



Application of Ordered Weighted Average (OWA) for Producing Map of Suitable Groundwater Recharge Zones in Salafchegan Plain, Iran

M.S. Mirakhorlo¹ and M. Rahimzadegan^{2*}

Abstract

Due to the depletion of groundwater resources in dry climates, establishing an effective procedure to delineate artificial groundwater recharge zones is of great importance. The objective of this study was to apply Ordered Weighted Average (OWA) multi-criteria evaluation method and fuzzification of layers to produce suitability maps of Salafchegan study area located in Qom province. To do this, different data layers including observation wells data, soil maps and reports, Digital Elevation Model and landsat-8 OLI, were used. Different ordered weights with different tradeoff (four procedures) were used to create suitability maps. Finally, by using a land-use filter as well as applying condition of proximity to tributaries and lineaments, few zones were indicated as the selected groundwater recharge zones. The risk-averse procedures (first and third procedures) did not introduce any suitable site for groundwater recharge. However, the second and fourth procedures did suggest 11 and 25 zones, respectively. To assess correlations of the information layers and results, principal components analysis was used. Results suggested that the slope and infiltration layers have strong positive correlation (more than 75%) and the electrical conductivity (EC) has a negative correlation with other layers (more than 50%).

Keywords: Multi-Criteria Evaluation, Ordered Weighted Average (OWA), Geographic Information Systems (GIS), Artificial Groundwater Recharge.

Received: November 24, 2018

Accepted: April 28, 2019

استفاده از میانگین وزن دار مرتب (OWA) برای تهیه نقشه نواحی مناسب جهت تغذیه آب زیرزمینی در محدوده دشت سلفچگان قم، ایران

محمدسعید میراخوړلو^۱ و مجید رحیمزادگان^{۲*}

چکیده

با توجه به اهمیت کاهش سطح آب‌های زیرزمینی در مناطق با اقلیم خشک، ارائه روش‌های مناسب جهت تعیین مناطق مناسب برای تغذیه آب‌های زیرزمینی از اهمیت بالایی برخوردار است. از این رو، هدف این تحقیق، استفاده از عملگر تصمیم‌گیری چندشاخصه میانگین وزن دار مرتب (OWA) و روش فازی‌سازی لایه‌ها برای تولید نقشه‌های نواحی مناسب جهت تغذیه آب زیرزمینی برای محدوده سلفچگان واقع در استان قم بود. در این راستا از لایه‌های اطلاعاتی شامل اطلاعات چاه‌ها، نقشه‌ها و گزارش‌های خاک‌شناسی، مدل رقومی ارتفاعی و تصویر سنجنده لندست-۸ OLI استفاده گردید. نقشه‌های تناسب با استفاده از OWA با بهره‌گیری از رویکردهای وزن‌دهی ترتیبی مختلف دارای ریسک‌پذیری متفاوت (چهار رویکرد) به منظور اعمال وزن‌دهی به دست آمد. در نهایت با اعمال فیلتر کاربری زمین و همچنین شروط نزدیکی به آبره‌ها و خطواره‌ها، نقاطی به عنوان نقاط منتخب به منظور تغذیه آب‌های زیرزمینی تعیین شد. رویکردهایی دارای ریسک‌پذیری کمتر (رویکردهای اول و سوم)، هیچ نقطه‌ای را به عنوان نقاط مناسب به منظور تغذیه آب‌های زیرزمینی ارائه نکردند؛ اما رویکرد دوم و چهارم به ترتیب ۱۱ و ۲۵ محدوده ارائه نمودند. به منظور بررسی همبستگی لایه‌های اطلاعاتی و نتایج از تحلیل مؤلفه‌های اصلی استفاده شد. نتایج تحلیل نشان داد که لایه‌های شیب و نفوذ دارای همبستگی بالای مثبت (بیش از ۷۵٪) و لایه هدایت الکتریکی دارای همبستگی منفی در مؤلفه اول (بیش از ۵۰٪) بوده است.

کلمات کلیدی: ارزیابی چندشاخصه، میانگین وزن دار مرتب (OWA)، سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، تغذیه مصنوعی آب زیرزمینی.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۹/۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۲/۸

1- M.Sc. Graduate of Water Resources Management, Faculty of Civil Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Water Resources Management, Faculty of Civil Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran. E-mail: rahimzadegan@kntu.ac.ir

*- Corresponding Author

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مدیریت منابع آب، گروه مهندسی منابع آب، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران.

۲- استادیار گروه مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران.

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

در هند را جهت تعیین مناطق مستعد برای احداث چاه‌های تغذیه آب زیرزمینی بررسی کردند. بدین منظور آنها از لایه‌های اطلاعاتی مختلف مانند شیب، ژئومورفولوژی و تغییرات آب زیرزمینی استفاده کردند. برای ارزیابی از مقادیر تخمین زده شده ۵۰ سایت تغذیه استفاده نمودند. نتایج نشان داد که ۲۹ چاه در ناحیه کلاس مناسب برای تغذیه آب زیرزمینی واقع شده‌اند.

Selvam et al. (2015) در محدوده‌ای در هند با استفاده از GIS و روش‌های سنجش از دور اقدام به تعیین نقاط مناسب برای تغذیه آب زیرزمینی نمودند. بدین منظور آن‌ها منطقه را از لحاظ پتانسیل آب زیرزمینی به سه دسته بالا، متوسط و پایین طبقه‌بندی نمودند. نتایج آنها حاکی از آن بود که حدود ۳۵ درصد از ناحیه دارای پتانسیل خوب برای تغذیه آب زیرزمینی در ناحیه مطالعاتی هستند. Steinel et al. (2016) با استفاده از روش وزن‌دهی خطی، منطق بولین و همچنین با استفاده از نقشه‌های محدودیت‌کننده^۵ اقدام به تولید نقشه مناطق دارای پتانسیل تغذیه آبخوان در حوضه‌ای در اردن نمودند. در این راستا، آنها نواحی را که در آنها رواناب سطحی حوضه با استفاده از فرآیند نفوذ قابل ذخیره به عنوان آب‌های زیرزمینی بوده است، بررسی نمودند. بدین منظور مناطقی به عنوان سایت‌های ذخیره آب‌های سطحی انتخاب شدند. نتایج آنها نشان داد که نواحی غیر دولتی مهمترین عامل در محدود کردن رویکرد جمع‌آوری آب‌های سطحی^۶ می‌باشند.

Samadi (2016) با استفاده از روش آماری، AHP و ملاحظات محیط زیستی اقدام به مدل‌سازی مکان‌یابی تغذیه مصنوعی آبخوان در کاشان کرد. در این تحقیق، از مدل رقومی ارتفاعی، هدایت هیدرولیکی، هدایت الکتریکی (EC)، داده‌های پیزومتریک و همچنین نقشه کاربری اراضی استفاده شد. همچنین، به منظور تحلیل حساسیت مدل پیشنهادی خود از روش حذف پارامتر^۷ استفاده کردند. نتیجه تحلیل حساسیت نشانگر حساسیت 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 وزنه‌های مؤثر ۲/۹۶، ۲/۸۳، ۲/۴۱، ۲/۳۳، ۲/۲۱، ۲/۰۷، ۱/۸۹ بود. Ghazavi et al. (2018) در شهر ارومیه با روش منطق فازی اقدام به تعیین نواحی مناسب برای چاه‌های تغذیه آب‌های زیرزمینی نمودند. در این راستا آنها از مدل SWMM^۸ برای تعیین کانال‌های زهکش با پتانسیل کافی برای رواناب سطحی استفاده کردند. همچنین به منظور تولید لایه‌ها از توابع فازی‌ساز خطی استفاده نمودند. نتایج آنها نشان داد که با اعمال لایه اطلاعاتی گردانان هیدرولیکی و تغذیه ویژه^۹ مقدار مساحت نواحی مناسب برای تغذیه آب‌های زیرزمینی به ترتیب فقط ۰/۷ و ۰/۲ کیلومتر مربع است.

بهره‌برداری بیش از حد از منابع آب‌های زیرزمینی منجر به افت سطح آب‌های زیرزمینی، شوری آب آبخوان، فرونشست و خشکسالی در بسیاری از نواحی زمین شده است (Zaidi et al., 2015). در مناطق با کمبود یا نبود منابع آب سطحی کافی، آب‌های زیرزمینی، منابع ارزشمندی برای تأمین آب در چنین نواحی هستند (Kolsi et al., 2013). لذا در چنین مناطقی استفاده از تغذیه مصنوعی می‌تواند بسیار موثر باشد. هدف از تغذیه مصنوعی آب‌های زیرزمینی توقف یا حتی برعکس کردن فرآیند پایین آمدن سطح آب‌های زیرزمینی، حفاظت آب‌های شیرین زیرزمینی در آبخوان‌های ساحلی در برابر هجوم آب شور اقیانوس‌ها و همچنین ذخیره آب شامل آب‌های مازاد سیل‌ها و غیره است (Asano, 2016).

