



Groundwater Vulnerability Evaluation of Tehran-Karaj Aquifer Using DRASTIC Method and Fuzzy Logic

R. Niknam¹, K. Mohammadi² and V. J. Majd³

Abstract

In recognition of the need for effective and efficient methods for protecting groundwater resources from future contamination, scientists and resource managers have sought to develop aquifer vulnerability assessment techniques for predicting which areas are more likely than others to become contaminated as a result of activities at or near the land surface. This research is focused on the evaluation of Tehran-Karaj groundwater vulnerability to pollution. Among several assessment methods, DRASTIC has been selected for this study. A major portion of Tehran's drinking water is supplied from groundwater. ArcGIS has been used to overlay and calculate different layers and obtain the vulnerability map. In addition, groundwater balance has been evaluated in order to calculate the net recharge parameter in DRASTIC index. About 50 percent of the aquifer has been classified as moderate and almost 20 percent has low pollution vulnerability. The Boolean algorithm is usually used in categorizing the index but it is proved that using the Boolean algorithm causes the discrepancy in classification. On the other hand, fuzzy algorithm can produce more accurate results. Therefore, in this research, both Boolean and Fuzzy algorithms were used and compared together. Fuzzy algorithm could recognize the areas with low and very low vulnerability potentials while the Boolean model was not able to do so, therefore, the fuzzy model showed better performance. According to the developed map, most of the areas in the moderate class and very high class had the minimum area in the region.

Keywords: Groundwater, Vulnerability, Pollution, Fuzzy Logic

ارزیابی آسیب پذیری سفره آب زیرزمینی تهران-کرج با روش DRASTIC و منطق فازی

رامین نیک‌نام^۱، کورش محمدی^۲ و وحید جوهری مجد^۳

چکیده

به منظور دستیابی به یک روش مناسب و مؤثر برای حفاظت منابع آب زیرزمینی از آلودگی‌هایی که در آینده آن را تهدید می‌کند، سیستم‌های ارزیابی آسیب‌پذیری سفره‌های آب زیرزمینی توسعه یافته‌اند. این روش‌ها بر این اساس هستند که بعضی از مناطق دارای استعداد بیشتری برای آلوده شدن نسبت به سایر مناطق می‌باشند. در این تحقیق سفره آب زیرزمینی تهران-کرج برای ارزیابی انتخاب شده است. بخش مهمی از آب شرب شهر تهران از این آبخوان تأمین می‌گردد که نشان‌دهنده اهمیت آن می‌باشد. از میان چندین روش موجود، روش DRASTIC مورد استفاده قرار گرفت. تحلیل‌های لازم برای این منظور با استفاده از نرم افزار ArcGIS انجام شده و برای محاسبه پارامتر تغذیه در شاخص DRASTIC بیان آب زیرزمینی منطقه محاسبه گردید. در حدود ۵۰ درصد سفره دارای پتانسیل آلوده شدن متوسط بوده و ۲۰ درصد آن دارای پتانسیل خیلی کم است. در محاسبه این شاخص از منطق بولین استفاده شده که در مورد مقادیر نزدیک مرز دسته‌بندی‌ها می‌تواند موجب نتیجه‌گیری‌های غلط گردد. از طرف دیگر منطق فازی می‌تواند به افزایش دقت نتایج به خصوص در مورد مقادیر مرزی کمک کند. بنابراین در این تحقیق از این روش نیز استفاده گردیده و نتایج با منطق بولین مقایسه گردید. منطق فازی توانست مناطق با پتانسیل کم و خیلی کم را که در منطق بولین نشان داده نشده بودند، بهتر مشخص نماید. بر طبق نقشه بدست آمده، بیشتر مناطق در محدوده پتانسیل متوسط قرار گرفته و مناطق با ریسک بالا دارای حداقل مساحت بودند.

کلمات کلیدی: آب زیرزمینی، آسیب پذیری، آلودگی، منطق فازی

1- M.Sc. in Irrigation and Drainage Eng., Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

2- Associate Professor, Water Engineering Research Center, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, kouros@m@modares.ac.ir

3- Associate Professor, Dept. of Electrical Eng., Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه آبیاری و زهکشی، دانشگاه تربیت مدرس

۲- دانشیار، پژوهشکده مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس

۳- دانشیار گروه برق-کنترل، دانشگاه تربیت مدرس

۱- مقدمه

از کاربردی‌ترین روش‌های شاخص، روش DRASTIC می‌باشد. بطوری که برای بخش‌هایی از ایالات متحده آمریکا (Plymale and Angle, 2002)، آفریقای جنوبی (Lynch et al., 1997)، نیکاراگوا (Johansson et al., 1999) و کره جنوبی (Lee and Choi, 1997) با استفاده از این شاخص و سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)، نقشه‌های آسیب‌پذیری آب زیرزمینی تهیه شده است.

