



## Vulnerability Assessment of Kordkandi-Duzduzan Plain Groundwater Using Calibrated DRASTIC Model

S. Soltani<sup>1</sup>, A. Asghari Moghadam<sup>2\*</sup>, R. Barzegar<sup>3</sup>  
and N. Kazemian<sup>4</sup>

### Abstract

The main land use in Kordkandi-Duzduzan plain is agricultural activities and therefore the possibility of aquifer contamination by irrigation return flows contaminated by chemical fertilizers is very high. Thus, vulnerability assessment of the aquifer seems to be essential for the land use management and preventing groundwater contaminations in the area. The main aim of this study is mapping the region's vulnerability by DRASTIC method and then calibration of DRASTIC model with nitrate data to improve this method. Factors affecting the groundwater vulnerability such as depth of groundwater, net recharge, aquifer media, soil media, topography, impact of vadose zone, and hydraulic conductivity were prepared as raster format in GIS media. Two nitrate data sets were used for validation and calibration of DRASTIC model. The results showed that the determination coefficient between nitrate concentration and the corresponding vulnerability increased from 0.6783 to 0.7903 when modifying layer weights. Based on calibrated DRASTIC vulnerability map, vulnerability index for the study area was calculated between 66.56 and 148.89. The determination coefficient between nitrate concentration values and calibrated DRASTIC vulnerability map were increased compared to the original DRASTIC map which confirms the validity of the calibration process.

**Keywords:** Calibration, DRASTIC, Groundwater Vulnerability, Kordkandi- Duzduzan Plain.

Received: March 4, 2017

Accepted: June 14, 2017

## ارزیابی آسیب پذیری آب زیرزمینی آبخوان دشت کردکندی - دوزدوزان با استفاده از مدل دراستیک واسنجی شده

شهلا سلطانی<sup>۱</sup>، اصغر اصغری مقدم<sup>۲\*</sup>، رحیم برزگر<sup>۳</sup>  
و نعیمه کاظمیان<sup>۴</sup>

### چکیده

با توجه به این که عمده کاربری اراضی در دشت کردکندی - دوزدوزان به کشاورزی اختصاص یافته است، احتمال آلودگی آبخوان به وسیله آب های برگشتی آغشته به کودهای شیمیایی بسیار بالا می باشد. بنابراین، ارزیابی آسیب پذیری آبخوان برای مدیریت کاربری اراضی و جلوگیری از آلودگی آب های زیرزمینی امری ضروری به نظر می رسد. هدف اصلی این مطالعه، تهیه نقشه آسیب پذیری منطقه به روش دراستیک و سپس واسنجی مدل دراستیک با استفاده از داده های نیترات به منظور بهبود این روش می باشد. بنابراین، عوامل مؤثر بر آسیب پذیری آب زیرزمینی شامل عمق آب زیرزمینی، تغذیه خالص، جنس محیط آبخوان، محیط خاک، شیب توپوگرافی، مواد تشکیل دهنده ناحیه غیراشباع و هدایت هیدرولیکی با فرمت رستر در محیط نرم افزاری GIS تهیه شدند. به منظور صحت سنجی و واسنجی مدل دراستیک از دو مجموعه داده نیترات استفاده شد. نتایج نشان داد که با تصحیح وزن لایه ها، ضریب تبیین بین غلظت نیترات و آسیب پذیری مربوطه از ۰/۶۸ به ۰/۷۹ افزایش یافته است. براساس نقشه آسیب پذیری دراستیک واسنجی شده، میزان شاخص آسیب پذیری بین ۶۶/۵۶ تا ۱۴۸/۸۹ برآورد شد. افزایش همبستگی غلظت نیترات با نقشه آسیب پذیری دراستیک واسنجی شده در مقایسه با دراستیک اولیه، صحت فرآیند واسنجی را تأیید کرد.

**کلمات کلیدی:** آسیب پذیری آب زیرزمینی، دراستیک، دشت کردکندی - دوزدوزان، واسنجی.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۵/۱۲/۱۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۶/۳/۲۴

1-MSc. in Hydrogeology, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

2-Professor, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran  
Email: moghaddam@tabrizu.ac.ir

3- Ph.D. Student in Hydrogeology, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

4- Water Quality Control Laboratory, East Azarbaijan Province Water and Waste Water Company, Tabriz, Iran

\*- Corresponding Author

۱- کارشناسی ارشد هیدروژئولوژی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۲- استاد گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۳- دانشجوی دکتری هیدروژئولوژی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۴- کارشناس آزمایشگاه کنترل کیفی آب استان آذربایجان شرقی، تبریز، ایران

\*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان خرداد ۱۳۹۷ امکان پذیر است

فعالیت‌های بشری بستگی دارد و مستقل از ماهیت آلاینده است (Gogu and Dassargues, 2000). روش‌هایی مانند دراستیک<sup>۱</sup> به منظور ارزیابی این نوع آسیب‌پذیری استفاده می‌شوند (Hamza et al., 2010). آسیب‌پذیری ویژه نیز به آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی نسبت به آلاینده یا گروهی خاص از آلاینده‌ها اشاره دارد که به ویژگی‌های آلاینده و ارتباط آن با مؤلفه‌های مختلف آسیب‌پذیری ذاتی وابسته است (Gogu and Dassargues, 2000).

روش‌های مختلفی برای بررسی و ارزیابی پتانسیل آلودگی در یک آبخوان وجود دارد که از آن جمله می‌توان به روش‌های مبتنی بر روش‌های شبیه‌سازی، روش‌های آماری و روش‌های شاخص و هم‌پوشان اشاره کرد (Almasri, 2008). دراستیک یک روش شاخص و هم‌پوشان است که در آن، اطلاعات به دست آمده از پارامترهای مختلف به صورت تلفیقی و به طور موازی مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند و سپس توسط سامانه اطلاعات جغرافیایی پردازش می‌گردند. اصولاً روش‌های شاخص و هم‌پوشان از ترکیب پارامترهای هیدروژئولوژیک مؤثر در انتقال آلودگی به آب‌های زیرزمینی تشکیل می‌شوند. در این روش‌ها برای تعیین اهمیت نسبی، هر کدام از پارامترها نسبت به سایرین ارزیابی می‌شوند، گرچه این روش‌ها فرآیندهای مؤثر در آلوده شدن منابع آب زیرزمینی را به طور کامل شرح نمی‌دهند؛ اما به دلیل ساده بودن روش و در دسترس بودن داده‌های مورد نیاز از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند (Gogu and Dassargues, 2000).

مدل دراستیک یک مدل تجربی است که اولین بار در سال ۱۹۸۷ برای ارزیابی آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی ایالات متحده مطرح شد که براساس مفهوم وضعیت هیدروژئولوژیکی استوار است (Aller et al., 1987). وضعیت هیدروژئولوژیکی در واقع بیانگر ترکیبی از همه‌ی فاکتورهای زمین‌شناسی و هیدرولوژیکی است که حرکت آب‌های زیرزمینی را در یک منطقه کنترل می‌کند (Aller et al., 1987). از جمله مزایای روش دراستیک، هزینه اندک و نیاز به داده‌های کم می‌باشد و ضعف عمده آن اعمال نظر شخصی و کارشناسی برای تعیین نرخ‌ها و وزن‌ها است (Asghari Moghaddam et al., 2015). در همین راستا، تا کنون روش‌های مختلفی برای بهبود مدل دراستیک متناسب با شرایط محدوده مطالعاتی به کار برده شده است. در بعضی از تحقیقات از پارامترهای اضافی مانند کاربری اراضی و نوع و شدت آبیاری برای بهبود مدل دراستیک استفاده شده است (Secunda et al., 1998; McLay et al., 2006). Panagopoulos et al. (2006) جهت بهبود روش دراستیک از روش‌های آماری استفاده کردند.