انتخاب نواحی مناسب برای چاه‌های تغذیه آب زیرزمینی موجب افزایش کارایی این چاه‌ها می‌شود (Ghazavi et al., 2018). روش‌های متفاوتی مانند روش منطق بولین (Machiwal and Singh, 2015)، روش منطق فازی (Heydari et al., 2015; Zaidi et al., 2015) و روش‌های مبتنی بر تحلیل سلسله مراتبی (Aghaghol et al., 2017) و روش‌های تعیین نواحی مناسب برای احداث چاه‌های تغذیه مصنوعی ارائه شده است که با توجه به ناحیه مورد مطالعه، اطلاعات در دسترس و تناسب روش با یکدیگر متفاوت هستند. بسیاری از محققین در سال‌های گذشته از روش‌های ارزیابی چندمعیاره در مسائل مدیریت منابع آب از جمله شناسایی مناطق مستعد برای احداث چاه‌های تغذیه آب‌های زیرزمینی استفاده کرده‌اند. در این راستا، در بسیاری از مطالعات، به منظور شناسایی نواحی با پتانسیل بالا برای بسیاری از کاربردهای مرتبط با منابع آب از جمله تغذیه آب زیرزمینی از سنجش از دور^۱ (RS) و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی^۲ (GIS) بهره‌گیری شده است (Mirakhorlo and Rahimzadegan, 2018; Selvam et al., 2015). از جمله مهم‌ترین این مطالعات می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

Nasiri et al. (2013) با استفاده از روش ترکیبی PROMETHEE II-AHP به منظور وزن‌دهی و تعیین نواحی مناسب برای تغذیه آب زیرزمینی اقدام نمودند. در این راستا آنها از GIS و همچنین روش‌های ارزیابی چندمعیاره بهره‌گیری نمودند. آنها به منظور ارزیابی نتایج با برهم‌نهی لایه نواحی کنترل سیلاب^۲ و نقشه نواحی مناسب برای تغذیه آب‌های زیرزمینی و با توجه به همپوشانی این دو لایه، صحت نتایج خود را اثبات نمودند. (Machiwal and Singh, 2015) با استفاده از منطق بولین^۳ و تصمیم‌گیری چند معیاره با وزن‌دهی خطی، حوضه‌ای

بر اساس تحقیقات و روش‌های بررسی شده، موضوع تعیین نواحی مناسب برای تغذیه آب‌های زیرزمینی با استفاده از روشی کارآمد به خصوص در مناطق خشک و نیمه خشک با توجه به کمبود منابع آب در دسترس در چنین مناطقی از اهمیت بالایی برخوردار است. این مطالعه با هدف ارائه روشی جامع‌تر (با توجه به در نظرگیری وضعیت‌های مختلف) و نوآورانه با در نظرگیری و تأثیر حالت‌های وزن‌دهی مختلف با استفاده از روش OWA در دشت سلفچگان واقع در جنوب استان قم انجام شده است. جهت پیاده‌سازی از لایه‌های اطلاعاتی بافت خاک، تغییرات سطح آب زیرزمینی، شیب، نفوذ و هدایت الکتریکی با اعمال توابع فازی خطی، سیگموئید، و J شکل جهت استانداردسازی (تبدیل به بازه ۰-۱) لایه‌ها استفاده شده است. همچنین، چهار رویکرد متفاوت وزن‌دهی مرتب با درجه ریسک‌پذیری متفاوت علاوه بر وزن‌های به دست آمده از ماتریس مقایسات زوجی در نظر گرفته شده است. در انتها به منظور تعیین نقاط مناسب در محدوده، با برهم‌نهی نقشه‌های تناسب با خطواره‌ها و آبراهه‌ها اقدام به تعیین نقاط مناسب جهت تغذیه مصنوعی گردید. همچنین نقشه کاربری زمین به عنوان فیلتر نهایی بر روی نقشه تناسب به دست آمده اعمال گردید تا نواحی واقع در زمین‌های کشاورزی و مسکونی حذف گردند. در نهایت، از تحلیل مؤلفه‌های اصلی برای بررسی همبستگی بین اطلاعات استفاده شد.

همچنین مقایسه لایه هدایت هیدرولیکی و نقاط تعیین شده چاه‌های تغذیه نشان داد که نواحی با هدایت هیدرولیکی پایین و نواحی نزدیک به چاه‌های بهره‌برداری نواحی مناسبی برای تغذیه نمی‌باشند. Shafiei and Ghanbarzadeh (2019) با استفاده از ترکیب GIS و AHP مناطق مستعد برای تغذیه آب زیرزمینی برای پخش سیلاب در دشت خوی را بررسی نمودند. در این تحقیق، از شانزده معیار بهره‌گیری شد و شش سناریو برای تعیین مناطق مستعد پیشنهاد گردید. در جدول ۱ نیز نمونه روش‌های مورد استفاده برای تعیین نقاط و نواحی مناسب جهت تغذیه مصنوعی آب‌های زیرزمینی ارائه شده است.

روش میانگین وزن‌دار مرتب^{۱۰} OWA روشی جدید در تصمیم‌گیری چند معیاره است که می‌تواند منجر به نتایج قابل اطمینانی گردد (Feizizadeh and Blaschke, 2012). در این روش می‌توان یک طیف کامل بین محدوده‌های سناریوهای بین عملگرهای AND و OR منطقی را بررسی و محاسبه کرد. با توجه به کاربرد این روش در مسائل مختلف تصمیم‌گیری چندمعیاره همچون (Mokarram and Hojati, 2017; Tang et al., 2017; Viccaro et al., 2018)، در این پژوهش از این روش استفاده گردیده است.

Table 1- Different methods and data used to estimate potential sites for artificial groundwater recharge

جدول ۱- روش‌های استفاده شده به منظور مکان‌یابی نقاط مناسب برای تغذیه مصنوعی آبخوان

Authors	Method	Used data
(Saraf and Choudhury, 1998)	Ranking the thematic parameters in GIS	Geology and geomorphology, Lineament, Land use, NDVI image
(Chowdhury et al., 2010)	Multi-criteria decision making (MCDM)	Geomorphology, Geology, Slope, Drainage density, Aquifer transmissivity
(Sargaonkar et al., 2011)	AHP	Land use (IRS-P6, LISSIII), Soil Map, DEM
(Nasiri et al., 2013)	ROMETHEE II-AHP	Geomorphology, Geology, Drainage density, Slope, Aquifer transmissivity, Land use, Water quality, Alluvium thickness
(Agarwal et al., 2013)	Integration of RS and GIS using AHP	The SCS-CN model, groundwater depth data and morphological parameters (bifurcation ratio, elongation ratio, drainage density, ruggedness number, relief ratio, and circulatory ratio)
(Zaidi et al., 2015)	Boolean logic	Slope, Soil Texture, Vadose Zone thickness, TDS (Total Dissolved Solid), Type of water bearing formation, land-use/land-cover
(Ghazavi et al., 2018)	Fuzzy logic	Distance to Runoff Harvesting Point, Aquifer Depth, Distance to production well, Hydraulic Conductivity, Specific Recharge

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

گردید. اطلاعات چاه‌های پمپاژ برای مصارف کشاورزی مربوط به سال ۸۸ درون محدوده مورد مطالعه مانند مختصات چاه‌ها، اطلاعات متوسط سطح آب چاه‌ها و هدایت الکتریکی (EC^{11}) از سازمان آب منطقه‌ای قم دریافت گردید (شکل ۱). همچنین اطلاعات مربوط به جنس خاک، گزارش‌های قابلیت منابع خاک و اراضی و نقشه‌های نفوذپذیری از این سازمان تهیه شد. جدول ۲ نشان دهنده متوسط و ضریب تغییرات و انحراف معیار دو شاخص استفاده شده در این مطالعه و همچنین تعداد چاه‌های واقع در محدوده و متوسط بارش در محدوده مطالعاتی می‌باشد. جدول ۳ نیز نشان دهنده گروه‌های هیدرولوژیکی خاک بر اساس روش سرویس حفاظت خاک آمریکا (S.C.S) می‌باشد.

۳- روش تحقیق

مطالعه حاضر در پنج مرحله انجام شده است. این مراحل عبارتند از: (۱) تهیه و تولید لایه‌های اطلاعاتی مورد نیاز جغرافیایی، (۲) اعمال توابع فازی تولید وزن و اهمیت هر لایه، (۳) ارزیابی چند معیاره با استفاده از روش OWA، (۴) اعمال فیلتر کاربری زمین و (۵) تعیین خروجی‌ها و ارزیابی اهمیت هریک از ورودی‌ها در خروجی نهایی. شکل ۲ نشان دهنده روند کلی در نظر گرفته شده برای این مطالعه می‌باشد. در ادامه، هریک از مراحل با جزییات مورد نیاز شرح داده شده است.

۳-۱- تهیه و تولید لایه‌های اطلاعاتی مورد نیاز

در این تحقیق، پنج لایه اطلاعاتی شامل بافت خاک، نفوذپذیری سطحی، EC ، سطح آب زیرزمینی^{۱۳} و شیب به منظور اجرای روش ارزیابی چندمعیاره جهت تعیین نواحی مناسب تولید و استفاده شده‌اند.

