابی مخاطرات طبیعی ناشی از شور شدن آب زیرزمینی مهم است. این مشخصه‌ها شامل:

۱. کل املاح محلول (TDS): این مشخصه توزیع مکانی شور شدگی و تغییرات کیفیت آب را نشان می‌دهد.

۲. برداشت از چاه‌های آب زیرزمینی (Q): این مشخصه مناطقی را با برداشت بی‌رویه و خطر افت شدید آب زیرزمینی نشان می‌دهد.

۳. هدایت هیدرولیکی (K): هرچه هدایت هیدرولیکی بیشتر باشد، نفوذ آب شور از دریاچه به ساحل بیشتر بوده و خطر شور شدن آبخوان ساحلی بیشتر است. بنابراین، هدایت هیدرولیکی شاخص مهمی در ارزیابی تغییرات فضایی کیفیت آب زیرزمینی است.

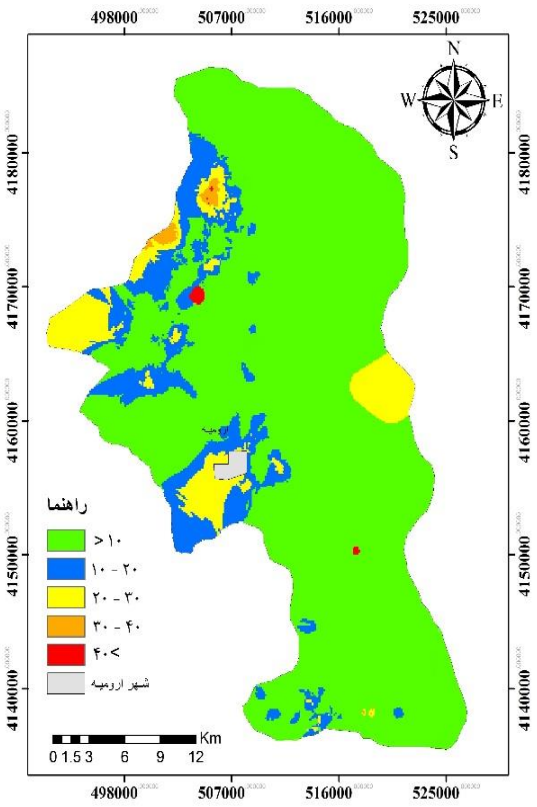
۴. ضخامت آبخوان (T): تغییرات فضایی ضخامت آبخوان مشخصه مهمی در ارزیابی تغییرات کیفیت آب زیرزمینی آبخوان ساحلی است، زیرا هرچه ضخامت بیشتر باشد، حجم تغییرات آب سفره آب زیرزمینی افزایش می‌یابد و، در نتیجه، خطر افزایش شوری آب زیرزمینی بیشتر خواهد بود.

۵. افت سطح آب زیرزمینی (S): این مشخصه عامل کنترل‌کننده درجه در معرض خطر بودن آبخوان است. بدین ترتیب که، هرچه میزان افت آبخوان بیشتر باشد، میزان مخاطرات طبیعی ناشی از برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی بیشتر است.

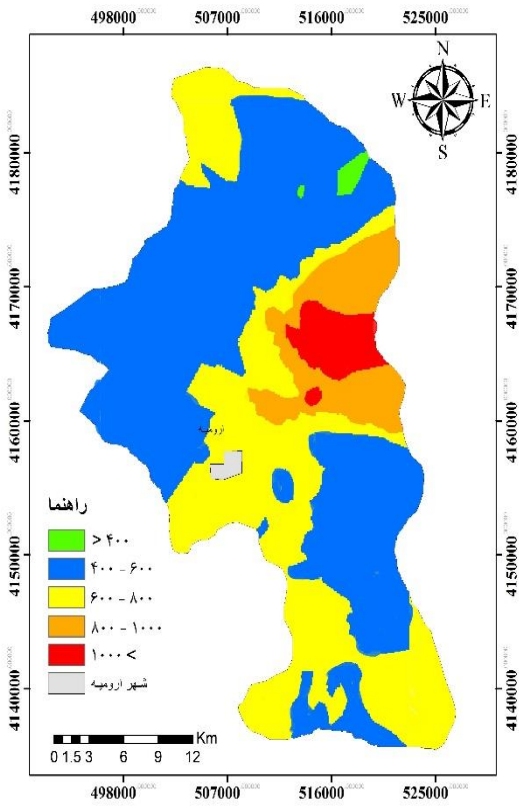
۶. فاصله از ساحل دریاچه (D): هرچه از سوی آبخوان به دریاچه نزدیک می‌شویم، خطر شور شدن آب زیرزمینی به دلیل نفوذ آب شور از دریاچه ارومیه به آبخوان بیشتر می‌شود. بنابراین، با برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی جبهه‌ی نفوذ آب شور به سمت ساحل پیشروی بیشتری می‌کند و، در نتیجه، آبخوان را آلوده می‌کند.

