



Evaluation of Vulnerability of Urmia Plain Groundwater Pollution Using Original and Modified DRASTIC Models

M. Masud Lak¹, J. Azizi Mobaser^{2*}
and A. Rasoulzadeh³

Abstract

Assessment of groundwater vulnerability to pollution is a proper tool for groundwater protection. In this study, the modified version of DRASTIC model versus the original DRASTIC model was used to investigate the vulnerability potential of Urmia groundwater which has a potential for contamination due to various industrial and agricultural activities. Precision to this model was achieved based on the revising of the ratings and weights of various factors using correlation methods in GIS environment and taking into account the correlation with the concentration of groundwater nitrate. The results showed that aquifer environment (A) did not have a significant correlation with nitrate concentration and was accordingly eliminated from the initial equation. The highest and lowest significant correlation was respectively found between soil factors (s) and depth to groundwater (D) and weighed 5 and 2.7, respectively. The correction of ratings and weights led to improved zoning map with an increased correlation of DRASTIC index with nitrate concentration versus the original DRASTIC by 11%. Based on the modified index, 4.3, 30.8 and 64.9 percent of the Urmia Plain were ranked as low, very low and without risk of pollution, respectively.

Keywords: Modified DRASTIC, Groundwater, GIS, Vulnerability.

Received: February 13, 2018

Accepted: July 27, 2018

ارزیابی آسیب پذیری آلودگی آب زیرزمینی دشت ارومیه با استفاده از مدل‌های دراستیک و دراستیک اصلاح شده

مهسا مسعودلک^۱، جوانشیر عزیزی مبصر^{۲*}
و علی رسولزاده^۳

چکیده

ارزیابی پتانسیل آسیب پذیری آلودگی آب زیرزمینی برای حفاظت از آب‌های زیرزمینی ابزار مناسبی می‌باشد. آب زیرزمینی دشت ارومیه به علت وجود کارخانه‌های مختلف و کشاورزی، پتانسیل آلوده شدن را دارا است. در این تحقیق با استفاده از مدل دراستیک اصلاح شده و دراستیک آسیب‌پذیری آلودگی دشت ارومیه بررسی شد. اصلاح این مدل بر اساس بازبینی رتبه‌ها و وزن‌های فاکتورهای مختلف، با استفاده از روش‌های همبستگی و در محیط GIS و با در نظر گرفتن مقدار همبستگی با غلظت نیترات آب زیرزمینی انجام شد. نتایج نشان داد که محیط آبخوان (A) همبستگی معنی‌دار با غلظت نیترات ندارد و از معادله اولیه حذف گردید. بیش‌ترین و کم‌ترین همبستگی معنی‌دار را فاکتورهای جنس خاک (S) و عمق تا سطح ایستابی (D) داشتند و به ترتیب وزن‌های ۵ و ۲/۷ به آن‌ها اختصاص یافت. اصلاح رتبه‌ها و وزن‌ها منجر به بهبودی نتایج پهنه‌بندی شد، به گونه‌ای که همبستگی شاخص دراستیک با غلظت نیترات نسبت به دراستیک اولیه، حدود ۱۱ درصد افزایش یافت. بر اساس شاخص دراستیک اصلاح شده، ۴/۳، ۳۰/۸ و ۶۴/۹ درصد دشت ارومیه به ترتیب در محدوده‌ی آسیب‌پذیری کم، خیلی کم و بدون خطر آلودگی قرار داشت.

کلمات کلیدی: دراستیک، آب زیرزمینی، GIS، آسیب‌پذیری.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۶/۱۱/۲۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۷/۵/۵

1- M.Sc. Graduate in Irrigation and Drainage, Department of Water Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Water Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. Email: ja.mobaser22@gmail.com

3- Associate Professor, Department of Water Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

*- Corresponding Author

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی.

۲- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی.

۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی.

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

Azizi and (2011) Marofi et al. (2012) در دشت ملایر، Mohamadzade در دشت امامزاده جعفر گچساران، Tabarmaye and Vaezi Hir (2013) در دشت تبریز و Salimi et al. (2014) در دشت اصفهان، Samadi (2015) در دشت کاشان، Niknam et al. (2007) در دشت تهران-کرج، Yaghoubi gardvisheh and Asgharimoghadam (2018) بخشی از دشت ارومیه، Zirak Javanmard et al. (2014) در دشت ارومیه، Asghari Moghaddam et al. (2017) در دشت دوزوزان اشاره نمود. علاوه بر آن در نقاط مختلف دنیا نیز تحقیقات زیادی انجام شده که برخی از آن‌ها عبارتند از: Rahman (2008) در هندوستان، Leone et al. (2009) در مجارستان، Malik (2015) در Lathamani et al. (2015) در پاکستان، Victorine Neh et al. (2015) در کامرون، Baalousha (2016) در قطر، Allouche et al. (2017) در تونس، Shrestha et al. (2017) در نپال. شاخص آسیب‌پذیری در مدل دراستیک با استفاده از دو بخش مجزا شامل هفت پارامتر هیدرولوژیکی و وزن‌های مربوطه محاسبه می‌شود که از مجموع حاصل ضرب رتبه هر پارامتر هیدرولوژیکی در وزن مربوطه به دست می‌آید (Aller et al., 1987). با توجه به این که این شاخص، آسیب‌پذیری ذاتی هر دشت را نسبت به پتانسیل آلودگی آب زیرزمینی محاسبه می‌کند و ویژگی‌های ذاتی و وزن هر پارامتر در جاهای مختلف یکسان نیست، بنابراین بازبینی صحیح در مقادیر مربوط به رتبه و وزن هر پارامتر نسبت به مقادیر اولیه، در هر منطقه می‌تواند نتایج مناسب‌تری را ارائه دهد. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش استفاده از منطق فازی (Rezaei et al., 2013) روش هوش مصنوعی (Rezaei et al., 2017) و همچنین روشی که توسط Kihumba et al. (2017) و Panagopoulos et al. (2006) ارائه شده اشاره نمود. در این روش مقادیر مربوط به وزن‌ها و رتبه‌ها بر اساس شاخص آلودگی آب زیرزمینی اصلاح می‌گردند. شاخص آلودگی مورد استفاده در این تحقیق غلظت نیترات می‌باشد، و علت انتخاب این شاخص به دلیل واقعیتی است که نشان دهنده‌ی آلودگی ناشی از فعالیت‌های انسانی و همچنین در تحقیقات زیادی این پارامتر و پارامترهای دیگری چون پتاسیم و کلر به عنوان شاخص کیفیت آب زیرزمینی معرفی شده‌اند (Panagopoulos et al., 2006). همان‌گونه که اشاره شد در حالت کلی رفع آلودگی آب‌های زیرزمینی بسیار پرهزینه و زمان‌بر می‌باشد؛ لذا تعیین مناطق آسیب‌پذیر و جلوگیری از آلودگی آبخوان این مناطق امری ضروری می‌باشد. در دشت ارومیه، به علت وجود زمین‌های کشاورزی و کارخانه‌های صنعتی و