۲-۲- اطلاعات مورد استفاده

در این مطالعه برای تولید نقشه کاربری محدوده مورد مطالعه از تصویر سنجنده OLI ماهواره لندست ۸ مربوط به تاریخ ۲۰۱۸/۹/۲۸ استفاده شد. همچنین مدل رقومی ارتفاعی SRTM-DEM از پایگاه داده (Earthexplorer, 2018) جهت انجام پردازش‌های مورد نیاز دریافت

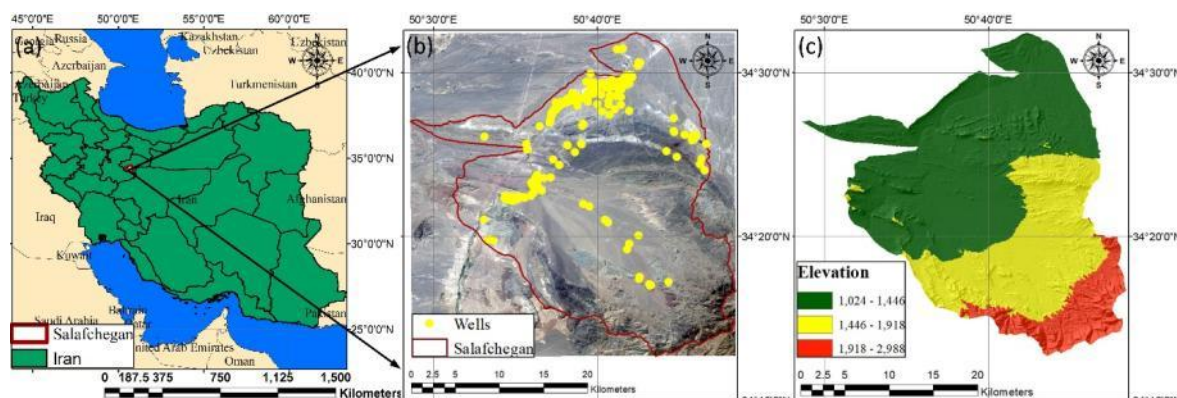


Fig. 1- Map of Salafchegan study area a) location of observation wells used in this study, and b) ranges of elevation (m)

شکل ۱- نقشه دشت سلفچگان به همراه نقشه (a) موقعیت جغرافیایی محدوده سلفچگان در کشور ایران (b) موقعیت چاه‌های مشاهداتی مورد استفاده در این مطالعه و (c) محدوده تراز ارتفاعی به متر

Table 2- Average, standard deviation, and coefficient of variation of EC and GW level
 جدول ۲- مقادیر متوسط، انحراف معیار و همچنین ضریب تغییرات هدایت الکتریکی و سطح آب زیرزمینی

	GW level (cm)	EC ($\mu\text{mohs/cm}$)	Number of wells	Yearly average of Precipitation (mm)
Average	11.19	3950	2230	160
Standard deviation	8.71	2689		
Coefficient of variation	0.77	0.68		

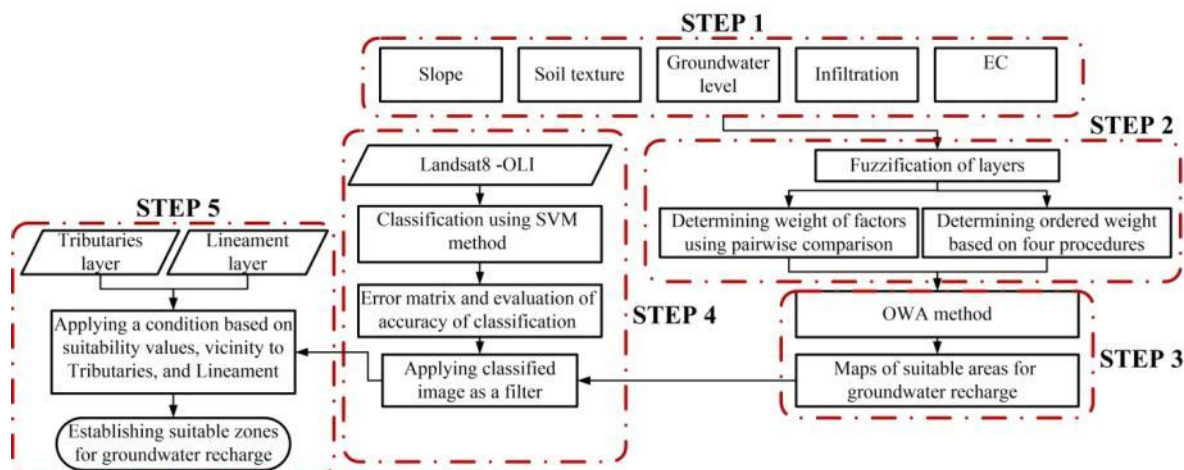


Fig. 2- The overall procedure of this study

شکل ۲- روند کلی محاسبات در این مطالعه

۳-۱-۱- بافت خاک

یکی از عوامل مهم در مناطق مستعد در ایجاد چاه‌های تغذیه، نفوذپذیری خاک است. نواحی با پستی و بلندی کم (زمین‌های صاف، همراه با نفوذپذیری کم) می‌توانند منجر به ایجاد چالاب^{۱۳} شده و در نهایت این آب می‌تواند در اثر تبخیر از دست رود. نفوذپذیری به مشخصات خاک (بافت و ساختار)، پوشش زمین و شیب وابستگی زیادی دارد (Zaidi et al., 2015). با فرض ثابت بودن پوشش زمین و شیب، نفوذپذیری خاک وابسته به بافت خاک و ساختار آن می‌باشد. بنابراین، نفوذپذیری خاک در نواحی غیر اشباع بسیار وابسته به بافت خاک بوده و یکی از عوامل مهم در کنترل تغذیه آب زیرزمینی است (Jang et al., 2013). در این مطالعه، خاک‌های لومی / سنگی و ماسه / رس نواحی نامناسب برای تغذیه آب زیرزمینی در نظر گرفته شده، در حالی که خاک‌های لومی، لومی / ماسه‌ای و خاک‌های ماسه‌ای به عنوان نواحی مناسب طبقه‌بندی شده‌اند. در این راستا، خاک منطقه مطالعاتی بر اساس مطالعات خاک‌شناسی و ارزیابی قابلیت اراضی منطقه به پنج کلاس مختلف رس، لوم درشت دانه، لوم و لوم ریزدانه، ماسه طبقه‌بندی شده است.

۳-۱-۲- نفوذپذیری سطحی

نرخ نفوذ به طور مشخص مرتبط با مقدار آب وارده به خاک یا خلل و فرج خاک می‌باشد. نفوذ ممکن است توسط عواملی (عموماً در سطح خاک) محدود شود. مهمترین پارامتر برای نرخ نفوذ مشخصه‌های فیزیکی خاک و سطح رویه خاک می‌باشد (Ghayoumian et al., 2007). جدول ۳ نشان‌دهنده گروه‌های هیدرولوژیکی و مقدار نفوذپذیری خاک‌های مربوطه است.

۳-۱-۳- هدایت الکتریکی (EC)

EC آب که نشانگر مقدار جامدات محلول در آب^{۱۴} می‌باشد (Rahimi et al., 2014)، شاخصی مناسب برای تعیین کیفیت آب است. این عامل توسط عوامل مختلفی مانند ترکیب‌های سنگی^{۱۵}، منبع آلودگی نقطه‌ای، تبخیر، تبخیر و تعرق، نفوذ، بارش، انحلال در مسیر حرکت آب از مبدأ تا آبخوان تأثیر می‌پذیرد (Dhar et al., 2015). با توجه به اینکه شاخص EC معیار خوبی برای در نظرگیری سرعت حرکت آب زیرزمینی و همچنین زمان سکون^{۱۶} (که منجر به حل ذرات یونی در آب می‌شود) است (Venkateswarlu, 1996)، لذا در این مطالعه این شاخص به عنوان شاخص کیفیت آب در نظر گرفته شده است.

Table 3- Hydrologic groups and infiltration rate of soils based on soil and land capability report (FRWO, 2015)

جدول ۳- گروه هیدرولوژیکی و شدت نفوذپذیری خاکها بر اساس مطالعات خاکشناسی و قابلیت اراضی (FRWO, 2015)

Hydrologic group	Characteristics	Infiltration rate (cm/hour)	Percentage in the study area
A	High infiltration even in completely wet soils. High drainage and coefficient of permeability with light and very coarse texture	11.43-7.62	2
B	Moderate infiltration rate even when soil is wet. Moderate drainage concentration. With moderate texture and earlier structure	7.62-3.81	61
C	Low infiltration rate, usually with impermeable layer which impede infiltration to lower parts of soil, soils with fine texture and low coefficient of permeability	3.81-1.27	36
D	Low infiltration rate, soils with high water table level and located on an impermeable bed, dense texture and low coefficient of permeability	1.27-0.5	1

به دلیل مقیاس‌های متفاوت معیارها، ضروری است که کلیه لایه‌ها قبل از استفاده در روابط، استاندارد شوند. (Voogd (1983) روندهای مختلفی را به منظور استاندارد کردن معرفی کرده است. در این پژوهش به منظور تعدیل و استانداردسازی با استفاده از تبدیل‌های فازی هریک از لایه‌ها به بازه ۰-۱ تبدیل شدند. از جمله مزایای استفاده از تبدیلات فازی می‌توان به پیوستگی در مقایسه با دسته‌های گسسته^۸، نرم بودن و تدریجی بودن تغییرات اشاره نمود (Eastman, 2015). به منظور حفظ نسبت مقادیر لایه‌های بافت خاک، نفوذپذیری و همچنین فاصله سطح آب زیرزمینی، این لایه‌ها به صورت خطی و صعودی فازی شده‌اند. با توجه به اینکه مقادیر بزرگتر از ۴۰۰۰ میکروموس بر ثانیه برای شاخص هدایت الکتریکی مقدار مناسبی نمی‌باشد، لذا در این مطالعه با این مقدار به عنوان نقطه کنترل و همچنین تابع سیگموئیدال با توجه به اعمال تغییرات نرم‌تر در نزدیکی نقطه کنترل اعمال شده است. همچنین با توجه اینکه شیب‌های بزرگتر از ۱۰ درجه مناسب نمی‌باشند، از تابع J شکل فازی با اعمال نقطه کنترل ۱۰ درجه استفاده شده است (جدول ۴).