در حال حاضر بخش قابل ملاحظه‌ای از مصارف آب به خصوص در بخش شرب از منابع آب زیرزمینی تأمین می‌گردد. از این نظر حفاظت کیفی آب‌های زیرزمینی از اهمیت بسیاری برخوردار است. آب‌های زیرزمینی به شکل‌های مختلف در معرض آلودگی قرار دارند که تشخیص و کنترل آلودگی در آن‌ها نسبت به آب‌های سطحی مشکل‌تر و پرهزینه‌تر است. همچنین، به دلیل استمرار آلودگی در این منابع، بهترین روش جلوگیری از آلودگی آن‌ها، شناسایی منابع آلوده کننده و مناطق آسیب‌پذیر، تهیه نقشه‌های آسیب‌پذیری و اتخاذ سیاست‌های مدیریتی مناسب می‌باشد (Babiker et al., 2005). با شناسایی مناطقی که استعداد آلودگی در آن بالا می‌باشد می‌توان منطقه را از لحاظ آسیب‌پذیری پهنه‌بندی نمود و در نتیجه با اعمال تمهیدات لازم از آلوده شدن مناطق با پتانسیل آسیب‌پذیری بالا جلوگیری کرد (Asghari Moghaddam et al., 2010). نقشه پهنه‌بندی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی بر این اساس است که در برخی اراضی، پتانسیل آسیب‌پذیری نسبت به آلودگی بیشتر از سایر اراضی است (Piscopo, 2001). باید توجه داشت که نقشه پهنه‌بندی آسیب‌پذیری آبخوان، میزان آلودگی آبخوان را نشان نمی‌دهد بلکه پتانسیل آبخوان نسبت به آلودگی را منعکس می‌کند. بنابراین، ممکن است در یک منطقه پتانسیل آسیب‌پذیری کم یا متوسط باشد ولی به دلیل حضور گسترده منابع آلاینده، آب‌های زیرزمینی آلوده شده باشد و یا بالعکس (Barzegar et al., 2015).

مفهوم آسیب‌پذیری برای اولین بار در اواخر سال ۱۹۶۰ میلادی در فرانسه ارائه شده است (Vrba and Zoporotec, 1994). امکان نفوذ و انتشار آلاینده‌ها از سطح زمین به درون سیستم آب زیرزمینی را آسیب‌پذیری می‌نامند. کمیته ملی علوم آمریکا در سال ۱۹۹۳ تعریفی برای آسیب‌پذیری آب زیرزمینی به آلودگی بیان کرده است (Stigter et al., 2006). این کمیته، آسیب‌پذیری آب زیرزمینی نسبت به آلودگی را، تمایل یا احتمال نفوذ آلاینده‌ها به مکان مشخص در سیستم آب زیرزمینی بعد از به‌وجود آمدن آن‌ها در برخی محل‌ها در بالای سطح آبخوان می‌داند (Almasri, 2008).

اصطلاح آسیب‌پذیری از نظر مفهومی در هیدروژئولوژی به دو صورت آسیب‌پذیری ذاتی و آسیب‌پذیری ویژه تقسیم می‌شود (Almasri, 2008; Gogu and Dassargues, 2000). آسیب‌پذیری ذاتی به امکان آلودگی در یک منطقه بدون در نظر گرفتن آلاینده خاص اشاره دارد (Almasri, 2008). به عبارتی، این نوع آسیب‌پذیری به ویژگی‌های زمین‌شناسی، هیدروژئولوژی و هیدروژئولوژی یک منطقه و

Jafarighariehali et al. (2012) با استفاده از مدل‌سازی و به کارگیری بعضی از پارامترهای روش دراستیک و همچنین نقش تراکم جمعیتی در نواحی شهری به ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان در نواحی شهری پرداخته‌اند. (Javanmard et al., 2013) از تئوری تقریبی<sup>۲</sup> و سیستم اطلاعات مکانی، در مدل‌سازی و از مدل دراستیک برای عدم قطعیت آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی بهره‌گیری کردند. همچنین، مدل‌های هوش مصنوعی مانند منطق فازی<sup>۳</sup>، نرو فازی<sup>۴</sup>، شبکه عصبی خود سازمان‌ده<sup>۵</sup>، مدل فازی مرکب نظارت شده<sup>۶</sup> و هوش مصنوعی مرکب نظارت شده<sup>۷</sup> به منظور ارزیابی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی و بهبود عملکرد روش دراستیک به کار گرفته شده است (Dixon, 2009; Rezaei et al., 2013; Asghari Moghaddam et al., 2015; Barzegar et al., 2015; Rezaei et al., 2017; Kihumba et al., 2017a; Nadiri et al., 2017b). (Nadiri et al., 2017) جهت بهبود دراستیک با استفاده از داده‌های نیترات به تصحیح نرخ و وزن پارامترها پرداختند.

با توجه به این که در دشت کردکندی - دوزدوزان عمده کاربری اراضی به صورت کشاورزی است و از کودهای شیمیایی و حیوانی نیز استفاده می‌شود، منابع آب زیرزمینی این منطقه با خطر آلودگی مواجه است. بنابراین، جهت محافظت و مدیریت صحیح منابع آب زیرزمینی، تهیه نقشه آسیب‌پذیری ضرورت دارد. هدف اصلی از این مطالعه ارزیابی آسیب‌پذیری دشت کردکندی - دوزدوزان با استفاده از روش دراستیک و انسجی شده می‌باشد. در این مطالعه با استفاده از همبستگی موجود بین غلظت نیترات و پارامترهای مؤثر بر آسیب‌پذیری، وزن‌های جدیدی برای هر پارامتر در نظر گرفته شد و نقشه آسیب‌پذیری جدیدی براساس وزن‌های به دست آمده تهیه گردید که افزایش مقدار ضریب تعیین بین غلظت نیترات و نقشه آسیب‌پذیری دراستیک و انسجی شده نسبت به نقشه دراستیک اولیه، صحت فرآیند و انسجی و بهبود ارزیابی آسیب‌پذیری را تأیید کرد.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- منطقه مطالعاتی

دشت کردکندی - دوزدوزان در شمال غرب ایران در شرق استان آذربایجان شرقی واقع شده است. این دشت از شمال به دشت مهربان، از جنوب به کوه‌های قملار و قاسم‌داغی، از شرق به رودخانه آجی‌چای و از غرب به رودخانه اوجان‌چای منتهی می‌شوند (شکل ۱). این دشت با وسعت تقریبی ۱۲۷ کیلومتر مربعی، جزء حوضه آبریز دریاچه ارومیه می‌باشد. براساس اطلاعات گردآوری شده از ایستگاه هواشناسی برازین میانگین دمای سالانه در منطقه برابر ۸/۷ درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

متوسط سالانه ریزش‌های جوی ایستگاه‌های کردکندی و دوزدوزان برابر ۲۶۹/۱۹ و ۲۷۴/۹ میلی‌متر در سال در طول بازه زمانی ۷۸-۱۳۷۹ تا ۹۳-۱۳۹۲ گزارش شده است. این منطقه از نظر اقلیمی جزء مناطق نیمه خشک سرد محسوب می‌شود. براساس نقشه کاربری اراضی، توزیع کاربری در منطقه به صورت ۸۲ درصد باغات و کشاورزی، ۱۷ درصد زمین‌های زیر کشت دیم و ۱ درصد مناطق مسکونی است.