تغییرات فضایی هر یک از این مشخصه‌ها برای آبخوان ارومیه در نرم‌افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی به صورت لایه‌های رقومی شده تهیه شد. با ترکیب و برهم نهی هر یک از این مشخصه‌ها، میزان مخاطرات طبیعی ناشی از برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی بررسی خواهد شد. درجه‌ی تأثیر هر یک از این مشخصه‌ها مشابه هم نیست؛ اما هر کدام از مشخصه‌ها، منعکس‌کننده‌ی تغییرات فضایی مشخصه‌ی مؤثر بر ارزیابی برداشت بی‌رویه‌ی آب زیرزمینی است.

کل مواد جامد محلول شامل مجموع مواد جامدی است که در آب محلول است، ولی شامل رسوبات معلق، کلوئیدها و گازهای محلول نمی‌شود. از آنجایی که هرچه غلظت نمک‌های محلول در آب بیشتر باشد، میزان TDS بالاتر است، می‌توان این مشخصه را نماینده‌ی غلظت تمامی عناصر محلول در آب دانست. برای همین از داده‌های ۹۶ چاه آب زیرزمینی استفاده شدکه در شهریور ۱۳۹۱ نمونه‌برداری شده بود. متوسط کل املاح محلول در منطقه‌ی مطالعه برابر ۶۲۰ میکرومهوس بر سانتی‌متر است. شکل ۵ تغییرات کل املاح محلول را در منطقه‌ی مطالعه نشان می‌دهد. روند تغییرات کیفیت آب زیرزمینی نشان‌دهنده افزایش شوری و پایین آمدن کیفیت آب از غرب به شرق آبخوان و همراه با فاصله گرفتن از محل تغذیه است. به علت برداشت بی‌رویه و وجود چاه‌های مجاز و غیرمجاز بیشتر از توان هیدرولیکی سفره، تعادل آبخوان ساحلی ارومیه برهم خورده و شاهد شور شدن منابع آب زیرزمینی و زمین‌های کشاورزی بر اثر پدیده‌ی بالا آمدگی آب شور از بخش‌های تحتانی آبخوان هستیم. بنابراین، با افزایش برداشت آب زیرزمینی مخاطرات ناشی از شور شدن آب بیشتر است. متوسط برداشت آب زیرزمینی از چاه‌های منطقه‌ی مطالعه، ۱۶ لیتر بر ثانیه است. شکل ۶ میزان برداشت آب زیرزمینی را در منطقه‌ی مطالعه نشان می‌دهد.