آب‌های زیرزمینی به عنوان منبع عظیم آب شیرین بوده و مقدار قابل توجهی از آب مصرفی کل جهان از آن تامین می‌گردد. با افزایش روزافزون برداشت آب، سطح آب زیرزمینی در بسیاری از دشت‌ها در کشور به حد بحرانی رسیده است؛ این در حالی است که بخش قابل ملاحظه‌ای از مصارف شرب، کشاورزی و صنعت از آب زیرزمینی تأمین می‌گردد. بنابراین حفاظت کیفی و مدیریت آب‌های زیرزمینی از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است (Mirzaei et al., 2012). رفع آلودگی آب زیرزمینی بسیار پرهزینه و گاهی غیرممکن است. روش مناسب‌تر، جلوگیری از آلوده شدن آب‌های موجود یا جلوگیری از ورود آلودگی به مناطقی است که باعث آلودگی آب می‌شود. برای این کار می‌توان نقشه استعداد آسیب‌پذیری منطقه به آلودگی را تهیه کرد تا بر روی این مناطق مستعد مدیریت خاص اعمال گردد (Stournaras and Koutsis, 2011). مفهوم آسیب‌پذیری برای اولین بار در اواخر سال ۱۹۶۰ میلادی در فرانسه برای آگاهی بخشی در مورد آلودگی آب زیرزمینی ارائه شد (Vrba, 1994). آسیب‌پذیری را می‌توان به عنوان امکان نفوذ و پخش آلاینده‌ها از سطح زمین به سیستم آب زیرزمینی تعریف کرد. آسیب‌پذیری آبخوان، توان و استعداد ذاتی آبخوان را برای نفوذ و پخش آلاینده‌ها از سطح زمین به سیستم آب زیرزمینی نشان می‌دهد. به طوری که آلودگی تولید شده در سطح زمین بتواند به آب زیرزمینی برسد و در آن پراکنده شود (Besien, 2002). آسیب‌پذیری نوعی خصوصیت نسبی، بدون بعد و غیرقابل اندازه‌گیری است و به ویژگی‌های آبخوان، محیط زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی بستگی دارد (Antonakos and Lambrakis, 2007). روش‌های مختلفی برای تعیین پتانسیل آسیب‌پذیری آبخوان وجود دارد که از جمله می‌توان به روش‌های هم‌پوشانی شامل GOD، DRASTIC، AVI، SINTAC COP و روش‌های ریاضی و روش‌های آماری اشاره کرد (Vlaicu and Muteanu, 2008). روش‌های هم‌پوشانی بر پایه‌ی تلفیق لایه‌های حاصل از پارامترهای مختلف بنا نهاده شده است و اساس کار یکسانی دارند. از کاربردی‌ترین روش‌های شاخص هم‌پوشانی، روش DRASTIC می‌باشد که توسط سازمان حفاظت محیط زیست ایالات متحده آمریکا جهت تعیین پتانسیل آلودگی آب زیرزمینی ارائه شده است. استفاده وسیع از این شاخص در نقاط مختلف دنیا و دشت‌های زیادی از کشور ادعای کاربردی بودن آن را اثبات می‌کند. از جمله این مطالعات که با استفاده از مدل DRASTIC آسیب‌پذیری آب زیرزمینی دشت‌ها در برابر آلودگی را مورد ارزیابی قرار دادند می‌توان به تحقیق (Amir Ahmadi et al. 2012) در دشت داورزن سبزوار، (Mirzaei et al. 2012) در دشت شهرکرد،

دوم را دارد.

۲-۲- مدل دراستیک

روش دراستیک جزء روش‌های رتبه و وزن‌دهی می‌باشد و برای تولید رتبه آسیب‌پذیری برای نقاط مختلف با ترکیب چندین لایه موضوعی طراحی شده‌اند. یکی از بزرگ‌ترین مزایای روش‌های رتبه‌دهی انجام بررسی با استفاده از تعداد بیش‌تری از لایه‌های ورودی است که تأثیر خطاها و یا عوامل نامعلوم را بر روی خروجی نهایی محدود می‌کند (Rosen, 1994). عبارت دراستیک مخفف پارامترهایی است که در سیستم هیدروژئولوژیکی کنترل‌کننده‌ی آلودگی آب زیرزمینی می‌باشد. این پارامترها شامل: عمق آب زیرزمینی D، تغذیه R، مواد تشکیل‌دهنده آبخوان A، نوع خاک S، توپوگرافی T، اثر منطقه غیراشباع I و هدایت هیدرولیکی آبخوان C می‌باشد. در این روش شاخص آسیب‌پذیری، از مجموع حاصل‌ضرب وزن و رتبه هفت پارامتر فوق‌الذکر مطابق رابطه‌ی ۱ به‌دست می‌آید (Beynen et al., 2012). رتبه‌ی مربوط به هر پارامتر بین ۱ تا ۱۰ و وزن هر پارامتر با توجه به اهمیت آن بین ۱ تا ۵ متغیر می‌باشد:

$$(DRASTIC)_i = W_D \times R_D + W_R \times R_R + W_A \times R_A + W_S \times R_S + W_T \times R_T + W_I \times R_I + W_C \times R_C \quad (1)$$

خشک‌شدن دریاچه‌ی ارومیه، امکان آلودگی آبخوان بسیار زیاد می‌باشد. هدف از این پژوهش، تعیین آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی دشت ارومیه با استفاده از روش دراستیک و دراستیک اصلاح شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۱-۲- مشخصات منطقه مورد تحقیق

دشت ارومیه در شمال غرب ایران و در استان آذربایجان غربی قرار دارد. این دشت از رودخانه‌های نازلوچای، روضه‌چای، شهرچای و باراندوزچای تغذیه می‌شود. دشت ارومیه در محدوده‌های بین عرض‌های جغرافیایی ۳۷ درجه و ۶ دقیقه تا ۳۸ درجه و طول‌های جغرافیایی ۴۴ درجه و ۲۰ دقیقه تا ۴۵ درجه و ۲۰ دقیقه واقع شده است که دارای مساحت ۱۷۷۳ کیلومتر مربع می‌باشد (شکل ۱).

بلندترین ارتفاع منطقه، کوه برده‌رش با ارتفاع ۳۶۰۸ متر از سطح دریا و پست‌ترین نقطه‌ی آن، سواحل دریاچه ارومیه به ارتفاع ۱۲۸۵ متر است. دما در این منطقه بین صفر تا ۲۰- درجه در فصل زمستان و تا ۴۰+ درجه در فصل تابستان تغییر می‌کند، همچنین با میانگین سالانه معادل ۳۹۸ میلی‌متر از نظر مقدار بارش در بین حوضه‌های ایران، مقام

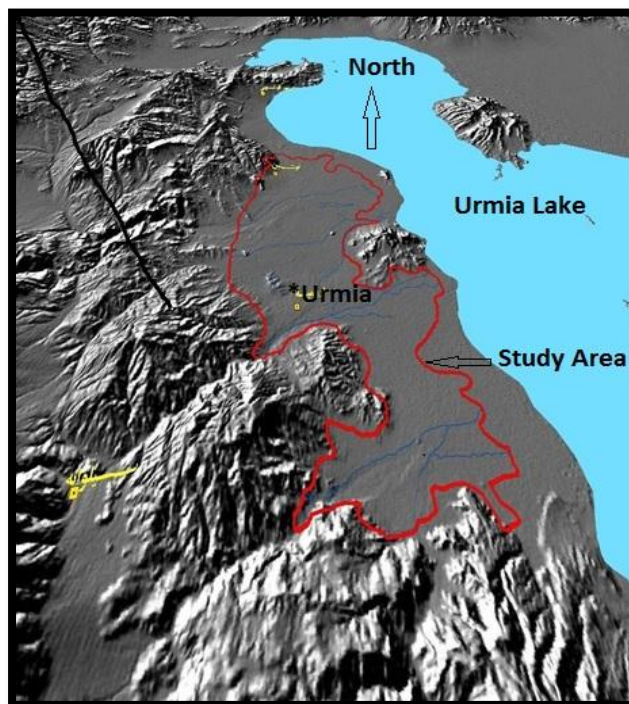


Fig. 1- The study area (Urmia plain)
شکل ۱- تصویری از محدوده مطالعاتی (دشت ارومیه)

۲-۳-۲- بازیابی وزن‌ها

گام بعد محاسبه‌ی وزن جدید برای هر پارامتر از مدل اصلی دراستیک است. اساس این مرحله با توجه به همبستگی بین هر پارامتر با غلظت نیترات برای نقاط موجود در دشت استوار است. مقدار هر فاکتور با توجه به یک مقیاس مشخص تغییر می‌کند از ضریب همبستگی تعریف شده توسط اسپیرمن استفاده شد (رابطه ۲)، که برای این‌گونه پارامترها در نظر گرفته شده است (Kendal, 1975):

$$r_s = 1 - [(6 \times \sum D^2) \div (n \times (n^2 - 1))] \quad (2)$$

در این رابطه r_s ضریب همبستگی اسپیرمن، D تفاوت رتبه‌ها و n تعداد رتبه‌ها می‌باشد. بعد از محاسبه‌ی ضریب همبستگی مذکور، چنانچه فاکتوری همبستگی قابل قبول با غلظت نیترات نداشته باشد مفهوم آن این است که تأثیری بر غلظت نیترات در منطقه‌ی مورد نظر را نخواهد داشت و از مدل اصلی دراستیک حذف می‌شود. سایر فاکتورها که دارای همبستگی معنی‌داری با غلظت نیترات دارند در معادله‌ی اولیه با تغییر وزن در نظر گرفته می‌شوند. به هر فاکتوری که بیش‌ترین ضریب همبستگی را داشته باشد، وزن ۵ (بالاترین وزن تعریف شده بر اساس مدل اصلی) اختصاص داده می‌شود. سایر وزن‌ها به صورت اعمال ضریبی از نسبت ضریب همبستگی فاکتور مورد نظر به ضریب همبستگی بیشینه در عدد ۵ محاسبه می‌شوند (Panagopoulos et al., 2006; Allouche et al., 2017).