برای تجزیه و تحلیل نتایج و محاسبه شاخص آسیب‌پذیری، بایستی نقشه‌ها و داده‌های بدست آمده ترکیب و طبقه‌بندی شوند. بطور معمول این طبقه‌بندی‌ها بر اساس روش بولین می‌باشد و در طبقه‌بندی به روش بولین ابتدا بایستی مرز بین طبقات مشخص گردد. بنابراین با توجه به اینکه شاخص‌های آسیب‌پذیری که دارای ماهیت طیفی و دامنه‌دار هستند، اگر طبقه‌بندی بر اساس روش بولین انجام گیرد موجب می‌شود که یک منطقه با کوچکترین تغییر از یک طبقه به طبقه بالاتر یا پایین‌تر جابجا شود که اصولاً قابل قبول و توجیه نمی‌باشد. اما با استفاده از مبانی تئوری فازی، که هر موضوع یا مفهومی دارای یک درجه عضویت است، می‌توان روش مناسبی جهت طبقه‌بندی و رتبه‌گذاری نسبت به روش بولین ارائه کرد (Malano and Gao, 1992).

دیکسون و همکاران با استفاده از تکنیک‌های منطق فازی آسیب‌پذیری سفره به آلودگی را در مقیاس منطقه‌ای پیش‌بینی کردند و به این نتیجه رسیدند که در ارزیابی آسیب‌پذیری آب زیرزمینی، دسته‌بندی اطلاعات و تعیین مرز بین این دسته‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، لذا منطق فازی آسیب‌پذیری را بهتر از روش‌های معمول ارزیابی می‌کند (Dixon et al., 2002).

هدف از تهیه مقاله، مشخص کردن مناطق مستعد از نظر آلودگی در سفره‌های آب زیرزمینی دشت تهران-کرج، کمک به تبیین سیاست‌های کاربردی و عملی برای مدیریت منابع آب زیرزمینی با در اختیار قرار داشتن ابزار و روش مناسب و بررسی امکان استفاده از منطق فازی در طبقه‌بندی نقشه‌های آسیب‌پذیری می‌باشد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- معرفی روش DRASTIC

سازمان حفاظت محیط زیست ایالات متحده آمریکا (US-EPA) این روش را جهت تعیین پتانسیل آلودگی آب زیرزمینی توسعه داد

آب‌های زیرزمینی در سرزمین‌ها و مناطق خشک و نیمه خشک مانند ایران که متوسط بارندگی آن کمتر از یک سوم متوسط بارندگی کره زمین است اهمیت پیدا کرده و مخزن مهم و قابل اطمینانی برای بهره‌برداری محسوب می‌گردد. سالانه حجم زیادی از پساب منابع خانگی، صنعتی و کشاورزی وارد آبخوان تهران-کرج می‌شود. این آب به همراه خود انواع آلودگی‌های خانگی، صنعتی و کشاورزی را به دلیل عدم وجود سیستم فاضلاب شهری و چاه‌های جذبی به منظور دفع فاضلاب وارد سفره آب زیرزمینی کرده و موجب آلودگی آن می‌گردد (بی‌نام، ۱۳۸۰).

مجموع این عوامل باعث شده است که وضعیت برخی از مناطق که نیاز مبرمی به آب زیرزمینی دارند، بحرانی شود و نیازمند برنامه‌ریزی دقیقی برای جلوگیری از خسارت بیشتر می‌باشد. نحوه مدیریت بایستی به ترتیبی باشد که از اثرهای زیان‌آوری مانند برداشت مازاد، نامناسب شدن کیفیت آب و اثر آن بر روی آب آشامیدنی و محصولات کشاورزی و نشست زمین بر اثر پمپ نمودن بیش از اندازه آب چه در حال و آینده جلوگیری نماید (شمسائی، ۱۳۷۷).

یکی از ابزارهای مناسب که کمک مؤثری به مدیریت آب‌های زیرزمینی می‌کند، تهیه نقشه‌هایی است که در آنها مناطق آسیب‌پذیر یا حساس نسبت به آلودگی‌ها مشخص شده باشند. بدین منظور نقشه‌هایی از مناطق حساس و مستعد نسبت به بروز آلودگی تهیه می‌گردد. همچنین شاخصی تعریف می‌گردد که می‌توان براساس آن، مناطقی که بیشتر تحت تأثیر آلودگی هستند را از دیگر مناطق تمیز داد. بدین ترتیب می‌توان مناطق مختلف را با یکدیگر مقایسه نموده و معیاری واحد جهت ارزیابی در اختیار داشت.

روش‌های مختلفی تاکنون برای ارزیابی آسیب‌پذیری سفره‌های آب زیرزمینی ارائه شده که می‌توان آنها را به سه دسته کلی تقسیم کرد. این سه دسته عبارت از رتبه‌دهی توصیفی، آماری و تحلیلی و روش ترکیبی می‌باشند. روش‌های آماری و تحلیلی به دلیل نیاز به اطلاعات زیاد و حل معادلات حاکم بر جریان آب و انتقال آلودگی در آب زیرزمینی، معمولاً نیاز به تهیه مدل‌های ریاضی داشته و مشکل‌تر از روش‌های رتبه‌دهی می‌باشند (Harbough et al., 2000). از مهم‌ترین روش‌های رتبه‌دهی می‌توان به GOD (Foster, 1987)، AVI (Van stemproot و IRISH (Daly and Drew, 1999) and Other, 1993) و DRASTIC (Aller et al., 1987) اشاره نمود.

