تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال دوازدهم، شماره ۱،بهار ۱۳۹۵
Volume 12, No. 1, Spring 2016 (IR-WRR)
۸۴-۹۴

مدل‌سازی مکان‌یابی تغذیه مصنوعی آبخوان کاشان با استفاده از روش‌های آماری، AHP و ملاحظات محیطزیستی آبهای زیرزمینی

جواد صمدی [۱*]

چکیده

مدیریت منابع آبهای زیرزمینی در مناطق خشک و نیمه‌خشک از اهمیت خاصی برخوردار است. عوامل مختلف طبیعی و انسانی در چند دهه اخیر باعث ایجاد شرایط بحرانی و افت سطح آبهای زیرزمینی شده است. در چنین مناطقی تغذیه مصنوعی آبهای زیرزمینی از مهمترین راهکارهای مدیریتی است. هدف از این پژوهش استفاده از AHP و روش‌های آماری (رتبه‌بندی فازی-آماری و بهینه‌سازی پارامترهای مدل تغذیه مصنوعی بر اساس رگرسیون غیرخطی و تحلیل حساسیت) جهت تعیین مناطق مناسب تغذیه مصنوعی آبهای زیرزمینی آبخوان کاشان می‌باشد. در این تحقیق از مدل تغذیه مصنوعی SMAGR بر اساس هفت پارامتر آلودگی آبهای زیرزمینی (GC)، نرخ نفوذپذیری خاک (IR)، قابلیت هدایت هیدرولیکی (HC)، آلودگی خاک (SP)، کاربری اراضی (LU)، شیب توپوگرافی (TS) و سطح آب ایستابی (WT) جهت مکان‌یابی تغذیه مصنوعی آبخوان کاشان و از اضافه کردن لایه خطرپذیری آلودگی آبخوان جهت مکان‌یابی مناطق مناسب تغذیه با ملاحظات محیط زیستی آبهای زیرزمینی استفاده گردید. لایه‌های اطلاعاتی در محیط GIS تهیه، رتبه‌بندی فازی-آماری و به صورت میانگین هندسی با وزن برابر تلفیق گردیدند. در ادامه از تحلیل حساسیت حذف پارامتری جهت تعیین وزن موثر پارامترها و بهینه‌سازی مدل استفاده گردید. بر اساس نتایج بدست‌آمده از روش‌های آماری و بهینه‌سازی مدل حدود ۱۵٪ و ۰/۱٪ از قسمت‌های غربی و جنوبی آبخوان مناسب تا بسیار مناسب تغذیه مصنوعی می‌باشد. همچنین حساسیت این مدل نسبت به حذف پارامترهای آلودگی آبهای زیرزمینی، نرخ نفوذپذیری خاک، قابلیت هدایت هیدرولیکی، آلودگی خاک، کاربری اراضی، شیب توپوگرافی و سطح آب ایستابی به ترتیب با وزن‌های موثر ۲/۹۶، ۲/۸۳، ۲/۴۱، ۲/۳۳، ۲/۲۱، ۲/۰۷ و ۱/۸۹ روند کاهشی نشان داد.

کلمات کلیدی: مکان‌یابی، تغذیه مصنوعی، آبخوان کاشان، AHP، رتبه‌بندی فازی-آماری، تحلیل حساسیت.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۴/۶/۲۲
تاریخ پذیرش مقاله: ۹۴/۱۱/۲۴

۱- دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد مهندسی منابع طبیعی، گروه آلاینده‌های محیطزیست، پژوهشکده علوم محیطی دانشگاه شهید بهشتی تهران.
*- نویسنده مسئول

Site Selection Modeling for Artificial Recharge in Kashan Aquifer Using Statistical Methods, AHP and Groundwater Environmental Considerations

*J. Samadi [1] **

Abstract

Management of groundwater resources, especially in arid and semi-arid areas, has great importance. Natural and anthropogenic phenomena in recent decades have caused critical conditions and fall in groundwater table. In such situations artificial recharge of groundwater is amongst the most important management strategies. Purpose of this study is the use of AHP and statistical methods (fuzzy-statistical ranking and parameters optimization of artificial recharge model based on nonlinear regression and sensitivity analysis) to determine suitable areas of artificial groundwater recharge in Kashan aquifer. In this study, SMAGR artificial recharge model was used for site selection artificial recharge in Kashan aquifer based on seven parameters of groundwater contamination (GC), soil infiltration rate (IR), capability of hydraulic conductivity (HC), soil pollution (SP), land use (LU), topographic slope (TS), and water table (WT). Adding layer of aquifer pollution risk was also used for site selection of suitable areas based on considerations of groundwater environmental conditions. The information layers were prepared in GIS environment and the fuzzy-statistical rating was combined based on geometric mean with equal weights. In addition, removal sensitivity analysis was used to determine the effective weight of parameters and to optimize the model. Based on the results obtained from statistical method and optimized model about 15% and 0.1% of the western and southern parts of aquifer are suitable to very suitable for artificial recharge. Also the sensitivity of the model showed a decreasing trend associated to different parameters of removed groundwater contamination, soil infiltration rate, hydraulic conductivity, soil pollution, land use, topographic slope and water table with effective weights of 2.96, 2.83, 2.41, 2.33, 2.21, 2.07 and 1.89, respectively.

Keywords: Site selection, Artificial recharge, Kashan aquifer, AHP, Fuzzy-Statistical rating, Sensitivity analysis.

Received: September 13, 2015
Accepted: February 13, 2016

1- M.Sc. Graduate in Natural Resources Engineering, Department of Environmental Pollutants, Researches Institute of Environmental Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran.
E-mail: Javad.Samadi09138287975@yahoo.com
*- Corresponding Author

۱- مقدمه

تغذیه مصنوعی عبارت از ذخیره و واردکردن آب به یک سازند نفوذپذیر با هدف تغذیه سفره آب زیرزمینی و به منظور استفاده مجدد از آن با رژیم و یا کیفیتی متفاوت به وسیله ایجاد تأسیسات اضافی یا تغییراتی در شرایط طبیعی منطقه است (Bize, 1972). با افزایش جمعیت، تقاضا برای منابع آب قابل اطمینان افزایش یافته است. مناطقی که منابع آب زیرزمینی منبع تأمین آب است و میزان برداشت از این منابع بیش از تغذیه آنهاست دارای وضعیتی بحرانی هستند (Kalantari et al., 2010). برداشت بیش از حد از سفره‌های زیرزمینی و در نتیجه افت این ذخایر ارزشمند پیامدهای گاه جبران‌ناپذیری خواهد داشت که مستقیم و غیرمستقیم انسان و سکونت‌گاههای انسانی را متأثر خواهند کرد. در چنین مناطقی تغذیهٔ مصنوعی آبهای زیرزمینی از مهمترین راهکارهای مدیریتی است (Mandal & Singh, 2004).