### ۲-۲- زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی

در حوضه آبریز محدوده مطالعاتی رخنمون سنگ‌های کهن‌تر از ائوسن شناسایی نگردیده است. بخش جنوبی منطقه را واحدهای سری ائوسن و الیگوسن دربرگرفته‌اند. مساحت وسیعی از پیرامون دشت با سازندهای سری میوسن پوشیده شده است. رسوبات میوسن تناوبی از ماسه سنگ، شیل مارنی، سنگ آهک ریفی، کنگلومرا، توف، مارن و سیلت را شامل می‌شود. رسوبات سری پلیوسن ارتفاعات واقع در مرکز دشت و همچنین به صورت پراکنده شمال و شرق دشت را پوشانده است. این رسوبات یک سری کنگلومرای گرد شده ناهمجنس هستند که به طور دگرشیب بر روی واحدهای میوسن قرار گرفته‌اند. رسوبات کواترنری نهشته‌های آبرفتی دشت‌ها غالباً از کنگلومرا، ماسه، رس، قله سنگ و شن تشکیل یافته است. به طور کلی، دشت کردکندی - دوزدوزان از نظر چینه‌شناسی شامل سازندهای کواترنری (رسوبات عهد حاضر، تراس‌های جوان، تراس‌های قدیمی‌تر و مرتفع‌تر، تراس و مخروط‌افکنه)، پلیوسن (ماسه سنگ کنگلومرائی و رس) و میوسن (ماسه سنگ، سیلت سنگ و مارن) می‌باشد. شکل ۲ نقشه زمین‌شناسی منطقه مطالعاتی را نشان می‌دهد.

نتایج حاصل از حفاری چاه‌های مشاهده‌ای و مطالعات ژئوفیزیک نشان داد که آبخوان دشت کردکندی - دوزدوزان از نوع آزاد است. آبخوان آزاد تشکیل شده، از پادگانه‌های آبرفتی قدیمی، پادگانه‌های آبرفتی جدید، مخروط‌افکنه‌ها و رسوبات رودخانه‌ای تشکیل یافته و مواد تشکیل‌دهنده رسوبات شن، ماسه، سیلت، لای و رس می‌باشد. مواد تشکیل‌دهنده آبخوان در دامنه‌ها، کناره‌های دشت و مخروط‌افکنه‌ها، دانه درشت بوده و هر چه به مرکز دشت نزدیک‌تر می‌شود، دانه ریزتر می‌گردد.

نتایج حاصل از مطالعات ژئوفیزیک نشان داد که رسوبات آبرفتی مربوط به مخروط‌افکنه‌ی شریبان از جنوب به شمال دشت به تدریج دانه‌ریز می‌شود، به طوری که در شمال دشت، مواد رسی همراه با املاح شور پوشش سطحی را تشکیل می‌دهد، حال آن که در جنوب دشت، رسوبات آبرفتی دانه‌درشت آبخوان آبرفتی را می‌پوشاند.