۳-۱-۶- کاربری زمین

کاربری زمین عاملی کلیدی در تعیین نواحی مناسب برای تغذیه مصنوعی آب زیرزمینی است (Rahimi et al., 2014). بدین منظور، این لایه به عنوان یک فیلتر نهایی برای حذف نواحی نامناسب استفاده شده است. در این مطالعه نقشه کاربری زمین با استفاده تصویر ماهواره Landsat-8 OLI مربوط به سال ۲۰۱۸ محاسبه شده است. کلاس‌های تعیین شده شامل Farmland, Rangeland, Built-up, Riverbed است.

بر اساس (Samadi, 2016) تزریق آب در مناطقی که مقادیر EC بیشتر از ۴۰۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر هستند، می‌تواند باعث تخریب آب تغذیه شده به منابع آب زیرزمینی گردند. لذا در این مطالعه در توابع فازی اعمالی استفاده شده برای لایه، این مقدار به عنوان نقطه کنترل^{۱۷} در نظر گرفته شده است.

۳-۱-۴- سطح آب زیرزمینی

یکی از عوامل تأثیرگذار بر میزان هزینه و زمان برای تعیین مناطق مناسب چاه‌های تغذیه مصنوعی، اطلاعات سطح آب‌های زیرزمینی است. هر چه این پارامتر بیشتر باشد، امکان استفاده از ویژگی‌های ذخیره و هدایت الکتریکی و انتقال برای آب زیرزمینی بیشتر فراهم می‌گردد (Samadi, 2016). برای تهیه این لایه ابتدا اطلاعات ناقص یا داده‌های غیرمنطقی از اطلاعات چاه ثبت شده حذف شدند، سپس اطلاعات سطح آب ثبت شده چاه‌ها با روش کریجینگ^{۱۸} درون‌یابی شدند. لازم به ذکر است، با توجه به اینکه اندازه‌گیری‌ها بر اساس فاصله تا سطح آب درون چاه‌ها می‌باشد، این مقادیر معکوس شده‌اند.

۳-۱-۵- شیب

شیب یکی از شاخص‌های مهم به منظور کنترل فرآیند نفوذ آب به آب‌های زیرزمینی بوده و در واقع عاملی مهم برای تعیین تناسب تغذیه آب زیرزمینی است. در این پژوهش، اطلاعات شیب از مدل رقومی ارتفاعی با قدرت تفکیکی مکانی ۳۰ متر به دست آمده است. بر اساس تحقیقات متعدد مانند (Mahmoud and Alazba, 2014; Steinel et al., 2016; Zaidi et al., 2015) شیب‌های بزرگتر از ۱۰ درجه دارای امتیاز تناسب بسیار کمتری نسبت به شیب‌های کوچکتر هستند.

Table 4- Information layers of model and rate of changes and assigned values with fuzzy functions

جدول ۴- لایه‌های اطلاعاتی مدل و همچنین نرخ تغییرات و امتیازهای نسبت داده شده همراه با توابع فازی اعمالی

Layers	Rates and values	Fuzzy membership function
Soil texture	Sand=8, Loam and Coarse loam=7, Fine loam=3, Clay=1	Linear function, monotonically increasing shape $\mu = 1 / (1 + ((x - p_2) / (p_2 - p_1))^2)$ where $p_1 = \text{point1}$ and $p_2 = \text{point2}$. When $x > \text{point2}$, then $m=1$
Infiltration rate	Hydrologic group: A=7, B=5, C=3, D=1	Linear function, monotonically increasing shape
EC	Ranges from 402 to 10860 ($\mu\text{mhos/cm}$)	Sigmoidal function and monotonically decreasing, end control point = 4000
Groundwater level	Ranges from 2.5 to 68.7, inverted layer range from 0.014 to 0.386	Linear function, monotonically increasing shape
Slope	Ranges from 0 to 66.98	J-shape function, monotonically decreasing, end control point = 10 $\mu = \cos^2 \alpha$ where, in the case of a monotonically decreasing function: $\alpha = (1 - (x - p_a) / (p_b - p_a)) \times \pi / 2$

عامل نسبت به هم مقایسه می‌شود. مقدار اهمیت عامل اول به عامل دوم بین بازه ۹ (بسیار مهم) تا ۱/۹ (بسیار بی‌اهمیت) تعیین می‌شود. از آنجایی که ماتریس مقایسه دوجه‌دوی کامل، شامل مسیرهای چندگانه بوده که در آن اهمیت نسبی معیارها بررسی می‌شوند، می‌توان با استفاده از نرخ سازگاری^{۲۰} (CR) برای تعیین نرخ‌ها اقدام کرد. CR نشان‌دهنده احتمال آن است که ماتریس مرتب^{۲۱} به صورت تصادفی تولید شده باشد. Saaty (1977) نشان داد که ماتریس‌های با CR بیش از ۱/۰ باید دوباره ارزیابی شوند.

وزن‌های مرتب W_{ord} بر اساس ارزش هر شی (در فضای رستری هر پیکسل) از کم به زیاد اعمال می‌شوند. بدین صورت که وزن اول برای لایه اطلاعاتی که کمترین ارزش پیکسلی را دارد اعمال شده و به ترتیب وزن آخر به لایه با بیشینه ارزش پیکسلی اعمال می‌گردد. همانطور که پیش‌تر اشاره گردید، در تصمیم‌گیری با منطق بولین تغییرات در بازه دو حد انتهایی ریسک‌گریز و کاملاً ریسک‌پذیر می‌باشد و همچنین WLC^{22} روشی میانه رو بین این دو حد است. اما در روش OWA با تعیین وزن W_{ord} مختلف می‌توان در فضایی بین AND و OR منطقی نتایج را بررسی کرد.

پس از تهیه لایه‌های فازی و همچنین نقشه کاربری زمین، اقدام به تهیه لایه تناسب^{۲۳} تغذیه آب زیرزمینی در محدوده مطالعاتی گردید. از این رو وزن‌های ترتیبی به چهار نوع مختلف در این پژوهش اعمال گردید. وزن‌های ترتیبی در جدول ۵ نمایش داده شده است. در رویکرد اول، در بین وزن‌های ترتیبی، فقط وزن اول دارای مقدار واحد است و بقیه وزن‌ها برابر صفر هستند. در واقع این حالت همان حالت and در منطق بولین می‌باشد و بدینانه‌ترین حالت ممکن را در نظر می‌گیرد.

پس از طبقه‌بندی تصویر ماهواره‌ای، ماتریس خطای تصویر کاربری زمین به دست آمده، نشان دهنده صحت نتایج بود. در نهایت، مقدار تناسب پیکسل‌های شامل کلاس‌های کاربری زمین Farmland و Built-up صفر در نظر گرفته شد، زیرا احداث چاه در مناطق کشاورزی و ساخته شده و مسقف غیر منطقی است.

۳-۲- ترکیب لایه‌های اطلاعاتی با استفاده از OWA

برای تهیه نقشه نواحی دارای قابلیت مناسب برای تغذیه آب زیرزمینی از روش OWA به دلیل انعطاف‌پذیری و قدرت بیشتر در فضای تصمیم‌گیری استفاده شد (Eastman et al., 1998). این روش به نوعی تکامل یافته دو روش منطق بولین و ترکیب خطی وزن‌دهی شده می‌باشد. روش وزن‌دهی خطی روش میانه رو بین عملگرهای منطقی AND (بدبینانه‌ترین) و OR (خوش‌بینانه‌ترین) می‌باشد. در روش OWA با اعمال وزن دوم خارجی می‌توان در فضایی بین استراتژی‌های خوش‌بینانه و بدبینانه وزن‌دهی کرد:

$$S = \sum_{i=1}^n w_i x_i \times \prod c_j \quad (1)$$

که در آن S مقدار تناسب بوده، w_i وزن عامل i و x_i امتیاز معیار برای عامل i است. c_j امتیاز ضابطه j (صفر یا ۱ در تصاویر بولین) می‌باشد (Mokarram and Hojati, 2017). در این رابطه وزن هر عامل بر اساس دو وزن دیگر تعیین می‌شود:

$$W_i = W_{ord} \times W_{SRM} \quad (2)$$

W_{SRM} نشانگر وزن‌هایی است که از ماتریس مربعی متقابل به دست آمده از مقایسه دوجه‌دوی بین معیارها تعیین می‌شود. در این روش تعیین وزن که توسط (Saaty, 1977) ارائه شد، با مقایسه دو به دو عوامل دخیل در اندازه‌گیری برای هدف مشخص، نسبت میزان اهمیت دو