متفاوتی از عناصر تخریبی نظیر رس، ماسه، شن و قلوه سنگ تشکیل یافته است و عموماً در نواحی ورودی و شمالی دشت عناصر درشت دانه‌تر درصد بیشتری از بافت خاک را شامل می‌شوند و به سمت نواحی خروجی و جنوبی دشت و با فاصله یافتن از محورهای رسوب‌گذاری به تدریج قطر ذرات کاهش می‌یابد.

۳- نتایج و تحلیل نتایج

۳-۱- تهیه نقشه رتبه‌بندی هریک از پارامترهای شاخص

چون در روش DRASTIC بایستی نقشه‌های رتبه‌بندی رقومی هر یک از پارامترها محاسبه گردد از نرم‌افزار ArcGIS استفاده شد. برای هر یک از پارامترها، بانک اطلاعاتی در محیط نرم‌افزار EXCEL با توجه به اطلاعات مورد نیاز شاخص و پارامتر مورد نظر تهیه شده و سپس بانک اطلاعاتی به فرمت قابل استفاده در محیط ArcGIS تبدیل گردید. در این نرم افزار با تبدیل نقشه‌ها به فرمت رستری با پیکسل‌های ۲۵۰ متری، محاسبات بر روی لایه‌ها انجام شد.

نقشه رتبه‌بندی عمق سطح آب با توجه به نقشه هم عمق بدست آمده از آمار و اطلاعات حدود ۱۰۰ چاه و جدول (۱) تهیه گردید.

برای تهیه نقشه رتبه‌بندی تغذیه خالص دشت، ابتدا بیان آب زیرزمینی تهیه گردید (جدول ۲). با استفاده از آن مقادیر تغذیه خالص مربوط به بارندگی، رودخانه کن، رودخانه کرج، سیلاب، شرب، صنعت، کشاورزی و قنوات بدست آمده و با هم جمع گردیدند. سپس با توجه به نقشه هدایت هیدرولیکی دشت و مقدار نفوذپذیری آن، توزیع میزان تغذیه خالص در سطح دشت تخمین زده شد.

با استفاده از لوگ‌های حفاری دشت تهران-کرج و نقشه‌های مقاطع ژئوالکتریک، نوع و جنس محیط آبخوان، خاک و منطقه غیراشباع مشخص گردید و برای تهیه نقشه رتبه‌بندی محیط آبخوان، خاک و منطقه غیراشباع از موقعیت چاه‌های حفاری، نوع و جنس محیط مورد نظر و جدول (۱) استفاده شد.

برای تهیه نقشه رتبه‌بندی شیب از نقشه توپوگرافی منطقه با مقیاس ۱/۵۰۰۰۰ به همراه نقاط ارتفاعی کمکی مربوط به چاه‌های مشاهده‌ای استفاده گردید. نقشه توپوگرافی بدست آمده به صورت رستری تبدیل شده و سپس به کمک آن مقدار شیب برای هر سلول محاسبه گردید.

(Aller et al., 1987). شاخص آسیب‌پذیری در این روش از مجموع حاصل ضرب وزن و رتبه هفت پارامتر مطابق فرمول (۱) بدست می‌آید. همانطور که در جدول (۱) مشخص است، رتبه مربوط به هر پارامتر بین ۱ تا ۱۰ متغیر بوده و وزن هر پارامتر با توجه به اهمیت آن بین ۱ تا ۵ متغیر می‌باشد.

$$D_i = \sum_{j=1}^7 (W_j \times R_j) \quad (1)$$

که:

D_i - مقدار نهایی شاخص

W_j - وزن فاکتور j

R_j - رتبه فاکتور j

پس از محاسبه شاخص می‌توان گفت که کدام منطقه در خطر آلودگی بیشتر قرار دارد. هر چه شاخص بزرگتر باشد، خطر ایجاد آلودگی بیشتر می‌گردد. باید توجه داشت که شاخص DRASTIC تنها یک ابزار ارزیابی نسبی را تهیه می‌کند و قابلیت ارزیابی مطلق را ندارد.

این روش براساس هفت پارامتر عمق آب، تغذیه خالص، محیط آبخوان، بافت خاک، توپوگرافی، تأثیر منطقه غیراشباع و هدایت هیدرولیکی آبخوان ارزیابی را صورت می‌دهد.