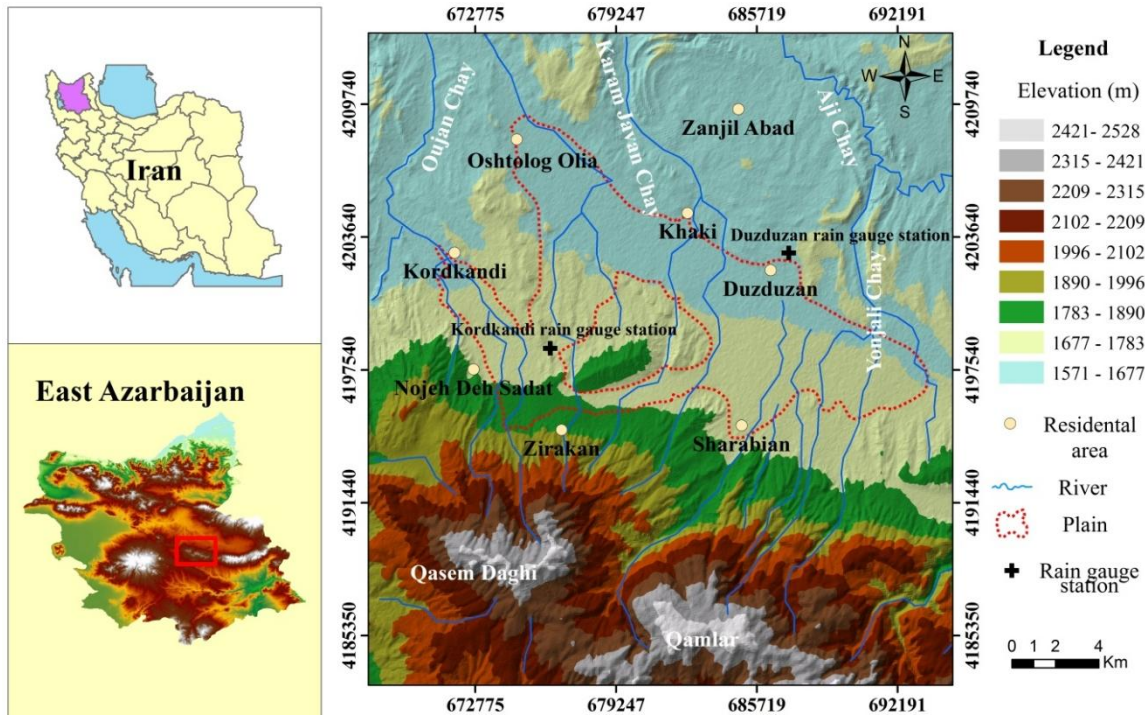


Fig. 1- Location of the study area

شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

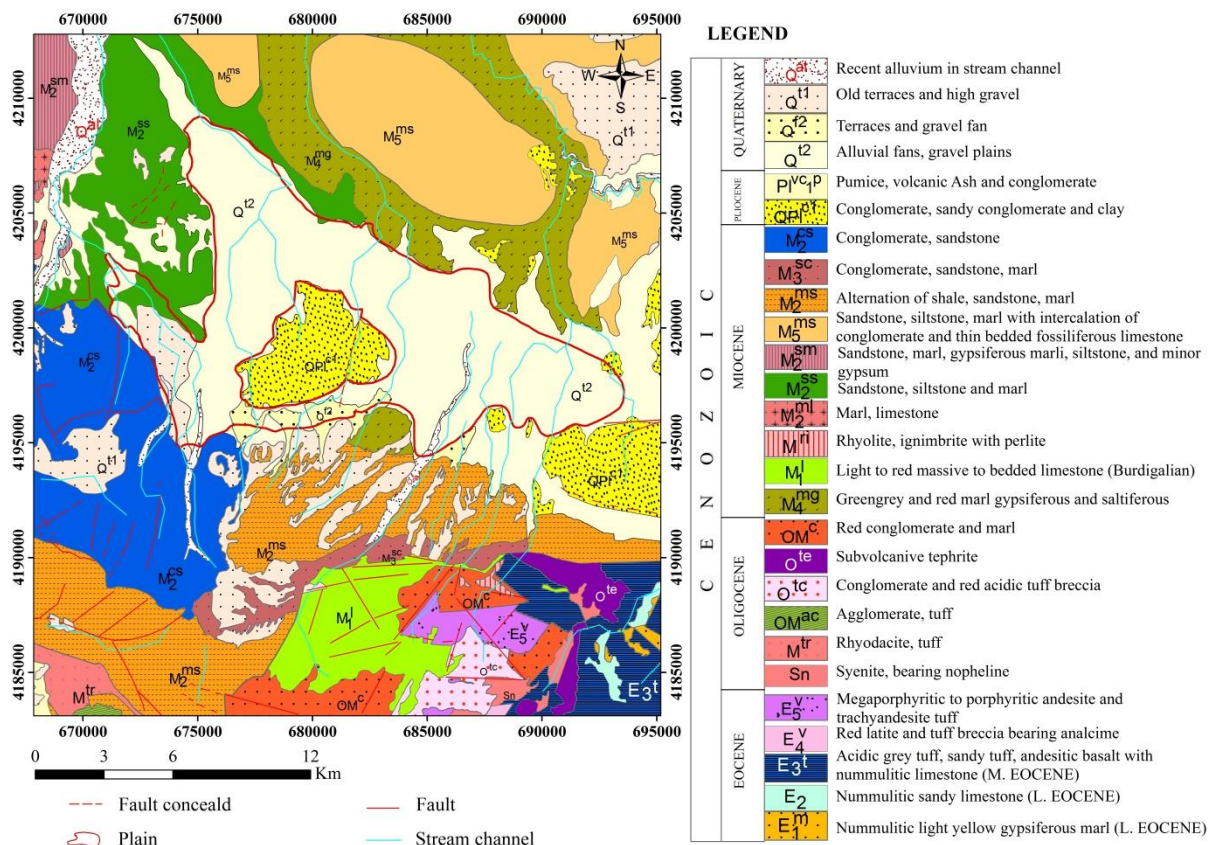


Fig. 2- Geological map of the study area

شکل ۲- نقشه زمین شناسی منطقه مطالعاتی

دشت و مجاورت ارتفاعات میانی اندازه‌گیری شده است؛ در حالی که بیشترین مقدار غلظت نیترات در جنوب شرق منطقه متمرکز شده است (شکل ۳).

#### ۲-۴- مدل آسیب‌پذیری به روش دراستیک

هدف اصلی ارزیابی به روش دراستیک، محاسبه نقشه رستری شاخص آسیب‌پذیری است که به وسیله هم‌پوشانی نقشه‌های رستری پارامترهای تأثیرگذار در آسیب‌پذیری آب زیرزمینی تهیه می‌شود. این روش براساس هفت پارامتر عمق آب (D)، تغذیه خالص (R)، محیط آبخوان (A)، محیط خاک (S)، توپوگرافی (T)، تأثیر منطقه غیراشباع (I) و هدایت هیدرولیکی (C) می‌باشد. برای هر یک از هفت پارامتر، نقشه‌ای با فرمت رستر در محیط نرم‌افزار GIS تهیه می‌شود که شامل توزیع مکانی مقادیر امتیاز آسیب‌پذیری از ۱ (حداقل تأثیر در آسیب‌پذیری) تا ۱۰ (حداکثر تأثیر در آسیب‌پذیری) می‌باشد. جدول ۲ امتیازات مربوط به هفت پارامتر مورد اشاره را نشان می‌دهد. در روش دراستیک معمول، هفت پارامتر آسیب‌پذیری ضرایب وزنی از ۱ تا ۵ را دارند که اهمیت نسبی آن‌ها نسبت به آسیب‌پذیری آبخوان را نشان می‌دهد. نقشه شاخص آسیب‌پذیری دراستیک طبق رابطه‌ی ۱ محاسبه می‌شود:

$$\text{DRASTIC index} = D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + S_r S_w + T_r T_w + I_r I_w + C_r C_w \quad (1)$$

تراس‌های کنگلومرایی یا رسی مربوط به دوره‌ی پلیوکواترنری در حاشیه‌های شرقی و غربی به عنوان سنگ کف آبخوان تشخیص داده شد و در بخش قابل توجهی از آبخوان، لایه‌ی مارنی یا رسی همراه با گچ و نمک مربوط به دوره‌ی میوسن سنگ کف آبخوان را تشکیل می‌دهد (Alizadeh, 2008).

#### ۲-۳- مجموعه داده نیترات

برای واسنجی و صحت‌سنجی آسیب‌پذیری از دو مجموعه داده نیترات استفاده شد. مجموعه اول در مهر ماه ۱۳۹۴ در دو روز متوالی از چاه‌ها برداشته شده و در آزمایشگاه آب‌شناسی دانشگاه تبریز اندازه‌گیری شدند. با توجه به یکسان بودن فعالیت‌های کشاورزی در منطقه، نیترات جمع‌آوری شده در مهر ماه ۱۳۹۴ با استفاده از درون‌یابی IDW پهنه‌بندی شد و نقاطی با پراکندگی مناسب انتخاب گردید که به عنوان مجموعه گروه دوم در نظر گرفته شدند. خلاصه آماری داده‌های نیترات در جدول ۱ ارائه شده است. مقدار کلی نیترات برای گروه اول در محدوده ۳/۳۱ و ۳۷/۲۳ میلی‌گرم بر لیتر متغیر بوده و میانگین آن‌ها برابر ۲۰/۶۵ میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد. محدوده تغییرات نیترات برای گروه دوم بین ۱۰/۱۲ و ۳۳/۴۱ و با میانگین ۲۱/۵۱ میلی‌گرم بر لیتر تعیین شده است. برای هر دو گروه، کمترین غلظت نیترات در شمال

Table 1- Statistical properties of nitrate concentration in groundwater

جدول ۱- خصوصیات آماری غلظت نیترات در آب زیرزمینی

Nitrate dataset	Count	Minimum (mg/L)	Maximum (mg/L)	Mean (mg/L)
First group (September 2015)	22	3.31	37.23	20.65
Second group (September 2015)	18	10.12	33.41	21/51

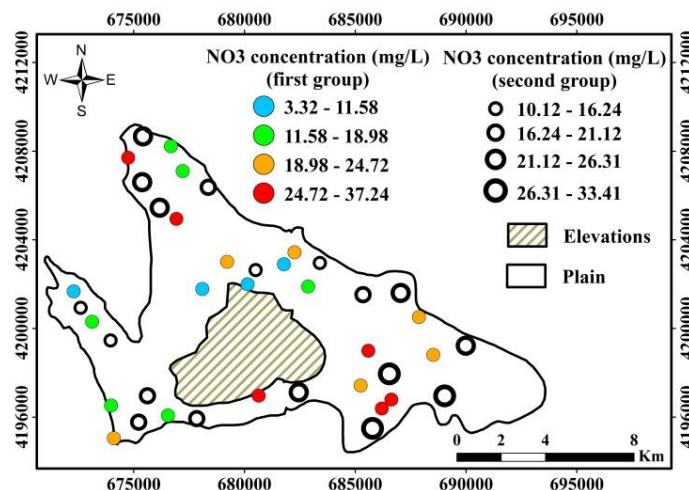


Fig. 3- Location of sampling sites and distribution of nitrate concentration for samples for the first and second groups

شکل ۳- موقعیت نقاط نمونه‌برداری و توزیع غلظت نیترات برای نمونه‌های گروه اول و دوم