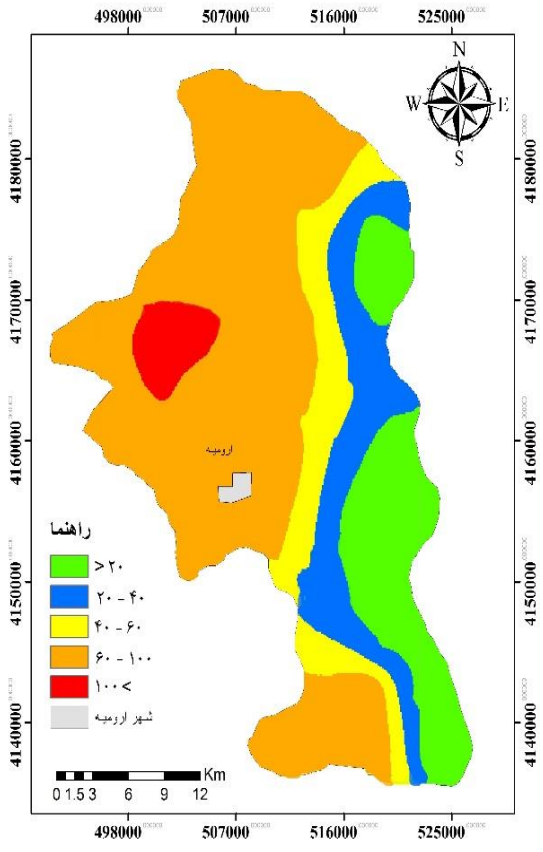


شکل ۵. تغییرات کل املاح محلول آبخوان

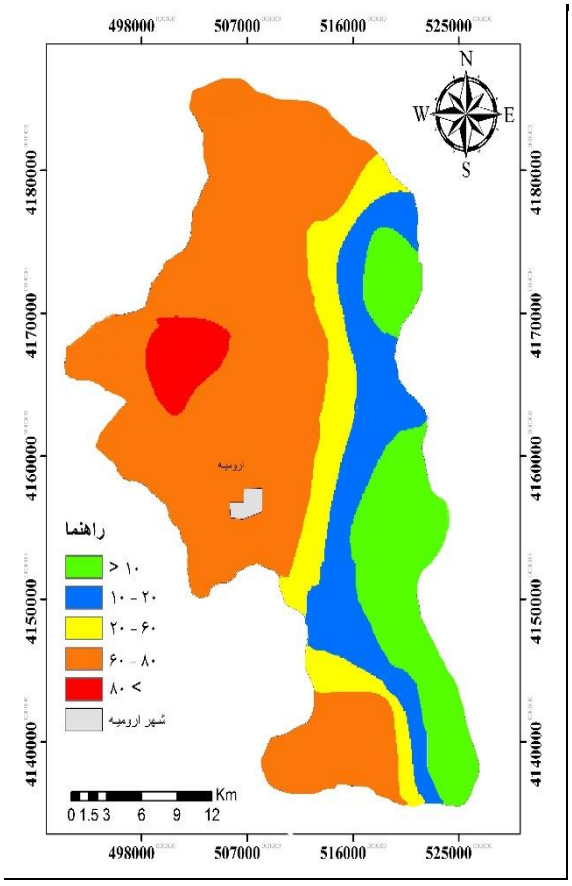


شکل ۶. میزان برداشت از چاه‌های آب زیرزمینی

توانایی عبور آب از خاک یا سنگ، تحت تأثیر گرادیان هیدرولیکی، هدایت هیدرولیکی تعریف می‌شود (Castany ۱۹۸۲). هدایت هیدرولیکی بالا می‌تواند به علت ایجاد مخروط افت حاصل از پمپاژ باشد که باعث حرکت و جابجایی آب زیرزمینی در آبخوان می‌شود. بنابراین، یکی از متغیرهای مهم در برهم زدن تعادل و حرکت یکنواخت آب زیرزمینی هدایت هیدرولیکی آبخوان است. مقادیر هدایت هیدرولیکی، که از آزمون پمپاژ به دست آمده، بین ۱ تا ۱۱۶ متر بر روز متغیر است. همان طور که در شکل ۷ نمایان است، هدایت هیدرولیکی از غرب به شرق آبخوان به علت طبیعت چرخه رسوب‌گذاری و کاهش اندازه ذرات کم می‌شود. ضخامت آبخوان یا ضخامت بخش اشباع آبخوان نقش مهمی در تعیین وسعت و بزرگی نفوذ آب شور دریاچه ارومیه و همچنین ارزیابی مخاطرات طبیعی ناشی از برداشت بی‌رویه در منطقه‌ی مطالعه دارد. هر چه ضخامت آبخوان بیشتر باشد، وسعت آب شور نفوذ کرده بیشتر خواهد بود. در شکل ۸، تغییرات ضخامت آبخوان بر حسب متر آمده است که برگرفته از داده‌های سونداژ ژئوالکتریکی است.



