

مقاله علمی-پژوهشی

بررسی وضعیت آبخوان مشهد-چناران از نظر کیفی و آسیب پذیری با استفاده از دراستیک و شاخص کیفیت آب

سید محمد علوی زاده^۱، حسین بانزاد^{۲*}، علی اصغر بهشتی^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۱۴

چکیده

در بررسی کیفی آبخوان، شناسایی مناطقی با کیفیت آب پایین تر و همچنین مناطق آسیب پذیر، به منظور تدوین برنامه های بهینه برای حفاظت از منابع آب زیرزمینی و کنترل فعالیت های انسانی در این مناطق، گامی اساسی محسوب می شود. در این پژوهش، وضعیت کیفی و آسیب پذیری آبخوان مشهد-چناران با استفاده از مدل دراستیک (DRASTIC) و شاخص کیفیت آب زیرزمینی (GWQI) مورد بررسی قرار گرفته است. داده های کیفی مربوط به ۳۵ چاه در سال ۱۴۰۰ و ۱۲۳ چاه در سال ۱۳۸۰ تحلیل شدند. مدل دراستیک شامل وزن دهی و رتبه دهی هفت متغیر عمق آبخوان، تغذیه خالص، محیط ناحیه اشباع، محیط خاک، شیب توپوگرافی، تأثیر ناحیه غیراشباع و هدایت هیدرولیکی می باشد. با اضافه کردن کاربری اراضی، مدل دراستیک ترکیبی نیز بررسی شد. مطابق نتایج، در بخش های مرکزی شامل بخش هایی از شهر مشهد و شمال این شهر کلاس آسیب پذیری خیلی زیاد دیده می شود که حدود ۱۵ درصد از مساحت محدوده بوده و محل استقرار شهرک های صنعتی می باشد. در هر دو مدل کلاس آسیب پذیری زیاد بیشترین مساحت را در محدوده مطالعاتی با حدود ۷۰ درصد دارد. مطابق شاخص کیفیت آب زیرزمینی، کیفیت آب در سال ۱۴۰۰ نسبت به سال ۱۳۸۰ کاهش یافته و بیشتر نمونه ها در رسته ضعیف برای مصارف شرب قرار گرفته اند. جنوب محدوده مطالعاتی (خروجی آبخوان) و بخش شمالی از کیفیت آب ضعیف تری نسبت به سایر مناطق برخوردارند.

واژه های کلیدی: آلودگی آبخوان، آسیب پذیری، آب زیرزمینی، آبخوان مشهد-چناران، شاخص کیفی آب

مقدمه

نرخ خالص کاهش سطح آب های زیرزمینی جهانی از سال ۱۹۹۰ بوده است (Konikov and Likhodedova, 2011). بسیاری از سفره های زیرزمینی بزرگ جهان که تغذیه ناچیزی دارند به طور گسترده استخراج می شوند. واقعیت این است که حفاظت از آب های زیرزمینی به نسبت آب های سطحی امری به مراتب دشوارتر است (Moraru and Hannigan, 2018).

تخلیه مخازن آب زیرزمینی همچنین با آلودگی و آسیب پذیری آن به آلاینده ها مرتبط دانسته شده (Machiwal and Jha, 2015). برای مثال تخلیه آب زیرزمینی یکی از علل آلودگی آن به آرسنیک در برخی نقاط دنیا است (Smedley and Kinniburgh, 2002). شاخص های متفاوتی برای بررسی کیفیت آب های زیرزمینی توسعه داده شده است. شاخص کیفیت آب زیرزمینی (GWQI^۴) در مطالعات بسیاری جهت بررسی کیفیت آب زیرزمینی جهت مصارف شرب به کار رفته است (Ghosh and Bera, 2023, Sheikh et al., 2021).

بشر همواره از آب زیرزمینی برای مقاصد مختلف مانند مصارف خانگی، صنعتی و کشاورزی استفاده کرده است. آلودگی آب و عدم دسترسی به آب آشامیدنی سالم برای برخی از مردم جهان به یک مشکل بزرگ تبدیل شده است. ه گفته سازمان جهانی بهداشت (۲۰۱۷)، ۸۴۴ میلیون نفر در جهان به آب آشامیدنی سالم دسترسی ندارند. سفره های زیرزمینی عمده در سراسر جهان به دلیل بهره برداری بیش از حد در معرض تهدید قرار گرفته اند که نتیجه آن دو برابر شدن

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۳- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

(*- نویسنده مسئول: (Email: hbanejad@gmail.com)

(Bhavsar and Patel, 2023).

علاوه بر بررسی وضعیت کیفی آب‌زیرزمینی، بررسی آسیب‌پذیری آبخوان و شناسایی نواحی آسیب‌پذیر دارای اهمیت بسیاری است. روش‌های بسیاری برای تحلیل و ارزیابی آلودگی آب‌های زیرزمینی و آسیب‌پذیری آبخوان در نقاط مختلف جهان ارائه شده است (Moraru and Hannigan, 2018). این روش‌ها را می‌توان در چهار دسته شامل مدل‌های همپوشانی و مبتنی بر شاخص، مدل‌های شبیه‌سازی مبتنی بر فرآیند، و مدل‌های آماری و روش‌های ترکیبی دسته‌بندی کرد (Taghavi et al., 2022). یکی از اصلی‌ترین روش‌های مبتنی بر شاخص و همپوشانی، روش دراستیک است. این روش را محبوب‌ترین و پراستفاده‌ترین روش برای ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی دانسته‌اند (Hamza et al., 2014). این روش برای اولین بار در دهه ۸۰ میلادی توسط آلر و همکاران تحت یک همکاری بین انجمن ملی چاه‌های آب آمریکا و آژانس ملی محافظت از محیط‌زیست توسعه داده شد. این مدل هفت پارامتر کلیدی آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان را که شامل عمق آب زیرزمینی، نرخ تغذیه، محیط آبخوان، محیط خاک، توپوگرافی، تأثیر ناحیه غیراشباع و هدایت هیدرولیکی آبخوان است را ترکیب کرده و با اختصاص دادن وزن و رتبه به هر پارامتر، آسیب‌پذیری آن آبخوان را تعیین می‌کند (Aller and Thornhill, 1987). این روش در مطالعات متعددی در خارج و داخل کشور بکار رفته است (Neshat et al., 2013, Asadi et al., 2016, Vosough et al., 2017, Bera et al., 2021). عمده مطالعات به بررسی همبستگی میان شاخص آسیب‌پذیری با تنها یک یا دو پارامتر کیفی بسنده کرده‌اند و تعداد بسیار محدودی اقدام به بررسی جامع‌تر همبستگی شاخص آسیب‌پذیری و پارامترهای مختلف کیفی کرده‌اند. از جمله محدود مطالعاتی که به همبستگی بین شاخص آسیب‌پذیری و پارامترهای مختلف کیفی پرداخته‌اند، می‌توان به پژوهش تقوی و همکاران اشاره کرد که در کویبنزلند استرالیا به بررسی آسیب‌پذیری با دو شاخص دراستیک و دراستیک ترکیبی با اضافه کردن شاخص کاربری اراضی پرداخته است. همچنین همبستگی این شاخص‌ها با یازده پارامتر کیفی بررسی گردیده است. نتایج نشان از همبستگی ضعیف آسیب‌پذیری با کلیه پارامترهای کیفی داشت (Taghavi et al., 2023). با این حال این مطالعه به بیان دلایل این مسئله نپرداخته است.

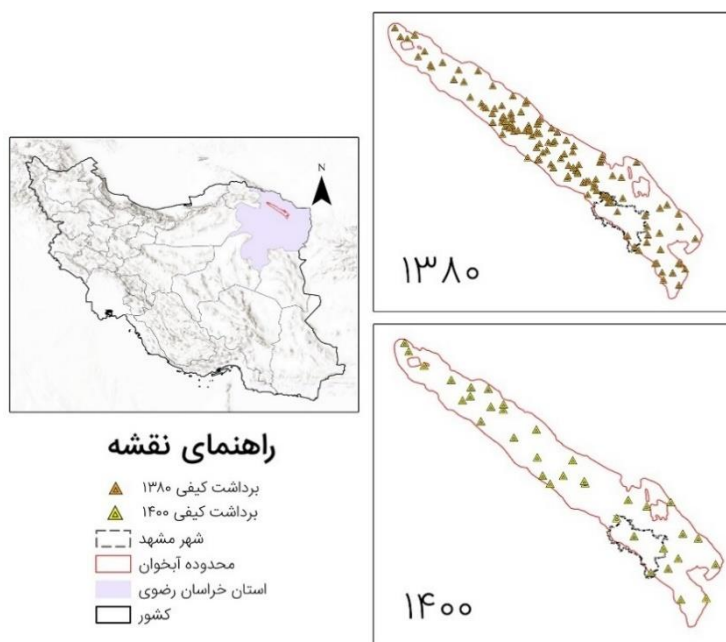
بررسی آسیب‌پذیری در کنار کیفیت آب می‌تواند به بررسی بهتر و جامع‌تر شرایط کیفی آبخوان و سیاست‌گذاری‌های مرتبط با مدیریت آن کمک کند. از همین رو رحیمی و همکاران (۱۴۰۲) به بررسی وضعیت آب‌زیرزمینی در دشت ارومیه با بررسی همزمان نقشه آسیب‌پذیری آبخوان، نقشه کیفیت آب‌زیرزمینی و نقشه پتانسیل آن پرداخته‌اند. اندک مطالعاتی در محدوده دشت مشهد برای بررسی وضعیت کیفی آبخوان انجام شده است. بررسی همزمان کیفیت آب و