Table 2- Ratings of DRASTIC index parameters (Aller et al., 1987)

جدول ۲- امتیازات پارامترهای شاخص دراستیک (Aller et al., 1987)

Range	Rate	Range	Rate	Range	Rate	Range	Rate
<b>Groundwater depth (m)</b>		<b>Topography (%)</b>		<b>Aquifer media</b>		<b>Impact of vadose zone</b>	
0-1.5	10	0-2	10	Massive Shale	2	Confining Layer	1
1.5-4.6	9	2-6	9	Metamorphic	3	Silt/Clay	3
4.6-9.1	7	6-12	5	Weathered Metamorphic	4	Shale	3
9.1-15.2	5	12-18	3	Alluvium	5	Limestone	6
15.2-22.8	3	18<	1	Sandstone, Limestone, Shale	6	Sandstone	6
22.8-30.4	2	<b>Hydraulic conductivity (m d<sup>-1</sup>)</b>		Massive Limestone	6	Sandstone, Shale	6
30.4<	1		0.04-4.1	1	Massive sandstone	6	Gravel, Sand, Clay
<b>Net recharge (mm)</b>		4.1-12.3	2	Gravel, Sand	8	Metamorphic	4
0-50.8	1	12.3-28.7	4	Basalt	9	Gravel, Sand	8
50.8-101.6	3	28.7-41	6	Karsts Limestone	10	Basalt	9
101.6-177.8	6	41-82	8			Karsts Limestone	10
177.8-254	8	82<	10				
254<	9						

بهره‌برداری، گزارش آزمون پمپاژ آبخوان، لاگ چاه‌های مشاهده‌ای و اکتشافی، اطلاعات ایستگاه‌های هواشناسی و نقشه رقمی ارتفاعی استفاده گردید.

لایه‌های رستری مربوط به هفت پارامتر دراستیک با وضوح تصویر ۵۰×۵۰ متر تهیه شد. لایه عمق آب زیرزمینی با استفاده از درون‌یابی IDW برای عمق آب زیرزمینی ۱۷ چاه مشاهده‌ای محاسبه و مطابق طبقه‌بندی استاندارد دراستیک رتبه‌بندی شد (شکل ۴- a). در تهیه لایه تغذیه خالص، دو منبع بارش و آب برگشتی کشاورزی به عنوان منابع عمده تغذیه‌کننده آبخوان در نظر گرفته شد و برای هر یک به صورت جداگانه لایه رستری محاسبه گردید در نهایت با هم‌پوشانی دو لایه مذکور و رتبه‌دهی طبق طبقه‌بندی (Aller et al. 1987)، لایه تغذیه خالص به دست آمد (شکل ۴- b). لایه تغذیه حاصل از بارش، با استفاده از روش (Piscopo 2001)، امتیازات مربوطه (جدول ۳) و طبق رابطه ۳ به دست آمد:

$$R=S+Ra+In \quad (3)$$

که در رابطه ذکر شده R مقدار تغذیه بر حسب میلی‌متر، S امتیاز برای شیب توپوگرافی بر حسب درصد، Ra امتیاز برای متوسط بارندگی سالانه بر حسب میلی‌متر و In امتیاز مقدار نفوذپذیری خاک می‌باشند.

در محاسبه تغذیه حاصل از آب برگشتی کشاورزی از رابطه ارائه شده توسط (Qian et al. 2012) استفاده شد (رابطه ۴). در این روش برای هر چاه مصرفی کشاورزی پلیگون تیسین رسم شده و میزان تغذیه برای هر پلیگون به طور جداگانه محاسبه می‌شود.

$$Q=\frac{W \times q}{F} \quad (4)$$

در رابطه بالا D, R, A, S, T, I و C، هفت پارامتر تأثیرگذار بر آسیب‌پذیری آب زیرزمینی هستند و اندیس‌های W و r به ترتیب نشان‌دهنده وزن و رتبه برای هر پارامتر می‌باشند.

### ۲-۵- مدل آسیب‌پذیری به روش دراستیک واسنجی شده

روش واسنجی بر ارتباط بین آسیب‌پذیری آبخوان و غلظت نیترات به عنوان داده کیفی نشان‌دهنده آلودگی سطح زمین یا نزدیک سطح زمین متکی است. واسنجی به صورت تصحیح ضرایب وزنی پارامترها انجام می‌گیرد. این روش نیز به طور کامل در محیط GIS قابل اجرا می‌باشد. غلظت نیترات اندازه‌گیری شده در نمونه‌های گروه اول، برای این منظور به کار گرفته شد. تصحیح فاکتورهای وزنی پارامترها در ابتدا با محاسبه ضرایب همبستگی اسپیرمن<sup>۱</sup> طبق رابطه (۲) برای هر مقدار امتیاز پارامتری با غلظت نیترات هر نقطه نمونه‌برداری انجام می‌گیرد. در نتیجه هفت ضریب همبستگی حاصل می‌گردد. جهت محاسبه ضرایب اصلاح شده، ضرایب همبستگی به مقیاس ۱ تا ۵ تغییر مقیاس می‌دهند. بدین ترتیب ضرایب وزنی برای هر پارامتر آسیب‌پذیری بهبود خواهد یافت.

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n D_i^2}{n(n^2-1)} \quad (2)$$

در رابطه فوق  $r_s$  ضریب همبستگی اسپیرمن، D تفاضل میان امتیاز پارامتر و غلظت نیترات و n تعداد نمونه می‌باشد.

### ۳- بحث و نتایج

#### ۳-۱- لایه‌های مؤثر در ارزیابی آسیب‌پذیری

در این مطالعه، جهت تهیه لایه‌های مؤثر در آسیب‌پذیری آب زیرزمینی از اطلاعات چاه‌های مشاهده‌ای سال آبی ۹۳-۹۲، اطلاعات چاه‌های

**Table 3- Recharge parameters ratings for rainfall (Piscopo, 2001)**

**جدول ۳- امتیازات پارامترهای تغذیه برای بارندگی (Piscopo, 2001)**

Soil infiltration		Rainfall (mm)		Slope (%)	
Intensity	Rate	Range	Rate	Range	Rate
High	5	850<	4	2>	4
Moderate to high	4	700-850	3	2-10	3
Moderate	3	500-700	2	10-33	2
Low	2	500>	1	33<	1
Very low	1				

این روند تطابق می‌تواند چنین بیان شود که پارامتر عمق آب زیرزمینی مساحت وسیعی از دشت را عمدتاً با نرخ‌های پایین می‌پوشاند به گونه‌ای که شرق و غرب منطقه نرخ پایین دارند؛ در حالی که سایر پارامترها مانند هدایت هیدرولیکی، منطقه غیراشباع، توپوگرافی و محیط خاک غالباً در شرق منطقه نرخ بالا و در غرب منطقه نرخ پایین دارند که هم‌پوشانی این پارامترها با وزن‌های گوناگون سبب شده است که تأثیر عمق آب زیرزمینی آشکار نگردد.

با توجه به محدوده شاخص آسیب‌پذیری دراستیک ارائه شده توسط (Aller et al., 1987)، آسیب‌پذیری منطقه به ۴ رده مابین بدون خطر تا کم-متوسط تقسیم می‌شود. جهت صحت‌سنجی از داده‌های نیترات گروه دوم استفاده شد و ضریب تعیینی با مقدار  $0/68$  به دست آمد (شکل ۶).