۲-۴- اطلاعات مورد نیاز

برای انجام این تحقیق از اطلاعاتی مانند غلظت نیترات در نقاط مختلف دشت، اطلاعات نفوذپذیری، هدایت هیدرولیکی، مقادیر بارندگی و لاگ چاهک‌های مشاهدتی استفاده شد. با استفاده از لاگ‌های پیژومتری اطلاعاتی از قبیل فاصله تاسطح ایستابی (D)، جنس آبخوان (A)، نوع خاک (S) و جنس خاک ناحیه بالای سطح ایستابی (I) برای دشت ارومیه مشخص شد. غلظت نیترات با استفاده از اطلاعات ثبت شده‌ی تعداد ۲۰ چاهک مشاهداتی موجود در دشت به دست آمد. کلیه اطلاعات مورد نیاز از شرکت آب منطقه‌ای آذربایجان غربی اخذ گردیده است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تعیین آسیب‌پذیری با استفاده مدل اصلی دراستیک

همان‌گونه که تشریح شد شاخص دراستیک از هفت پارامتر مطابق با رابطه (۱) تشکیل شده است. برای تهیه نقشه عمق سطح ایستابی (D) با استفاده از اطلاعات اندازه‌گیری ماهانه چاهک‌ها و پیژومترهای اخذ

که در آن i (DRASTIC): مقدار نهایی شاخص دراستیک در پیکسل نام، w_j : وزن پارامتر j ، R_j : رتبه‌ی پارامتر j می‌باشد. با تهیه‌ی نقشه‌های رستری، پارامترهای دراستیک در محیط GIS و بکارگیری قابلیت Calculator Raster نرم‌افزار GIS می‌توان لایه‌های مختلف را تلفیق و نقشه‌ی پهنه‌بندی آسیب‌پذیری را تهیه نمود (Olusola Gabriel, 2013) دقت نقشه‌های پتانسیل آسیب‌پذیری آب زیرزمینی از طریق میزان همبستگی آن با نقشه توزیع مقدار نیترات انجام می‌شود. هریک از رتبه‌ها و وزن‌های فاکتورهای هفت‌گانه معرفی شده‌ی دراستیک بر میزان همبستگی با مقادیر نیترات تأثیرگذار هستند. بنابراین تصحیح رتبه‌ها و وزن‌ها منجر به افزایش دقت نقشه‌های پتانسیل آسیب‌پذیری آب زیرزمینی می‌شود. برای این منظور شاخص دراستیک مطابق روشی که (Allouche et al. 2017) و (Panagopoulos et al. 2006) ارائه نمودند، اصلاح گردید.

۲-۳- اصلاح مدل دراستیک

۲-۳-۱- بازیابی رتبه‌ها

بازنگری رتبه‌ی هر پارامتر را می‌توان با استفاده از میانگین هر کلاس از پارامترهای اولیه تعریف شده توسط مدل انجام داد. در ادامه این عمل با استفاده از آزمون آماری ناپارامتری ویلکاکسون (Wilcoxon, 1945) انجام می‌شود، که با توجه به این آزمون مشخص می‌گردد که میانگین دو طبقه همسایه از لحاظ آماری با هم تفاوتی دارند یا خیر. طبقه‌بندی‌های صورت گرفته برای پارامترهای ناپیوسته (نوع آبخوان، نوع خاک و منطقه غیراشباع) بدون توجه به انحراف‌ها و تفاوت‌های آماری، در دسته‌های موجود در محدوده‌ی مطالعات حفظ می‌شوند. در این تحقیق برای اجرایی نمودن مفاهیم فوق به شکل زیر مراحل بازنگری رتبه‌های پارامترها طبق دستورالعمل ارائه شده توسط (Allouche et al. 2017) و (Panagopoulos et al. 2006) انجام شد: ابتدا در محدوده مطالعات برای نقاط مشاهده‌ای بر طبق دستورالعمل ابتدایی مدل دراستیک تقسیم‌بندی انجام شد. سپس برای دسته‌های موجود میانگین غلظت نیترات محاسبه و در مقابل دسته‌ی مربوطه ثبت گردید. سپس بزرگ‌ترین غلظت نیترات برای هر دسته بالاترین رتبه‌ی آن پارامتر اختصاص یافت. در گام بعدی با توجه به نسبت غلظت نیترات آن دسته بر غلظت نیترات بیشینه پارامتر مورد نظر رتبه‌بندی جدید انتخاب گردید.

بارندگی ایجاد شده و معیارهای جدول (۱) پهنه‌بندی تغذیه خالص (R) برای دشت ارومیه تهیه گردید (شکل ۳). مقدار تغذیه خالص برای دشت ارومیه بین صفر الی ۱۸۰ میلی‌متر در سال محاسبه شد، که با توجه جدول ۱ سه رتبه‌ی ۱، ۳ و ۵ به آن اختصاص یافت.

لایه سوم تهیه شده، رتبه‌بندی محیط آبخوان (A) در محدوده مطالعاتی بود که با توجه به جنس محیط آبخوان در سه رتبه به ارزش ۳، ۶ و ۸ تقسیم‌بندی شد. بخش عمده‌ی دشت دارای رتبه ۶ بود و تنها بخش کوچکی دارای رتبه ۸ در حاشیه دریاچه ارومیه قرار دارد (شکل ۴). علاوه بر جنس محیط آبخوان، جنس خاک بالای آن نیز بر عبور جریان آب و در نهایت انتقال آلودگی مؤثر است. بنابر این رتبه‌بندی جنس خاک (S) برای دشت ارومیه با استفاده از نقشه خاک موجود (نقشه با مقیاس ۱:۲۰۰۰ تهیه شده مطالعات کشاورزی) انجام شد (شکل ۵).

شده از شرکت آب منطقه‌ای آذربایجان غربی و با بررسی همگنی و بازسازی (در صورت نیاز)، تغییرات عمق سطح ایستابی در دشت ارومیه مشخص گردید، که عمق سطح ایستابی برای دشت ارومیه در دامنه صفر الی ۵۶ متر متغیر بود (شکل ۲). بیش‌ترین مقدار عمق سطح ایستابی در قسمت‌های غربی و شمال غربی دشت ارومیه مشاهده شد، که مقدار ۳۰ الی ۵۶ متر را به خود اختصاص داد. کم‌ترین مقدار عمق سطح ایستابی در مناطق مرکزی دشت ارومیه و قسمت‌هایی از اطراف دریاچه ارومیه (شرق دشت) مشخص گردید (۰ الی ۲ متر). همچنین بر اساس شرایط اولیه تعریف شده برای مدل دراستیک (جدول ۱) عمق سطح ایستابی برای دشت ارومیه در ۷ رتبه تقسیم‌بندی شد. در این روش پارامتر تغذیه خالص با توجه به میزان بارندگی، شیب و نفوذپذیری و براساس روش Piscoپو به دست می‌آید. برای محاسبه مقدار تغذیه، ابتدا مدل رقمی ارتفاعی دشت برای تعیین وضعیت شیب منطقه تهیه شد، سپس با استفاده از نقشه نفوذپذیری و

Table1- Rate of Recharge for Urmia plain

جدول ۱- رتبه تغذیه برای دشت ارومیه

Slope		Precipitation		Infiltration		Recharge	
Slope (%)	Factor	Precipitation (mm)	Factor	Range	Factor	Net recharge	Rating
< 2	4	< 500	1	Very slow	1	11 – 13	10
2 – 10	3	500 – 700	2	Slow	2	9 – 11	8
10 – 33	2	700 – 850	3	Moderate	3	7 – 9	5
> 33	1	> 850	4	Mod-high	4	5 – 7	3
				High	5	3 – 5	1