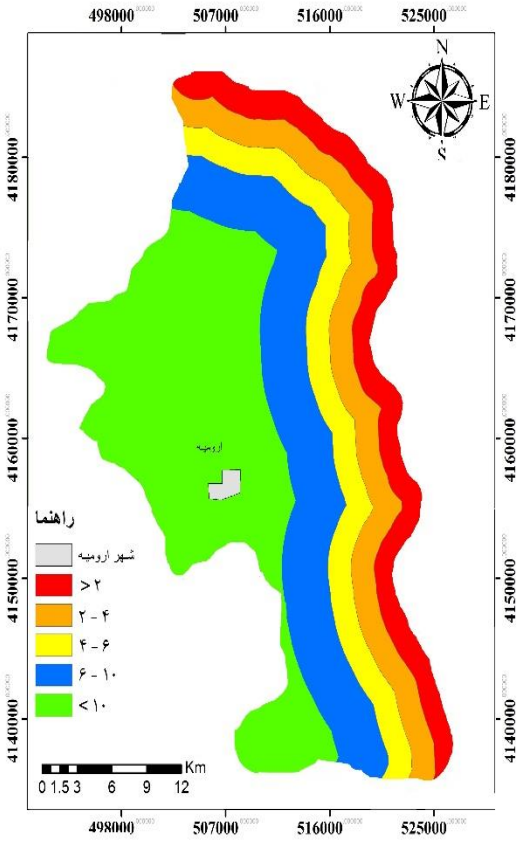
شکل ۷. تغییرات هدایت هیدرولیکی آبخوان



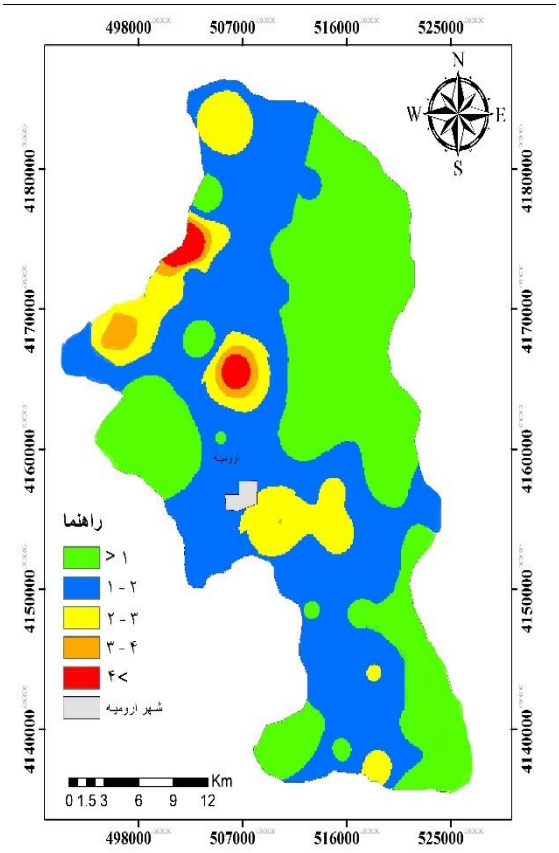
شکل۸. تغییرات ضخامت آبخوان

رابطه‌ی قوی بین شور شدن آب زیرزمینی و افت سطح آب زیرزمینی وجود دارد (Polemio, ۲۰۰۵). متوسط شیب هیدرولیکی آب زیرزمینی منطقه‌ی مطالعه در حد ۵/۴ در هزار و در نواحی نزدیک به دریاچه در حدود ۳ در هزار است (مهندسین مشاور کاو