### ۳-۳- اجرای مدل دراستیک واسنجی شده

ضرایب همبستگی پارامترهای آسیب‌پذیری با غلظت نیترات و فاکتورهای وزنی اصلاح شده در جدول ۴ خلاصه شده است. براساس این نتایج، پارامترهای عمق آب زیرزمینی و تأثیر منطقه غیراشباع به ترتیب ضعیف‌ترین همبستگی ( $r_s = 0/042$ ,  $p < 0/05$ ) و قوی‌ترین همبستگی ( $r_s = 0/777$ ,  $p < 0/01$ ) را با غلظت نیترات نشان می‌دهند.

وزن‌های مربوطه پارامترهای توپوگرافی و محیط خاک افزایش یافته است که این افزایش وزن منعکس‌کننده افزایش تأثیر این عوامل در آسیب‌پذیری منطقه خواهد بود؛ در حالی که وزن سایر پارامترهای باقی‌مانده کاهش یافته است.

با استفاده از ضرایب وزنی پارامترهای اصلاح شده، نسخه واسنجی شده نقشه آسیب‌پذیری آب زیرزمینی تهیه شد (شکل ۷). براساس این نقشه، میزان شاخص آسیب‌پذیری در منطقه از  $66/56$  تا  $148$  برآورد شده است که طبق طبقه‌بندی (Aller et al., 1987)، میزان آسیب‌پذیری آبخوان در ۵ رده بین آسیب‌پذیری بدون خطر تا متوسط-زیاد قرار می‌گیرد که بیشترین آسیب‌پذیری در شرق و جنوب شرق و

در رابطه بالا،  $Q$  تغذیه سالانه حاصل از آب برگشتی کشاورزی در هر پلیگون ( $\text{mm/year}$ )،  $q$  حجم آب تخلیه‌شده سالانه ( $\text{mm}^3/\text{year}$ ) از چاه مصرفی جهت کشاورزی در سطح  $F$ ،  $F$  مساحت پلیگون ( $\text{mm}^2$ ) و  $\psi$  ضریب نفوذ آب کشاورزی بر حسب درصد می‌باشند.

با استفاده از لاگ چاه‌های مشاهده‌ای و اکتشافی موجود در منطقه مورد مطالعه، نوع و جنس محیط آبخوان، محیط خاک و منطقه غیراشباع مشخص گردید. همچنین، با استفاده از نقشه رقمی ارتفاعی، نقشه شیب استخراج و لایه توپوگرافی به دست آمد. سپس، لایه‌ها براساس روش استاندارد دراستیک طبقه‌بندی و ارزش‌گذاری شدند (شکل ۴- e, d, c, f). در تهیه لایه هدایت هیدرولیکی، ابتدا نقشه رستری قابلیت انتقال آبخوان با استفاده از نتایج آزمون پمپاژ محاسبه گردید.

سپس، با تقسیم نقشه قابلیت انتقال بر نقشه رستری هم ضخامت آبخوان در محیط ArcGIS مقدار هدایت هیدرولیکی هر نقطه محاسبه و با استفاده از رتبه‌های پیشنهادی روش دراستیک، لایه رتبه‌بندی هدایت هیدرولیکی منطقه مورد مطالعه استخراج شد (شکل ۴- f).

### ۳-۲- اجرای مدل دراستیک

جهت ارزیابی آسیب‌پذیری به روش اصلی دراستیک، وزن‌های معمول مربوط به هر پارامتر اعمال گردید و از تلفیق آن‌ها با استفاده از تابع هم‌پوشانی، نقشه نهایی روش معمول آسیب‌پذیری دراستیک به دست آمد (شکل ۵). مطابق این نقشه، میزان آسیب‌پذیری منطقه از  $61/4$  تا  $123/5$  برآورد گردید که بیش‌ترین آسیب‌پذیری در شمال غرب، اطراف کردکندی و نواحی شرقی منطقه دیده می‌شود؛ در حالی که کم‌ترین آسیب‌پذیری در بخش غربی محدوده واقع شده است. با توجه به این که عمق آب زیرزمینی یکی از پارامترهای مهم و تأثیرگذار در شاخص دراستیک می‌باشد؛ ولی نقشه آسیب‌پذیری انطباق کمتری را با این پارامتر نشان می‌دهد و بیشتر با پارامترهای هدایت هیدرولیکی، منطقه غیراشباع، توپوگرافی و محیط خاک انطباق دارد.

نمونه‌های گروه دوم استفاده شد و مقدار ضریب تعیین برابر ۰/۷۹ به دست آمد (شکل ۸).

کمترین آن در غرب منطقه مطالعاتی واقع شده است. به منظور ارزیابی صحت آسیب‌پذیری دراستیک واسنجی شده از غلظت نیترات