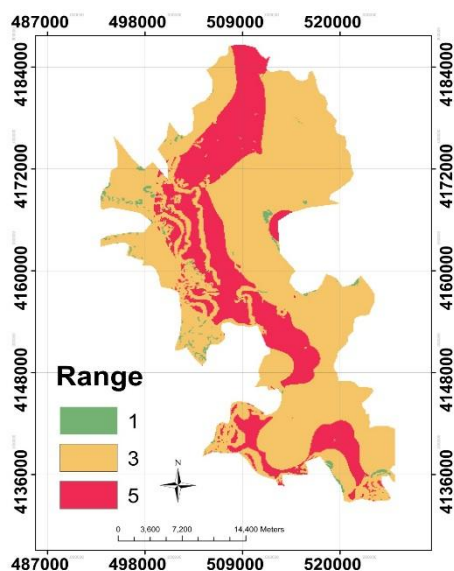


Fig. 3- Rating of net recharge (R) for Urmia plain
شکل ۳- رتبه‌بندی تغذیه خالص (R) دشت ارومیه

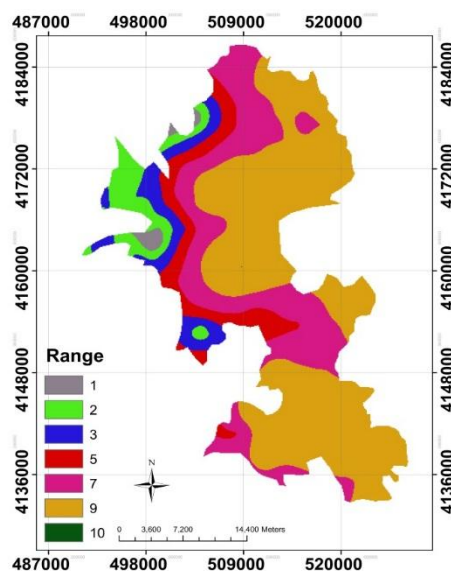


Fig. 2- Rating of depth to water table (D) for Urmia plain
شکل ۲- رتبه‌بندی فاصله سطح زمین تا سطح ایستابی (D) دشت ارومیه

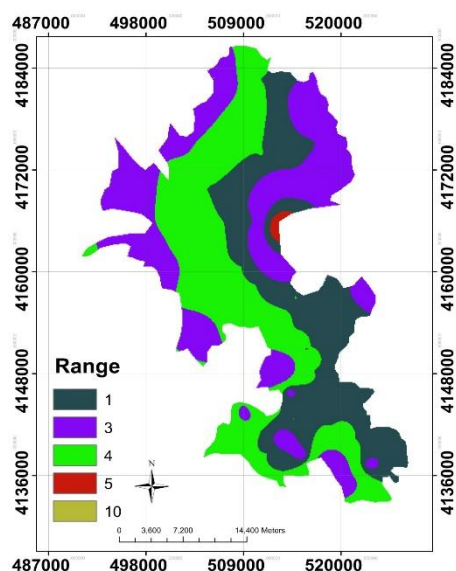


Fig. 5- Rating of Soil type (S) for Urmia plain
شکل ۵- رتبه‌بندی جنس خاک (S) دشت ارومیه

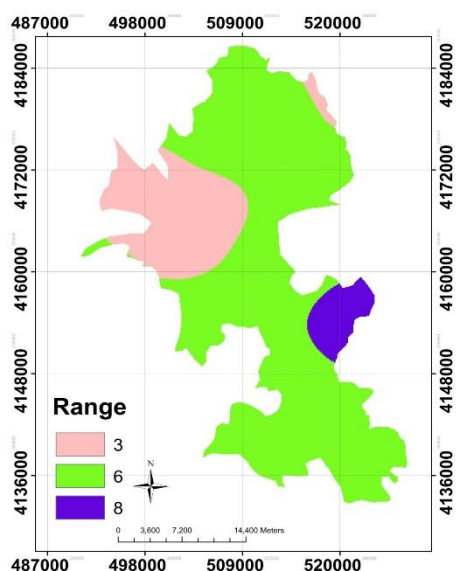


Fig. 4- Rating of Aquifer type (A) for Urmia plain
شکل ۴- رتبه‌بندی محیط آبخوان (A) دشت ارومیه

از سطح زمین به آب زیرزمینی نقش مهمی دارد. بنابراین در مدل دراستیک به عنوان یک لایه تأثیرگذار به صورت یک لایه مستقل و با نماد (I) در نظر گرفته شده است. لایه‌بندی محیط غیر اشباع در دشت ارومیه با استفاده از اطلاعات به دست آمده از لاگ‌های اکتشافی و مشاهده‌ای، برحسب نسبت جنس مواد تشکیل دهنده محیط غیر اشباع، رتبه مربوط به هر لاگ محاسبه شد. سپس براساس مختصات جغرافیایی مربوطه، به یک لایه تبدیل شده و با استفاده از الگوریتم‌های درون‌یابی به کل منطقه تعمیم داده شد. در نتیجه آن، دشت ارومیه از این نظر به دو لایه با رتبه‌های ۱ و ۳ تفکیک شد که تنها بخش کوچکی در جنوب دشت دارای رتبه‌ی ۳ بود و سایر قسمت‌های دشت حائز رتبه‌ی ۱ تشخیص داده شد (شکل ۷). آخرین لایه‌ای که در مدل دراستیک تعریف شده، هدایت هیدرولیکی به عنوان مهم‌ترین مشخصه هیدرودینامیک خاک است و نیاز است که محدوده‌ی مطالعات بر این اساس، لایه‌بندی گردد. برای تهیه این لایه از اطلاعات به دست آمده از آزمون پمپاژ که در سنوات قبل انجام شده بود، همانند سایر لایه‌ها بعد از درون‌یابی لایه مربوطه تشکیل گردید. دشت ارومیه با استفاده از اطلاعات موجود برای هدایت هیدرولیکی (C) لایه‌بندی، که در نتیجه آن کل دشت تنها در یک لایه (اعداد موجود در دامنه ۰/۱ تا ۱/۱۵ متر بر روز متغیر هستند؛ اما طبق شرایط اصلی مدل دراستیک در یک لایه قرار گرفتند) تقسیم‌بندی شد (شکل ۸). با تکمیل لایه‌های مختلف با استفاده از برهم‌نهی لایه‌ها و استفاده از رابطه (۱) نقشه پتانسیل آسیب‌پذیری آلودگی آب زیرزمینی دشت ارومیه بر اساس دستورالعمل اولیه تهیه شد (شکل ۹). با توجه به نقشه پهنه‌بندی،

در نتیجه این رتبه‌بندی دشت به پنج رتبه از ۱ تا ۱۰ گروه‌بندی گردید، که به ترتیب بخش‌هایی از دشت که دارای رتبه ۴، ۱ و ۳ بودند بیش‌ترین سهم و آن قسمت که دارای رتبه ۱۰ بود کم‌ترین سطح را به خود اختصاص داد. در دشت‌ها عامل حرکت آب بین دو نقطه اختلاف ارتفاع بین آن دو نقطه است که در قالب شیب طولی تعریف می‌شود، بنابراین در صورت شیب زیاد فرصت برای نفوذ نبوده و بیش‌تر جریان به صورت رواناب خواهد بود. در مقابل در صورت عدم شیب، سرعت جریان کاهش یافته و فرصت نفوذ افزایش می‌یابد که شرایط برای نفوذ فراهم می‌شود. با این تفاسیر یکی از پارامترهای مهم در مدل دراستیک شیب محدوده مطالعاتی است که به وسیله پارامتر توپوگرافی (T) تعریف شده و لایه‌بندی مربوطه ایجاد شد (شکل ۶).

برای تهیه این لایه، ابتدا مدل رقومی ارتفاعی منطقه، از فایل‌های رقومی با مقیاس سازمان نقشه‌برداری کشور تهیه گردید، سپس در محیط ArcGIS ویرایش شده و در قسمت تحلیل‌گر مکانی با ابزار تعیین شیب، شیب منطقه استخراج و با توجه به رتبه‌های مدل دراستیک لایه توپوگرافی منطقه ایجاد گردید. بر اساس نقشه لایه‌بندی ایجاد شده برای توپوگرافی دشت ارومیه و متناسب با مدل اصلی دراستیک، تعداد پنج لایه با رتبه‌های ۱، ۳، ۵، ۹ و ۱۰ ایجاد گردید. لایه‌های توپوگرافی با رتبه ۱۰ و ۹ به ترتیب حدود ۸۰ و ۱۵ درصد از محدوده‌ی دشت ارومیه را به خود اختصاص دادند و از این نظر دشت، پتانسیل بالایی برای آلوده شدن دارد. محیط غیر اشباع به عنوان لایه واسط بین خاک سطحی و لایه آبخوان است، که برای انتقال آلودگی

به نتایج مشخص شد که اطراف دریاچه ارومیه، به نسبت سایر مناطق دشت ارومیه پتانسیل آسیب پذیری بالاتری دارد و بیش تر مستعد آلوده شدن می باشد. مناطق غربی دشت ارومیه که شیب نسبتاً بیش تری دارد از احتمال کمتری برای آلوده شدن آب های زیرزمینی برخوردار می باشد.