مکان‌یابی از مهمترین مسائل در تغذیه مصنوعی به حساب می‌آید (Bouwer, 2002). با توجه به قابلیت GIS در واردسازی، ذخیره و مدیریت، پردازش، تجزیه و تحلیل و ارائه خروجی داده‌های مکان‌دار، موفقیت طرحهای تغذیهٔ مصنوعی مستلزم جمع‌آوری و تکمیل داده‌ها و اطلاعات بسیار زیادی جهت مکان‌یابی است. نخستین پیش شرط برای احداث طرح تغذیه، شناسایی محل مناسب است (Kalantari et al., 2010). بهترین محل برای اجرای طرح‌های تغذیه مصنوعی، خاکهای درشت بافت، ابتدای آبرفت‌های ماسه‌ای، خاکهای سنگلاخی، مناطق کارستی، مسیل‌های با بستر شنی و مخروط‌افکنه رودخانه‌های فصلی می‌باشد (Hendrick et al., 1991 ; Rebhun et al., 1968 ; Samani & Behrooz, 1997 ; Schuh, 1990). از دیگر عوامل موثر نیز شامل نرخ بالای نفوذ ثابت خاکها، شیب پایین و شکل زمین مناسب، عمق بالای برخورد به سطح آب زیرزمینی، ضریب ذخیره، قابلیت انتقال و هدایت هیدرولیکی بالا و درشت‌دانه بودن منطقه غیراشباع و اشباع آبخوان، و نیز کیفیت مناسب و نبود شوری در خاک، آبخوان و آبهای زیرزمینی منطقه و وجود کاربری اراضی غیر انسانی جهت مکان‌یابی مناسب لازم می‌باشد.

نتایج تحقیقات USDA (1983) مشخص کرد که آبگذری خاک بیش از ۰/۶اینچ بر ساعت و شیب کمتر از ۸٪، شوری خاک کمتر از ۴ دسی‌زیمنس بر متر و سطح آبهای زیرزمینی بیش از ۱/۲۵متر مناسب پخش لجن فاضلاب می‌باشد. Chowdhury et al. (2010) در پژوهشی با استفاده از GIS، RS و MCDM، نسبت وزن لایه‌های ژئومورفولوژی، زمین‌شناسی، حجم زهکشی، شیب و قابلیت انتقال را بر اساس میزان ارتباط آنها با تغذیه و نرمال‌سازی وزن‌ها را بر اساس Saaty's AHP بدست آوردند نتایج مشخص کرد که حدود ۴۶٪ از ناحیه مناسب تغذیه منطقه مدینیپور (Medinipur) در غرب ناحیه بنگلادش، بیشتر در قسمت‌های با میانگین عمق آبهای زیرزمینی زیاد می‌باشد و سدها به عنوان ساختار تغذیه مصنوعی پیشنهاد شد. Mahdavi et al. (2011) از منطق فازی جهت کلاسه‌بندی و وزن‌دهی عوامل درنظر گرفته‌شده شیب، نفوذپذیری سطحی، ضخامت قسمت غیراشباع آبرفت، کیفیت شیمیایی آب زیرزمینی، کاربری اراضی و شبکه آبراهه‌ای و با عملگر حاصل‌ضرب جبری، عملیات تلفیق شاخصه‌ها را در نرم افزار ArcView انجام دادند. نتایج مشخص کرد که Collovial Fan لندفرم‌ها مناسب‌ترین واحدهای شکل زمین جهت اجرای پروژه‌های تغذیه مصنوعی در حوضه آبریز شهرکرد می‌باشد.

Riad et al. (2011) در پژوهشی با استفاده از مدل Eastman (2001) و استفاده از دو روش بولینی و مدل وزنی-همپوشانی مشخص کردند که روش بولینی غیر زمان‌بر و جهت تخمین اولیه برای نواحی گسترده و مدل وزنی-همپوشانی از دقت و انعطاف‌پذیری بالاتری در منطقه صنعتی شهر سادات (Sadat) مصر برخوردار است. Ramesht et al. (2012) در پژوهشی در منطقه آبخیز زرند ساوه (Zarand-Saveh) از روش‌های ELECTRE و ارزیابی خطی در GIS مناطق مناسب را بر اساس ماتریس مقایسه جفتی جهت تهیه ماتریس تصمیم‌گیری نرمال‌شده وزنی پارامترهای میزان بارندگی، حجم رواناب، شیب، تراکم رستنگاه و ارتفاع بدست آورد.

Nasiri et al. (2013) در تحقیقی جهت پخش سیلاب در حوزه گربایگان ایران از روش PROMETHEE II و AHP جهت رتبه‌بندی و وزن‌دهی هشت لایه موثر استفاده کرد نتایج بیانگر معنی‌داری تغذیه مصنوعی با مکان‌های کواترنری (Q_g)، واحدهای زمین شناسی (Q^{gsc})، واحدهای ژئومورفولوژی سنگفرشی و مخروط افکنه‌ها با شیب کمتر از ۳٪ می‌باشد.

Singh et al. (2013) در تحقیقی در پنجاب هند بر اساس هشت لایه ژئومورفولوژی، زمین شناسی، کاربری اراضی، حجم زهکشی، شیب، بافت خاک، قابلیت انتقال آبخوان و آبدهی ویژه و بر اساس سهم ارتباط آنها با تغذیه مصنوعی، وزن‌دهی شده و وزن‌های نرمال‌شده را بر اساس روش تحلیل سلسله مراتبی Saaty's AHP محاسبه کرده و مناسب‌ترین مکان در مرکز و غرب ناحیه به دلیل

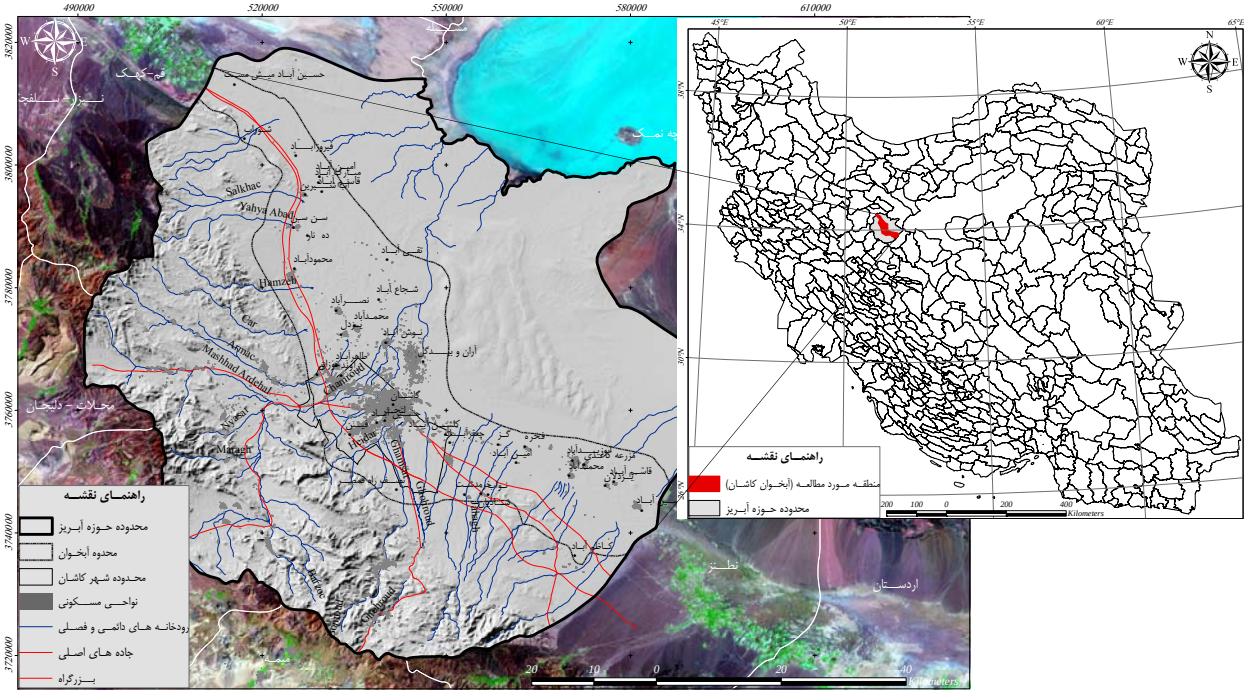
وجود نرخ نفوذپذیری بالا ناشی از دشت‌های سیلابی و آبرفتی و زمین‌های کشاورزی تعیین شد.