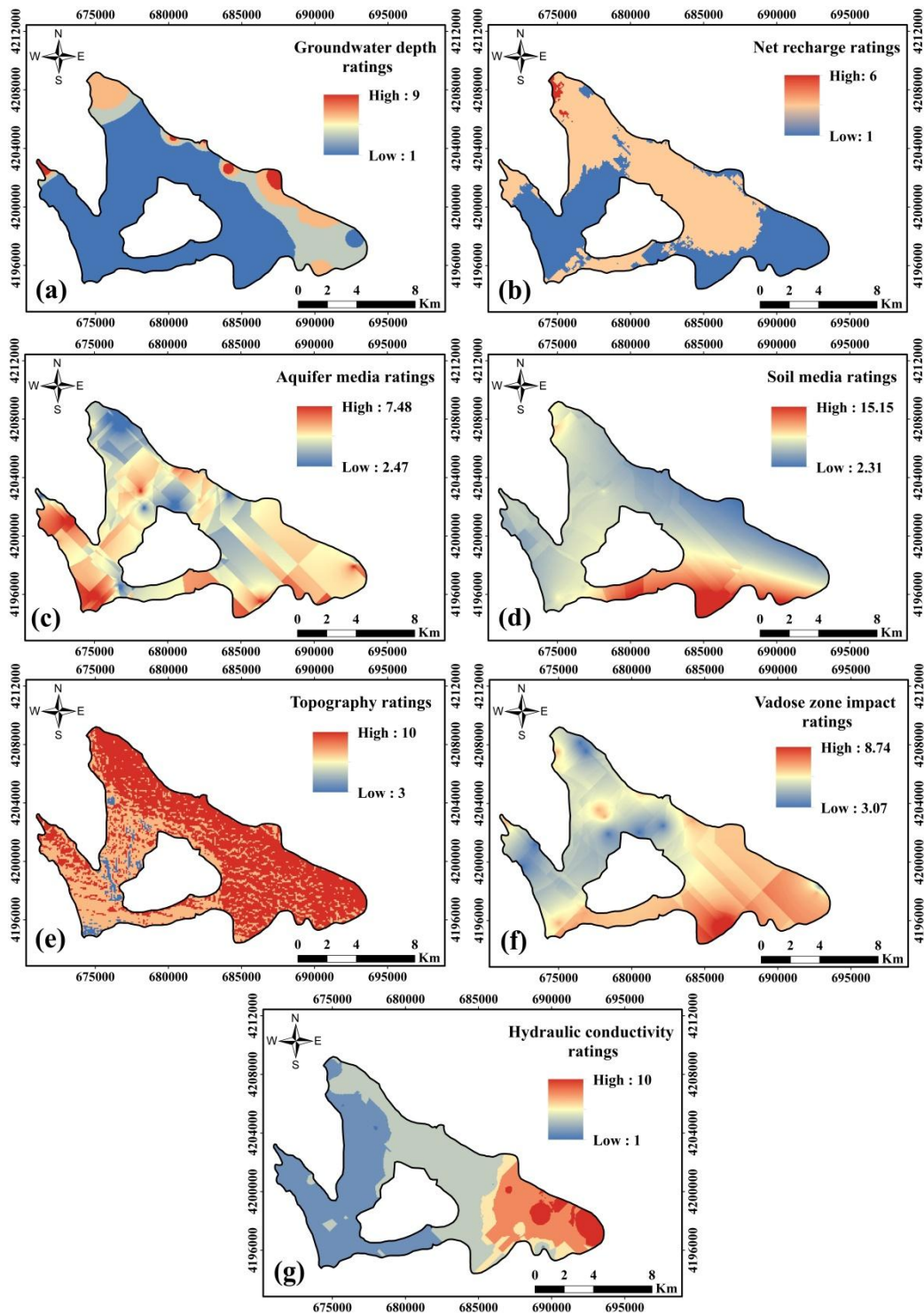


Fig. 4- Zoning map of the parameters; a) depth of groundwater, b) net recharge, c) aquifer media, d) soil media, e) topography, f) impact of vadose zone, and g) hydraulic conductivity

شکل ۴- نقشه پهنه‌بندی پارامترهای (a) عمق آب زیرزمینی، (b) تغذیه خالص، (c) محیط آبخوان، (d) محیط خاک، (e) توپوگرافی، (f) تأثیر منطقه غیراشباع، (g) هدایت هیدرولیکی



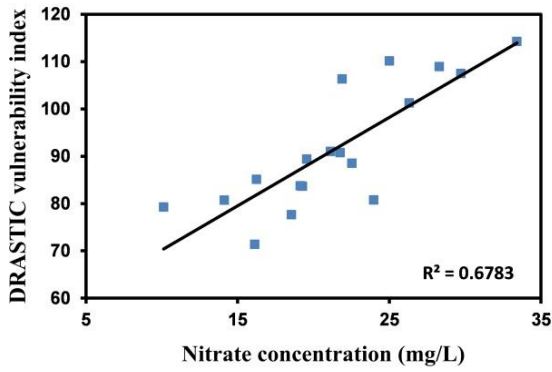


Fig. 6- Coefficient of determination between DRASTIC vulnerability index and nitrate concentration of the second group

شکل ۶- ضریب تعیین بین شاخص آسیب پذیری دراستیک و غلظت نیترات گروه دوم

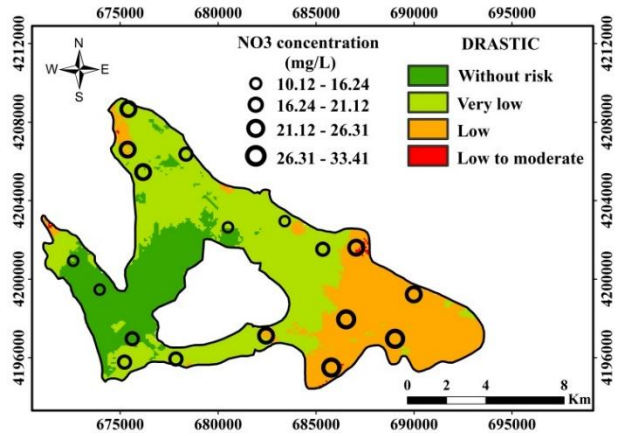


Fig. 5- DRASTIC vulnerability index map with nitrate concentration of the second group

شکل ۵- نقشه شاخص آسیب پذیری دراستیک به همراه غلظت نیترات گروه دوم

Table 4- Original and modified weighting coefficients and correlations of vulnerability parameters with nitrate data (\* correlation is significant at  $p > 0.05$ ; \*\* correlation is significant at  $p < 0.01$ )

جدول ۴- ضریب وزنی اصلی و اصلاح شده و همبستگی پارامترهای آسیب پذیری با داده نیترات (\* همبستگی در سطح ۰/۰۵+ معنی دار است؛ \*\* همبستگی در سطح ۰/۰۱+ معنی دار است)

Vulnerability parameter	Original weighting coefficient	Spearman's correlation coefficient	Modified weighting coefficient
Groundwater depth	5	0.042	1
Net recharge	4	0.147	1.572
Aquifer media	3	0.128	1.464
Soil media	2	0.553**	3.780
Topography	1	0.477*	3.366
Impact of vadose zone	5	0.777**	5
Hydraulic conductivity	3	0.250	2.131

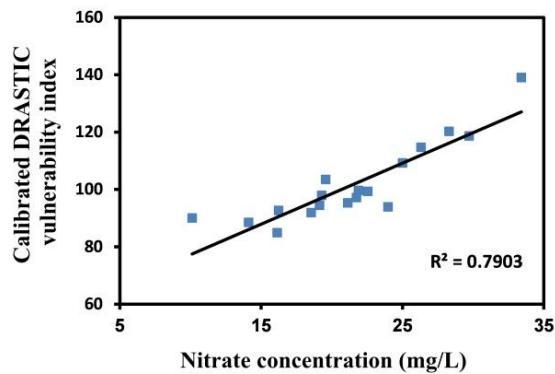


Fig. 8- Coefficient of determination between calibrated DRASTIC vulnerability index and nitrate concentration of the second group

شکل ۸- ضریب تعیین بین شاخص آسیب پذیری دراستیک و غلظت نیترات گروه دوم

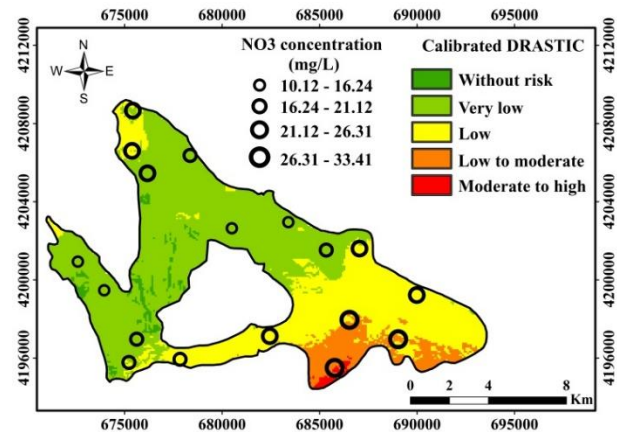


Fig. 7- Calibrated DRASTIC vulnerability index map with nitrate concentration of the second group