۲-۲- معرفی منطقه مورد مطالعه

دشت تهران-کرج از نظر تقسیم بندی حوزه‌های آبریز ایران، بخشی از حوزه آبریز مرکزی می‌باشد، که از دامنه‌های جنوبی البرز شروع و تا دشتهای ورامین و شهریار گسترش یافته است. این دشت از شمال به ارتفاعات شمالی تهران، از جنوب به بند علیخان، از شرق به مرز بین رودخانه‌های جاجرود و سرخه حصار، از جنوب شرقی به مرز شبکه ورامین، از غرب به رودخانه شور منتهی می‌شود. این محدوده از نظر طول و عرض جغرافیایی، بین طول‌های ۵۱°-۰۵' تا ۵۱°-۱۰' و عرض ۳۵°-۰۲' تا ۳۵°-۵۷' قرار دارد. مساحت این دشت حدود ۲۷۰۴ کیلومترمربع می‌باشد. رودخانه‌های موجود در این محدوده عموماً از ارتفاعات جنوبی سلسله جبال البرز سرچشمه گرفته و پس از دریافت جریان‌های سطحی، فاضلاب‌های شهری و صنعتی تهران و منطقه جنوب تهران، به سمت جنوب و کویر مرکزی جریان می‌یابد.

آبخوان ناحیه مورد مطالعه دشت تهران-کرج دارای سرشت مشترک بوده و یک واحد هیدرولوژیکی را تشکیل می‌دهند. نوع آبخوان بصورت آزاد بوده، عناصر عمده تشکیل دهنده آبخوان به نسبت‌های

جدول ۱- رتبه‌دهی و وزن‌دهی پارامترهای DRASTIC (Aller et al., 1987)

عمق آب متر		تغذیه میلیمتر		توپوگرافی درصد شیب		هدایت هیدرولیکی متر بر روز		محیط آبخوان		مواد تشکیل دهنده ناحیه غیراشباع		محیط خاک					
متر	فوت	متر	فوت	درصد	فوت	متر	فوت	متر	فوت	متر	فوت	متر	فوت				
(0-1.5)	10	(0-50.8)	1	(0-2)	10	(.04-4.1)	1	Massive Shale	2	Confining Layer	1	Thin or Absent	10				
(1.5-4.6)	9	(50.8-101.6)	3	(2-6)	9	(4.1-12.3)	2	Metamorphic Igneous	3	Silt/Clay	3	Gravel	10				
(4.6-9.1)	7	(101.6-177.8)	6	(6-12)	5	(12.3-28.7)	4	Weathered Meta-	4	Shale	3	Sand	9				
(9.1-15.2)	5	(177.8-254)	8	(12-18)	3	(28.7-41)	6	morphic Igneous		Limestone	3	Peat	8				
(15.2-22.8)	3	(>254)	9	(>18)	1	(41-82)	8	Glacial Till	5	Sandstone	6	Shrinking Clay	7				
(22.8-30.4)	2					(>82)	10	Bedded Sandstone, Limestone	6	Bedded Limestone, Sandstone	6	Sandy Loam	6				
(>30.4)	1											Massive sandstone	6	Sand and Gravel	6	Silty Loam	4
												Masive Limestone	8	W.Silt		Clay Loam	3
												Sand and Gravel	8	Sand and Gravel	8	Muck	2
												Basalt	9	Basalt	9	No shrinking Clay	1
												Karsts Limestone	10	Karsts Limestone	10		
DRASTIC Weight: 5 Pesticide Weight: 5		DRASTIC Weight: 4 Pesticide Weight: 4		DRASTIC Weight: 1 Pesticide Weight: 3		DRASTIC Weight: 3 Pesticide Weight: 2		DRASTIC Weight: 3 Pesticide Weight: 3		DRASTIC Weight: 5 Pesticide Weight: 3		DRASTIC Weight: 2 Pesticide Weight: 5					

جدول ۲- محاسبات بیلان دشت تهران-کرج

مقدار (MCM)	جریان خروجی	مقدار (MCM)	جریان ورودی
۴۳/۰۴	جریان خروجی زیرزمینی	۲۲۷/۴۸	جریان ورودی زیرزمینی
۲۸۴/۹۸	تخلیه توسط چاه‌های شرب	۱۷۳/۲۲	تغذیه از بارندگی
۱۱۳۹/۲۲	تخلیه توسط چاه‌های کشاورزی	۹۵/۵۷	تغذیه از رودخانه کن
۱۱۲/۴۶	تخلیه توسط چاه‌های صنعتی	۲۵۶/۵۴	تغذیه از رودخانه کرج
۲۸۱/۲۳	تخلیه توسط قنوات	۳۰۸/۹۴	تغذیه از سیلاب‌ها
۲۰۲/۰۳	تغییرات حجم مخزن	۴۳۸/۵۱	تغذیه از فاضلاب شرب
		۴۴/۹۸	تغذیه از چاه‌های صنعتی
		۳۹۵/۲۳	تغذیه از چاه‌های کشاورزی
		۱۱۲/۴۹	تغذیه از قنوات
۲۰۵۲/۹۶	جمع	۲۰۵۲/۹۶	جمع

کلاسهای بالاتر تعیین کننده استعداد بیشتر سفره آب زیرزمینی برای آلوده شدن می‌باشد.