Table 5- Different considered procedures to calculate W_{ord} for generation of suitability maps as input to OWA

جدول ۵- حالت‌های مختلف تعیین وزن دوم W_{ord} برای تولید نقشه تناسب با استفاده از روش OWA

Weighted order	W1	W2	W3	W4	W5
First procedure	1	0	0	0	0
Second procedure	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Third procedure	0.5	0.25	0.125	0.0625	0.0625
Fourth procedure	0.0625	0.0625	0.125	0.25	0.5

۳-۳- تحلیل مولفه‌های اصلی و شاخص مربع کسینوس
 در این تحقیق جهت بررسی اهمیت و نحوه تأثیرگذاری لایه‌ها بر روی خروجی از تحلیل مؤلفه‌های اصلی^{۲۵} (PCA) روی اطلاعات ۶ لایه (۵ لایه فازی ورودی و خروجی مدل) استفاده گردید. بدین منظور نقشه‌های رستری^{۲۶} به ماتریس بردارهای اطلاعاتی چند بعدی تبدیل شده (هر بعد یک لایه اطلاعاتی)، سپس از بارگذاری^{۲۷} (همبستگی) دو مؤلفه اصلی برای هر چهار رویکرد استفاده گردید. همچنین به منظور نشان دادن میزان اهمیت هر مؤلفه، شاخص مربع کسینوس برای هر یک از مشاهدات محاسبه شده است. PCA یکی از روش‌های چندمعیاره آماری است که هدف آن استخراج اطلاعات مهم از جدول‌ها یا دسته‌های اطلاعاتی و ارائه به صورت متغیرهای متعامد جدید که مؤلفه‌های اصلی نامیده می‌شوند، می‌باشد. این اطلاعات به منظور نمایش الگوهای تشابه بین مشاهدات استفاده می‌شود (Jolliffe, 2011). در تحلیل مؤلفه‌های اصلی، مؤلفه‌ها از طریق تجزیه مقادیر منفرد به دست می‌آیند که رابطه آن در ادامه آمده است. ماتریس X دارای تجزیه مقادیر منفرد²⁸ (SVD) به صورت زیر می‌باشد:

$$X = PAQ^T \quad (3)$$

که در آن P یک ماتریس $I \times L$ بردارهای یکنای چپ^{۲۹} (که I نشان دهنده ماتریس همانی و L نشان دهنده رتبه ماتریس است و $L \leq \min\{I, J\}$)، Q ماتریس بردارهای یکنای راست و Δ ماتریس قطری مقادیر منفرد می‌باشد. ماتریس Q حاوی ضرایب ترکیب‌های خطی استفاده شده برای امتیازهای عوامل است. این ماتریس می‌تواند به صورت ماتریس تصویر³⁰ تعریف شود، زیرا با ضرب این ماتریس در ماتریس اولیه اطلاعات X ، تصویر مشاهدات مؤلفه‌های اصلی به دست می‌آید. مؤلفه‌ها (F) با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه است (Abdi and Williams, 2010):

$$F = PA = PAQ^T Q = XQ \quad (4)$$

مرکز ثقل ردیف‌ها^{۳۱}، g ، برابر با میانگین ستون‌های ماتریس دسته اطلاعات X است. همچنین فاصله اقلیدسی مشاهده نام به مرکز ثقل g برابر است با:

$$d_{i;g}^2 = \sum_1^j (x_{i,j} - g_i)^2 \quad (5)$$

روند تخصیص وزن در روش OWA در این حالت بدین صورت است که برای هر پیکسل مختصاتی مشخص در بین لایه‌های مختلف، آن لایه‌ای را که کمترین امتیاز را به خود اختصاص داده انتخاب و مقدار آن را وارد می‌کند. در رویکرد دوم وزن‌ها به صورت مساوی (۰/۲) تقسیم شده‌اند، در واقع نتیجه این رویکرد برابر روش WLC می‌باشد که فقط در آن وزن‌های تعیین شده توسط روش مقایسه جفتی اعمال می‌شود. در رویکرد سوم حالتی بین روش WLC و AND بولین در نظر گرفته شده است. در واقع در این رویکرد نیز وضعیتی بدینانه در نظر گرفته شده است و بیشترین وزن (۰/۵) برای پیکسلی در نظر گرفته می‌شود که دارای کمترین امتیاز است و وزن‌های کمتر که به ترتیب ۰/۲۵، ۰/۱۲۵ و ۰/۰۶۲۵ می‌باشند، برای مقادیر پیکسلی با ارزش بالاتر به ترتیب اعمال می‌گردند. رویکرد چهارم نیز بر عکس رویکرد اول بوده و در واقع خوشبینانه‌ترین حالت بین رویکردها می‌باشد. در این وضعیت که حالتی بین روش WLC و OR بولین می‌باشد، بزرگترین وزن به پیکسلی تعلق می‌گیرد که دارای بالاترین مقدار باشد.

در مرحله بعد، نقشه زهکشی و خطوط‌های منطقه مطالعاتی به دست آمده و رتبه‌بندی جریان با استفاده از روش استراهلر^{۳۲} (Tarboton et al., 1991) انجام گردید. سپس، برای تعیین نقاط مناسب برای تغذیه آب زیرزمینی بر اساس (Chowdhury et al., 2010) با استفاده از نقشه‌های تناسب به دست آمده، نقشه زهکشی و رتبه‌بندی جریان (استفاده از رتبه‌های بزرگتر از ۱) و نیز محدوده بافر ۱۰۰ متری نقشه خطوط‌وارها، نقاط مناسب برای چاه‌های تغذیه شناسایی گردید. شرط اعمالی به صورت مناطق دارای سه شرط حداقل ارزش پیکسلی تناسب بزرگتر از ۰/۳، درجه آبراهه بزرگتر از ۱ و همچنین قرار گرفتن در فاصله بیشینه ۱۰۰ متری خطوط‌وارها می‌باشد. لازم به ذکر است جهت در نظر گرفتن تأثیر کاربری زمین اعمال لایه کاربری زمین بر نتایج، لایه کاربری زمین با استفاده طبقه‌بندی تصویر ماهواره‌ای سنجنده OLI ماهواره LANSAT-8 و روش طبقه‌بندی SVM به دست آمد.

مقیاس و مقادیر متفاوت لایه‌ها با استفاده از توابع فازی ارائه شده در جدول ۴ استانداردسازی شده‌اند. شکل ۳-۳ تا ۳-۴ به ترتیب نشان دهنده لایه‌های فازی شده بافت خاک، نفوذ، هدایت الکتریکی، سطح آب زیرزمینی و شیب شده به دست آمده از اطلاعات چاه‌ها و درون‌یابی شده به روش IDW³² می‌باشند. همانطور که پیش‌تر توضیح داده شد در فازی‌سازی لایه‌های هدایت الکتریکی و شیب از توابع نزولی به دلیل اعمال صحیح تأثیرات لایه‌ها استفاده شده است. همچنین لایه سطح آب زیرزمینی نیز قبل از فازی‌سازی معکوس شده است تا این لایه نیز با تأثیر صحیح در مدل وارد گردد. افزون بر این، وزن‌های WSRM به دست آمده در جدول ۶ نشان داده شده‌اند. در این مطالعه میزان CR کمتر از ۰/۰۱ به دست آمد. شکل ۳-۴ نشانگر نقشه کلاس‌های کاربری شامل بستر رودخانه^{۳۳}، مرتع^{۳۴}، مناطق کشاورزی^{۳۵} و همچنین زمین‌های ساخته شده^{۳۶} می‌باشد. همچنین به منظور صحت‌سنجی این نقشه از ماتریس خطا و صحت کلی و ضریب کاپا برای ارزیابی صحت نتایج استفاده شد (Congalton and Green, 2008). که به طور کلی نتایج، نشانگر صحت کلی ۸۸/۷۷ و ضریب کاپا ۰/۷۳ بود.

شاخص مربع کسینوس نشان دهنده اهمیت مؤلفه برای آن مشاهده مشخص است. مربع کسینوس بیانگر میزان سهم مشارکت مؤلفه به مربع فاصله مشاهدات نسبت به مبدأ است (Abdi and Williams, 2010). این شاخص برابر با مربع کسینوس زاویه از مثلث راستی ایجاد شده با مبدأ، مشاهدات و تصویر مؤلفه در فضای مختصات جدید بوده و به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$\cos^2_{i,l} = \frac{f_{i,l}^2}{\sum_1 f_{i,l}^2} = \frac{f_{i,l}^2}{d_{i,l}^2} \quad (6)$$

به منظور بررسی همبستگی نتایج از مقادیر بارگذاری شده مؤلفه‌های اول و دوم لایه‌های اطلاعاتی و همچنین شاخص مربع کسینوس در این مطالعه با استفاده از دو بسته توابع FactoMineR، Factoextra (Husson et al., 2018, 2017;) توسعه داده شده توسط (Kassambara and Fabian Mundt, 2017) در زبان R به دست آمده است.