شکل ۷- نقشه آسیب پذیری شاخص دراستیک و اسنجی شده به همراه غلظت نیترات گروه دوم

#### ۴- نتیجه گیری

مقایسه بین غلظت نترات به عنوان داده کیفی آب زیرزمینی با نقشه آسیب پذیری دراستیک اولیه نشان داد که همبستگی نسبی بین آن‌ها وجود دارد؛ در حالی که در نقشه دراستیک واسنجی شده به وسیله اصلاح وزن پارامترها، این همبستگی افزایش یافته است. چنان که با اصلاح وزن لایه‌ها، ضرایب تعیین بین غلظت نترات اندازه‌گیری شده و رتبه‌بندی آسیب‌پذیری مربوطه از ۰/۶۸ به ۰/۷۹ ارتقاء یافته است بنابراین، تصحیح وزن لایه‌ها عملکرد مؤثری در ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان داشته است. براساس این نتایج، پارامترهای عمق آب زیرزمینی و تأثیر منطقه غیراشباع به ترتیب ضعیف‌ترین و قوی‌ترین همبستگی را با غلظت نترات نشان می‌دهند. وزن‌های مربوطه پارامترهای توپوگرافی و محیط خاک افزایش یافته است که این افزایش وزن منعکس کننده افزایش تأثیر این عوامل در آسیب‌پذیری منطقه خواهد بود؛ در حالی که وزن سایر پارامترهای باقی‌مانده کاهش یافته است. آسیب‌پذیری منطقه براساس نقشه دراستیک واسنجی شده با میزان شاخص ۶۶/۵۶ تا ۱۴۸/۸۹ در ۵ رده بین آسیب‌پذیری بدون خطر تا متوسط- زیاد قرار گرفت که حداقل شاخص آسیب‌پذیری در غرب و حداکثر آن در شرق و جنوب شرق دشت متمرکز شده است. در مطالعه حاضر تنها وزن پارامترها تصحیح شده است که در ادامه این پژوهش جهت افزایش دقت ارزیابی آسیب‌پذیری می‌توان به تصحیح رتبه‌ها نیز پرداخت. همچنین، با استفاده از روش‌های مختلف مانند روش تصمیم‌گیری چند معیاره<sup>۹</sup> و الگوریتم ژنتیک<sup>۱۰</sup> می‌توان به تصحیح وزن پارامترها ادامه داد تا با توجه به نتایج بهترین روش برای بهبود دراستیک در منطقه مورد مطالعه انتخاب گردد.

#### پی‌نوشت‌ها

- 1- DRASTIC
- 2- Rough
- 3- Fuzzy Logic (FL)
- 4- Neuro Fuzzy (NF)
- 5- Self-Organizing Map (SOM)
- 6- Supervised Committee Fuzzy Logic (SCFL)
- 7- Supervised Intelligence Committee Machine (SICM)
- 8- Spearman's Rho Correlation Coefficient
- 9- Analytical Hierarchy Process (AHP)
- 10- Genetic Algorithm (GA)

#### ۵- مراجع

- Aller L, Bennett T, Lehr J H, Petty R J, Hackett G (1987) DRASTIC: A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. EPA 600/2-87-035. Ada, Oklahoma: U.S. Environmental Protection Agency
- Almasri M N (2008) Assessment of intrinsic vulnerability to contamination for Gaza coastal aquifer, Palestine. *Journal of Environmental Management* 88:577-593
- Asghari Moghaddam A, Fijani E, Nadiri A (2010) Groundwater vulnerability assessment using GIS-based DRASTIC model in the Bazargan and Poldasht plans. *Journal of Environmental Studies* 52:55-64 (In Persian)
- Asghari Moghaddam A, Fijani E, Nadiri A (2015) Optimization of DRASTIC model by artificial intelligence for groundwater vulnerability assessment in Maragheh- Bonab plain. *Journal of Geoscience* 94:169-176 (In Persian)
- Babiker I S, Mohamed M M A, Hiyama T, Kato K (2005) A GIS-based DRASTIC model for assessing aquifer vulnerability in Kakamigahara, Heights, Gifu Prefecture, central Japan. *Science of the Total Environment* 345:127-140
- Barzegar R, Asghari Moghaddam A, Nadiri A, Fijani E (2015) Using different fuzzy logic methods to optimize DRASTIC model, case study: Tabriz plain aquifer. *Journal of Geoscience* 95:211-222 (In Persian)
- Dixon B (2009) A case study using SVM, NN and logistic regression in a GIS to predict wells contaminated with Nitrate-N. *Hydrogeology Journal* 17:1507-1520
- Gogu R C, Dassargues A (2000) Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods. *Environmental Geology* 39:549-559
- Hamza M H, Maâlej A, Ajmi M, Added A (2010) Validity of the vulnerability methods DRASTIC and SI applied by GIS technique to the study of diffuse agricultural pollution in two phreatic aquifers of a semi-arid region (Northeast of Tunisia). *AQUAmundi* (2010) - Am01009:057-064
- Jafarighariehali A, Kazemi Gh A, Hafezimoghadas N, Mosaviasterabadi S S (2012) Application of GIS in the study of groundwater pollution in urban areas (case study: Mashhad city). *Iran-Water Resources Research* 8(2):80-86 (In Persian)
- Javanmard F Z, Mahdavi M, Malek M R, Keirkhah Zarkesh M M (2013) Modeling of groundwater vulnerabilities Uncertainty using GIS & rough set. *Iran-Water Resources Research* 10(1):26-38 (In Persian)

Alizadeh Z (2008) Investigation of hydrogeology and hydrogeochemistry of aquifer in Bilverdi- Duzdozan plains. M.Sc. Thesis, Tabriz University, 206 p (In Persian)

- Qian H, Li P, Howard K W, Yang C, Zhang X (2012) Assessment of groundwater vulnerability in the Yinchuan Plain, Northwest China using OREADIC. *Environmental Monitoring and Assessment* 184(6):3613-3628
- Rezaei F, Safavi H R, Ahmadi A (2013) Groundwater vulnerability assessment using fuzzy logic: a case study in the Zayandehrood aquifers, Iran. *Environmental Management* 51(1):267-277
- Rezaei F, Ahmadzadeh M R, Safavi H R (2017) SOM-DRASTIC: using self-organizing map for evaluating groundwater potential to pollution. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 31(8):1941–1956
- Secunda S, Collin M L, Melloul A J (1998) Groundwater vulnerability assessment using a composite model combining DRASTIC with extensive agricultural land use in Israel's Sharon region. *Journal of Environmental Management* 54:39-57
- Stigter T Y, Ribeiro L, Carvalho Dill A M M (2006) Evaluation of an intrinsic and a specific vulnerability assessment method in comparison with groundwater salinisation and nitrate contamination levels in two agricultural regions in the south of Portugal. *Hydrogeology Journal* 14:79-99
- Vrba J, Zoporotec A (1994) Guidebook on mapping groundwater vulnerability. *International Contributions to Hydrogeology*. Verlag Heinz Heise GmbH and Co. KG
- Kihumba A, Vanclooster M, Longo J N (2017) Assessing groundwater vulnerability in the Kinshasa region, DR Congo, using a calibrated DRASTIC model. *Journal of African Earth Sciences*, 126:13-22
- McLay C D A, Dragten R, Sparling G, Selvarajah N (2001) Predicting groundwater nitrate concentrations in a region of mixed agricultural land use: a comparison of three approaches. *Environmental Pollutants* 115:191-204
- Nadiri A A, Gharekhani M, Khatibi R, Asghari Moghaddam A (2017a) Assessment of groundwater vulnerability using supervised committee to combine fuzzy logic models. *Environmental Science and Pollution Research* 1-16
- Nadiri A A, Gharekhani M, Khatibi R, Sadeghfam S, Asghari Moghaddam, A (2017b) Groundwater vulnerability indices conditioned by Supervised Intelligence Committee Machine (SICM). *Science of the Total Environment* 574:691-706
- Panagopoulos G, Antonakos A, Lambrakis N (2006) Optimization of DRASTIC model for groundwater vulnerability assessment, by the use of simple statistical methods and GIS. *Hydrogeology Journal* 14:894-911
- Piscopo G (2001) Groundwater vulnerability map. Explanatory notes, Castlereagh Catchment, NSW, Department of Land and Water Conservation, Australia