۱۱/۹۶ درصد از مساحت کل دشت ارومیه دارای شاخص دراستیک بین ۹۹ الی ۱۱۹ بود که دارای آسیب پذیری کم که متعلق به قسمت شرقی دشت بود. ۶۱/۴۸ درصد از مساحت کل دشت ارومیه دارای شاخص دراستیک بین ۷۹ الی ۹۹ که از آسیب پذیری خیلی کم برخوردار بود. ۲۶/۵۶ درصد از مساحت دشت ارومیه دارای شاخص دراستیک بین ۳۳ الی ۷۹ بود که بدون خطر آلودگی تشخیص داده شد. با توجه

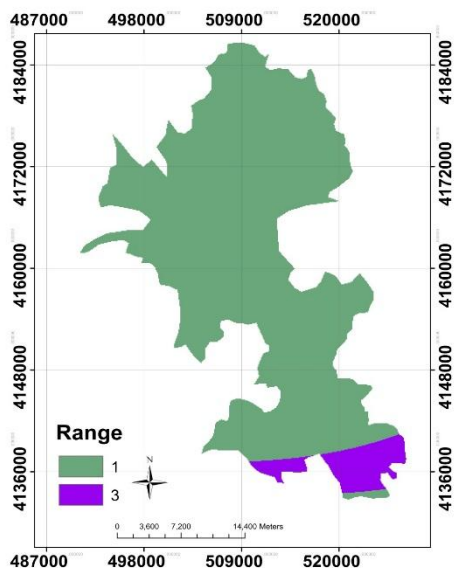


Fig. 7- Rating Impact of the vadose zone (I) for Urmia plain

شکل ۷- رتبه بندی محیط غیراشباع (I) دشت ارومیه

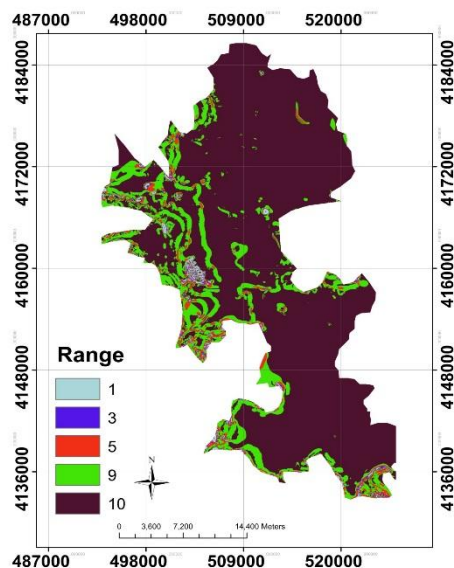


Fig. 6- Rating of Topography (T) for Urmia plain

شکل ۶- رتبه بندی توپوگرافی (T) دشت ارومیه

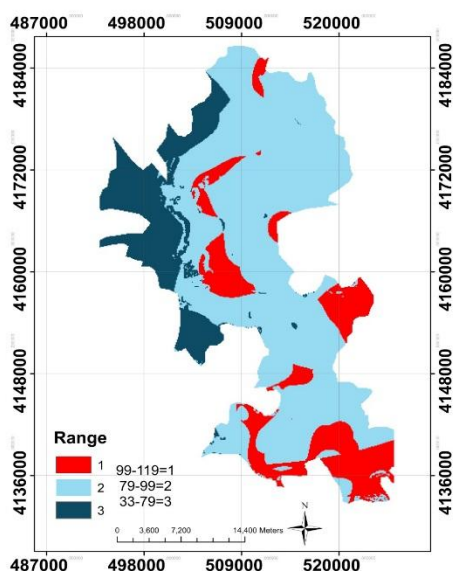


Fig. 9- Mapping of original DRASTIC for Urmia plain

شکل ۹- پهنه بندی شاخص دراستیک دشت ارومیه

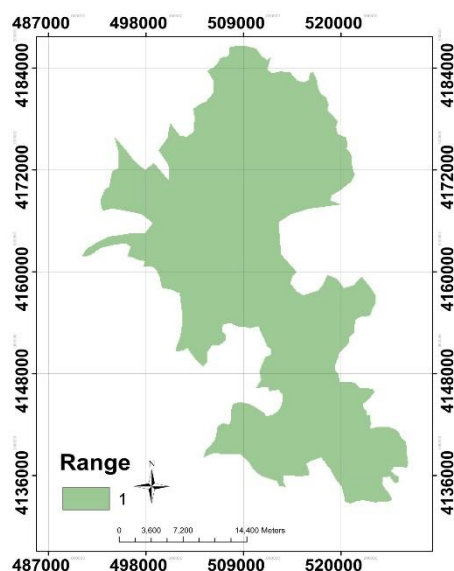


Fig. 8- Rating of hydraulic conductivity (C) for Urmia

شکل ۸- رتبه بندی هدایت هیدرولیکی (C) دشت ارومیه

غلظت نیترات بالاتری هست. از طرفی تقریباً شرایط آلودگی آب زیرزمینی در شمال و جنوب دشت مشابه بوده و در طبقات غلظت پایین نیترات قرار دارد (شکل ۱۰). همان طور که اشاره شد، از جمله کارکرد پهنه‌بندی نیترات، تدقیق نقشه آسیب‌پذیری با شرایط واقعی است. برای این منظور همبستگی اعداد مربوط به شاخص دراستیک با استفاده از روش اسپیرمن، با اعداد غلظت نیترات انجام شد (شکل ۱۲). نتایج نشان داد بین غلظت نیترات اندازه‌گیری شده و اعداد شاخص دراستیک در سطح احتمال ۵ درصد، همبستگی معنی‌داری با ضریب همبستگی ۰/۵۱۴ وجود دارد.

لازم به ذکر است که، پتانسیل بالای آسیب‌پذیری آلودگی آب زیرزمینی به معنی آلوده بودن آب زیرزمینی نیست، بنابراین نیاز است آلودگی آب زیرزمینی بررسی شود که برای این منظور با استفاده از اطلاعات موجود غلظت نیترات که نشان از فعالیت‌های انسانی، اعم از کشاورزی یا مسکونی است در قالب نقشه پهنه‌بندی نیترات دشت ارومیه تهیه شد (شکل‌های ۱۰ و ۱۱).

با توجه به نقشه پهنه‌بندی نیترات دشت ارومیه، مشخص گردید که شرق (حاشیه دریاچه ارومیه) و غرب دشت نسبت به نوار مرکزی دارای

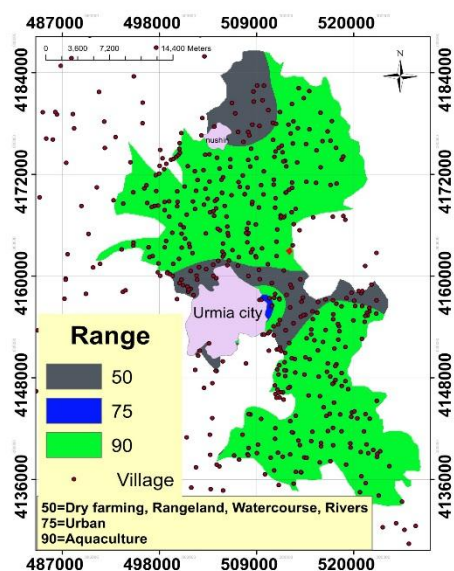


Fig. 11- Zoning of land use for Urmia plain
شکل ۱۱- پهنه‌بندی کاربری اراضی در دشت ارومیه