آسیب‌پذیری آبخوان و ارتباط این دو پارامتر در مطالعه‌ای در کشور بنگلادش انجام شده است. شناسایی مناطق آسیب‌پذیر با روش دراستیک و شناسایی مناطق دارای کیفیت آب زیرزمینی ضعیف‌تر با شاخص کیفیت آب‌زیرزمینی انجام شده و نتایج نشان از ارتباط بسیار ضعیف بین دو شاخص داشته است که این مورد به تفاوت بین آسیب‌پذیری و آلودگی ارتباط داده شده است (Rahman et al., 2021). در پژوهشی دیگر در کشور هند به بررسی شاخص آسیب‌پذیری در کنار شاخص کیفیت آب پرداخته شده است. در این مطالعه به همبستگی پایین شاخص آسیب‌پذیری با پارامترهای کیفی و لزوم استفاده از شاخص آلودگی در کنار شاخص آسیب‌پذیری پرداخته شده است (Chaudhary and Singh, 2023). در مورد کیفیت آبخوان در دشت مشهد، یک مطالعه یزدانی و همکاران (۱۴۰۲) به بررسی پارامترهای کیفی آب در سال ۱۳۹۲-۱۳۹۳ با استفاده از روش‌های درون‌یابی پرداخته‌اند. نتایج آن‌ها نشان از کیفیت پایین‌تر آب در قسمت‌های شمال غربی و جنوب شرقی دشت مشهد است.

در این مطالعه به بررسی چند وجهی وضعیت آبخوان مشهد-چناران از نظر کیفیت آب و آسیب‌پذیری پرداخته شده است تا علاوه بر نقاطی با کیفیت آب پایین‌تر، نقاط آسیب‌پذیر شناسایی شوند. جهت بررسی آسیب‌پذیری آبخوان و شناسایی نقاط آسیب‌پذیر از روش دراستیک استفاده شد. همچنین شاخص کیفیت آب‌زیرزمینی (GWQI) جهت مصارف شرب با داده‌های کیفیت آب ۳۵ چاه در سال ۱۴۰۰ و ۱۲۳ چاه در سال ۱۳۸۰ محاسبه گردید.

معرفی منطقه

آبخوان مشهد-چناران که بین طول‌های جغرافیایی ۲۹° ۵۸' تا ۹° ۵۹' شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۵۸° ۳۵' تا ۳° ۳۷' شمالی قرار دارد، از نظر وسعت و استفاده به عنوان اصلی‌ترین آبخوان آبرفتی در استان خراسان رضوی شناخته می‌شود. این آبخوان مساحتی در حدود ۲۵۲۷ کیلومتر مربع را پوشش می‌دهد. این آبخوان بخشی از حوضه کشف رود است که در شمال استان خراسان رضوی واقع شده است و از جنوب به کوه‌های بینالود، از شمال به کوه‌های هزار مسجد، از جنوب شرقی به حوضه رودخانه جامرود و از شمال غربی به حوضه رودخانه اترک محدود است. شهر مشهد با وسعتی در حدود ۳۵۱ کیلومتر مربع از مهم‌ترین شهرها در این محدوده‌ی مطالعاتی است (گزارش ممنوعیت منطقه مطالعاتی مشهد-چناران، ۱۳۹۷). بر اساس گزارش‌های شرکت مدیریت منابع آب ایران بیش از ۸۰ درصد از منابع آب استان خراسان رضوی از منابع آب زیرزمینی تأمین می‌شود که بیش از ۹۰ درصد آن به بخش کشاورزی اختصاص می‌یابد (Mirboluki et al., 2024).



شکل ۱- موقعیت محدوده مطالعاتی و چاه‌ها

آسیب پذیری آبخوان

روش دراستیک یکی از روش‌های شاخص همپوشانی و روی هم‌گذاری و محبوب‌ترین و پرکاربردترین روش ارزیابی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی در دنیا است (Hamza et al., 2014). این روش برای اولین بار در دهه ۸۰ میلادی توسط آلر و همکاران تحت یک همکاری بین انجمن ملی چاه‌های آب آمریکا و آژانس ملی محافظت از محیط زیست توسعه داده شد. این مدل هفت پارامتر کلیدی آسیب‌پذیری ذاتی آبخوان را که شامل عمق آب زیرزمینی، نرخ تغذیه، محیط آبخوان، محیط خاک، توپوگرافی، تأثیر ناحیه غیراشباع و هدایت هیدرولیکی آبخوان است را ترکیب کرده و با اختصاص دادن وزن و رتبه به هر پارامتر، آسیب‌پذیری آن آبخوان را تعیین می‌کند (Aller and Thornhill, 1987).

در این مدل با توجه به ریسک آلودگی هر پارامتر در مقایسه با سایر پارامترها، وزن مشخصی (w) به آن پارامتر اختصاص داده می‌شود. این وزن‌ها مقادیر از ۱ که نشان‌دهنده کمترین نسبت به آلودگی و ۵ که بیان‌گر بیشترین میزان اهمیت نسبت به آلودگی است را شامل می‌شوند. همچنین مقادیر هر پارامتر خود به زیر بخش‌هایی تقسیم می‌شود که برای هر زیر شاخص رتبه‌ای (r) در نظر گرفته می‌شود. این رتبه عددی بین ۱ تا ۱۰ بوده که ۱ به معنی کم خطرترین زیرگروه و ۱۰ به معنی پرخطرترین است. شاخص نهایی آسیب‌پذیری دراستیک با اعمال وزن و رتبه به هر پارامتر به صورت رابطه ۱ محاسبه می‌شود:

مواد و روش‌ها

داده مورد استفاده

جهت بررسی عمق آب در منطقه مطالعاتی، داده‌های ۸۰ چاه مشاهده‌ای با اندازه‌گیری‌های ماهانه عمق آب از سال ۱۳۶۷ تا ۱۳۹۹ از شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی تهیه شد. همچنین داده ۱۸۸ عدد لاگ حفاری چاه‌ها و پی‌زومترها و همچنین هدایت هیدرولیکی این نقاط از شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی، آب و فاضلاب مشهد و انجمن نظارت بر شرکت‌های حفاری، مشاهدات نقطه‌ای بافت خاک در ۲۲۰ نقطه از گروه علوم و مهندسی خاک دانشگاه فردوسی مشهد، نقشه توپوگرافی از ماهواره SRTM، داده‌ی بارندگی از سازمان هواشناسی کل کشور و داده هدایت هیدرولیکی از سازمان آب منطقه‌ای خراسان رضوی تهیه گردید. علاوه بر این، جهت بررسی وضعیت کیفی آب آبخوان از داده‌های کیفیت آب ۳۵ چاه در سال ۱۴۰۰ و ۱۲۳ چاه در سال ۱۳۸۰ تهیه شده توسط آب منطقه‌ای خراسان رضوی استفاده شد. برداشت‌های کیفی شامل پارامترهای کلسیم (Ca^{+2})، منیزیم (Mg^{+2})، سدیم (Na^{+})، پتاسیم (K^{+})، کاتیون‌ها، درصد سدیم ($Na\%$)، نسبت جذب سدیم (SAR)، سختی کل (TH)، هدایت الکتریکی (EC)، مجموع جامدات محلول (TDS)، pH، کربنات (CO_3^{2-})، بی‌کربنات (HCO_3^{-})، کلراید (Cl^{-})، سولفات (SO_4^{2-}) و همچنین نیترات (در برداشت‌های ۱۴۰۰) NO_3^{-} می‌باشد.