تحقیقاتی در آبخوان مشهد پارامترهای مواد و مصالح، نزولات آسمانی، میزان رواناب، مساحت، تراکم گسل، شیب، دما، ارتفاع و زیستگاه‌ها را به ترتیب اهمیت وزنی با استفاده از مدل TOPSIS، (Arab ameri et al., 2014) و تحقیقاتی در آبخوان سارابانگا (Sarabanga) زیرحوضه رودخانه کاووری (Cauvery) تامیل نادو (Tamil Nadu) هند مناطق مناسب تغذیه با استفاده از روش WIOA بر اساس پارامترهای زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی، خطواره، تراکم خطواره، تراکم زهکشی، کاربری اراضی و پوشش زمین تعیین شد (Vijay prabhu & Venkateswaran, 2015).

هدف و نوآوری از انجام این پژوهش استفاده از رگرسیون غیرخطی جهت رتبه‌بندی فازی-آماری پارامترهای هیدروژئولوژی موثر بر اساس تحقیقات انجام‌شده پژوهشگران، نظرات کارشناسی و روش AHP جهت تعیین نتایج بهینه و دقیق‌تر مناطق مناسب تغذیه مصنوعی آبخوان کاشان و نیز تعیین اهمیت و وزن پارامترها به خصوص آلودگی آبهای زیرزمینی، شوری خاک و هدایت هیدرولیکی بر اساس تحلیل حساسیت به صورت شاخصی جدید و بهینه‌شده می‌باشد.

۲- منطقه مورد مطالعه

دشت کاشان در دامنه کوههای کرکس و حاشیه کویر مرکزی ایران و در حدود ۲۴۰کیلومتری جنوب تهران به‌صورت دره‌ای باریک، با امتداد شمال غربی- جنوب شرقی با عرضی در حدود ۲۰ کیلومتر واقع می‌باشد که در شمال به دشت قم، در جنوب به ارتفاعات مجاور منطقه نطنز، از غرب به ارتفاعات و از شرق به محدوده دریاچه نمک منتهی می‌شود. آبخوان کاشان به وسعت $۱۸۳۰km^2$ (شکل ۱)، شهر کاشان و بخش مرکزی آن، شهر آران و بیدگل و همه بخشهای آن و اراضی کشاورزی واقع در دشت را شامل می‌شود و بین طولهای جغرافیائی ′۵۶ °۵۱ تا ′۶ °۵۱ و عرضهای ′۴۵ °۳۳ تا ′۲۹ °۳۴ محدود می‌باشد. تقریباً تمام بهره‌برداری از آبخوان آبرفتی کاشان نیز در همین محدوده صورت می‌گیرد. حداکثر ارتفاع آبخوان از سطح دریا ۱۶۰۲متر در حاشیه جنوب غربی و حداقل ارتفاع آن ۸۰۰متر در حاشیه شمالی آبخوان می‌باشد (Samadi, 2016).



شکل ۱- نقشه منطقه مورد مطالعه آبخوان کاشان

۳- مواد و روش پژوهش

۳-۱- سیستم پیشنهادی مدل تغذیه مصنوعی SMAGR[1]

اصلی‌ترین متغیرهای موثر و بکاررفته در اکثر روش‌های تغذیه مصنوعی به خصوص در مدل این پژوهش شامل سطح ایستایی آبهای زیرزمینی[2] (فاصله بین سطح زمین و سطح آب زیرزمینی، WT)، نفوذپذیری خاک[3] (مسافت طی شده جریان یا حرکت آب از سطح خاک به داخل زمین در واحد زمان، IR)، شیب توپوگرافی[4] (شیب و تغییرات سطح زمین، TS)، آلودگی و خصوصیت شیمیایی خاک[5] (میزان شوری و دیگر آلودگی‌هایی که قابل انتقال از طریق آب نفوذی به آبهای زیرزمینی می‌باشد، SP)، قابلیت هدایت هیدرولیکی[6] (حجم آبی که می‌تواند در منطقه اشباع و غیراشباع در واحد زمان از میانی سطحی واحد و عمود بر جهت جریان عبور کند، HC)، آلودگی آب زیرزمینی[7] (میزان شوری و دیگر آلاینده‌های شاخص و غالب موثر بر آب تغذیه‌شده به آبخوان، GC) و کاربری اراضی[8] (نوع استفاده از زمین در وضعیت موجود، LU) می‌باشند که مقدار و نوع اهمیت هریک از پارامترها طبق جدول ۱ بر اساس تحقیقات انجام‌شده، نظرات کارشناسی و روش AHP در یک سیستم پیشنهادی در محدوده رتبه ۱ تا ۱۰ طبقه‌بندی گردیده است. در این روش برای ارزیابی تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها از سیستم پیشنهادی مدل تغذیه مصنوعی SMAGR طبق رابطه (۱) استفاده می‌گردد که برای بدست آوردن آن به عامل درجه‌بندی و محدوده (جهت هم‌مقیاس‌سازی) مقدار پارامترهای مدل نیاز دارد.

$$SMAGR = \left(GC \times IR \times HC \times SP \times LU \times TS \times WT\right)^{\frac{1}{7}} \quad (۱)$$

مبنای تهیه این مدل بر این اساس است که پارامترهای موثره به عنوان عامل محدودکننده تغذیه مصنوعی محسوب می‌شوند و در شرایط خارج از استاندارد مورد نظر هر یک از پارامترها، شرایط را برای تغذیه مصنوعی بسیار ضعیف می‌گرداند از این رو از میانگین هندسی آنها استفاده شده است. با توجه به اینکه شرایط هیدروژئولوژی و زمین‌شناسی در مناطق مختلف متفاوت می‌باشد. وزن و رتبه‌های لایه‌های مدل می‌بایست متناسب با وضعیت هر منطقه ولی با درنظر گرفتن مبانی ارائه شده در جدول ۱ و بند (۳-۱-۱ و ۳-۲) تصحیح شوند. در این روش تصحیح وزن و رتبه پارامترها و نحوه تهیه آن با استفاده از روش‌های آماری، AHP و GIS طبق شکل ۲ و ۳ استفاده شده است.