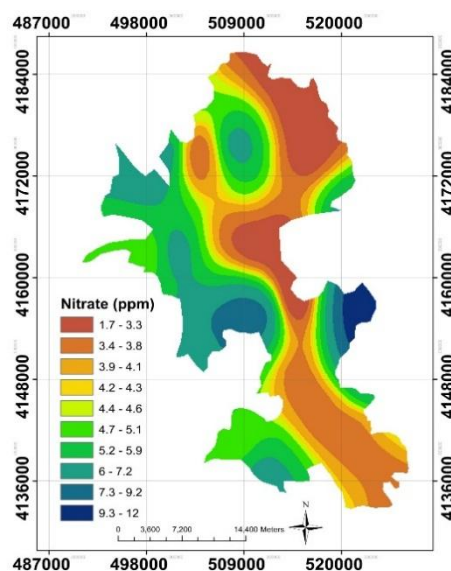


Fig. 10- Zoning of nitrate concentration (ppm) for Urmia plain
شکل ۱۰- پهنه‌بندی غلظت نیترات (ppm) در دشت ارومیه

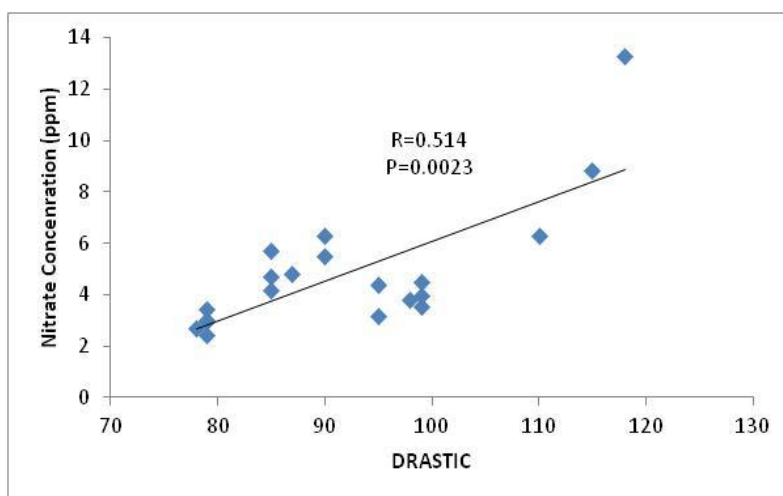


Fig. 12- Relationship of original DRASTIC index and groundwater nitrate concentration for Urmia plain
شکل ۱۲- میزان همبستگی شاخص دراستیک و غلظت نیترات در دشت ارومیه

از p-value از مقدار پیش فرض (0/05) بیش تر باشد همبستگی معنی دار خواهد بود. با توجه به جدول ۳ تنها فاکتور مربوط به نوع آبخوان (A) همبستگی معنی دار نداشت، بنابراین برای محاسبه شاخص دراستیک اصلاح شده در دشت ارومیه، نوع آبخوان از معادله حذف شده است. اصلاح وزن‌ها نیز بر این فرض استوار بود که هر فاکتوری که بالاترین همبستگی را با غلظت نیترات داشته باشد، بالاترین وزن به آن اختصاص داده شود، بنابراین با توجه به اعداد مربوط به ضریب اسپیرمن در جدول ۳ به فاکتور نوع خاک (S) وزن ۵ اختصاص یافت، لذا می‌توان گفت نوع خاک سطحی در دشت ارومیه بیش‌ترین تأثیر را در پتانسیل آسیب‌پذیری آب زیرزمینی را داراست. همچنین با توجه به این‌که ضریب اسپیرمن برای فاکتورهای اول، دوم، پنجم، ششم و هفتم اعداد ۰/۵۰۹، -۰/۶۴۹، ۰/۵۹۷، ۰/۶۰۸ و ۰/۶۴۸ بود و نسبت آن‌ها به ضریب اسپیرمن بیشینه به ترتیب ۵۴، ۶۴، ۶۸، ۶۴ و ۶۸ درصد محاسبه شد. بر این اساس وزن‌های جدید برای اعداد موجود برای فاکتورهای اول، دوم، پنجم، ششم و هفتم به ترتیب برابر ۲/۷، ۳/۲، ۳/۴ و ۳/۲ و ۳/۴ بدست آمد (جدول ۲). شایان ذکر است ضریب اسپیرمن منفی برای فاکتورهای D و T (جدول ۳) با فیزیک مسأله هم‌خوانی دارد.

بدین معنی که هرچه مقدار فاصله تا آب زیرزمینی کم‌تر باشد در صورت وجود منبع آلودگی، احتمال آلوده شدن آب زیرزمینی بیش‌تر می‌شود. همچنین هرچه مقدار شیب حوضه کم‌تر، فرصت برای نفوذ و انتقال از سطح بیش‌تر خواهد بود. با توجه به اصلاحات انجام شده برای وزن‌ها، معادله (۱) به صورت معادله (۳) اصلاح شد:

$$(DRASTIC) i = 2.7 \times D + 3.2 \times R + 5 \times S + 3.4 \times T + 3.2 \times I + 3.4 \times C \quad (3)$$

اگر چه شاخص دراستیک بدست آمده به روش اصلی با مقدار نیترات موجود در آب زیرزمینی دشت ارومیه، دارای همبستگی معنی دار است، اما مطلوب این است که این مقادیر مربوط به شاخص دراستیک و غلظت نیترات همبستگی بیش‌تری (به عدد ۱ نزدیک‌تر) وجود داشته باشد. برای این منظور با استفاده از روش تشریح شده (Panagopoulos et al., 2006; Allouche et al., 2017) (جدول ۲) و وزن‌ها (جدول ۳) بر مبنای غلظت نیترات اصلاح شد. برای اصلاح وزن‌ها، ابتدا اعداد موجود برای هر فاکتور از مدل دراستیک مطابق طبقه‌بندی اصلی مرتب شد، و میانگین غلظت نیترات اعداد هر طبقه به عنوان شاخص نیترات آن طبقه در نظر گرفته شد، و این رویه تا زمان تکمیل کل طبقات هر فاکتور ادامه یافت. در گام بعدی بالاترین رتبه به طبقه‌ای که بیش‌ترین میانگین غلظت نیترات را داراست اختصاص داده شد و رتبه‌ی دیگر طبقات متناسب با نسبت غلظت نیترات آن طبقه نسبت به غلظت نیترات بیشینه تعیین شد. به عنوان مثال در فاکتور فاصله تا آب زیرزمینی (D)، با توجه به اعداد موجود تعداد پنج طبقه شکل گرفت که بیش‌ترین عدد غلظت نیترات مربوط به طبقه اول در دامنه ۱/۵ تا ۴/۵ متر فاصله تا آب زیرزمینی با غلظت ۶/۶۵ mg/L بود و رتبه‌ی ۱۰ به آن اختصاص یافت. با توجه به این‌که غلظت نیترات برای طبقات دوم تا پنجم ۴/۳۲ mg/L، ۵/۱، ۴/۱ و ۲/۷ بود و نسبت آن‌ها به غلظت بیشینه به ترتیب ۶۵، ۶۵، ۷۷ و ۶۲ درصد محاسبه شد. بر این اساس رتبه‌های جدید برای اعداد موجود در طبقات دوم تا پنجم به ترتیب برابر ۶/۵، ۷/۷، ۶/۲ و ۴/۱ بدست آمد (جدول ۲). وزن‌های تعریف شده اولیه با استفاده از بررسی میزان همبستگی بین اعداد فاکتور هفت‌گانه و غلظت نیترات با توجه به ضریب اسپیرمن اصلاح گردید. در این روش، چنانچه مقدار