۳- نتایج و بحث

برای تولید نقشه‌های تناسب مدل OWA، لایه‌های موجود با توجه به

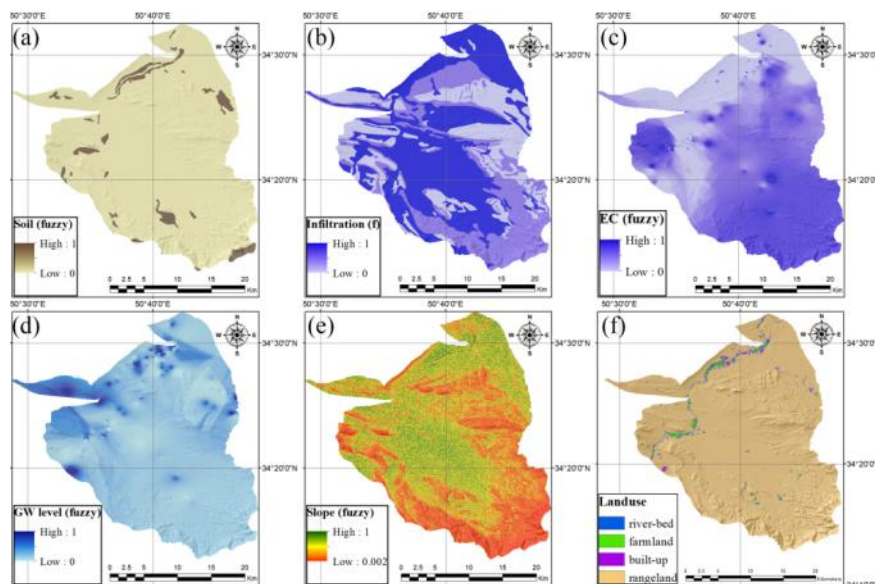


Fig. 3- Produced fuzzy layer maps of a) soil, b) infiltration, c) EC, d) groundwater level, e) slope, and f) land-use

شکل ۳- لایه‌های فازی تولید شده (a بافت خاک، b نفوذ، c هدایت الکتریکی، d سطح آب زیرزمینی، e شیب و f کاربری زمین)

Table 6- The estimated weight values of information layers

جدول ۶- مقادیر وزن به دست آمده برای هر لایه

Layers	Soil	Infiltration	Groundwater level	EC	Slope
WSRM	0.0647	0.1845	0.5017	0.1845	0.0647

چاه تغذیه در این مطالعه در رویکرد ۲ کمتر از حالت رویکرد چهارم (شکل ۵-d) است. این موضوع ناشی از وزن‌های ترتیبی و مقادیر به دست آمده تناسب برای هر پیکسل در حالت‌های مختلف است. بنابراین، اگر در محدوده سعی بر احداث چاه‌های تغذیه باشد، نقاط مشخص شده می‌توانند به منظور تعیین محل احداث چاه‌ها راهگشا باشند. از طرفی با توجه به در نظر گرفتن ریسک کمتر در رویکرد دوم (شکل ۵-b) نسبت به رویکرد چهارم (شکل ۵-d) می‌توان گفت که نقاط مشخص شده در این رویکرد دارای ارجحیت بالاتری نسبت به نقاطی غیر مشترک بین دو رویکرد می‌باشد.

شکل ۶ نشان دهنده درصد واریانس به دست آمده ناشی از اجرای PCA بر روی اطلاعات ۶ لایه (۵ لایه فازی ورودی و خروجی مدل) برای هر ترتیب وزن‌دهی است. در این نمودارها مقادیر ویژه از بزرگترین به کمترین ترسیم شده است. در شکل‌های ۶-a، ۶-b، ۶-d، دو عامل اول بیش از ۶۰ درصد سهم کل واریانس را به خود اختصاص داده‌اند. در شکل ۶-a عامل اول بیشترین تأثیر را در واریانس دارد، از طرفی چنانچه در تمامی شکل‌ها مشخص است، واریانس عامل ششم تقریباً در تمامی رویکردها مقدار ناچیزی است. نتایج حاکی از آن است که دو مؤلفه اول با توجه به واریانس بیشتر، بالاترین تأثیرات را داشته است. بنابراین، در ادامه بارگذاری مؤلفه اول و دوم ترسیم شده است.

نتایج تصاویر تولید شده برای هر کدام از رویکردهای ۱ تا ۴ به ترتیب در شکل ۴-a تا ۴-d نشان داده شده است. چنانچه در تصاویر نیز مشخص است، رویکردهای دوم و چهارم که دارای وضعیت خوشبینانه‌تری نسبت به دو رویکرد اول و سوم هستند و در بیشتر نقاط محدوده مطالعاتی دارای مقادیر بالاتر ارزش پیکسلی هستند. همچنین رویکردهای اول با سوم و دوم با چهارم دارای الگوی تقریباً مشابهی بوده و در مقدار ارزش هر پیکسل با یکدیگر تفاوت دارند.

با توجه به اینکه زمین‌های کشاورزی و همچنین مناطق ساخته شده از لحاظ موقعیت مکانی نواحی مناسبی برای احداث چاه‌های تغذیه نمی‌باشند، بدین منظور نقشه کاربری زمین به عنوان فیلتری بر روی نقشه‌های به دست آمده اعمال گردید تا ارزش پیکسل این نواحی را برابر با صفر کند. همچنین بر اساس اعمال شرط ارائه شده مبنی بر حداقل تناسب ۰/۳، و نزدیکی به آبراهه‌ها و خطوط راه‌ها، نقاطی به عنوان نقاط مناسب جهت تغذیه آب زیرزمینی تعیین شد. این نتایج نیز در شکل ۵ به ترتیب برای رویکردهای ۱ تا ۴ از a تا d نشان داده شده‌اند.

با توجه به نتایج موجود در شکل ۵، دو رویکرد اول و سوم که دارای وزن‌های ترتیبی بدبینانه‌ای نسبت به دو حالت دیگر هستند، دارای هیچ نقاط تلاقی نبودند. اما در دو حالت دیگر (رویکردهای ۲ و ۴) نقاطی به عنوان نقاط مناسب برای احداث چاه‌های تغذیه تعیین گردید. چنانچه در شکل ۵-b و ۵-d مشخص است تعداد نقاط تعیین شده برای احداث

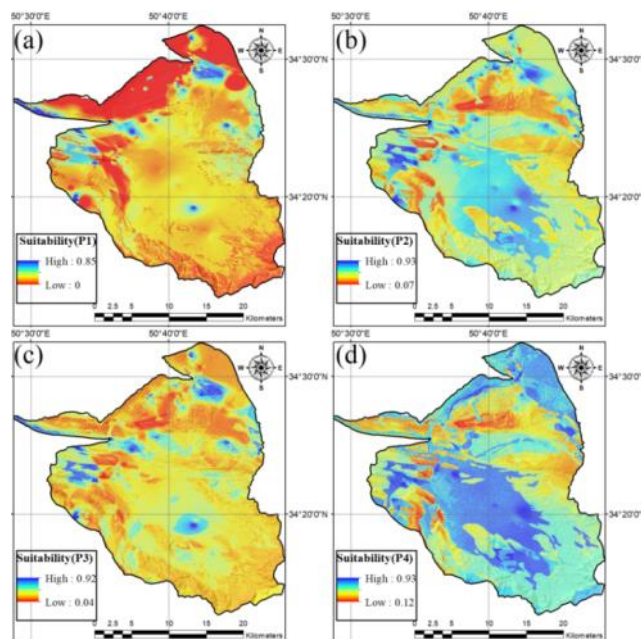


Fig. 4- Suitability maps produced from OWA for procedures 1 to 4 (a to d)

شکل ۴- نقشه تناسب به دست آمده از روش OWA (a رویکرد ۱، b رویکرد ۲، c رویکرد ۳ و d رویکرد ۴)

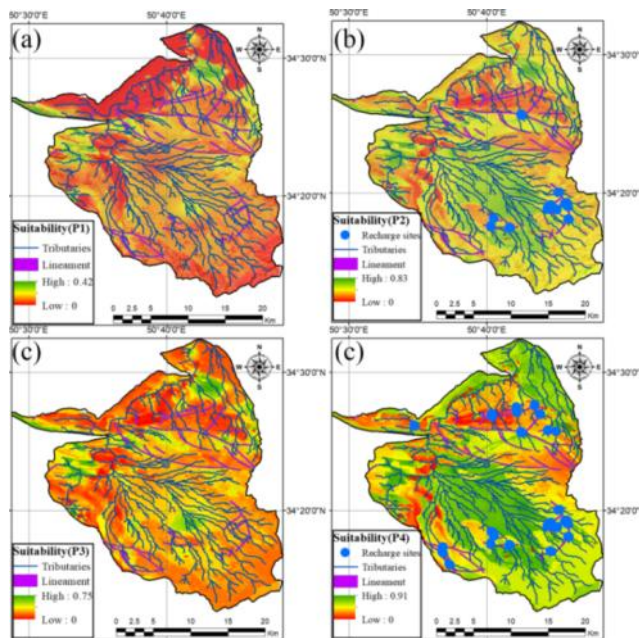


Fig. 5- The suitability maps by applying landuse filter and also, Lineaments, Tributaries and recharge sites for artificial groundwater recharge for procedures 1 to 4 (a to d)