آب، ۱۳۸۸). با برداست بی‌رویه آب زیرزمینی و، در نتیجه، افت سطح آب زیرزمینی جهت عمومی حرکت آب تغییر پیدا می‌کند و باعث برهم‌زدگی تعادل آب شور و شیرین می‌شود. از این رو، افت سطح آب بسیار با اهمیت است. برای همین، از داده‌های ۵ ساله (شهریور ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۱) سطح مشاهداتی استفاده شده است تا تغییرات سطح آب زیرزمینی و میزان افت آبخوان در مدل تحلیل فضایی به منزله‌ی مهم‌ترین مشخصه لحاظ شود. شکل ۹ افت سطح آب زیرزمینی بر حسب متر را نشان می‌دهد. یکی دیگر از مشخصه‌های مهم ارزیابی مخاطرات طبیعی آبخوان‌های ساحلی فاصله از خط ساحلی است. با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی و مدل رقومی ارتفاع این لایه تهیه شد. با دور شدن از ساحل دریاچه‌ی ارومیه، میزان آسیب‌پذیری نفوذ آب شور دریاچه‌ی ارومیه به آبخوان ساحلی کاهش می‌یابد. نفوذ آب شور، زمانی که آبخوان نزدیک ساحل بوده و شرایط هیدروژئولوژیکی آبخوان جهت انتقال مناسب باشد، به بیش‌ترین مقدار خود خواهد رسید. شکل ۱۰ فاصله خط ساحلی بر حسب کیلومتر آمده است.



شکل ۹. افت سطح آب (شهریور ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۱)



شکل ۱۰. نقشه‌ی رقومی فاصله از خط ساحلی

شرح و تفسیر نتایج

پس از بررسی منابع و مطالعات مختلف و نظر کارشناسی مؤلفین، شش مشخصه‌ی کل املاح محلول، برداشت بی‌رویه از چاه‌های آب زیرزمینی، هدایت هیدرولیکی، ضخامت آبخوان، افت سطح آب زیرزمینی و فاصله از ساحل دریاچه‌ی ارومیه انتخاب شد که اهمیت بالایی در ارزیابی مخاطرات ناشی از برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی و، در نتیجه، کاهش کیفیت آب زیرزمینی دارد. مؤلفین، با توجه به میزان آسیب‌پذیری، وزن مخصوصی برای هر یک از مشخصه‌ها تعیین کردند. وزن‌ها و رتبه‌ها بر اساس نتایج تجربی یا

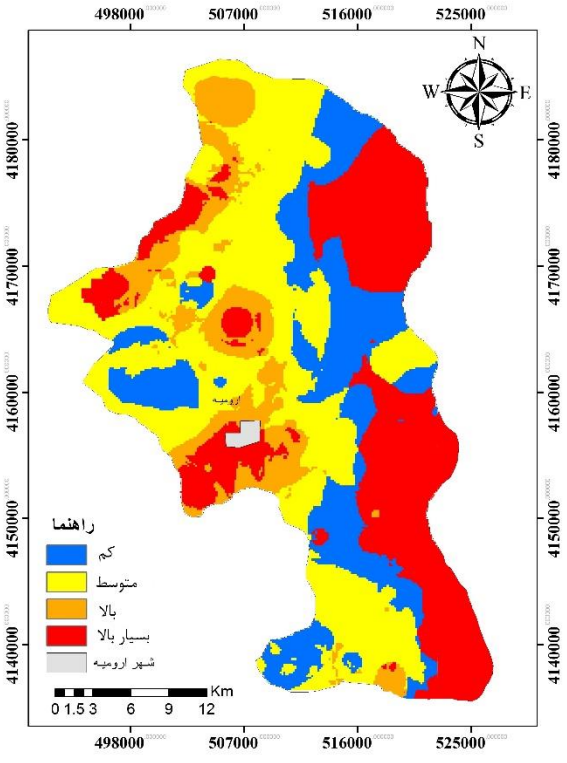
قضاوت مؤلفین و دانش کارشناسان در مطالعات مشابه و روش‌های آماری تعیین شد (Nobr Thirumalaivasan et al ;۲۰۰۳. et al, ۲۰۰۷; Hammouri and El-Naqa ۲۰۰۸). رتبه‌ها، وزن‌ها و رده‌های مشخصه‌های استفاده شده این تحقیق در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱. رتبه‌ها، وزن‌ها و رده‌های مشخصه‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر

لایه مشخصه	رده	رتبه	وزن	وزن نهایی
کل املاح محلول(µmhos/cm)	۱۰۰۰<	۹	۱	۹
	۸۰۰-۱۰۰۰	۷		۷
	۶۰۰-۸۰۰	۵		۵
	۴۰۰-۶۰۰	۳		۳
	>۴۰۰	۱		۱
برداشت از چاه‌های آب زیرزمینی (lit/s)	۴۰<	۹	۲	۱۸
	۳۰-۴۰	۷		۱۴
	۲۰-۳۰	۵		۱۰
	۱۰-۲۰	۳		۶
	>۱۰	۱		۲
هدایت هیدرولیکی (m/day)	۸۰<	۹	۱	۹
	۶۰-۸۰	۷		۷
	۲۰-۶۰	۵		۵
	۱۰-۲۰	۳		۳
	>۱۰	۱		۱
ضخامت آبخوان (m)	۱۰۰<	۹	۱/۵	۱۳/۵
	۶۰-۱۰۰	۷		۱۰/۵
	۴۰-۶۰	۵		۷/۵
	۲۰-۴۰	۳		۴/۵

	>۲۰	۱		۱/۵
افت سطح آب زیرزمینی (m)	۴<	۹	۳	۲۷
	۳-۴	۷		۲۱
	۲-۳	۵		۱۵
	۱-۲	۳		۹
	>۱	۱		۳
فاصله از ساحل دریاچه (Km)	>۲	۹	۱/۵	۱۳/۵
	۴-۲	۷		۱۰/۵
	۴-۶	۵		۷/۵
	۶-۱۰	۳		۴/۵
	۱۰<	۱		۱/۵

هر یک از این مشخصه‌ها، که در بخش قبلی بررسی شد، به ۵ رده تقسیم شدند و هر کدام رتبه‌های ۱ تا ۹ را به خود اختصاص دادند. وزن نهایی برای هر یک از لایه‌ها نیز بر اساس اهمیت لایه‌ها تعیین شد. وزن نهایی مشخصه‌های مورد استفاده بدین صورت تعیین شدند: کل املاح محلول «۱»، برداشت از چاه‌های آب زیرزمینی «۲»، هدایت هیدرولیکی «۱»، ضخامت آبخوان «۱/۵»، افت سطح آب زیرزمینی «۳»، فاصله از ساحل دریاچه «۱/۵». وزن هر یک از لایه‌ها به رده‌های لایه تخصیص داده شد. سرانجام با توجه به اهمیت میزان آسیب‌پذیری، نقشه نهایی (شکل ۱۱) تعیین شد و مناطق با آسیب‌پذیری کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد رده‌بندی شدند.



شکل ۱۱. نقشه نهایی تحلیل فضایی مخاطرات طبیعی

نقشه نهایی نشان می‌دهد، مناطقی با آسیب‌پذیری کم ۱۹۱ کیلومترمربع (۲۰ درصد از منطقه‌ی مطالعه) را شامل می‌شود. در این مناطق، برداشت آب زیرزمینی کم است و ضخامت آبرفت نیز ناچیز است. مناطق با آسیب‌پذیری متوسط ۳۵۳ کیلومترمربع (۳۷ درصد) و مناطق با آسیب‌پذیری بالا ۱۱۹ کیلومترمربع (۱۳ درصد) از منطقه‌ی مطالعه را شامل می‌شود. در بخش‌های ساحلی دریاچه و مناطق مرکزی دشت، برداشت آب زیرزمینی بسیار بالا است و آسیب‌پذیری بسیار بالا را نشان می‌دهد که معادل ۲۸۰ کیلومترمربع (۳۰ درصد) از منطقه‌ی مطالعه است. نتایج مدل نشان‌دهنده نیاز منطقه‌ی مطالعه به مدیریت ویژه‌ی پایش، تنظیم و بهینه کردن برداشت آب زیرزمینی است.