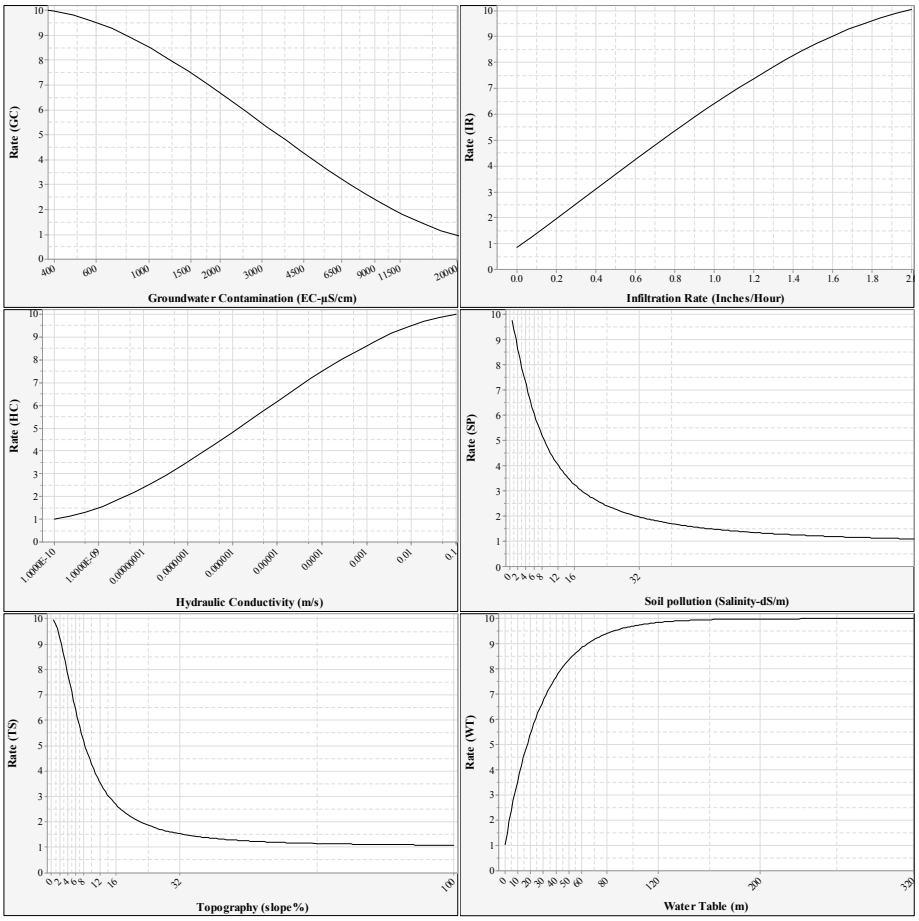
جدول ۱- سیستم پیشنهادی رتبه‌بندی پارامترهای مدل مکان‌یابی تغذیه مصنوعی SMAGR براساس تحقیقات انجام شده، نظرات کارشناسی و روش AHP

مدل تغذیه مصنوعی SMAGR	رتبه	Aquifer Quality		Aquifer & Unsaturated zone		Ground Level			
		آلودگی آبهای زیرزمینی ($EC_{\mu S/cm}$)	شوری خاک (dS/m)	سطح آب زیرزمینی (m)	هدایت هیدرولیکی (m/s)	نرخ نفوذپذیری نوع خاک (Inches/Hour)		کاربری اراضی	شیب (درصد)
بسیار مناسب (۱۰-۹)	۱۰	<۶۰۰	<۲	>۶۰	$\geq 10^{-2}$	قلوه سنگ	>۱/۸	مراتع و جنگل	<۲
مناسب (۹-۷/۵)	۹	۶۰۰-۱۰۰۰		۵۰-۶۰	10^{-3}-10^{-2}	شن درشت	۱/۵۵	بایر	۲-۴
	۸	۱۰۰۰-۱۵۰۰	۲-۴	۴۰-۵۰	10^{-4}-10^{-3}	شن متوسط	۱/۳۱	مراتع و جنگل متراکم	
اندک مناسب (۷/۵-۶)	۷	۱۵۰۰-۲۰۰۰		۳۰-۴۰	10^{-5}-10^{-4}	شن ریز	۱/۱۶	آبند و تالاب‌ها	۴-۸
	۶	۲۰۰۰-۳۰۰۰	۴-۸	۲۰-۳۰		شنی لومی	۱/۰۹		
						لومی شنی	۰/۹۳		
نامناسب (۶-۴)	۵	۳۰۰۰-۴۵۰۰		۱۵-۲۰	10^{-6}-10^{-5}	لومی شنی ریز	۰/۷۸		۸-۱۲
						لومی شنی خیلی ریز	۰/۷۳		
						لومی	۰/۶۷		
						لومی سیلتی	۰/۶۲		
	۴	۴۵۰۰-۶۵۰۰	۸-۱۶	۱۰-۱۵	10^{-7}-10^{-6}	سیلت	۰/۵۴	کشاورزی	۱۲-۱۶
بسیار نامناسب (۴-۱)	۳	۶۵۰۰-۹۰۰۰		۵-۱۰	10^{-8}-10^{-7}	رسی شنی	۰/۳۸		
						لومی رسی	۰/۳۱		
	۲	۹۰۰۰-۱۱۵۰۰	۱۶-۳۲	۱-۵	10^{-9}-10^{-8}	رسی سیلتی	۰/۲۳	سد و ذخایر آبی	۱۶-۳۲
	۱	>۱۱۵۰۰	>۳۲	<۱	$<10^{-9}$	رسی	<۰/۱۸	شهری و صنعتی	>۳۲

۳-۱-۱- هم‌مقیاس‌سازی[9] و رتبه‌بندی فازی-آماری

جهت هم‌مقیاس‌سازی با توجه به دانش کارشناسی و با استفاده از تابع طبقه‌بندی مجدد، تمام نقشه‌های معیار مربوط به مدل تغذیه مصنوعی به دو روش قطعی و فازی-آماری طبقه‌بندی می‌شوند. در روش قطعی مرز بالا و پایین طبقات یک کد بر اساس رتبه جدول در نظر گرفته می‌شود (مقدار ۱۰ نواحی با بهترین عملکرد، در حالیکه مقدار ۱ نواحی با ضعیف‌ترین عملکرد در تغذیه مصنوعی بر اساس آن پارامتر مشخص می‌شود). در این تحقیق از رگرسیون غیرخطی[10]

جهت فازی‌سازی و رتبه‌بندی آماری پارامترها استفاده شد. در این عمل سعی شد بهترین خط رگرسیون (رابطه‌های بدست آمده) بر اساس رتبه و مقدار بازه هریک از پارامترهای تغذیه مصنوعی انجام شود (شکل ۲). در مرحله بعدی نقشه‌های معیار در رابطه‌های بدست آمده از این خط رگرسیون قرار داده شده و لایه‌های معیار پارامترهای مدل تغذیه مصنوعی بر این اساس هم‌مقیاس شدند. از این نقشه‌ها برای تعیین میزان همبستگی و وزن‌دهی و از مجموع یا میانگین هندسی آنها برای تعیین میزان و اهمیت تغذیه مصنوعی بر طبق مدل مفهومی شکل ۳ استفاده می‌گردد.



شکل ۲- رتبه‌بندی فازی-آماری پارامترهای مدل تغذیه مصنوعی SMAGR

۳-۲- تحلیل حساسیت

برای آگاهی از میزان تأثیرگذاری هر کدام از پارامترهای به کاررفته شده و تصحیح آنها در ارزیابی تغذیه مصنوعی آبخوان منطقه مورد مطالعه، تحلیل حساسیت مدل انجام گرفته است. برای انجام این کار از تحلیل حساسیت حذف پارامتر[11] استفاده شد. این روش حساسیت نقشه تغذیه مصنوعی را به حذف یک یا چند پارامتر نشان می‌دهد و از طریق رابطه (۲) محاسبه می‌گردد (Lodwick et al., 1990).

$$S = \left| \frac{V}{N} - \frac{V'}{n} \right| \times 100 \Big/ V \qquad (۲)$$

در این رابطه S میزان حساسیت، V و 'V به ترتیب شاخص‌های تغذیه مصنوعی بدون حذف و با حذف پارامتر، N و n تعداد لایه‌های اطلاعاتی مورد استفاده برای محاسبه V و 'V هستند.