شدند. موقعیت ۸۰ چاه مشاهده‌ای در شکل ۲ نمایش داده شده است. هر چه مقدار تغذیه خالص (R) بیشتر باشد، احتمال آلودگی آبخوان بیشتر شده و در نتیجه شاخص آسیب‌پذیری بالاتر است (Aller & Thornhill, 1987; Hamza et al., 2014). در این مطالعه به منظور تهیه‌ی لایه‌ی تغذیه‌ی خالص از روش پیسکوپو استفاده شد (Piscopo et al., 2001). در این روش سه عامل شیب، بارندگی و نفوذپذیری خاک برای محاسبه‌ی مقدار تغذیه بکار می‌روند. هر کدام از این پارامترها رتبه بندی شده و معادله نهایی به صورت زیر مقدار تغذیه را محاسبه و به هر گروه رتبه مورد نظر داده می‌شود:

$$\text{تدرصد شیب} + \text{بارندگی} + \text{نفوذپذیری} = \text{تغذیه خالص} \quad (۲)$$

$$DI = DrDw + RrRw + ArAw + SrSw + TrTw + IrIw + CrCw \quad (۱)$$

در این رابطه D عمق آب زیرزمینی، R تغذیه خالص، A محیط آبخوان، S نوع خاک، T توپوگرافی، I تأثیر ناحیه غیراشباع و C هدایت هیدرولیکی است (Aller and Thornhill, ۱۹۸۷). عمق آب (D) به طور اساسی به این دلیل مهم است که به تعیین عمق مسیری که یک آلاینده باید از طریق آن عبور کند تا به آبخوان برسد کمک می‌کند (Aller and Thornhill, ۱۹۸۷). به طور کلی، اعماق بیشتر، به آب‌های آلوده نفوذ فرصت کافی برای تماس با آبخوان را نمی‌دهند. برای تهیه عمق آب از میانگین عمق آب در ۸۰ چاه مشاهده‌ای بین سال‌های ۱۳۶۷ تا ۱۳۹۹ استفاده شد تا آسیب‌پذیری بلند مدت بررسی شود و مقادیر با روش IDW درون‌یابی

جدول ۱- برآورد تغذیه خالص به روش پیسکوپو (Piscopo et al., 2001)

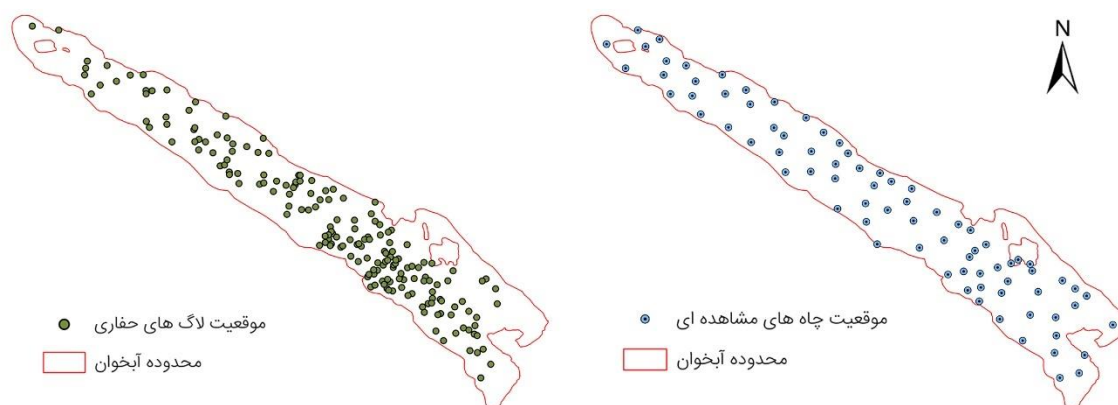
تغذیه خالص (وزن دراستیک=)		نفوذپذیری خاک		بارندگی (mm)		درصد شیب	
رتبه دراستیک		رتبه		رتبه		رتبه	
بازه		بازه		بازه		بازه	
۱۰	۱۳-۱۱	۵	بالا	۴	>۸۵۰	۴	<۲
۸	۱۱-۹	۴	نسبتاً بالا	۳	۸۵۰-۷۰۰	۳	۲-۱۰
۵	۹-۷	۳	معمولی	۲	۷۰۰-۵۰۰	۲	۳۳-۱۰
۳	۷-۵	۲	پایین	۱	<۵۰۰	۱	>۳۳
۱	۵-۳	۱	بسیار پایین				

خاک تحت تأثیر قرار می‌گیرد (Umar et al., 2009). برای تهیه این لایه از مشاهدات زمینی درون‌یابی شده ۲۲۰ نقطه در سراسر محدوده مطالعاتی استفاده گردید. توپوگرافی (T) به شیب یک منطقه اشاره دارد. مناطق با شیب کم تمایل دارند که آب را برای مدت زمان بیشتری نگه دارند در نتیجه این امکان فراهم می‌شود که مقدار بیشتری آب نفوذ کرده و صرف تغذیه شود و امکان انتقال آلاینده بیشتر می‌شود. مناطق با شیب‌های تند، که دارای مقادیر زیادی از رواناب و مقادیر کمتری از نفوذ هستند، کمتر به آلودگی آب زیرزمینی حساس هستند (Rahman, 2008). مقادیر شیب از نقشه DEM از داده‌های رقومی ارتفاعی سنجنده SRTM با رزولوشن ۳۰ متر تهیه شد.

بافت ناحیه غیراشباع (I) بالای سطح آب زیرزمینی مشخص می‌کند که عبور آلاینده از این ناحیه چقدر زمان می‌برد. برای تهیه این لایه مشابه لایه‌ی محیط آبخوان عمل شد. هدایت هیدرولیکی (C) به توانایی مواد تشکیل‌دهنده آبخوان در انتقال آب اشاره دارد. این مقدار کنترل‌کننده جریان آلاینده پس از ورود به آبخوان است. آبخوانی با هدایت هیدرولیکی بالا می‌تواند در معرض آلودگی بیشتری باشد زیرا آلاینده می‌تواند به راحتی درون آبخوان حرکت کند (Rahman, 2008).

شیب از لایه‌ی توپوگرافی منطقه، بارندگی از مقادیر تجمعی ایستگاه‌های بارندگی و نفوذپذیری خاک با توجه به بافت و جدول رتبه‌بندی پیسکوپو (جدول ۱) رتبه‌بندی شدند. جهت درون‌یابی بارندگی تجمعی سالیانه از روش IDW استفاده شد.

لایه محیط آبخوان (A)، بیان‌گر جنس مواد و رسوبات تشکیل‌دهنده ناحیه‌ی اشباع آبخوان است. محیط آبخوان بر تغذیه آبخوان و جابجایی آلاینده تأثیر به‌سزایی دارد. جنس مواد تشکیل‌دهنده آبخوان تعیین‌کننده فرایند حرکت آلاینده شامل مسیر و طول مسیری که باید طی کند و مدت زمان آن است. در این پژوهش با توجه به طبقه‌بندی لاگ‌های حفاری ۱۸۸ چاه به روش یونیفاید (زرننگ، ۱۳۹۸) و همچنین عمق آب این لایه با درون‌یابی به روش IDW تهیه گردید. موقعیت لاگ‌های حفاری در شکل ۲ آمده است. محیط خاک (S) به عنوان قسمت هوازده و بالایی ناحیه‌ی غیراشباع تعریف می‌شود و به طور متوسط ۱/۸ متر یا کمتر است. این عامل تأثیر به‌سزایی در نفوذ آب به زمین و در نتیجه توانایی آلاینده برای ورود به ناحیه غیراشباع دارد. به طور کلی، توانایی خاک در نفوذ آلاینده به طور قابل توجهی توسط نوع رس موجود و اندازه دانه‌های



شکل ۲- موقعیت چاه‌های مشاهده‌ای و لاگ‌های حفاری استفاده‌شده در این مطالعه

از آن جا که تعداد آزمایش‌های پمپاژ در دشت مشهد برای برآورد ضریب قابلیت انتقال اندک است، از هدایت هیدرولیکی تهیه‌شده به روش تجربی از لاگ‌های حفاری از مطالعه عابدی و همکاران استفاده شد (عابدی و همکاران، ۱۳۹۵). در این روش مقادیر هدایت هیدرولیکی هر لایه در لاگ حفاری با توجه به مقادیر تجربی بدست آمده در آزمایشگاه تعیین شده و سپس مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع آبخوان بر اساس این مقادیر تعیین می‌شود. مقادیر تخمینی هدایت هیدرولیکی براساس لاگ‌های حفاری از شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی تهیه و به روش IDW درون‌یابی شدند. تعدادی از پژوهش‌ها به محدودیت پارامترهای مدل دراستیک انتقاد کرده‌اند (Elzain et al., 2020, Liang et al., 2019, Safa et al., 2023). در این راستا پژوهشگران متعددی به تغییر مدل اصلی دراستیک با افزودن یا کم کردن پارامترها یا استفاده از وزن‌ها و نرخ‌های مختلف برای پارامترها پرداخته‌اند. از آنجا که وجود آلاینده در سطح زمین بر آلودگی آب زیرزمینی مؤثر است، می‌توان ادعا کرد که روش‌های ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی باید ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی آبخوان و تأثیر فعالیت‌های انسانی بر آب زیرزمینی را در نظر بگیرند (Wu et al., 2015). در نتیجه، دسته‌بندی کاربری ارضی یک پارامتر مهم است که می‌تواند به چارچوب دراستیک اضافه شود. این مسئله در چندین مطالعه مورد توجه قرار گرفته است (Wu et al., 2015, Kwon et al., 2022, Taghavi et al., 2023). برای تهیه این لایه از نقشه کاربری اراضی جهانی ESRI با دقت کلی ۸۵ درصد در ۹ کلاس و وضوح ۱۰ متر تهیه شده از ماهواره Sentinel-2 استفاده شد (Karra et al., 2021). وزن پیشنهادی برای این پارامتر ۵ (Alam et al., 2014) و رتبه‌های پیشنهادی برای هر دسته با توجه به پراکندگی نیترات در محدوده مطالعاتی و بررسی مطالعات پیشین (Sarkar and Pal, 2021, Taghavi et al., 2023) مطابق جدول ۱ تعیین شد.