۳-۳- طبقه‌بندی آسیب‌پذیری با استفاده از منطق فازی

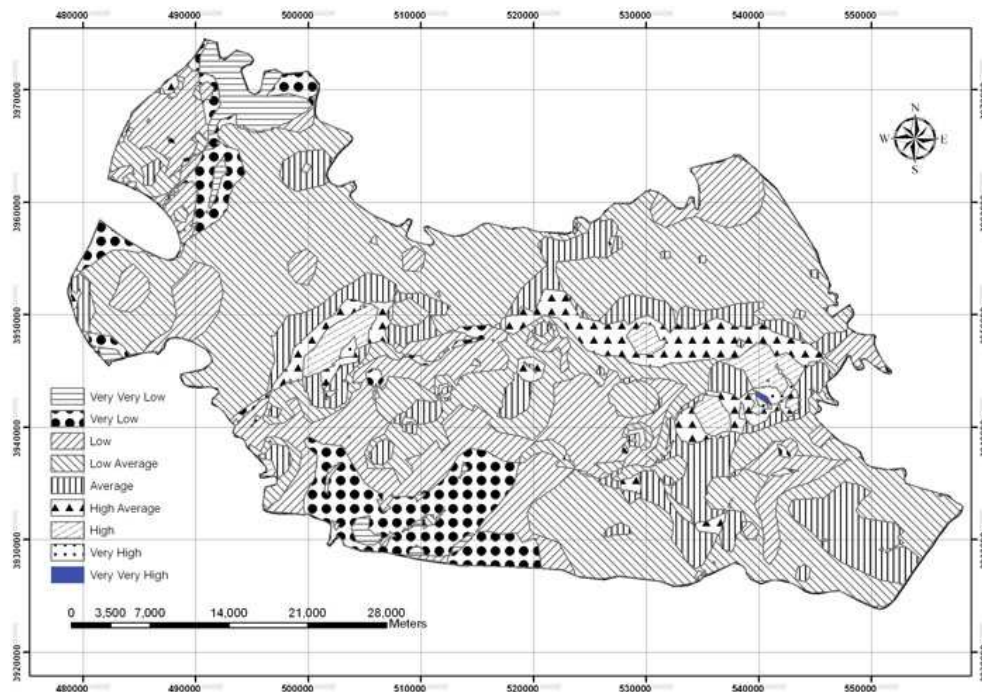
در این مرحله با استفاده از منطق فازی طبقه‌بندی آسیب‌پذیری انجام گرفت. منطق فازی در طبقه‌بندی پارامترهای مؤثر در شاخص بکار رفته و سپس نتیجه نهایی که همان طبقه‌بندی آسیب‌پذیری است، بدست آمد. نتایج بدست آمده از این حالت با نتایج حاصل از روش بولین مقایسه شد.

چهار پارامتر عمق سطح آب، تغذیه خالص، توپوگرافی و هدایت هیدرولیکی به صورت فازی طبقه‌بندی شد. سه پارامتر دیگر به دلیل اینکه دارای مقادیر بینابین نبوده، امکان طبقه‌بندی فازی برای آنها وجود ندارد. اولین مرحله طبقه‌بندی، فازی‌سازی می‌باشد. برای فازی‌سازی به خاطر سادگی محاسبات از تابع عضویت گوسی استفاده شد و با برنامه نویسی در محیط نرم‌افزار MATLAB نمودار فازی‌سازی هر پارامتر رسم گردید. چون پارامترها مستقل می‌باشند، فازی‌سازی برای هر پارامتر بصورت جداگانه انجام گرفت. شکل‌های ۲ تا ۵ تابع عضویت گوسی را برای چهار پارامتر مذکور نشان می‌دهد.

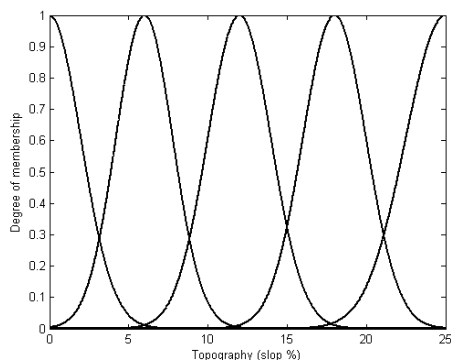
با توجه به آنکه در آزمایشات پمپاژ، مقدار پارامتر ضریب قابلیت انتقال آب اندازه‌گیری می‌شود، با استفاده از ضخامت اشباع آبخوان، مقدار هدایت هیدرولیکی از تقسیم ضریب قابلیت انتقال آب بر ضخامت اشباع آبخوان بدست آمد. اطلاعات و نقاط جغرافیایی مربوط به ضریب قابلیت انتقال و ضخامت آبرفت دشت از نقشه‌های موجود تهیه گردیده و کلیه مراحل تهیه نقشه مطابق پارامترهای قبلی در محیط ArcMap انجام گرفت. سپس به کمک قابلیت نرم‌افزار ArcMap از تفریق نقشه هم‌ضخامت آبرفت و نقشه هم‌عمق سطح آب، نقشه ضخامت اشباع حاصل شد و بعد از تقسیم نقشه ضریب قابلیت انتقال بر نقشه ضخامت آبخوان نقشه هدایت هیدرولیکی دشت بدست آمد.