Table 2- Original and modified rating of seven DRASTIC factors

جدول ۲- وزن‌های اصلی و اصلاح شده برای هفت فاکتور دراستیک

Depth to groundwater				Recharge			Aquifer type			Soil type					
Range (m)	Original rating	NO ₃ ⁻ (mg/L)	Modified rating	Range (mm)	Original rating	NO ₃ ⁻ (mg/L)	Modified rating	Aquifer type	Original rating	NO ₃ ⁻ (mg/L)	Modified rating	Soil type	Original rating	NO ₃ ⁻ (mg/L)	Modified rating
0-1.5	10	-	-	0-50	1	-	-	Alluvial	5	-	-	Clay	1	-	-
1.5-4.5	9	6.65	10	50-100	3	-	-	Conglomerate	4	-	-	Clay loam	3	4.88	2.4
4.5-9	7	5.1	7.7	100-180	6	3.6	3.2	Limestone	8	-	-	Sandy clay loam	4	-	-
9-15	5	4.32	6.5	180-250	8	4.4	3.9	Pleistocene	7	-	-	Loam	5	-	-
15-23	3	4.1	6.2	250+	9	11.1	10	Palaeosols	6	-	-	Sandy clay	5	-	-
23-30.5	2	2.7	4.1							-	-	Sandy loam	6	-	-
30.5+	1	-	-							-	-				
Topography				Impact of vadose zone			Hydraulic conductivity								
Slope (m)	Original rating	NO ₃ ⁻ (mg/L)	Modified rating	Geological formation	Original rating	NO ₃ ⁻ (mg/L)	Modified rating	Range (m/day)	Original rating	NO ₃ ⁻ (mg/L)	Modified rating				
0-2	10	5.26	10	Alluvial	8	-	-	0.01-1.3	1	4.88	1				
2-6	9	2.7	5.12	Conglomerate	6	-	-	1.3-3.9	2	-	-				
6-12	5	-	-	Fine flysch phase	3	4.88	2.55	3.9-8.6	4	-	-				
12-18	3	-	-	Palaeosols	6	-	-	8.6-13	6	-	-				
18+	1	-	-	Limestone	6	-	-	13-24.2	8	-	-				
				Marly limestone	6	-	-	24.2+	10	-	-				
				Pleistocene	6	-	-								

Table 3- Original and modified weights of the DRASTIC factors and correlation coefficient between DRASTIC factors and nitrate concentration

جدول ۳- وزن‌های اصلی و اصلاح شده فاکتورهای دراستیک و ضریب همبستگی بین غلظت نیترات و فاکتورهای دراستیک

DRASTIC factors	Original weight	Spearman's rho coefficient	p-value	Modified weight
Depth to groundwater (D)	5	-0.509	0.0216	2.7
Recharge (R)	4	0.597	0.005	3.2
Aquifer type (A)	3	0.263	0.257	-
Soil type (S)	2	0.947	0.000	5
Topography (T)	1	-0.649	0.002	3.4
Impact of vadose zone (I)	5	0.608	0.004	3.2
Hydraulic conductivity (C)	3	0.648	0.002	3.4

از آسیب‌پذیری خیلی کم برخوردار بود و قسمت‌های شرقی و مرکزی را شامل شد. ۶۴/۹ درصد از مساحت دشت ارومیه دارای شاخص دراستیک بین ۴۲ الی ۷۹ بود که بدون خطر آلودگی گزارش شد. در این مدل نیز اطراف دریاچه ارومیه پتانسیل آسیب‌پذیری بالایی دارد و مستعد آلوده شدن می‌باشد. مناطق غربی دشت ارومیه که شیب نسبتاً بیشتری داشت از احتمال آلوده شدن آب‌های زیرزمینی کم‌تری برخوردار بود.

در قدم بعدی با استفاده از رابطه (۳) نقشه آسیب‌پذیری آب زیرزمینی ارومیه تهیه شد (شکل ۱۳). مقایسه شکل‌های ۱۲ و ۱۴ نشان می‌دهد در حالت دراستیک اصلاح شده همبستگی حدود ۱۱ درصد افزایش پیدا کرده است. همبستگی از مقدار ۵۱/۴ درصد به مقدار ۶۱/۶ درصد افزایش یافته که نشان دهنده تأثیر مثبت اصلاح رتبه‌ها و وزن‌های فاکتورهای هفت‌گانه دراستیک به روش مورد استفاده در این تحقیق می‌باشد.

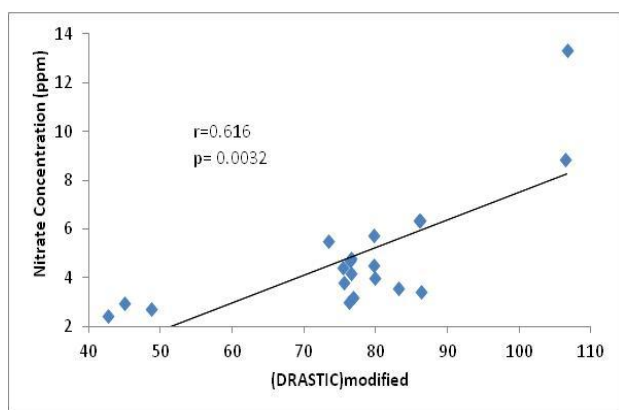


Fig. 14- Relationship of modified DRASTIC index and groundwater nitrate concentration for Urmia plain

شکل ۱۴- میزان همبستگی شاخص دراستیک اصلاح شده و غلظت نیترات در دشت ارومیه

۴- نتیجه‌گیری

نقشه پتانسیل آسیب‌پذیری آب زیرزمینی به آلودگی یک ابزار مفید برای محافظت از آب زیرزمینی، مدیریت منابع آب و مدیریت کاربری اراضی است. در این تحقیق نقشه پتانسیل آسیب‌پذیری آب زیرزمینی به آلودگی برای دشت ارومیه، با استفاده از شاخص‌های دراستیک و دراستیک اصلاح شده تهیه شد. نقشه‌های تهیه شده با استفاده از غلظت نیترات مشاهده شده از آب زیرزمینی دشت ارومیه مورد ارزیابی

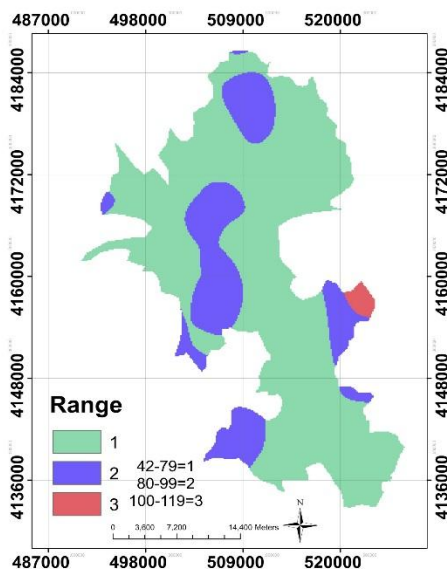


Fig. 13- Zoning of modified DRASTIC for Urmia plain

شکل ۱۳- پهنه‌بندی شاخص دراستیک اصلاح شده دشت ارومیه

با توجه به نقشه پهنه‌بندی (شکل ۱۳) ۴/۳ درصد از مساحت کل دشت ارومیه دارای شاخص دراستیک بین ۱۰۰ الی ۱۱۹ بود که پتانسیل آسیب‌پذیری کم را نشان می‌دهد، بدین ترتیب قسمت کوچکی از شرق دشت ارومیه دارای بالاترین آسیب‌پذیری بود. حدود ۳۰/۸ درصد از مساحت کل دشت ارومیه دارای شاخص دراستیک بین ۸۰ الی ۹۹ که