جهت برآورد نقشه نهایی آسیب‌پذیری در منطقه مقادیر هر هشت پارامتر DRASTIC-L با اختصاص رتبه‌ها و وزن‌های هر پارامتر در محیط نرم‌افزار Arc GIS برهم‌نهی شدند. بر طبق مقادیر نهایی آسیب‌پذیری، منطقه مورد مطالعه بر پایه اختلاف مقادیر شاخص آسیب‌پذیری با انحراف از معیار طبقه‌بندی شد (Taghavi et al., 2023). چهار کلاس تعریف شده عبارتند از: آسیب‌پذیری کم ($D \leq D^- - 3s$)، متوسط ($D^- - 3s \leq D \leq D^- + s$)، زیاد ($D^- + s \leq D \leq D^- + 3s$)، و خیلی زیاد ($D \geq D^- + 3s$). همچنین مقدار همبستگی شاخص دراستیک با پارامترهای کیفی از چاه‌ها بررسی شد. رتبه‌ها و وزن‌های هر کدام از پارامترهای دراستیک (Aller and Thornhill, 1987) در جدول ۲ بیان شده است.

محاسبه شاخص کیفیت آب زیرزمینی

برای محاسبه شاخص کیفیت آب با توجه به اهمیت نسبی هر پارامتر کیفی با توجه به مصارف شرب و اثرات آن پارامتر بر سلامتی، به هر پارامتر کیفیت آب یک وزن (w_i) بین ۱ تا ۵ اختصاص می‌یابد. بیشترین وزن که برابر با ۵ است به پارامترهایی نظیر TDS که اثر قابل توجهی دارند اختصاص می‌یابد. وزن نسبی برای هر پارامتر (W_i) از معادله ۳ محاسبه می‌شود:

$$W_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (3)$$

در این جا n تعداد پارامترها است. در مرحله بعد نرخ کیفی (qi) برای هر پارامتر با در نظر گرفتن مقدار اندازه‌گیری شده آن پارامتر در هر نمونه بر مقدار استاندارد مربوطه آن طبق دستورالعمل‌های سازمانی محاسبه می‌شود:

$$qi = \left(\frac{Ci}{Si} \right) \times 100 \quad (4)$$

در اینجا qi نرخ کیفی برای هر پارامتر، Ci غلظت هر پارامتر بر حسب میلی گرم بر لیتر و Si غلظت استاندارد براساس دستورالعمل مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران ویرایش پنجم است.

جدول ۲- رتبه‌ها و وزن‌های اختصاص داده‌شده در مدل دراستیک

رتبه	پارامتر	رتبه	پارامتر	رتبه	پارامتر
وزن ۳	محیط آبخوان	وزن ۴	تغذیه خالص	وزن ۵	عمق تا سطح ایستابی (متر)
۱۰	گراول	۱۰	۱۱-۱۳	۱۰	۰ - ۱/۵
۸	گراول ماسه‌ای و رس	۸	۹-۱۱	۹	۱/۵ - ۴/۶
۷	ماسه	۵	۷-۹	۷	۴/۶ - ۹/۱
۶	ماسه سیلتی	۳	۵-۷	۵	۹/۱ - ۱۵/۲
۵	ماسه رسی	۱	۳-۵	۳	۱۵/۲ - ۲۲/۸
۲	رس سیلتی	-	-	۲	۲۲/۸ - ۳۰/۵
۱	رس	-	-	۱	> ۳۰/۵
رتبه	پارامتر	رتبه	پارامتر	رتبه	پارامتر
وزن ۵	محیط غیراشباع	وزن ۱	شیب (درصد)	وزن ۲	محیط خاک
۱۰	گراول	۱۰	۲۰-۲	۳	لوم رسی
۸	گراول ماسه‌ای و رس	۹	۲-۶	۴	لوم سیلتی
۷	ماسه	۵	۶-۱۲	۵	لوم
۶	ماسه سیلتی	۳	۱۲-۱۸	۶	لوم ماسه‌ای
۵	ماسه رسی	۱	> ۱۸	۹	ماسه
۳	سیلت	-	-	-	-
۲	رس سیلتی	-	-	-	-
۱	رس	-	-	-	-
رتبه	پارامتر	رتبه	پارامتر	رتبه	پارامتر
وزن ۵	کاربری اراضی	وزن ۳	هدایت هیدرولیکی (متر بر روز)	وزن ۳	هدایت هیدرولیکی (متر بر روز)
۸	شهری	۱۰	> ۸۲	۱۰	> ۸۲
۷	زراعی	۸	۴۱-۸۲	۸	۴۱-۸۲
۳	مرتج و فضای سبز	۶	۴۱-۲۸/۷	۶	۴۱-۲۸/۷
۱	آب و زمین‌های بایر	۴	۲۸/۷-۱۲/۳	۴	۲۸/۷-۱۲/۳
		۲	۱۲/۳-۴/۱	۲	۱۲/۳-۴/۱
		۱	۴/۱-۰/۴	۱	۴/۱-۰/۴

جدول ۳ آمده است.

پس از محاسبه مقادیر شاخص کیفیت آب زیرزمینی، تقسیم‌بندی این شاخص برای آب آشامیدنی به شرح زیر است: (Dandge and Patil, 2022).

در آخر مقادیر GWQI مطابق با جدول ۴ در پنج دسته کیفیت عالی تا غیرقابل شرب طبقه‌بندی شدند. نتایج با روش IDW درون‌یابی شده و نقشه شاخص کیفیت آب زیرزمینی رسم شد.

نتایج و بحث

آسیب‌پذیری آبخوان

جهت تهیه نقشه آسیب‌پذیری، در ابتدا هشت پارامتر عمق آب زیرزمینی، تغذیه خالص، محیط آبخوان، محیط خاک، توپوگرافی، تأثیر ناحیه غیراشباع، هدایت هیدرولیکی و کاربری اراضی از منابع مختلف

در نهایت برای محاسبه شاخص کیفیت آب زیرزمینی (GWQI) زیرشاخص SI_i برای هر پارامتر به صورت زیر محاسبه و مجموع این مقادیر برابر با شاخص کیفیت آب است:

$$SI_i = W_i \times qi \quad (5)$$

$$GWQI = \sum SI_i \quad (6)$$

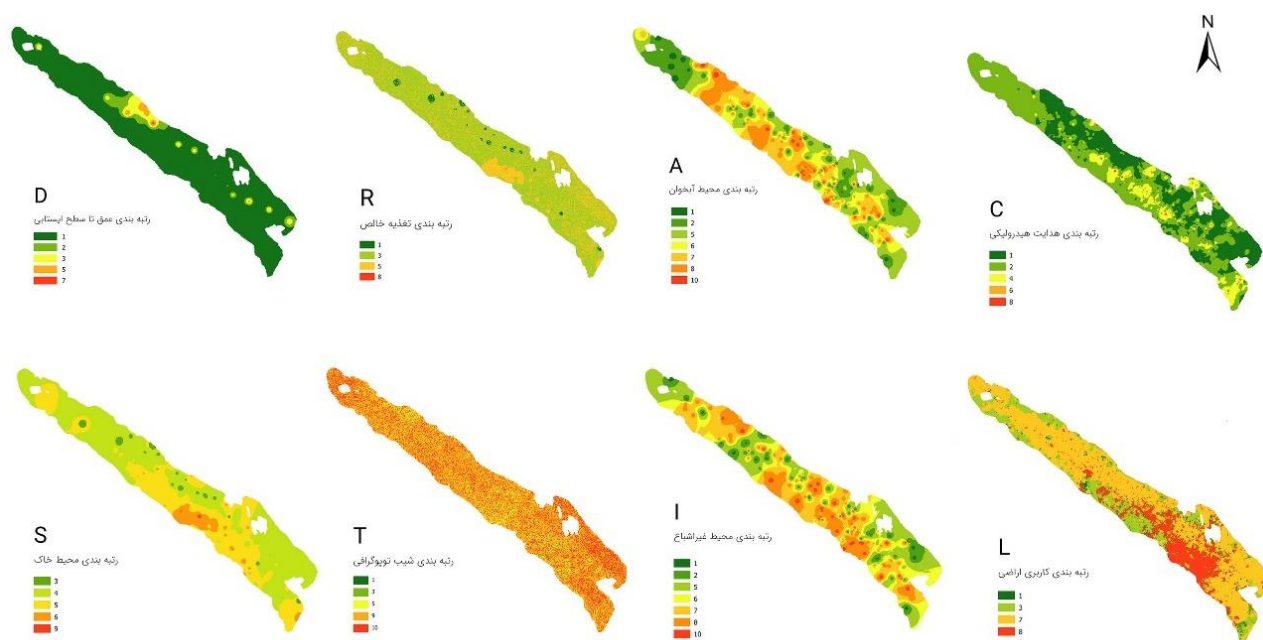
در این پژوهش از نه پارامتر کیفی برای محاسبه شاخص استفاده شد. انتخاب پارامترها با توجه به دسترسی به مشاهدات کیفی و مطالعات مشابه قبلی انجام شده است (Adimalla and Taloor, 2020, Badeenezhad et al., 2020). همچنین به اهمیت برخی از این پارامترها همچون TDS، pH و نترات در کیفیت آب در مطالعات پیشین پرداخته شده است (Machiwal et al., 2019). وزن مربوط به هر پارامتر مطابق با پژوهش بدیعی‌نژاد و همکاران (Badeenezhad et al., 2020) و مقدار استاندارد ملی ایران در

محیط آبخوان و همچنین تأثیر ناحیه غیراشباع با توجه به داده‌های موجود اصلاح شود. پس از تهیه نقشه نهایی، مقادیر آسیب‌پذیری با داده‌های کیفی آبخوان مقایسه شد و مقادیر ضریب همبستگی محاسبه گردید. لایه‌های هشت پارامتر دراستیک ترکیبی در شکل ۳ آمده است.