۳-۲- شاخص آسیب‌پذیری سفره آب زیرزمینی

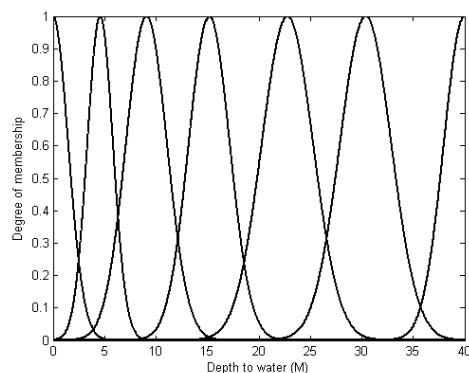
پس از تهیه نقشه‌های پایه و استفاده از قابلیت‌های نرم‌افزار در خصوص انجام عملیات رستری، نقشه‌های رتبه‌بندی در وزن مربوط ضرب و با هم جمع گردیدند و در مجموع نقشه آسیب‌پذیری دشت تهران-کرج حاصل گردید (شکل ۱). جدول (۳) درصد مربوط به کلاس‌های مختلف آسیب‌پذیری را نشان می‌دهد. کلاس‌های بالاتر نشان دهنده میزان حساسیت بیشتر سفره بوده، به این ترتیب که



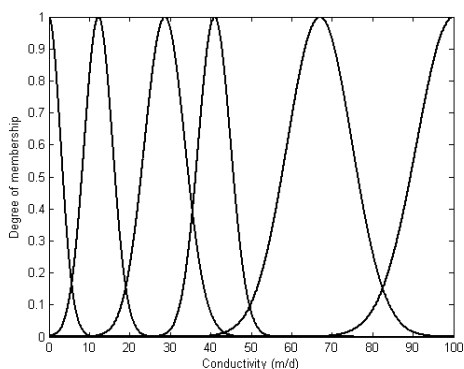
شکل ۱- نقشه آسیب‌پذیری محاسبه شده به روش DRASTIC



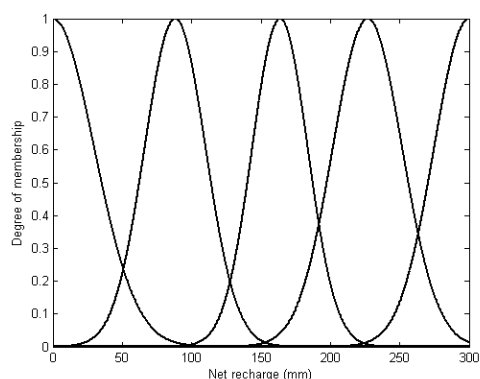
شکل ۴- تابع عضویت توپوگرافی دشت



شکل ۲- تابع عضویت عمق سطح آب دشت



شکل ۵- تابع عضویت هدایت هیدرولیکی دشت



شکل ۳- تابع عضویت تغذیه خالص دشت

$$R_x = \frac{\sum(\mu(x) \times R_i)}{\sum \mu(x)} \quad (3)$$

$$\mu(x) = e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}} \quad (4)$$

که در آن:

- R_x - رتبه خروجی پارامتر مورد نظر
 - $\mu(x)$ - درجه عضویت پارامتر مورد نظر
 - R_i - رتبه ورودی پارامتر مورد نظر
 - x - مقدار پارامتر مورد نظر
 - c - میانگین تابع گوسی پارامتر مورد نظر
 - σ - انحراف معیار تابع گوسی پارامتر مورد نظر
- مقادیر c ، σ و R_i برای هر پارامتر مؤثر براساس توابع عضویت بصورت زیر می‌باشد:

- پارامتر عمق سطح آب
 $c = [0, 4.6, 9.1, 15.2, 22.8, 30.4, 40]$
 $\sigma = [1.5, 1.25, 2, 2, 2.5, 2.5, 2]$
 $R_i = [10, 9, 7, 5, 3, 2, 1]$

در این نمودارها:

$$\text{Degree of membership} = \quad (2)$$

$$f(x, \sigma, c) = \mu(x) = e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}}$$

مرحله دوم بیان قواعد اگر...آنگاه فازی می‌باشد. کلیه گزاره‌های فازی ساده بوده و متغیرها عددی می‌باشند. بیان قواعد اگر...آنگاه فازی پارامتر عمق سطح آب به عنوان نمونه بصورت زیر می‌باشد:

If	D= 0-1.5	Then	R= 10
If	D= 1.6-4.6	Then	R= 9
If	D= 4.7-9.1	Then	R= 7
If	D= 9.2-15.2	Then	R= 5
If	D= 15.3-22.8	Then	R= 3
If	D= 22.9-30.4	Then	R= 2
If	D= > 30.4	Then	R= 1

سومین مرحله طبقه‌بندی فازی، استنتاج فازی می‌باشد. در مرحله استنتاج فازی از روی متغیرهای عددی ورودی، قواعد ورودی سیستم و توابع فازی، متغیرهای عددی خروجی استخراج شدند. برای استنتاج فازی از روش میانگین وزنی به صورت فرمول (۳) و (۴) استفاده شد:

- پارامتر تغذیه خالص

$$c = [0, 88.3, 163.9, 227, 300]$$

$$\sigma = [30, 22, 20, 25, 25]$$

$$R_i = [1, 3, 6, 8, 9]$$

- پارامتر توپوگرافی

$$c = [0, 6, 12, 18, 25]$$

$$\sigma = [2, 1.8, 2, 2, 2.5]$$

$$R_i = [10, 9, 5, 3, 1]$$

- پارامتر هدایت هیدرولیکی

$$c = [0, 12.3, 28.7, 41, 67, 100]$$

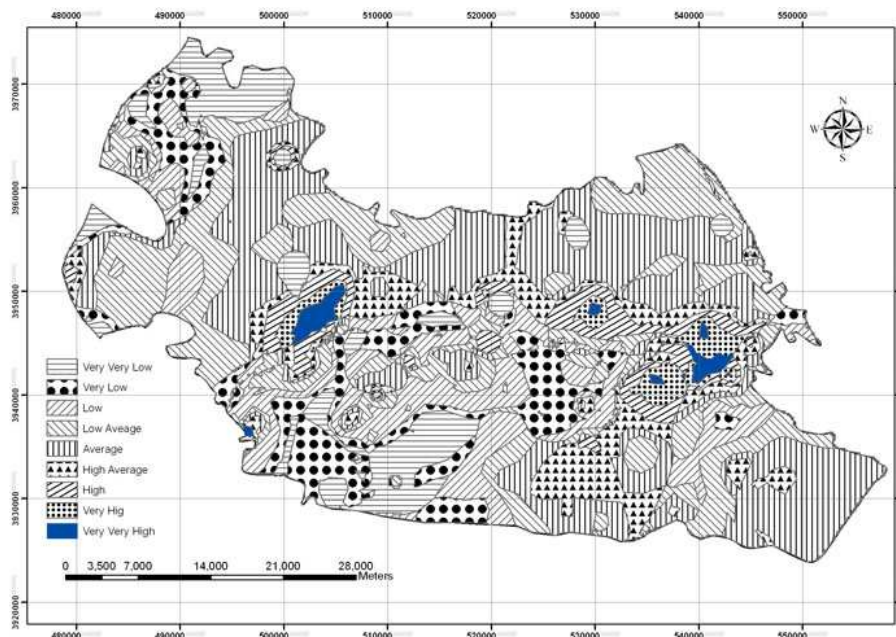
$$\sigma = [3, 3.5, 5, 4, 8, 9]$$

$$R_i = [1, 2, 4, 6, 8, 10]$$

با نوشتن معادله (۳) برای تمام پارامترهای مؤثر در محیط نرم افزار ArcMap ، طبقه بندی رتبه های هر یک از پارامترهای مؤثر انجام گرفت و سپس هر یک از نقشه های پارامترهای مؤثر و غیرمؤثر طبق فرمول (۱) در وزن مربوطه ضرب و با هم جمع گردید و در مجموع نقشه آسیب پذیری دشت تهران-کرج (شکل ۶) با استفاده از منطق فازی حاصل گردید. جدول (۳) درصد مساحت تحت پوشش هر کلاس را نشان می دهد که بیشترین آن مربوط به کلاس متوسط بوده و کمترین آن مربوط به کلاس خیلی خیلی بالا می باشد.

جدول ۳- درصد آسیب پذیری کلاس های مختلف در سطح دشت

شماره کلاس	کلاس آسیب پذیری	درصد آسیب پذیری منطق فازی	درصد آسیب پذیری منطق بولین
۱	خیلی خیلی کم	۹/۲	۲/۴
۲	خیلی کم	۱۰/۶	۸/۶
۳	متوسط کم	۱۲/۸	۱۹/۷
۴	کم	۲۲/۰	۴۶/۷
۵	متوسط	۲۸/۰	۱۴/۰
۶	بالا	۹/۳	۵/۷
۷	متوسط بالا	۴/۶	۲/۵
۸	خیلی بالا	۲/۳	۰/۳
۹	خیلی خیلی بالا	۱/۱	۰/۱



شکل ۶- نقشه آسیب پذیری دشت تهران-کرج با استفاده از منطق فازی

۴- نتیجه گیری

هدف از تحقیق انجام شده، تهیه نقشه آسیب پذیری آبخوان تهران - کرج بوده است. در این تحقیق از شاخص DRASTIC که تقریباً کاملترین شاخص در این زمینه است، استفاده گردید. با کمک نقشه تهیه شده، مناطق با استعداد آلوده شدن مشخص شده و می توان براساس آن مدیریت کیفی سفره آب زیرزمینی را انجام داد. مناطق با استعداد آلودگی بیشتر برای احداث مراکز صنعتی و یا کشاورزی با قابلیت آلوده سازی بالا مناسب نبوده و می توانند بسادگی آلوده شوند.