- Antonakos AK, Lambrakis NJ (2007) Development and testing of three hybrid methods for the assessment of aquifer vulnerability to nitrates, based on the DRASTIC model, an example from NE Korinthia, Greece. *Journal of Hydrology* 333:288-304
- Asghari Moghaddam A, Soltani S, Barzegar R, Kazemian N (2017) Vulnerability assessment of Kordkandi-Duzduzan plain groundwater using calibrated DRASTIC model. *Iran-Water Resources Research* 13(4):89-99 (In Persian)
- Azizi F, Mohamadzade H (2011) Vulnerability zoning and evaluation of spatial variations of aquifer quality in Imamzadeh Jafar-e-Gachsaran plain using DRASTIC model and GWQI quality index. *Journal of Water Resources Engineering* 5:13 (In Persian)
- Baalousha HM (2016) Groundwater vulnerability mapping of Qatar aquifers. *Journal of African Earth Sciences* 124:75-93
- Besien T (2002) Groundwater vulnerability interactions of chemical and site properties. *Journal of the science of the total environment* 299:131-143
- Beynen PE, Niedzielski MA, Bialkowska-Jelinska E, Alsharif K, Matusick J (2012) Comparative study of specific groundwater vulnerability of a karsts aquifer in central Florida. *Journal of Applied Geography* 32:868-877
- Kendal MG (1975) Rank correlation methods. 4th edh, Griffin, London
- Kihumba AM, Vanclooster M, Longo JN (2017) Assessing groundwater vulnerability in the Kinshasa region, DR Congo, using a calibrated DRASTIC model. *Journal of Africa Earth Sciences* 126:13-22
- Lathamani R, Janardhana MR, Mahalingam B, Suresha S (2015) Evaluation of aquifer vulnerability using DRASTIC model and GIS: a case study of Mysore city, Karnataka, India. *Aquatic Procedia* 4:1031-1038
- Leone A, Ripa MN, Uricchio V, Dea'k J, Vargay Z (2009) Vulnerability and risk evaluation of agricultural nitrogen pollution for Hungary's main aquifer using DRASTIC and GLEAMS models. *Journal of Environmental Management* 90:2969-2978
- Malik Muhammad A, Zhonghua T, Salman Dawood at (2015) Evaluation of local groundwater vulnerability based on DRASTIC index method in Lahore, Pakistan. *Geofísica Internacional* 54(1):67-81
- Marofi S, Soleymani S, Ghobadi MH, Rahimi GH, Marofi H (2012) Vulnerability assessment of Malayer plain groundwater by SINTACS, قرار گرفتند. البته باید در نظر داشت که نقشه‌ی آسیب‌پذیری آبخوان میزان آلودگی آبخوان را نشان نمی‌دهد بلکه پتانسیل آبخوان به آلودگی را مشخص می‌نماید. بدین معنی که ممکن است در یک منطقه پتانسیل آسیب‌پذیری کم و متوسط باشد ولی به دلیل حضور گسترده منابع آلاینده آب‌های زیرزمینی آلوده شده باشد. برعکس ممکن است در منطقه‌ای پتانسیل آسیب‌پذیری بالا باشد ولی به دلیل عدم منابع آلاینده، هیچ خطری آلودگی آب‌های زیرزمینی را تهدید نکند (Yarmohammadi et al., 2006). روش دراستیک اصلاح شده بر پایه اصلاح رتبه‌ها و وزن‌ها اولیه مدل دراستیک از طریق بررسی میزان همبستگی آن‌ها با غلظت نیترات شکل گرفت. با توجه به این‌که کم‌ترین مقدار همبستگی مربوط به فاکتور جنس آبخوان (A) بود، این فاکتور از رابطه اصلی تعریف شده حذف گردید. همچنین بر پایه همبستگی با غلظت نیترات، بیش‌ترین وزن (۵) به فاکتور جنس خاک (S) و کم‌ترین وزن (۲/۷) به فاکتور عمق تا سطح آب زیرزمینی (D) اختصاص یافت. نتایج بدست آمده نشان داد، روش دراستیک اصلاح شده نسبت به روش دراستیک اولیه، همبستگی بیش‌تری با غلظت نیترات آب زیرزمینی دارد (حدود ۱۱ درصد بیش‌تر). پیشنهاد می‌گردد که در هر محدوده‌ی مطالعاتی که قصد استفاده از مدل دراستیک وجود دارد، بهتر است به روش‌های مختلف، از جمله روشی که در این تحقیق استفاده شده، اصلاحات مورد نیاز در وزن‌ها و رتبه‌های مدل دراستیک صورت پذیرد. همچنین با توجه به شکل ۱۱ که مربوط به کاربری اراضی و پراکندگی نقاط مسکونی در دشت می‌باشد، منشأ آلودگی در دشت ارومیه به نیترات، کشاورزی و عامل انسانی است. برای عامل انسانی پیشنهاد می‌گردد که از چاه‌های سپتیک و در صورت امکان شبکه فاضلاب ایجاد گردد. در بخش کشاورزی نیز مدیریت کود بر اساس نیاز خاک و آزمایش‌های حاصلخیزی برای جلوگیری از استفاده بی‌رویه از کود (حیوانی و شیمیایی) می‌تواند مفید باشد.

۵- مراجع

- Aller L, Bennet T, Leher JH, Petty RJ, Hackett G (1987) DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydro-geological settings. *Environmental Research Laboratory, EPA/600/2.87/036*
- Allouche N, Maanan M, Gontara M, Rollo N, Jamal I, Bouri S (2017) A global risk approach to assessing groundwater vulnerability. *Environmental Modelling and Software* 88:168-182
- Amir Ahmadi A, Abbariki Z, Ebrahimi M (2012) Evaluation of the vulnerability of Davarzan aquifer by DRASTIC method using GIS. *Journal of Arid Regions Geographic Studies* 2(6):51-66 (In Persian)

- Shrestha S, Kafle R, Prasad Pandey V (2017) Evaluation of index-overlay methods for groundwater vulnerability and risk assessment in Kathmandu valley, Nepal. *Science of the Total Environment* 575:779-790
- Stournaras G, Koutsi R (2011) Groundwater vulnerability assessment in the Loussi Polje area, N Peloponessus: The PRESK method. *Advances in the Research of Aquatic Environment* 2:335-342
- Tabarmaye M, Vaezi Hir AR (2013) Evaluation of vulnerability of aquifer to Tabriz plain. *Journal of water and soil* 28(6):1137-1151 (In Persian)
- Victorine Neh A, Ako A, Ayuk AR, Hosono T (2015) DRASTIC-GIS model for assessing vulnerability to pollution of the phreatic auriferous formations in Douala-Cameroon. *Journal of African Earth Sciences* 102:180-190
- Vlaicu M, Muteanu CM (2008) Karst groundwater vulnerability assessment methods. *Trev. Inst. Speol.* 107-118
- Vrba J (1994) Guide book on mapping groundwater vulnerability. Verlag Heise Hannover, Association of Hydrogeologists, Contributions to Hydrogeology No.16
- Wilcoxon F (1945) Individual comparisons by ranking methods. *Biomet Bull* 1:80-83
- Yaghoubi gardvisheh S, Asgharimoghadam A (2018) Determining the vulnerability of Barandouzchi aquifer Plain, Urmia, using the combination of DRASTIC, SI, AND SINSTAC Indices. *Iran-Water Resources Research* 14(4):198-215 (In Persian)
- Yarmohammadi E, Chitsazan M, Rangzan K, Mirzaei SY (2006) Assessments of the potential of aquifer pollution in Aghili plain using GIS and SINTACS method. 1st Conference of Environmental Engineering, Tehran (In Persian)
- Zirak Javanmard F, Mahdavi M, Malek M, Keirkhah Zarkesh M (2014) Modeling of groundwater vulnerabilities uncertainty using GIS and Rough set. *Iran-Water Resources Research* 10(1):26-38 (In Persian)
- DRASTIC and SI models. *Journal of Water and Soil Conservation* 19:2 (In Persian)
- Mirzaei S, Naderi M, Baigi H, Jahangard M (2012) Vulnerability assessment of the Shahrekord plain groundwater using DRASTIC model. *Iranian Water Resources Journal* 6:11 (In Persian)
- Niknam R, Mohammadi K, Majd V (2007) Groundwater vulnerability evaluation of Tehran-Karaj aquifer using DRASTIC method and fuzzy logic. *Iran-Water Resources Research* 3(2):39-47 (In Persian)
- Panagopoulos GP, Antonakos AK, Lambrakis NJ (2006) Optimization of the DRASTIC method for groundwater vulnerability assessment via the use of simple statistical methods and GIS. *Journal of Hydrology* 14:894-911
- Rahman A (2008) A GIS based DRASTIC model for assessing groundwater vulnerability in shallow aquifer in Aligarh, India. *Journal of Applied Geography* 28:32-53
- Rezaei F, Ahmadzadeh MR, Safavi HR (2017) SOM-DRASTIC: using self-organizing map for evaluating groundwater potential to pollution. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 31(8):1941-195
- Rezaei F, Safavi HR, Ahmadi A (2013) Groundwater vulnerability assessment using fuzzy logic: a case study in the Zayandehrood aquifers, Iran. *Environmental Management* 51(1):267-277
- Rosen L (1994) A study of the DRASTIC methodology with emphasis on Swedish conditions. *Ground Water* 32(2):278-285
- Salimi M, Ebrahimi A, Salimi (2014) Aquifer vulnerability assessment using the DRASTIC model at new landfill sit-in Isfahan. *Journal of Health System Research* 10:2 (In Persian)
- Samadi J (2015) Assessment of Kashan aquifer-land use composite vulnerability impact on groundwater pollution using DRASTIC method and degradation model. *Iran-Water Resources Research* 11(1):13-21 (In Persian)