تهیه شدند. سپس با استفاده از روش‌های درونیابی لایه رستری مربوط به هر پارامتر در محیط نرم‌افزار Arc GIS تهیه شد. به مقادیر هر لایه مطابق با روش دراستیک، رتبه و وزن مربوط اختصاص داده شد. با توجه به تفاوت در برخی داده‌های برداشتی و یا عدم دسترسی به برخی داده‌ها نیاز بود تا رتبه‌های اختصاص داده شده به پارامترهای

جدول ۳- مقادیر استاندارد مؤسسه استاندارد ایران و ضرایب وزنی هر پارامتر

پارامتر کیفی	ضریب وزنی (w_i)	مقدار استاندارد ملی ایران
pH	۴	۶/۵ - ۸/۵
TDS	۵	۱۰۰۰
TH	۴	۲۰۰
SO_4^{2-}	۴	۲۵۰
Cl^-	۳	۲۵۰
NO_3^-	۵	۵۰
Ca^{+2}	۲	۳۰۰
Mg^{+2}	۲	۳۰
Na^+	۲	۲۰۰

$$\sum w_i = 31$$


شکل ۳- نقشه رتبه‌بندی لایه‌های دراستیک ترکیبی در محدوده مطالعاتی

تنها نقاط محدودی از آبخوان از نظر این پارامتر در آسیب پذیری آبخوان مؤثرند. تغذیه خالص از روش رتبه‌بندی پیسکوپو محاسبه شد. به اکثریت محدوده مطالعاتی از نظر تغذیه خالص رتبه ۳ تعلق می‌گیرد. جهت تهیه لایه محیط آبخوان از داده ۱۸۸ عدد لاگ حفاری

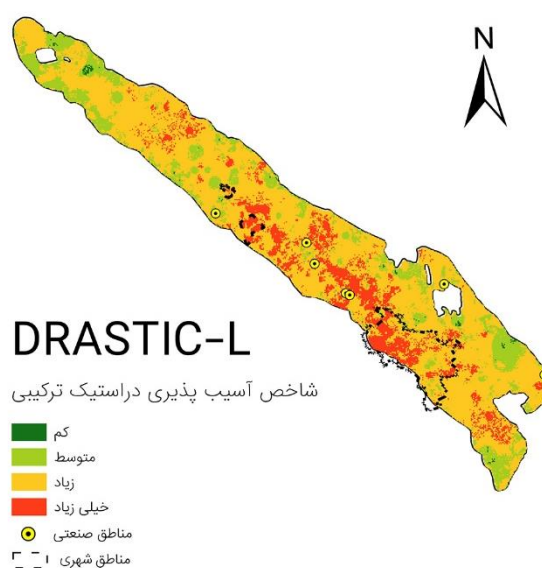
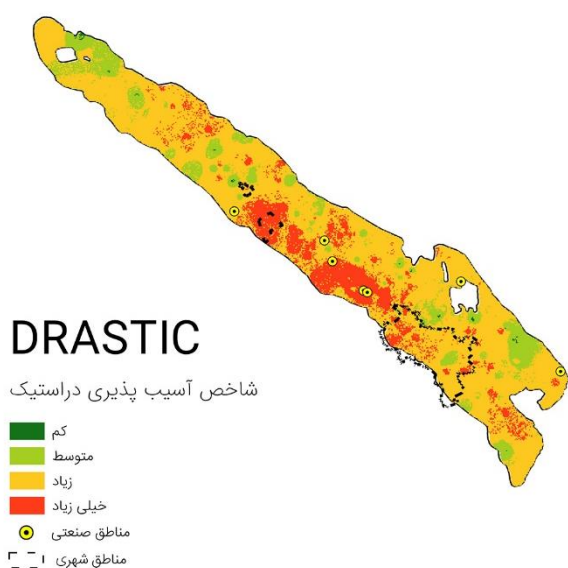
در محدوده مطالعاتی میانگین عمق تا سطح ایستابی بین ۶ تا ۱۴۱ متر متغیر بوده و در بیشتر نقاط آبخوان بیش از ۳۰ متر است. به همین جهت به اکثر محدوده آبخوان رتبه ۱ تعلق می‌گیرد به این معنی که در این مناطق تأثیر پارامتر عمق آب زیرزمینی در آسیب‌پذیری آبخوان کمترین مقدار است.

ماسه رسی با ۲۸ درصد محدوده و ماسه با ۲۵ درصد بیشترین مساحت را در این محدوده دارند. ماسه سیلتی و گراول و ماسه و رس به ترتیب با ۱۹ و ۱۸ درصد از محدوده در رتبه‌های بعدی هستند. گراول و رس تنها بخش کوچکی از محدوده را با کمتر از ۴ درصد گرفته‌اند. مقدار برآورد شده هدایت هیدرولیکی در اکثر مناطق محدوده مطالعاتی در بازه‌ی ۰/۴ تا ۴/۱ قرار دارد که کمترین تأثیر را بر انتقال آلودگی داشته و رتبه ۱ طبق رتبه‌بندی دراستیک به این بازه تعلق می‌گیرد. مطابق با نقشه کاربری اراضی ESRI فوق اکثریت اراضی محدوده مطالعاتی را مناطق زراعی و شهری تشکیل می‌دهند که بیشترین تأثیر را در آلودگی آبخوان دارند. پس از اعمال وزن‌ها و رتبه‌ها برای هر پارامتر نقشه نهایی آسیب‌پذیری آبخوان برای دراستیک و دراستیک ترکیبی با برهم نهی در محیط Arc Map به دست آمد.

به صورت طبقه‌بندی شده استفاده و با توجه به مقادیر تراز آب زیرزمینی این لایه تهیه شد. ماسه رسی با ۳۰ درصد محدوده و ماسه با ۲۰ درصد بیشترین مساحت را در این محدوده دارند. رس سیلتی و ماسه سیلتی و سپس گراول و ماسه و رس به ترتیب با ۱۸ و ۱۶ و ۱۳ درصد از محدوده در رتبه‌های بعدی هستند. گراول و رس تنها بخش کوچکی از محدوده را با ۳ درصد گرفته‌اند. لایه محیط خاک با استفاده از درون‌یابی ۲۲۰ نقطه مشاهده‌ای تهیه شد. نتایج نشان می‌دهد دو بافت خاک اصلی در محدوده بافت‌های لوم سیلتی و لوم هستند که به ترتیب ۵۶ و ۳۷ درصد از محدوده را گرفته‌اند. لایه شیب از نقشه DEM بیان‌گر آن است که در بیشتر نقاط آبخوان شیب توپوگرافی بین ۲ تا ۶ درصد بوده و رتبه ۹ را دارد. پس از آن شیب‌های کمتر از ۲ درصد، بیشترین محدوده را دارد. لایه محیط غیر اشباع نیز مشابه با لایه محیط آبخوان تهیه شده و نشان می‌دهد که

جدول ۴- طبقه‌بندی شاخص کیفیت آب

کیفیت آب	GWQI
کیفیت عالی	۵۰ <
کیفیت خوب	۱۰۰-۵۰
کیفیت ضعیف	۲۰۰-۱۰۰
کیفیت خیلی ضعیف	۳۰۰-۲۰۰
غیرقابل شرب	>۳۰۰



شکل ۴- نقشه آسیب‌پذیری حاصل از مدل دراستیک و دراستیک ترکیبی

آسیب‌پذیری به آلودگی نشان می‌دهند. در این نتایج کلاس آسیب‌پذیری زیاد، در هر دو مدل بیشترین مساحت را به خود اختصاص داده است. خلاصه نتایج مدل‌های دراستیک و دراستیک ترکیبی در جدول ۵ بیان شده است.

طبق نتایج بدست آمده شاخص دراستیک برای منطقه مورد مطالعه بین ۴۱ تا ۱۴۴ و شاخص دراستیک ترکیبی بین ۵۶ تا ۱۸۰ متغیر هستند. نقشه دراستیک و دراستیک ترکیبی در شکل ۴ آمده است.