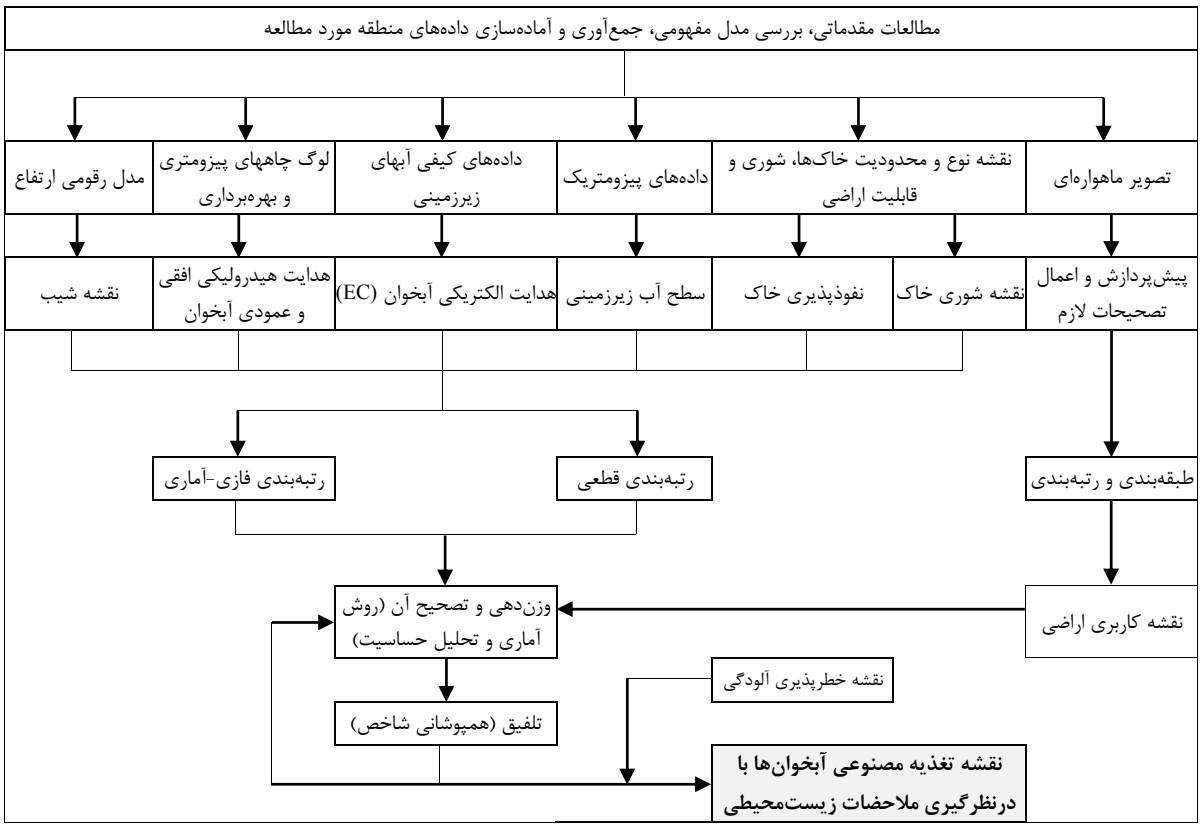
۳-۳- ملاحظات محیط‌زیستی آبهای زیرزمینی

تغذیه آبهای زیرزمینی با استفاده از پساب‌ها و رودخانه‌های آلوده شده به زهاب‌ها و نیز لجن فاضلاب از جمله مواردی هستند که نیاز به ملاحظات بهداشتی جهت جلوگیری از آلودگی آبهای زیرزمینی می‌باشند. تحقیقاتی که در این زمینه توسط ایستمن (Eastman, 2001) ارائه شده مبنی بر رعایت این اصول (مناطق دارای خطرپذیری آلودگی[12] کم و متوسط آبخوان) علاوه بر تغذیه

مناسب آبهای زیرزمینی می‌باشد. جهت تعیین خطرپذیری منطقه از مدل DRASTIC استفاده شده و طبق جدول ۲ جهت استفاده در منطق بولینی رتبه‌بندی شده است.

جدول ۲- رتبه‌بندی خطرپذیری آلودگی آبهای زیرزمینی

اهمیت	رتبه
بسیار کم تا متوسط	۱
زیاد تا بسیار زیاد	۰



شکل ۳- مدل مفهومی بررسی مناطق مناسب تغذیه مصنوعی آبخوان کاشان

٤- نتایج و بحث

٤-١- نقشه‌سازی پارامترها

آلودگی آب زیرزمینی (GC): یکی از پارامترهای بسیار مهم در تغذیه مصنوعی می‌باشد به طوریکه مناطقی از آبخوان که حتی تحت حرکت و نفوذ شوری آبهای زیرزمینی بیشتر از ۴۰۰۰μS/cm در بعضی از فصول قرار دارند می‌توانند باعث تخریب کامل آب تغذیه‌شده به آبخوان شوند.

جهت تهیه لایه کیفیت آبهای زیرزمینی باتوجه به آلودگی نفوذ آب شور از پارامتر EC و توسط میانیابی روش اسپلاین کششی[۱۳] در ArcGIS9.3 استفاده گردید. بر اساس نقشه حاصله حاشیه غربی آبخوان از کیفیت آب زیرزمینی مناسب‌تری برخوردار است.

نرخ نفوذپذیری خاک (IR): به طور معمول خاکهای درشت‌دانه و سبک از نرخ نفوذپذیری بالایی برخوردار هستند این امر باعث حجم بیش از ده برابری نفوذ شده و از تبخیر و هدر رفت آب سطحی جلوگیری می‌نماید.

به منظور تهیه نرخ نفوذپذیری خاک از نقشه نوع و محدودیت خاکها، نقشه قابلیت اراضی و لوگ پیزومترها بر اساس میزان نفوذپذیری هریک از بافت‌های خاک استفاده گردیده است. بر اساس این نقشه بیشتر قسمت‌های حاشیه غربی آبخوان به دلیل شیب و ارتفاع زیاد و وجود خاکهای درشت‌دانه و بعضی از قسمت‌های شرقی به دلیل تأثیر شن‌زارها، بادرفت‌ها و آبرفت‌های رودخانه‌های فصلی و دائمی از نرخ بالاتری برخوردار هستند.

قابلیت هدایت هیدرولیکی (HC): این پارامتر بر حجم افقی و عمودی آب عبوری در منطقه اشباع و غیراشباع موثر است همچنین بر میزان قابلیت انتقال، آبدهی و ضریب ذخیره آبخوان موثر می‌باشد

و به طور مستقیم و غیرمستقیم تحت تاثر جنس نـاحیه اشباع و غیـراشباع و میزان تخلخل آن است. بـه طور معمول و بـر اسـاس تحقیقات انجام شده نواحی از جنس شنی و درشت‌تر آبخوان و یا هدایت‌های بیشتر از ۰/۰۰۰۱ متر بر ثانیه با توجه به اینکه امکان حرکت افقی آب پس از برخورد عمودی به لایه‌های نفوذناپذیر (رسی، سنگ‌جوش و سیمانی‌شده) و بالاعکس وجود دارد، این مناطق می‌تواند جهت انجام تغذیه مصنوعی بسیار مناسب باشند.