شکل ۵- نقشه تناسب با اعمال فیلتر کاربری زمین و همچنین خطواره‌ها، آبراهه‌ها و نقاط تعیین شده برای تغذیه مصنوعی آب‌های زیرزمینی (a رویکرد ۱، b رویکرد ۲، c رویکرد ۳ و d رویکرد ۴)

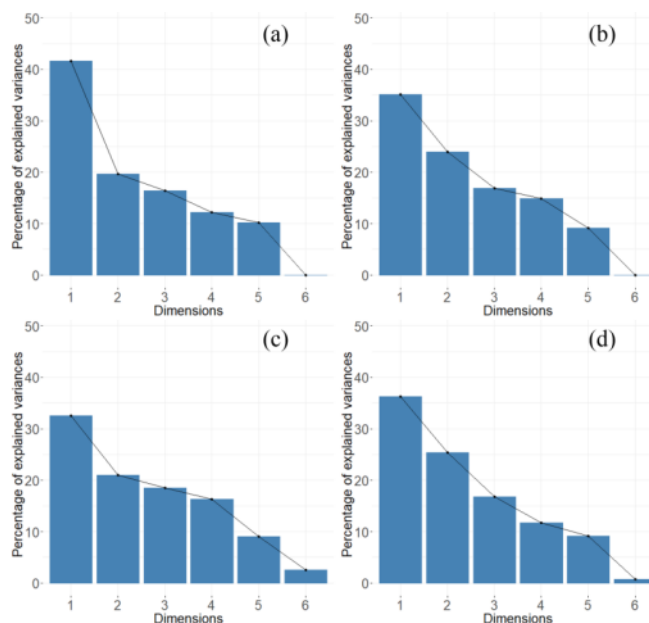


Fig. 6- Percentage of explained variances of six factors for procedures 1 to 4 (a to d)

شکل ۶- درصد واریانس به دست آمده برای شش عامل مختلف در چهار رویکرد ۱ تا ۴ (a تا d)

میزان اهمیت مؤلفه با شاخص مربع کوسینوس نشان داده شده است. این شاخص با رنگ‌های مختلف میزان اهمیت هر عامل را مشخص می‌سازد.

شکل ۷ نشان دهنده بارگذاری^{۲۷} (همبستگی) دو مؤلفه اصلی برای هر چهار رویکرد (a تا d) است. بر این اساس هرچه یک عامل به محیط دایره همبستگی‌ها نزدیکتر باشد، دارای اهمیت بیشتری بوده است، زیرا در هر دو مؤلفه اصلی یک و دو دارای سهم بالایی است. همچنین،

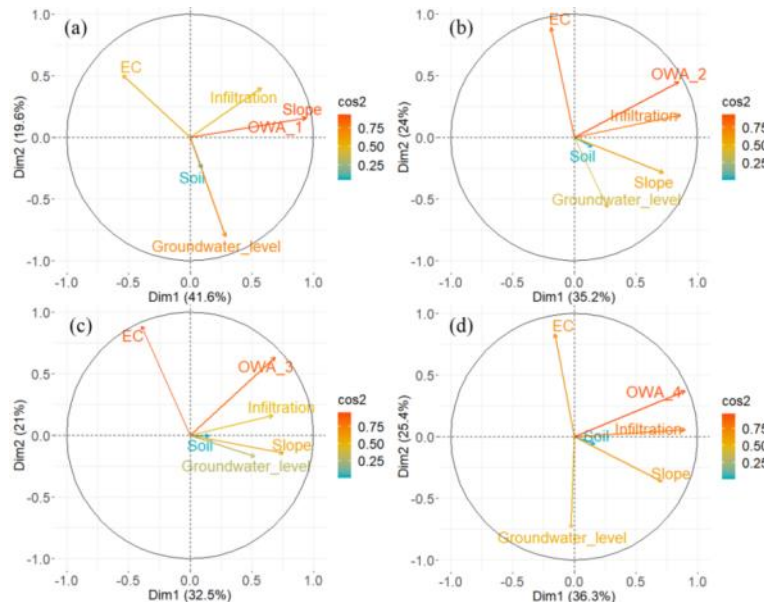


Fig. 7- The loading of first and second principal component for procedures 1 to 4 (a to d)

شکل ۷- بارگذاری دو مؤلفه اصلی برای چهار رویکرد ۱ تا ۴ (a تا d)

است که مقادیر Cos^2 نیز دارای وضعیت مشابه مقادیر بارگذاری است، که این حدود این مقادیر در شکل‌ها با تغییر رنگ مشخص شده است.

با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان دریافت که شاخص‌های شیب، نفوذ، سطح آب زیرزمینی به ترتیب دارای بیشترین سهم Cos^2 مثبت در تولید نتایج خروجی مدل بوده است. از طرفی دیگر به دلیل منفی بودن شاخص EC برای مؤلفه اول، می‌توان نتیجه گرفت که برخلاف سه لایه با سهم مشارکت بالای مثبت، لایه EC با وجود سهم بالا (با توجه به مقدار Cos^2) دارای تأثیر منفی در نقشه بوده است. برای نمونه، در مناطق غربی و شمال غربی محدوده با وجود بالابودن امتیازهای سه عامل شاخص‌های شیب، نفوذ، سطح آب زیرزمینی، شاخص EC دارای امتیاز مناسبی برای این مناطق نبود و برعکس در مناطق جنوبی و شرقی دارای امتیاز مناسب بوده است. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که کمترین تأثیر را لایه خاک با توجه به مقادیر اندک به دست آمده از تحلیل‌ها داشته است.

۴- نتیجه‌گیری

در بسیاری از نواحی با اقلیم خشک و نیمه‌خشک، تعیین نواحی مناسب برای تغذیه آب‌های زیرزمینی بسیار مهم است؛ بنابراین استفاده از روش‌های مناسب برای تعیین نواحی مناسب برای تغذیه مصنوعی آب‌های زیرزمینی می‌تواند بسیار راهگشا باشد. این مطالعه جهت تعیین نقاط مناسب برای تغذیه مصنوعی در ناحیه سلفچگان واقع در جنوب شهر قم با استفاده از روش OWA انجام گردید. بدین منظور از

بر اساس (Liu et al., 2003) بارگذاری‌های را می‌توان به سه دسته قوی (>0.75) ، متوسط $(0.5-0.75)$ و ضعیف (<0.5) تقسیم کرد. چنانکه در تمامی شکل‌ها (a تا d) مشخص است، بالاترین درجه معناداری Cos^2 مربوط به لایه اطلاعاتی تولید شده تناسب مناطق تغذیه مصنوعی است که در تمامی شکل‌ها این مقدار بیش از 0.75 بوده است. کمترین میزان معناداری مربوط به لایه بافت خاک بوده است که کمترین مقدار را به خود اختصاص داده است. چنانچه در شکل a-7 مشخص است شاخص شیب دارای بیشترین بارگذاری مثبت (0.94) می‌باشد. از طرفی شاخص EC دارای بارگذاری منفی (-0.54) است. همچنین مقادیر برای لایه‌های خاک (0.93) به عنوان کمترین و نفوذ (0.57) و سطح آب زیرزمینی (0.28) دارای بیشترین مقادیر می‌باشند. برای شکل b-7 مقادیر بیشترین مقدار بارگذاری همبستگی به ترتیب مربوط به نفوذ (0.86)، شیب (0.72)، سطح آب زیرزمینی (0.27)، بافت خاک (0.14) و همچنین مقدار هدایت الکتریکی (-0.18) می‌باشد. برای شکل c-7 بیشترین مقدار همبستگی به ترتیب مربوط به شیب (0.75)، نفوذ (0.67)، سطح آب زیرزمینی (0.52)، خاک (0.15) و هدایت الکتریکی (-0.39) است. به طور مشابه برای شکل d-7 این مقادیر به ترتیب برای نفوذ (0.89)، شیب (0.71)، خاک (0.17)، سطح آب زیرزمینی (-0.02) و هدایت الکتریکی (-0.16) است. چنانچه از مقادیر به دست آمده مشخص است، شاخص‌های نفوذ و شیب دارای بیشترین همبستگی بوده و دارای بیشترین تأثیر نیز می‌باشند و از طرفی شاخص هدایت الکتریکی در تمامی چهار حالت دارای همبستگی منفی است. همچنین لازم به ذکر

- 12- Groundwater Level
- 13- Ponding
- 14- Total Dissolved Solids
- 15- Lithological Composition
- 16- Residence Time
- 17- Control Point
- 18- Kriging
- 19- Crisp Sets
- 20- Consistency Ratio
- 21- Rating Matrix
- 22- Weighted Linear Combination
- 23- Suitability
- 24- Strahler
- 25- Principal Component Analysis
- 26- Raster
- 27- Loading
- 28- Singular Value Decomposition
- 29- Left Singular Vectors
- 30- Projection Matrix
- 31- The Inertia of a Column
- 32- Inverse Distance Weighting
- 33- Riverbed
- 34- Rangeland
- 35- Farmland
- 36- Built-up
- 37- Loading
- 38- Strong
- 39- Moderate
- 40- Weak
- 41- Significance
- 42- Contribution
- 43- Riske-Averse

۵- مراجع

- Abdi H and Williams LJ (2010) Principal component analysis. Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics 2(4):433-459
- Agarwal R, Garg PK, and Garg RD (2013) Remote sensing and GIS based approach for identification of artificial recharge sites. Water Resources Management 27(7):2671-2689
- Asano T (2016) Artificial recharge of groundwater. Elsevier, Butterworth-Heinemann, ISBN: 9781483163208
- Burrough PA (1989) Fuzzy mathematical methods for soil survey and land evaluation. Journal of Soil Science 40(3):477-492
- Chowdhury A, Jha MK, and 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

روش ترکیبی ارزیابی چندمعیاره OWA با استفاده از توابع فازی به منظور تولید نقشه تناسب بهره‌گیری شد و چهار نقشه تناسب مختلف با استفاده از چهار نوع روش وزن‌دهی ترتیبی (شامل حالت‌های خوشبینانه و بدبینانه در فضای تصمیم‌گیری) تولید شد. همچنین به منظور تعیین نقاط مناسب، سعی بر اعمال فیلترهای مختلف مانند کاربری زمین، خطواره‌ها، شبکه آبراهه و همچنین ارزش تناسب هر پیکسل شد. در نهایت نیز با استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی، همبستگی و نحوه تأثیر لایه‌ها بررسی شد.