نقشه‌های حاصل شده وضعیت مناطق مختلف را از نظر

جدول ۵- نتایج شاخص دراستیک و دراستیک ترکیبی

کلاس آسیب پذیری	معادله طبقه بندی	DRASTIC		DRASTIC-L	
		بازه طبقه بندی	درصد از مساحت	بازه طبقه بندی	درصد از مساحت
کم	$D \leq \bar{D} - 3s$	۴۱ - ۴۸	۰/۱	۵۶ - ۷۲	۰/۳
متوسط	$\bar{D} - 3s \leq D \leq \bar{D} - s$	۴۸ - ۷۵	۱۲/۳	۷۲ - ۱۰۴	۱۶/۱
زیاد	$\bar{D} - s \leq D \leq \bar{D} + s$	۷۵ - ۱۰۳	۷۲/۳	۱۰۴ - ۱۳۷	۶۹/۲
خیلی زیاد	$D \geq \bar{D} + s$	۱۰۳ - ۱۴۴	۱۵/۱	۱۳۷ - ۱۸۰	۱۴/۲

همچنین شهرستان گلبهار در محدوده آسیب پذیری خیلی زیاد قرار دارد. جهت بررسی وضعیت کیفیت آب زیرزمینی از ۱۰۰ برداشت کیفی از ۳۵ چاه در سال ۱۴۰۰ و ۱۲۸ برداشت از ۱۲۳ چاه در سال ۱۳۸۰ پراکنده در محدوده استفاده شد. خلاصه برداشت های کیفی سال ۱۴۰۰ در جدول ۶ آمده است.

کلاس آسیب پذیری زیاد در هر دو مدل دراستیک و دراستیک ترکیبی ۷۲/۳ و ۶۹/۲ درصد از مساحت کل را تشکیل می دهد. همچنین کلاس آسیب پذیری کم تنها ۰/۱ و ۰/۳ مساحت منطقه را در این دو مدل دارا است. همچنین، بخش قابل توجهی از شهر مشهد و همچنین شهرک های صنعتی اطراف آن شامل شهرک های توس، صنایع غذایی و ماشین سازی دارای آسیب پذیری خیلی زیاد هستند.

جدول ۶- خلاصه برداشت های کیفی

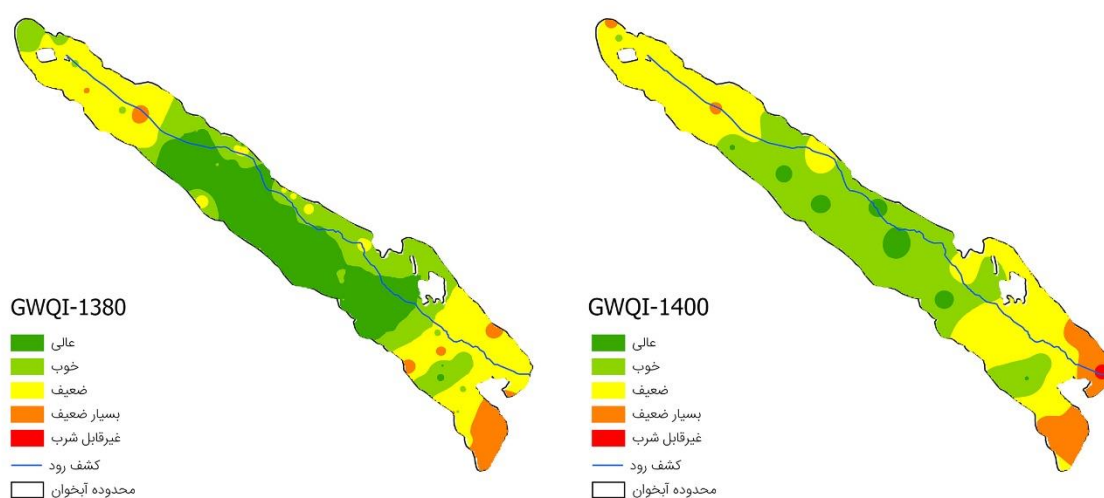
پارامتر کیفی آب	واحد	۱۴۰۰				۱۳۸۰				همبستگی با DRASTIC		همبستگی با DRASTIC-L	
		حداک	حداقل	میانگین	حداک	حداقل	میانگین	۱۴۰۰	۱۳۸۰	۱۴۰۰	۱۳۸۰	۱۴۰۰	۱۳۸۰
کلسیم	mg/lit	۱۹۸	۲۸	۹۲	۳۸۰/۷	۲۰	۶۶/۶۱	۰/۰۰۴	۰/۰۷	-۰/۰۸	-۰/۰۹	-۰/۰۸	-۰/۰۹
کلراید	mg/lit	۱۲۷۶/۲	۳/۵	۲۶۳/۹	۱۶۴۸	۱۰/۶۳	۱۹۱	-۰/۲۴	-۰/۰۸	-۰/۲۳	-۰/۱۱	-۰/۲۳	-۰/۱۱
متزیم	mg/lit	۲۱۶/۲	۸/۵	۵۷/۹	۲۱۹/۹	۳/۶۴	۴۰	-۰/۰۱	-۰/۰۶	-۰/۰۶	-۰/۰۶	-۰/۰۶	-۰/۰۶
پتاسیم	mg/lit	۲۷/۳	۰/۳	۲/۷	۶۲/۵۶	۰	۳/۷	-۰/۱۹	-۰/۱۷	-۰/۲۳	-۰/۲۷	-۰/۲۳	-۰/۲۷
سدیم	mg/lit	۱۱۲۴	۲/۲	۲۶۷/۷	۱۱۲۶/۵	۴/۵	۱۸۶/۷۲	-۰/۲۹	-۰/۱۲	-۰/۳	-۰/۱۴	-۰/۳	-۰/۱۴
نیترات	mg/lit	۱۴۴/۴	۳/۷	۲۳/۴	-	-	-	۰/۰۲	-	۰/۰۸	-	-	-
سولفات	mg/lit	۱۳۱۴/۱	۲/۴	۳۹۳/۱	۱۹۱۶	۱۹/۲۱	۲۸۹/۸	-۰/۰۵	-۰/۰۶	-۰/۰۳	-۰/۰۶	-۰/۰۳	-۰/۰۶
EC	μS/cm	۵۶۳۰	۳۰۷	۲۰۶۶	۶۴۱۱	۲۹۱	۱۴۵۱	-۰/۲۳	-۰/۰۸	-۰/۲۳	-۰/۱	-۰/۲۳	-۰/۱
TDS	mg/lit	۳۵۴۶	۱۹۳/۴	۱۳۰/۱۶	۴۰۳۸/۹	۱۸۳/۳	۹۱۴	-۰/۳۴	-۰/۰۸	-۰/۳۱	-۰/۱	-۰/۳۱	-۰/۱
TH	mg/lit	۱۳۳۵	۱۱۵	۴۹۲	۱۶۲۰	۹۰	۳۳۰/۹۷	-	-	-	-	-	-
pH	-	۸/۲۶	۷/۱۶	۷/۴۹	۸/۸	۶/۸	۸	-	-	-	-	-	-

قابل توجه دیگر افزایش قابل توجه میانگین مشاهدات کیفی بین سال های ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۰ می باشد. در ادامه با توجه به برداشت های کیفی چاه ها مقدار شاخص کیفیت آب زیرزمینی برای هر برداشت محاسبه و نقشه شاخص کیفی آب زیرزمینی تهیه شد. خلاصه نتایج مربوط به شاخص کیفیت آب در جدول ۷ مشاهده می شود. مطابق با شاخص محاسبه شده، اکثر نمونه ها در سال ۱۴۰۰ رسته ضعیف برای مقاصد آشامیدنی قرار گرفتند. پس از آن رسته های عالی و خوب قرار می گیرند. این در حالی است که در سال ۱۳۸۰ اکثریت نمونه ها در رسته کیفیت عالی قرار داشتند. نقشه درون یابی شده شاخص کیفیت آب در شکل ۵ مشاهده می شود.