نتیجه‌گیری

اهمیت آب زیرزمینی، به منزله‌ی بخش مهمی از منابع آب شیرین، در مناطقی با بارش کم و تراکم جمعیت بالا مشخص می‌شود. آبخوان‌های ساحلی، به علت برداشت نامناسب و امکان نفوذ آب شور، بیشتر در معرض خطر هستند. با برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی و بیشتر از توان هیدرولیکی آبخوان و، همچنین، عدم جایگزینی آن با بارش در طی سال‌های اخیر، سطح آب زیرزمینی افت شدیدی پیداکرده و به تبع آن کیفیت آب زیرزمینی پایین آمده است. از این رو، مدیریت و پایش کیفیت آب زیرزمینی آبخوان ارومیه و محدوده‌ی تداخل آب شور و شیرین در حاشیه دریاچه‌ی ارومیه بسیار ضروری می‌نماید. تهیه نقشه تحلیل فضایی مخاطرات طبیعی آبخوان، با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند متغیره در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی، گزینه‌ی مناسبی برای مطالعه تغییرات کیفیت آب زیرزمینی و تعیین مناطق با خطر بالا به شمار می‌رود. در این پژوهش، مشخصه‌های

مختلفی بررسی شد و تأثیرگذارترین آن‌ها شامل کل املاح محلول، برداشت از چاه‌های آب زیرزمینی، هدایت هیدرولیکی، ضخامت آبخوان، افت سطح آب زیرزمینی و فاصله از ساحل دریاچه انتخاب شد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد: میزان مخاطرات طبیعی ناشی از برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی در ساحل دریاچه ارومیه، به علت نفوذ آب شور به آبخوان ساحلی و، همچنین، بخش‌های مرکزی آبخوان به دلیل برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی، بسیار بالا است. نتایج مدل نشان داد که، در مجموع، ۴۳ درصد از منطقه‌ی مطالعه آسیب‌پذیری بالا و خیلی بالایی دارند. همچنین، ۳۷ درصد آسیب‌پذیری متوسط و ۲۰ درصد از آبخوان ارومیه آسیب‌پذیری کمی دارند. پیشنهاد می‌شود، مدیران منابع آب مدیریت ویژه‌ای برای مناطق با خطر بسیار بالا در نظر بگیرند. همچنین، تنظیم برنامه‌هایی برای کنترل میزان برداشت آب زیرزمینی از چاه‌های منطقه‌ی مطالعه و برداشت منظم داده‌های کیفیت آب زیرزمینی، برای پایش تغییرات کیفیت آب زیرزمینی در مناطق با مخاطرات طبیعی بالا، پیشنهاد می‌شود.

منابع

- عزیزی، فرحناز و حسین محمدزاده. ۱۳۹۲. پهنه‌بندی آسیب‌پذیری و ارزیابی تغییرات مکانی کیفیت آبخوان دشت امامزاده جعفر گچساران با استفاده از DRASTIC و شاخص کیفی GWQI، *مجله‌ی مهندسی منابع آب*، **۱۳**، ص ۱-۱۴.
- قره محمودلو، مجتبی و حمیدرضا ناصری. ۱۳۸۷. بررسی نفوذ آب شور در آبخوان شهر ساری، *مجله‌ی محیط‌شناسی*، **۴۷**، ص ۲۱-۳۰.
- مهندسین مشاور کاو آب. ۱۳۸۸. گزارش توجیهی رفع ممنوعیت دشت ارومیه و امکانات توسعه‌ی بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی. *شرکت آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی*.
- نخعی، محمد؛ وهاب امیری و مهدی رحیمی شهربابکی. ۱۳۹۲. ارزیابی پتانسیل آلودگی و آنالیز حساسیت آب زیرزمینی در آبخوان خاتون‌آباد با استفاده از مدل دراستیک مبتنی بر GIS، *مجله‌ی زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته*، **۸**، ص ۱-۱۰.
- Adams, B. and Foster, S.۱۹۹۲. Land surface zoning for groundwater protection. *Journal of the Institution of Water & Environmental Management*, **۶**, pp. ۳۱۲ – ۳۲۰.
- Aller, L. Bennett, T. Lehr, J.H. and Petty, R. ۱۹۸۷. DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeological settings, U.S. EPA Report.
- Bear, J., Cheng, AHD, Sorek, S., Ouazar, D. and Herrera, I. ۱۹۹۹. *Seawater intrusion in coastal aquifers-concepts, methods and practices: theory and applications in transport in porous media*, Kluwer Academy Publishers, Dordrecht.
- Cardona, A. Carrillo-Rivera, J.J. Huizar-Alvarez, R. and Graniel-Castro, E, ۲۰۰۴, Salinization in coastal aquifers of arid zones: an example from Santo Domingo, Baja California Sur, Mexico, Environmental Geology, **۴۵**, pp. ۳۵۰ – ۳۶۶.
- Castany, G. ۱۹۸۲. *Primcipe set methods de l'hydrogeologie*, Dunod, Paris.
- Chachadi, A.G. Lobo-Ferreira, J.P. Noronha, L. and Choudri, B.S. ۲۰۰۲. Assessing the impact of sea-level rise on salt water intrusion in coastal aquifers using GALDIT model, COASTIN newsletter, **۷**, pp. ۲۷ – ۳۲.