بر همین اساس جهت تهیه این لایه، نواحی مخروطه افکنه‌ها آبرفت‌های جدید و پادگان‌های آبرفتی و واحدهای کواترنری و دیگر لایه‌های رسی و شنی به خوبی شناسایی، تعیین و در GIS بر اساس هدایت هیدرولیکی اندازه و نوع جنس ۴۰ ایستگاه لوگ (Kashan Water Resources Affairs, 2011) طبق رابطه‌های (۳) و (۴) محاسبه گردید.

$$\overline{K}_v = \frac{D}{\frac{d_1}{k_1} + \frac{d_2}{k_2} + \ldots + \frac{d_n}{k_n}} \quad (۳)$$

$$\overline{K}_h = \frac{k_1 d_1 + k_2 d_2 + \ldots + k_n d_n}{D} \quad (۴)$$

در این رابطه‌ها $\overline{K}_v$: هدایت هیدرولیکی عمودی، $\overline{K}_h$: هدایت هیدرولیکی افقی، D: ضخامت آبخوان، d: ضخامت لایه‌ها، k: هدایت هیدرولیکی لایه‌ها است.

پس از تعیین هدایت هیدرولیکی عمودی و افقی کل آبخوان از میانگین آنها به عنوان لایه‌ای مجزا در مدل استفاده گردیده و پهنه‌بندی گردید. براساس نقشه حاصله بیشتر حاشیه غربی آبخوان به دلیل درشت‌دانه بودن و وجود نواحی با واحدهای کواترنری، مخروطه افکنه‌ها و پادگان‌های آبرفتی از هدایت هیدرولیکی بسیار بالا و مناطق جنوب شرقی به دلیل لایه‌های نفوذناپذیر و حاشیه شرقی و شمالی به دلیل لایه‌های رسی از میزان بسیار پایین‌تری برخوردار هستند.

آلودگی خاک (SP): شوری خاک یکی از عوامل تأثیرگذار بر کیفیت آبهای زیرزمینی می‌باشد. به طور معمول خاکهایی که با شوری بیشتر از ۸dS/m از سطح تا عمق خود برخوردارند هنگامی که تحت تأثیر تغذیه بسیار بالا قرار می‌گیرند می‌توانند تأثیر بسیار جبران ناپذیری را برکیفیت آب زیرزمینی ایجاد کنند.

به منظور تهیه آلودگی شوری خاک از نقشه نوع و محدودیت خاکها، نقشه قابلیت اراضی و تصاویر ماهواره‌ای و نقشه‌های موجود استفاده گردید. بر اساس این نقشه مناطق شرقی و شمالی آبخوان به دلیل نزدیکی به دریاچه نمک و نیز شیب و ارتفاع کم و نمک‌زارهایی با بافت خاک رسی از شوری بالاتری برخوردار هستند.

سطح آب زیرزمینی (WT): یکی از عوامل تأثیرگذار بر میزان ذخیره آب زیرزمینی می‌باشد هرچه این پارامتر بیشتر باشد امکان استفاده از ویژگی‌های ذخیره و هدایت هیدرولیکی و انتقال برای آب زیرزمینی بیشتر فراهم می‌شود و از تبخیر لایه سطحی خاک جلوگیری می‌کند. بر اساس تحقیقات انجام شده عمق آب زیرزمینی بیش از ۲۵متر مناطقی مناسب تغذیه مصنوعی فراهم می‌کند.

برای تهیه لایه عمق آب زیرزمینی از روش درون‌یابی کریجینگ[۱۴] ۶۷ داده پیزومتریک مهرماه (Kashan Water Resources Affairs, 2011) استفاده شد (Samadi, 2016). براساس این نقشه حاشیه غربی آبخوان به دلیل ارتفاع و شیب زیاد دارای سطح آب زیرزمینی زیادی نسبت به مناطق پست‌تر و وجود لایه‌های نفوذناپذیر و هدایت هیدرولیکی کم در حاشیه قسمت‌های شرقی و جنوب شرقی آبخوان می‌باشد (Samadi, 2016).

کاربری اراضی (LU): برای تهیه لایه کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه از تصویر سنجنده ETM ماهواره Landsat 2003 استفاده شد. پس از تصحیحات هندسی لازم و نیز استفاده از روش Supervised برای طبقه‌بندی کاربری اراضی در نرم‌افزار Geomatica 2012 و نیز استفاده از روش رقومی‌کردن در GIS و Google earth و تطبیق با نقشه‌های موجود تهیه گردیـد (Samadi, 2015). بر اساس تحقیقات انجام‌شده مناطقی با پوشش گیاهی ضعیف و فاقد فعالیت‌های انسانی مناسب تغذیه مصنوعی هستند.

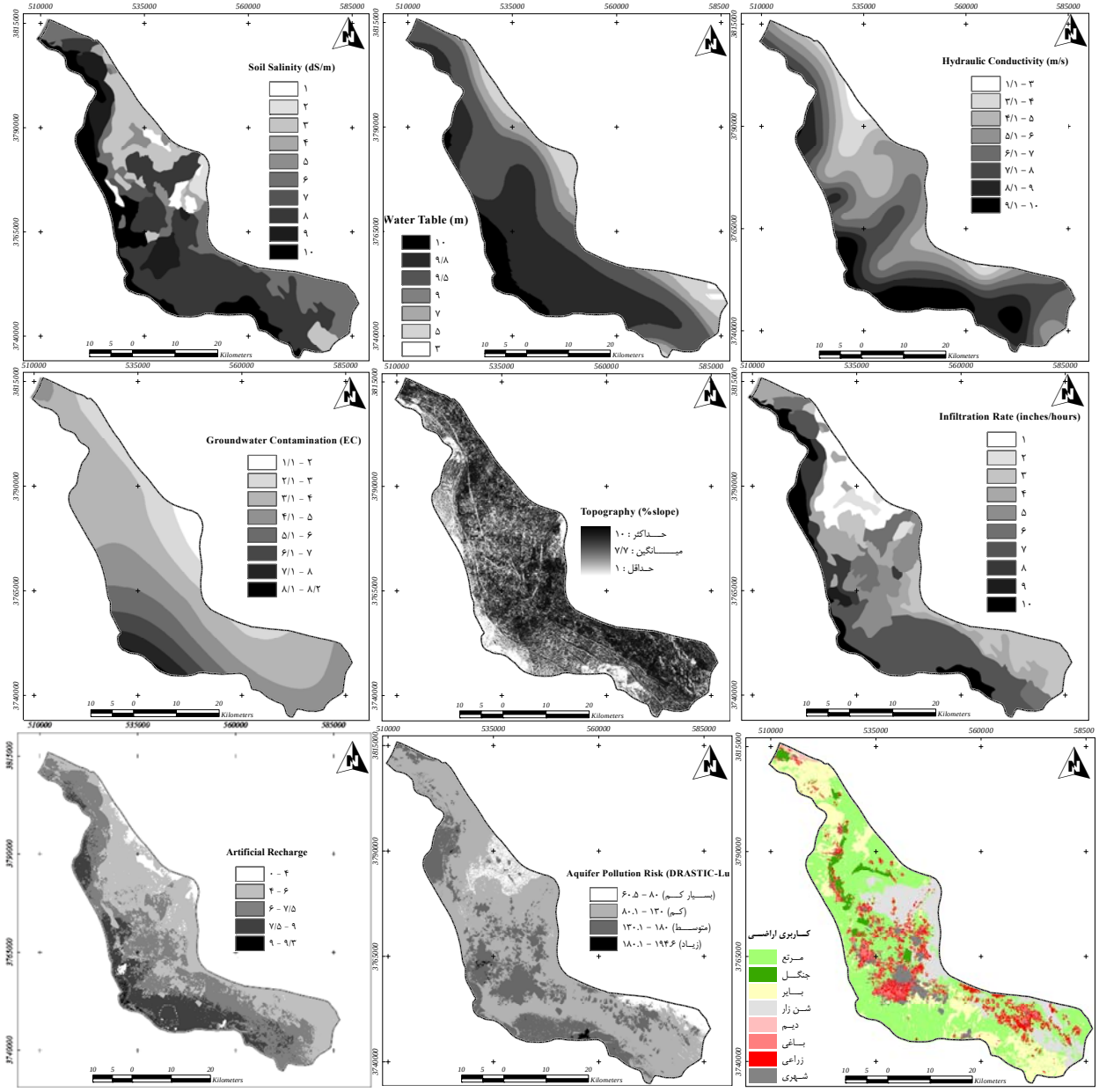
شیب توپوگرافی (TS): این پارامتر علاوه بر میزان نفوذپذیری بر نقشه نوع و شوری خاک نیز موثر می‌باشد. به طور معمول مناطقی که دارای شیب بیش از ۸٪ می‌باشند می‌توانند باعث کاهش تا ۴ برابری ثابت نرخ و میزان حجم آب نفوذی و افزایش هدررفتگی و تبخیر آب زیادی شوند.