همان طور که از جدول مشخص است، همبستگی بالایی میان شاخص های آسیب پذیری و پارامترهای کیفیت آب مشاهده نشد. به این موضوع در مطالعات دیگری نیز اشاره شده است (Taghavi et al., 2023, Kwon et al., 2022). دلیل این امر می تواند اختصاص وزن ها و رتبه های تجربی به پارامترها و همچنین تفاوت در مفهوم آسیب پذیری و آلودگی و حرکت آلاینده در آبخوان باشد. آسیب پذیری یک منطقه الزاماً به معنای آلودگی آن نمی باشد. نقشه آسیب پذیری نشان نمی دهد که کدام مناطق در حال حاضر بیشتر آلوده هستند، بلکه نشان می دهد که کدام مناطق ممکن است بر اساس اطلاعات موجود مستعد خطر بیشتری باشند (Rahman et al., 2021). نکته

جدول ۷- شاخص کیفیت آب زیرزمینی در برداشت‌های ۱۳۸۰ و ۱۴۰۰

دسته‌بندی کیفی	GWQI	۱۳۸۰		۱۴۰۰	
		تعداد نمونه‌ها	تعداد چاه‌ها	تعداد نمونه‌ها	تعداد چاه‌ها
عالی	$50 >$	۷۲	۷۱	۳۳	۸
خوب	$100-50$	۲۳	۲۱	۲۰	۷
ضعیف	$200-100$	۱۹	۱۸	۳۲	۱۰
بسیار ضعیف	$300-200$	۱۳	۱۲	۱۹	۶
غیر قابل شرب	<300	۱	۱	۶	۱



شکل ۵- شاخص کیفیت آب زیرزمینی

درصد از مساحت محدوده را کاربری مناطق ساخته‌شده (مسکونی و صنعتی) تشکیل می‌دهد. در محدوده آبخوان مشهد-چناران، شهرهای مشهد و شهرستان‌های چناران و گلپه‌ار از مراکز اصلی جمعیتی هستند. شهر مشهد به عنوان اصلی‌ترین تولید کننده فاضلاب شهری در محدوده شناخته می‌شود. مطابق با مطالعات انجام‌شده در منطقه غلظت نیترات در برخی از چاه‌های محدوده شهر مشهد بسیار بالاتر از حد استاندارد گزارش شده است و نشت فاضلاب شهری در این محدوده از عوامل مهم آلودگی آبخوان بوده است (لطیف و همکاران، ۱۳۸۴). در این محدوده شهرک‌های صنعتی مشهد (کلات)، توس، صنایع غذایی، ماشین‌سازی، چرم‌شهر، چهارطاقی و شهرک صنعتی چناران واقع شده‌اند. همچنین تعداد قابل توجهی از صنایع فعال منطقه به صورت پراکنده در این محدوده واقع شده‌اند. با توجه به موقعیت برخی شهرک‌های صنعتی و واقع‌شدن آن‌ها در مکان‌هایی با آسیب‌پذیری بیشتر توجه به این مناطق اهمیت بالایی دارد و می‌توانند از عوامل مؤثر در آلودگی آبخوان باشند. یک مطالعه بر روی پساب تصفیه‌خانه شهرک صنعتی توس نشان داد با وجود در حد استاندارد

مطابق با شکل ۵ در سال ۱۴۰۰ آب اکثر مساحت منطقه دارای کیفیت خوب است. مناطق دارای کیفیت ضعیف و خیلی ضعیف در قسمت ورودی و خروجی آبخوان قرار دارند. در سال ۱۳۸۰، کلاس عالی اکثریت وسعت منطقه را دارا بوده است. در این سال نیز در خروجی آبخوان در جنوب و در ورودی در شمال آبخوان کیفیت آب به نسبت سایر نقاط ضعیف‌تر است. همچنین، به رغم وجود تعداد مشاهداتی کمتر در سال ۱۴۰۰ کاهش کیفیت آب زیرزمینی در محدوده بین شهر مشهد و شهر چناران به خوبی مشاهده می‌شود. علاوه بر این، در هر دو سال در برخی از نمونه‌هایی که در اطراف رودخانه کشف‌رود قرار دارند، کیفیت آب ضعیف‌تری به نسبت نقاط اطراف آن‌ها مشاهده می‌شود. برخی تفاوت‌های جزئی دو نقشه به علت تعداد کمتر مشاهدات در سال ۱۴۰۰ است.

منابع آلاینده در محدوده

براساس نقشه کاربری اراضی ESRI در سال ۲۰۲۰ میلادی حدود ۴۳ درصد از مساحت محدوده را کاربری کشاورزی و حدود ۲۰

ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی دشت ارومیه برای مصارف کشاورزی با استفاده از روش ترکیبی مدل های آسیب پذیری آلودگی، پتانسیل و شاخص کیفیت آب زیرزمینی. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۷(۴): ۷۱۹-۷۳۳.

زرنگ، ا.، لشکری پور، غ. و غفوری، م. ۱۳۹۸. بررسی شرایط زیرسطحی و تاثیر آن بر میزان نشست زمین در غرب دشت مشهد ششمین کنگره ملی عمران، معماری و توسعه شهری
<https://civilica.com/doc/1003471>

لطیف، م.، موسوی، ف.، افیونی، م. و ولایتی، س. ۱۳۸۴. بررسی آلودگی نیترات و منشایابی آن در آب های زیرزمینی دشت مشهد. علوم کشاورزی و منابع طبیعی. ۱۲(۲): ۳۲-۲۱.

مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران. ۱۳۸۸. آب آشامیدنی - ویژگی های فیزیکی و شیمیایی. تهران، شماره ۱۰۵۳: بازنگری پنجم.

عابدی، م.، کرمی، غ. و حافظی مقدس، ن. ۱۳۹۵. تخمین قابلیت انتقال با استفاده از لاگ های حفاری در دشت مشهد چهارمین کنگره بین المللی عمران، معماری و توسعه شهری.
<https://civilica.com/doc/618185>

یزدانی، م.، درمانی، م.، نهتانی، م.، آرا، ه. و ابراهیمیان، ص. ۱۴۰۲. بررسی پارامترهای کیفی آب های زیرزمینی با استفاده از روش های زمین آمار (مطالعه موردی: دشت مشهد). پژوهش های فرسایش محیطی. ۱۳ (۴): ۲۵۶-۲۷۲.

Adimalla, N. and Taloor, A. K. 2020. Hydrogeochemical investigation of groundwater quality in the hard rock terrain of South India using Geographic Information System (GIS) and groundwater quality index (GWQI) techniques. Groundwater for Sustainable Development. 10: 100288.

Alam, F., Umar, R., Ahmed, S. and Dar, F. A. 2014. A new model (DRASTIC-LU) for evaluating groundwater vulnerability in parts of central Ganga Plain, India. Arabian Journal of Geosciences. 7: 927-937.

Aller, L., Bennett, T., Lehr, J., Petty, R.J. and Hackett, G., 1987. DRASTIC: A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. US Environmental Protection Agency. Washington. DC: 455.

Asadi, P., Ataie-Ashtiani, B. and Beheshti, A. 2016. Vulnerability assessment of urban groundwater resources to nitrate: the case study of Mashhad, Iran. Environmental Earth Sciences, 76, 41.

Badeenezhad, A., Tabatabaee, H. R., Nikbakht, H.-A., Radfard, M., Abbasnia, A., Baghapour, M. A. and Alhamd, M. 2020. Estimation of the groundwater

بودن غلظت بیشتر عناصر سنگین در پساب، غلظت بالای جیوه در آن می تواند بر روی آلودگی آب زیرزمینی به این عنصر مؤثر باشد (امیرنژاد و همکاران، ۱۳۹۵). بررسی نقشه کاربری اراضی و نقشه آسیب پذیری نشان می دهد که بخش عمده کلاس آسیب پذیری خیلی زیاد در کاربری های مناطق ساخته شده و همچنین کاربری بایر قرار دارند که بخش قابل توجهی از آسیب پذیری مطابق شاخص دراستیک در محدوده شهرک های صنعتی طوس و صنایع غذایی قرار گرفته است.

نتیجه گیری

ارزیابی آسیب پذیری آبخوان مشهد-چناران با روش های دراستیک و دراستیک ترکیبی بیانگر آن است که عمده مساحت منطقه (حدود ۷۰ درصد) دارای آسیب پذیری زیاد می باشد. همچنین مناطق دارای آسیب پذیری خیلی زیاد عمدتاً در بخش های مرکزی آبخوان قرار دارند که شامل بخش هایی از شهر مشهد و شمال غربی شهر مشهد می شود و حدود ۱۵ درصد از مساحت منطقه را پوشش می دهند. نکته قابل توجه قرار گرفتن شهرک های صنعتی در محدوده ای است که مطابق با هر دو مدل دارای آسیب پذیری خیلی زیاد هستند. جهت بررسی دقیق تر وضعیت کیفی و تغییرات آن در محدوده مطالعاتی، شاخص کیفیت آب زیرزمینی (GWQI) در دو سال ۱۳۸۰ و ۱۴۰۰ در این محدوده محاسبه گردید. نتایج بیان گر این است که مناطق جنوبی آبخوان که در قسمت خروجی آبخوان قرار دارند، کمترین کیفیت آب را جهت مصارف آشامیدن دارا هستند. کیفیت ضعیف آب در مناطق شمالی آبخوان نیز دیده می شود که علت این مسئله می تواند فعالیت های انسانی از جمله تجمع زمین های کشاورزی و روستاها باشد. نتایج این تحقیق با نتایج پژوهش یزدانی و همکاران (۱۴۰۲) که به بررسی توزیع پارامترهای کیفی در محدوده دشت مشهد با روش های زمین آمار پرداخته است، مطابقت دارد. با توجه به داده های مشاهداتی می توان به کاهش کیفیت آب زیرزمینی در طی بیست سال پی برد، به طوری که کاهش کیفیت در مشاهدات مناطق مرکزی آبخوان به وضوح دیده می شود که این مورد با قرار گرفتن بخش قابل توجهی از این مناطق در دسته مناطق با آسیب پذیری خیلی زیاد مطابقت دارد.