نتایج بدست آمده از تحقیق را می توان بشرح زیر خلاصه نمود:

- با مقایسه نقشه آسیب پذیری مدل فازی و مدل DRASTIC نتیجه گیری شد که در مدل فازی طبقه بندی ها توزیع یکنواخت تری بین کلاس های مختلف داشته، در حالیکه در منطق بولین درصد زیادی از مناطق (۴۶/۷ درصد) در محدوده کم آسیب پذیر قرار گرفت. در منطق فازی بیشترین درصد به کلاس متوسط (۲۸ درصد) تعلق گرفته است. در منطق بولین بسیاری از مناطق آسیب پذیر با پتانسیل خیلی کم و خیلی زیاد نادیده گرفته شده است.
- با توجه به نقشه آسیب پذیری بیشترین درصد پتانسیل آلودگی دشت مربوط به کلاس آسیب پذیری متوسط و کمترین آن مربوط به کلاس آسیب پذیری خیلی خیلی بالا می باشد.
- با توجه به نقشه آسیب پذیری شرق دشت مرز بین رودخانه کن و جاجرود و قسمتی از حاشیه غربی رودخانه کرج در غرب دشت کلاس آسیب پذیری بالا، در مرکز، قسمتی از جنوب، جنوب غربی و شمال غربی دشت کلاس آسیب پذیری کم و در بقیه نقاط دشت کلاس آسیب پذیری در حد متوسط می باشد.

۵- تقدیر و تشکر

این مقاله حاصل پروژه تحقیقاتی (محمدی، ۱۳۸۵) با حمایت مالی معاونت فنی و پژوهش ها شرکت سهامی مدیریت منابع آب (دفتر امور پژوهشی و پشتیبانی علمی) می باشد که نویسندگان از آن معاونت تشکر نموده، همچنین از معاونت مطالعات پایه منابع آب سازمان آب منطقه ای تهران که اطلاعات مورد نیاز این تحقیق را در اختیار قرار دادند، تشکر می نمایند.

۶- مراجع

بی نام (۱۳۸۰). گزارش مطالعات منابع آب های زیرزمینی دشت تهران، شرکت مهندسی مشاور جاماب.

شمسائی، ا. (۱۳۷۷). هیدرولیک جریان آب در محیط متخلخل، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۷۷.

محمدی، ک. (۱۳۸۵). تهیه نقشه آسیب پذیری منابع آب زیرزمینی دشت تهران-کرج، شرکت سهامی مدیریت منابع آب، معاونت فنی و پژوهش ها، گزارش طرح تحقیقات کاربردی، ۲۳۷ ص.

Aller, L., Bennet, T., Lehr, JH., Petty, RJ. and Hackett, G. (1987) DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeological settings. EPA/600/2-87/035. US Environmental Protection Agency, Ada, OK, USA.

Daly, D. and Drew, D. (1999). Irish methodologies for karst aquifer protection. In: Beek B (ed) Hydrogeology and engineering geology of sinkholes and karst. Balkema, Rotterdam, pp. 267-272.

Dixon, B., Scott, H. D., Steele, K. F. and Dixon, J. C. (2002). Prediction of aquifer vulnerability to pesticides using fuzzy rule-based models at the regional scale. *Physical Geography*, 23(2): pp. 130-153.

Foster, S.S. (1987). Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. In: Duijvenbooden W van, Waegeningh HG van (eds) TNO Committee on Hydrological Research, The Hague. Vulnerability of soil and groundwater to pollutants, Proceedings and Information. 38: pp. 69-86.

Harbaugh, A. W., Banta, E. R., Hill, M. C. and McDonald, M. G. (2000). MODFLOW-2000, The U. S. Geological Survey Modular Ground-water Model- Users guide to modularization concepts and the ground-water flow process. U.S. Geological Survey Open-File Report 00-92, 121p.

Johansson, P.O., Scharp, C., Alveteg, T. and Choza, A. (1999). Framework for groundwater protection-the management groundwater system as an example. *Groundwater*, 37(2): pp. 204-213.

Lee, S. and Choi, S. (1997). Groundwater pollution susceptibility assessment of Younggwang area using GIS technique (in Korean). *Journal of Korean Society on Groundwater Environment*, 4(4): pp. 223-230.

Lynch, S.D., Reynders, A.G. and Schulze, R.E. (1997). A DRASTIC approach to groundwater vulnerability

Department of natural resources division of water, water resources section. Groundwater pollution potential report no.45

Van Stemproot, D., Evert, L. and Wassenaar, L. (1993). Aquifer vulnerability index: a GIS compatible method for groundwater vulnerability mapping. Canadian Water Resources Journal, 18: pp. 25-37.

in South Africa. South African *Journal of Science*, 93 (2): pp. 59-60.

Malano, H.M. and Gao, G. (1992). Ranking and Classification of irrigation system performance using fuzzy set theory: case studies in Australia and China. *Irrigation and Drainage Systems*, (6): pp. 129-148.

Plymale, C.L. and Angle, M.P. (2002). Groundwater pollution potential of Fulton County, Ohio. Ohio

تاریخ دریافت مقاله: ۲۸ تیر ۱۳۸۴

تاریخ اصلاح مقاله: ۴ مهر ۱۳۸۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۳ آذر ۱۳۸۶