برای تهیه لایه شیب توپوگرافی آبخوان کاشان از مدل رقومی ارتفاع با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ بر اساس توابع موجود در نرم‌افزار ArcGIS محاسبه و تهیه گردید. براساس این نقشه بیشتر حواشی غربی آبخوان به دلیل ارتفاع زیاد از شیب بالایی برخوردار هستند (Samadi, 2015).

٤-٢- نتایج حاصل از مدل‌سازی تغذیه مصنوعی آب زیرزمینی

تغذیه آبهای زیرزمینی با استفاده از پساب‌ها و رودخانه‌های آلوده‌شده به زهاب‌ها و نیز لجن فاضلاب از جمله مواردی هستند که نیاز به ملاحظات بهداشتی جهت جلوگیری از آلودگی آبهای زیرزمینی می‌باشند. جهت تعیین خطرپذیری آلودگی منطقه از مدل DRASTIC استفاده شده و جهت استفاده در منطق بولینی رتبه‌بندی (آسیب‌پذیری ویژه کم و متوسط با رتبه ۱ و آسیب‌پذیری ویژه زیاد تا بسیار زیاد با رتبه صفر) شده است.

برای تهیه نقشه تغذیه مصنوعی، از رابطه (۱) جهت انجام تغذیه مصنوعی بدون در نظرگیری و نیز از نقشه خطرپذیری آلودگی بر اساس مدل DRASTIC (Aller et al., 1987)، به صورت منطق بولینی جهت درنظرگیری ملاحظات محیطزیستی آبهای زیرزمینی طبق مدل ایستمن استفاده شد. همانطور که در نقشه‌ها (پارامترها و مدل تغذیه مصنوعی و نقشه خطرپذیری آلودگی) پیداست (شکل ۴)، مناطق جنوبی، غربی و شمال غربی در محل تلاقی رودخانه‌های دائمی و فصلی مناسب تغذیه مصنوعی می‌باشد.



شکل ٤- نقشه‌های رتبه‌بندی پارامترهای هدایت هیدرولیکی، سطح آب زیرزمینی، آلودگی شوری خاک، نرخ نفوذپذیری خاک، شیب توپوگرافی، آلودگی شوری آبهای زیرزمینی، کاربری اراضی، خطرپذیری آلودگی (Samadi, 2015) و تغذیه مصنوعی با در نظرگیری ملاحظات محیطزیستی آبخوان کاشان

منطقه بسیار مناسب در قسمت جنوب غربی آبخوان قرار گرفته که وسعت ناچیز و کمتر از ۱٪ از آبخوان می‌باشد، منطقه مناسب و مناسب اندک در حاشیه غربی و مرکزی آن تشکیل می‌دهد.

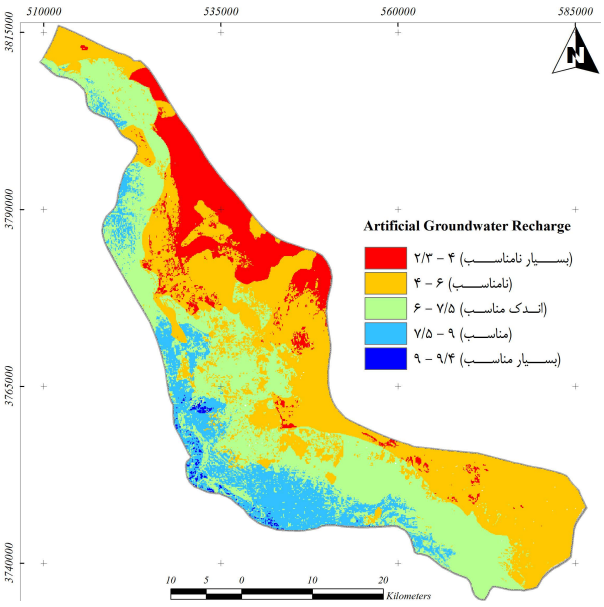
٤-۲-۱- نتایج حاصل از تحلیل حساسیت مدل پیشنهادی

بر اساس نتایج بدست‌آمده این تحلیل در جدول ۳ بیشترین حساسیت در مدل تغذیه مصنوعی SMAGR، در حذف پارامتر آلودگی آبهای زیرزمینی و نرخ نفوذپذیری خاک مشاهده می‌گردد. این موضوع به دلیل اهمیت بالای آن در تغذیه مصنوعی در مناطق خشک با توجه به شرایط جغرافیایی (دما و میزان تبخیر هوا)، کمی و کیفی آبهای سطحی و شوری آبهای زیرزمینی می‌باشد. حساسیت مدل نسبت به حذف پارامترهای هدایت هیدرولیکی، شوری خاک، کاربری اراضی، شیب توپوگرافی و سطح آب ایستابی در رتبه‌های سوم تا هفتم قرار می‌گیرد.

جدول ۳- وزن موثر پارامترهای مدل پیشنهادی SMAGR بر اساس تحلیل حساسیت حذف پارامتری

پارامتر	GC	IR	HC	SP	LU	TS	WT
تحلیل حساسیت	۲/۹۶	۲/۸۳	۲/۴۱	۲/۳۳	۲/۲۱	۲/۰۷	۱/۸۹

بر اساس وزن موثر بدست‌آمده در جدول ۳ مدل بهینه‌شده تغذیه مصنوعی آبخوان کاشان بر اساس روش‌های آماری در رابطه (۵) و شکل ۵ تهیه گردید.



شکل ۵- مکان‌یابی مناطق مناسب تغذیه مصنوعی آبخوان کاشان بر اساس مدل بهینه‌شده از روش‌های آماری

$$SMAGR = (GC^{2.96} \times IR^{2.83} \times HC^{2.41} \times SP^{2.33} \times LU^{2.21} \times TS^{2.07} \times WT^{1.89})^{\frac{1}{16.7}} \quad (۵)$$

براساس این شکل مناطق بیشتری که جهت انجام تغذیه مصنوعی ضعیف‌تر می‌باشد بدست آمد. همچنین مناطقی که مناسب تغذیه می‌باشد بیشتر در قسمت غربی و جنوبی آبخوان (۱۵درصد) و منطقه بسیار مناسب در قسمت جنوب غربی آبخوان (۰/۱درصد) متمرکز یافته‌اند که به دلیل اهمیت، وزن و شرایط مناسب‌تر پارامترهای آلودگی آبهای زیرزمینی، نرخ نفوذپذیری خاک، هدایت هیدرولیکی و آلودگی خاک در این قسمت از آبخوان می‌باشد.