منابع

امیرنژاد، ر. و فرهادی، ا. ۱۳۹۵. بررسی تأثیر فلزات سنگین پساب تصفیه خانه شهرک صنعتی توس مشهد بر آب های زیرزمینی. علوم و مهندسی محیط زیست. ۳(۱۰): ۷۷-۸۸.

رحیمی، م.، رضا وردی نژاد، و.، بهمنش، ج. و اسدزاده، ف. ۱۴۰۲.

- of The Total Environment. 807: 151399.
- Liang, J., Li, Z., Yang, Q., Lei, X., Kang, A. and Li, S. 2019. Specific vulnerability assessment of nitrate in shallow groundwater with an improved DRSTIC-LE model. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 174: 649-657.
- Machiwal, D., Islam, A. and Kamble, T. 2019. Trends and probabilistic stability index for evaluating groundwater quality: The case of quaternary alluvial and quartzite aquifer system of India. *Journal of Environmental Management*. 237: 457-475.
- Machiwal, D. and Jha, M. K. 2015. Identifying sources of groundwater contamination in a hard-rock aquifer system using multivariate statistical analyses and GIS-based geostatistical modeling techniques. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 4: 80-110.
- Mirboluki, A., Mehraein, M., Kisi, O., Kuriqi, A. and Barati, R. 2024. Groundwater level estimation using improved deep learning and soft computing methods. *Earth Science Informatics*. 17: 2587-2608.
- Moraru, C. and Hannigan, R. 2018. *Analysis of Hydrogeochemical Vulnerability*, Springer.
- Neshat, A., Pradhan, B., Pirasteh, S. and Shafri, H. Z. M. 2013. Estimating groundwater vulnerability to pollution using a modified DRASTIC model in the Kerman agricultural area, Iran. *Environmental Earth Sciences*. 71: 3119-3131.
- Piscopo, G., Pleasure, P. and Sinclair, P. 2001. Groundwater vulnerability map explanatory notes, Lachlan Catchment, Centre of Natural Resources. New South Wales (NSW) Department of Land and Water Conservation. 14.
- Rahman, A. 2008. A GIS based DRASTIC model for assessing groundwater vulnerability in shallow aquifer in Aligarh, India. *Applied geography*. 28: 32-53.
- Rahman, M., Haque, M. M. and Tareq, S. M. 2021. Appraisal of groundwater vulnerability in south-central part of Bangladesh using DRASTIC model: An approach towards groundwater protection and health safety. *Environmental Challenges*. 5: 100391.
- Safa, G., Najiba, C., El Houda, B. N., Monji, H., Soumaya, A. and Kamel, Z. 2020. Assessment of urban groundwater vulnerability in arid areas: Case of Sidi Bouzid aquifer (central Tunisia). *Journal of African Earth Sciences*. 168: 103849.
- Sarkar, M. and Pal, S. C. 2021. Application of DRASTIC and Modified DRASTIC Models for Modeling Groundwater Vulnerability of Malda District in West Bengal. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*. 49: 1201-1219.
- Sheikhi, S., Faraji, Z. and Aslani, H. 2021. Arsenic health risk assessment and the evaluation of groundwater quality using GWQI and multivariate quality index and investigation of the affecting factors their changes in Shiraz drinking groundwater, Iran. *Groundwater for Sustainable Development*. 11: 100435.
- Bera, A., Mukhopadhyay, B. P., Chowdhury, P., Ghosh, A. and Biswas, S. 2021. Groundwater vulnerability assessment using GIS-based DRASTIC model in Nangasai River Basin, India with special emphasis on agricultural contamination. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 214: 112085.
- Bhavsar, Z. and Patel, J. 2023. Assessing potability of groundwater using groundwater quality index (GWQI), entropy weighted groundwater pollution index (EGPI) and geospatial analysis for khambhat coastal region of Gujarat. *Groundwater for Sustainable Development*. 21: 100916.
- Chaudhary, J. and Singh, K. 2023. Use of water quality index and DRASTIC index correlation for better assessment of groundwater vulnerability to pollution: a case study. *Water Supply*. 23: 4759-4774.
- Dandge, K. and Patil, S. 2022. Spatial distribution of ground water quality index using remote sensing and GIS techniques. *Applied Water Science*. 12: 7.
- Elzain, H. E., Chung, S. Y., Venkatramanan, S., Selvam, S., Ahemd, H. A., Seo, Y. K., Bhuyan, M. S. and Yassin, M. A. 2023. Novel machine learning algorithms to predict the groundwater vulnerability index to nitrate pollution at two levels of modeling. *Chemosphere*. 314: 137671.
- Ghosh, A. and Bera, B. 2023. Hydrogeochemical assessment of groundwater quality for drinking and irrigation applying groundwater quality index (GWQI) and irrigation water quality index (IWQI). *Groundwater for Sustainable Development*. 22: 100958.
- Hamza, S. M., Ahsan, A., Imteaz, M. A., Rahman, A., Mohammad, T. A. and Ghazali, A. H. 2014. Accomplishment and subjectivity of GIS-based DRASTIC groundwater vulnerability assessment method: a review. *Environmental Earth Sciences*. 73: 3063-3076.
- Karra, K., Kontgis, C., Statman-Weil, Z., Mazzariello, J. C., Mathis, M. and Brumby, S. P. 2021. Global land use/land cover with Sentinel 2 and deep learning. 2021 IEEE international geoscience and remote sensing symposium IGARSS. IEEE: 4704-4707.
- Konikov, E. and Likhodedova, O. 2011. Global climate change and sea-level fluctuations in the Black and Caspian Seas over the past 200 years. *Geology and geoarchaeology of the black sea region: beyond the flood hypothesis*. 473: 59.
- Kwon, E., Park, J., Park, W.-B., Kang, B.-R., Hyeon, B.-S. and Woo, N. C. 2022. Nitrate vulnerability of groundwater in Jeju Volcanic Island, Korea. *Science*

- Umar, R., Ahmed, I. and Alam, F. 2009. Mapping groundwater vulnerable zones using modified DRASTIC approach of an alluvial aquifer in parts of Central Ganga Plain, Western Uttar Pradesh. *Journal of the Geological Society of India*. 73: 193-201.
- Vosoogh, A., Baghvand, A., Karbassi, A. and Nasrabadi, T. 2017. Landfill Site Selection Using Pollution Potential Zoning of Aquifers by Modified DRASTIC Method: Case Study in Northeast Iran. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*. 41: 229-239.
- Wu, H., Chen, J., Qian, H. and Zhang, X. 2015. Chemical characteristics and quality assessment of groundwater of exploited aquifers in Beijiao water source of Yinchuan, China: a case study for drinking, irrigation, and industrial purposes. *Journal of Chemistry*. 2015(1), p.726340.
- statistical analysis in rural areas, Hashtroud, Iran. *Environmental Science and Pollution Research*. 28: 3617-3631.
- Smedley, P. L. and Kinniburgh, D. G. 2002. A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Applied geochemistry*. 17: 517-568.
- Taghavi, N., Niven, R. K., Kramer, M. and Paull, D. J. 2023. Comparison of DRASTIC and DRASTICL groundwater vulnerability assessments of the Burdekin Basin, Queensland, Australia. *Science of The Total Environment*. 858: 159945.
- Taghavi, N., Niven, R. K., Paull, D. J. and Kramer, M. 2022. Groundwater vulnerability assessment: A review including new statistical and hybrid methods. *Science of The Total Environment*. 822: 153486.

Assessment of the Mashhad-Chenaran Aquifer in Terms of Quality and Vulnerability Using DRASTIC and Groundwater Quality Index

S.M. Alavizadeh¹, H. Banejad^{2*}, A. A. Beheshti³
Received: Dec.17, 2024 Accepted: Feb.02, 2025

Abstract

Identifying areas with low water quality in addition to vulnerable zones is essential for developing optimal plans to protect groundwater resources and control human activities in these regions. This study examines the water quality as well as vulnerability of the Mashhad-Chenaran aquifer using the DRASTIC model and the Groundwater Quality Index (GWQI). Water quality data from 35 wells in 2021 and 123 wells in 2001 were analyzed. The DRASTIC model includes weighting and ranking of seven variables: aquifer depth, net recharge, aquifer media, soil media, slope, impact of vadose zone, and hydraulic conductivity. Additionally, a modified DRASTIC model incorporating land use was also evaluated. According to the results, the central parts of the aquifer, including areas of Mashhad city and the northern parts of it, exhibit very high vulnerability classes, covering about 15% of the study area, where industrial zones are located. In both models, the high vulnerability class occupies the largest area, accounting for approximately 70% of the study region. Based on the Groundwater Quality Index, water quality declined in 2021 compared to 2001, with most samples classified as poor for drinking purposes. The southern parts of the study area (aquifer discharge) and the northern regions exhibit poorer water quality compared to other areas.

Keywords: Aquifer pollution, Groundwater, Mashhad-Chenaran aquifer, Vulnerability, Water quality index

1- M.Sc. graduate student, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

2- Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

3- Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

(* - Corresponding Author Email: hbanejad@gmail.com)