- Choudhury, K., Saha, D.K. and Chakraborty, P. ۲۰۰۱. Geophysical study for saline water intrusion in a coastal alluvial terrain, *Journal of Geophysics*, **۴۶**, pp, ۱۸۹ –۲۰۰.
- Foster, S. and Hirata, R. ۱۹۸۸. Groundwater pollution risk assessment: a methodology based on available data. CEPIS/PAHO Technical Report. Lima, Peru.
- Hammouri, N. and El-Naqa, A. ۲۰۰۸. GIS based hydrogeological vulnerability mapping of groundwater resources in Jerash Area-Jordan, Geofisica International, **۴۷۲**, pp. ۸۵ – ۹۷.
- Le Grand, H. ۱۹۶۴. System for evaluating contamination potential for some waste sites. *American Water Work Association Journal.*
- Lobo-Ferreira, J.P. and Cabral, M. ۱۹۹۱. Proposal for an Operational Definition of Vulnerability for the European Community's Atlas Groundwater Resource. In: Meeting of the European Institute for Water, Groundwater Work Group, Brussels.
- Nobr, RCM., Rotunno, O.C., Mansur, W.J., Nobre, MMM. And Cosenza, CAN. ۲۰۰۷. Groundwater vulnerability and risk mapping using GIS, modeling and fuzzy logic tool. *J Contaminant Hydrology*, **۹۴**, pp. ۲۷۷ – ۲۹۲.
- NRC, National Research Council. ۱۹۹۳. *Groundwater vulnerability assessment: contamination potential under conditions of uncertainties*. National Academy Press, Washington, DC.
- Panagopoulos, G.P., Antonakos A.K. and Lambrakis N.J. ۲۰۰۶. Optimization of the DRASTIC method for groundwater vulnerability assessment via the use of simple statistical methods and GIS. *Hydrogeology Journal*, **۱۴**, pp. ۸۹۴ – ۹۱۱.
- Polemio, M. ۲۰۰۵. Seawater intrusion and groundwater quality in the Southern Italy region of Apulia: a multi-methodological approach to the protection. In: Maraga F, Arattano M eds Progress in surface and subsurface water studies at the plot and small basin scale. UNESCO, IHP, Malaysia.
- Thirumalaivasan, D., Karmegam, M. and Venugopal, K. ۲۰۰۳. AHP DRASTIC: software for specific aquifer vulnerability assessment using DRASTIC model and GIS. Environmental Modeling Software, **۱۸**, pp. ۶۴۵ – ۶۵۶.
- Van Stempvoort, D., Ewert, L. and Wassenaar, L. ۱۹۹۲. AVI: a method for groundwater protection mapping in the Prairie Provinces of Canada. PPWD pilot project, September ۱۹۹۱–March ۱۹۹۲. Groundwater and contaminants project, Environmental Sciences Division, National Hydrology Research Institute.
- Varnes, D.J. ۱۹۸۴. Landslides hazard zonation, a review of principles and practice, UNESCO.