۵- نتیجه‌گیری

این نتایج با یافته‌های حاصل از پژوهش‌های مشابه قبلی مطابقت دارد (بخش پیشینه پژوهش). اما نوع‌آوری این تحقیق در مقایسه با سایر تحقیقات مشابه انجام‌شده، استفاده از رتبه‌بندی‌های فازی-آماری پارامترهای مدل تغذیه مصنوعی با استفاده از روش رگرسیون غیرخطی می‌باشد به دلیل اینکه این روش با استفاده از نرم‌افزار Minitab17 از رتبه واقعی پارامترها بر اساس نتایج تحقیقات انجام‌شده استفاده می‌کند، خطا و عدم قطعیتی را که در کالیبره کردن رتبه پارامترها و یا استفاده از منطق فازی جهت غیرقطعی و فازی کردن رخ می‌دهد را به حداقل رسانده (حداکثر R^2 خط رگرسیون)، می‌توان به نتایج بهینه‌تر و صحیح‌تر در میزان و مقدار اهمیت مکانی مدل نهایی تغذیه مصنوعی دست یافت. همچنین پارامترهای در نظرگرفته‌شده در شرایطی تهیه شده‌اند که کمترین Collinearity و بیشترین اهمیت مورد نظر را داشته باشند. پارامترهایی چون شوری خاک و آلودگی آبهای زیرزمینی به دلیل تأثیر مستقیم کیفی، نرخ نفوذپذیری خاک به دلیل تأثیر مستقیم کمی بر تغذیه مصنوعی و نیز استفاده از هدایت هیدرولیکی (عمودی و افقی) آبخوان همراه با ضخامت ناحیه غیراشباع به دلیل اینکه بر بیشتر پارامترهای هیدروژئولوژیکی (ضریب ذخیره، قابلیت انتقال و ...) به صورت کمی موثر می‌باشد می‌تواند شرایط حائز اهمیتی را بر تغذیه مصنوعی آبخوان ایفا کند. همچنین با توجه به این مطلب و از آنجایی که هر کدام از پارامترهای مورد استفاده استاندارد مورد نظر را برای تغذیه مصنوعی نداشته باشند شرایط را برای دیگر پارامترها و مدل نهایی جهت انجام تغذیه مصنوعی موفق بسیار سخت می‌گرداند (باتوجه به وزن بدست آمده پارامترها نسبت به یکدیگر در جدول ۳) از میانگین هندسی آنها استفاده شده است.

پیشنهاد می‌شود از میزان روند افت و تراز آبهای زیرزمینی جهت نتایج بهتر و پیشگیرانه در مبارزه با هجوم آبهای شور به آبخوان نیز استفاده گردد.

پی نوشت‌ها

1-Site Selection Model of Artificial Groundwater Recharge
2-Water Table
3-Infiltration Rate
4-Topographic Slope
5-Soil Pollution (Salinity)
6-Hydraulic Conductivity
7-Groundwater Contamination
8-Land Use
9-Scaling
10-Nonlinear regression
11-Removal-parameter sensitivity analysis
12-Pollution risk
13-Spline with tension
14-Kriging

٦- مراجع

Aller L, Bennet T, Leher JH, Petty R, Aller J, Hackett G (1987) DRASTIC: A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. E.P.A., Report, No.600/2-87-035, 622p.

Arab ameri A, Ameripoor Z, Kazemi mohsenabadi S, Biglari, MR (2014) Zoning Mashhad watershed for artificial recharge of underground aquifers using TOPSIS model and GIS technique. Global Journal Inc, 14(8): 44-53.

Bize J, Lemoine J, Bourguet L (1972) L'alimentation artificielle des nappes souterraines. Masson et Cie, 160p.

Bouwer H (2002) Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering. Hydrogeology Journal 10(1):121-142.

Chowdhury A, Jha MK, Chowdary VM (2010) Delineation of groundwater recharge zones and identification of artificial recharge sites in west Medinipur district, west Bengal, using RS, GIS and MCDM techniques. Environmental Earth Sciences 59(6):1209–1222.

Eastman RJ (2001) Guide to GIS and image processing, Clark University, USA, 144p.

Hendrick JMH, Khan AS, Bannink MH, Birch D, Kidd C (1991) Numerical analysis of groundwater recharge through stony soils using limited data. Journal of Hydrology 127(1-4):173-192.

Kalantari N, Rangzan K, Thigale SS, Rahimi M (2010) Site selection and cost-benefit analysis for artificial recharge in the Baghmalek. Journal of Hydrogeology 18(3):761-773.

Kashan Water Resources Affairs (2011) Groundwater level in Kashan plain. (In Persian)

Lodwick WA, Monson W, Svoboda L (1990) Attribute error and sensitivity analysis of map operations in geographical information systems: suitability analysis. Journal of Geographic Information System 4(4):28-413.

Mahdavi A, Nouri emamzadei MR, Mahdavi najafabadi R, Tabatabaei SH (2011) Identification of artificial recharge sites using fuzzy logic in Shahrekord basin. Water and Soil Science (Science and Technology of Agriculture and Natural Resources) 15(2):63-76 (In Persian).

Mandal NC, Singh VS (2004) A new approach to delineate the groundwater recharge in hard rock terrain. Current Science 87(5):658–662.

Nasiri H, Darvishi boloorani A, Faraji sabokbar AH, Jafari HR, Hamzeh M, Rafii Y (2013) Determining the most suitable areas for artificial groundwater recharge via an integrated PROMETHEE II-AHP method in GIS environment (case study: Garabaygan basin, Iran). Environmental Monitoring and Assessment 185(1):707-718.

Ramesht MH, Arab ameri A, Soltanian M (2012) Zoning Zarand-Saveh watershed for artificial recharge of underground aquifers using ELECTRE method & linear assignment with GIS technique. Global Journal of Human Social Science Geography & Environmental GeoSciences 12(9):23-34..

Rebhun M, Schwarz J, (1968) Clogging and contamination processes in recharge wells. Water Resources Research, 4(6):1207-1217.

Riad PHS, Billib M, Hassan AA, Salam MA, Nour el din M (2011) Application of the overlay weighted model and boolean logic to determine the best locations for artificial recharge of groundwater. Journal of Urban and Environmental Engineering 5(2):57-66.

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):13-20 (In Persian).

Samadi J (2016) Spatial-temporal modeling of groundwater level variations of urban and rural areas in Kashan aquifer using GIS techniques. Environmental Science and Technology, 18(2):15p (In Persian).

study in Indian Punjab. Environmental Management 52(1):61-71.

USDA-SCS (1983) National soils handbook. Title 430, Washington Dc. Government Printing Office.

Vijay prabhu M, Venkateswaran S (2015) Delineation of artificial recharge zones using geospatial techniques in Sarabanga sub basin Cauvery river, Tamil Nadu. 15th International Conference on Water Resources Coastal and Ocean Engineering 4:1265-1274.

Samani N, Behrooz S (1997) Optimal distribution of artificial recharge and its stability. In: Proc. 8th International Conference on Rainwater Catchment Systems, Tehran, Iran, 182-189.

Schuh WM (1990) Seasonal variation of clogging of an artificial recharge basin in a northern climate. Journal of Hydrology 121(1-4):193-215.

Singh A, Panda SN, Kumar KS, Shekhar Sharma C (2013) Artificial groundwater recharge zones mapping using remote sensing and GIS: a case