در این مطالعه چهار رویکرد مختلف با درجه وزن‌دهی مختلف در نظر گرفته شد. این رویکردها دارای وضعیت‌های مختلفی بین وضعیت‌های ریسک‌پذیری کم و ریسک‌گریز بودند. رویکرد اول دارای ریسک‌گریزترین حالت، رویکرد دوم حالتی میانه‌رو، رویکرد سوم حالتی میان رویکرد اول و دوم و رویکرد چهارم ریسک‌پذیرترین رویکرد بوده است. نتایج به دست آمده حاکی از آن بود که با توجه به الگوی وزن‌دهی ترتیبی لایه‌ها دو رویکرد اول با سوم و همچنین دوم با چهارم دارای الگو مشابه با مقادیر متفاوت بودند. بالاترین ارقام تناسب به منظور تهیه نقشه تغذیه آب‌های زیرزمینی برای رویکرد شماره ۴ به دست آمد؛ زیرا وزن‌دهی ترتیبی این رویکرد با درجه ریسک‌پذیری کمتری نسبت به حالت‌های دیگر صورت گرفت. در انتها، با اعمال فیلتر کاربری زمین و شروط ارائه شده بر روی نقشه‌های تناسب به دست آمده، حدود ۱۱ محدوده برای احداث چاه تغذیه در رویکرد دوم و برای رویکرد چهارم حدود ۲۵ محدوده مشخص گردید. اما در دو رویکرد ۱ و ۳ به دلیل اعمال وزن‌ها با درجات ریسک‌پذیری کمتر^۳ نقاطی که شروط ارائه شده را دارا باشند، به دست نیامد. بنابراین می‌توان برای ایجاد چاه‌های تغذیه به ترتیب از نقاط به دست آمده در رویکردهای دوم و چهارم استفاده کرد. همچنین نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی نشانگر این بود که شاخص‌های شیب و نفوذ دارای بیشترین همبستگی مثبت بوده و همچنین شاخص هدایت الکتریکی دارای همبستگی منفی با دیگر لایه‌های اطلاعاتی می‌باشد.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Remote Sensing
- 2- Geographic Information Systems
- 3- Flood Spreading Control
- 4- Boolean Logic
- 5- Constraint Maps
- 6- Water Harvesting
- 7- Removal-Parameter Sensitivity Analysis
- 8- Storm Water Management Model
- 9- Hydraulic Gradient and Specific Recharge
- 10- Ordered Weighted Averaging
- 11-Electrical Conductivity

- determine potential zones of groundwater recharge based on borehole data. *Catena* 101:178-187
- Jolliffe I (2011) Principal component analysis. International encyclopedia of statistical science. Springer, 1094-1096
- Kassambara and Fabian Mundt A (2017) Factoextra: extract and visualize the results of multivariate data analyses. Available at: <http://www.sthda.com/english/rpkgs/factoextra>.
- Kolsi SH, Bouri S, Hachicha W, and Dhia H Ben (2013) Implementation and evaluation of multivariate analysis for groundwater hydrochemistry assessment in arid environments: a case study of Hajeb Elyoun-Jelma, Central Tunisia. *Environmental Earth Sciences* 70(5):2215-2224
- Liu C-W, Lin K-H, and Kuo Y-M (2003) Application of factor analysis in the assessment of groundwater quality in a blackfoot disease area in Taiwan. *Science of The Total Environment* 313(1-3):77-89
- Machiwal D and Singh PK (2015) Comparing GIS-based multi-criteria decision-making and Boolean logic modelling approaches for delineating groundwater recharge zones. *Arabian Journal of Geosciences* 8(12):10675-10691
- Mahmoud SH and Alazba AA (2014) Identification of potential sites for groundwater recharge using a GIS-based decision support system in Jazan region-Saudi Arabia. *Water Resources Management* 28(10):3319-3340
- Mirakhorlo MS and Rahimzadegan M (2018) Application of sediment rating curves to evaluate efficiency of EPM and MPSIAC using RS and GIS. *Environmental Earth Sciences* 77(20)
- Mokarram M and Hojati M (2017) Using ordered weight averaging (OWA) aggregation for multi-criteria soil fertility evaluation by GIS (Case study: Southeast Iran). *Computers and Electronics in Agriculture* 132:1-13
- Nasiri H, Bolorani AD, Sabokbar HAF, Jafari HR, Hamzeh M, and Rafii Y (2013) Determining the most suitable areas for artificial groundwater recharge via an integrated PROMETHEE II-AHP method in GIS environment (case study: Garabayan Basin, Iran). *Environmental Monitoring and Assessment* 185(1):707-718
- Rahimi S, Roodposhti MS, and Abbaspour RA (2014) Using combined AHP-genetic algorithm in artificial groundwater recharge site selection of Gareh Bygone Plain, Iran. *Environmental Earth Sciences* 72(6):1979-1992
- Congalton RG and Green K (2008) Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices. CRC Press
- Dhar A, Sahoo S, and Sahoo M (2015) Identification of groundwater potential zones considering water quality aspect. *Environmental Earth Sciences* 74(7):5663-5675
- Earthexplorer (2018) No Title. <https://earthexplorer.usgs.gov/> (available at 2018). Available at: <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- Eastman JR (2015) TerrSet manual. Accessed in TerrSet version 18:1-390
- Eastman JR, Jiang H, and Toledano J (1998) Multi-criteria and multi-objective decision making for land allocation using GIS. *Environment and Management* 9:227-252
- Feizizadeh B and Blaschke T (2012) Uncertainty analysis of GIS-based ordered weighted averaging method for landslide susceptibility mapping in Urmia Lake Basin, Iran. Seventh International Geographic Information Science Conference, September, 18-21
- FRWO (2015) Land capability and soil report of Aliabad area located in Qom province (In Persian). Ministry of Agriculture - Forest, Range & Watershed Management Organization-I.R. of IRAN
- Ghayoumian J, Saravi MM, Feiznia S, Nouri B, and Malekian A (2007) Application of GIS techniques to determine areas most suitable for artificial groundwater recharge in a coastal aquifer in southern Iran. *Journal of Asian Earth Sciences* 30(2):364-374
- Ghazavi R, Babaei S, and Erfanian M (2018) Recharge wells site selection for artificial groundwater recharge in an urban area using fuzzy logic technique. *Water Resources Management* 1-14
- Heydari Aghagol M, Ghoami E, and Rostami Barani HR (2017) Finding potential groundwater resources using fuzzy logic (Case study: South Khorasan Province). *Iran Water Resources Research* 13(1):211-215
- Husson F, Josse J, Le S, Mazet J, and Husson MF (2018) Package 'FactoMineR'. Obtenido de Multivariate Exploratory Data Analysis and Data Mining: <http://cran.r-project.org/web/packages/FactoMineR/FactoMineR.pdf>
- Husson F, Lê S, and Pagès J (2017) Exploratory multivariate analysis by example using R. Chapman and Hall/CRC
- Jang C-S, Chen S-K, and Kuo Y-M (2013) Applying indicator-based geostatistical approaches to

- Shafiei M and Ghanbarzadeh Lak M (2019) Modeling artificial groundwater nourishing (through flood spreading) site selection process based on GIS technique and AHP method (Case study: Khoy Plain Aquifer). *Iran Water Resources Research* 14(5):253-264 (In Persian)
- Steinel A, Schelkes K, Subah A, and Himmelsbach T (2016) Spatial multi-criteria analysis for selecting potential sites for aquifer recharge via harvesting and infiltration of surface runoff in north Jordan. *Hydrogeology Journal* 24(7):1753-1774
- Tang Z, Yi S, and Xiao Y (2017) A probabilistic GIS-OWA approach for flood susceptibility assessment. *Geoinformatics, 2017 25th International Conference on. IEEE*, 1-5
- Tarboton DG, Bras RL, and Rodriguez-Iturbe I (1991) On the extraction of channel networks from digital elevation data. *Hydrological Processes* 5(1):81-100
- Venkateswarlu KS (1996) Water chemistry: industrial and power station water treatment. New Age International (P), Ltd., New Delhi, 28(12)
- Viccaro M, Cozzi M, Vastola A, and Romano S (2018) Promoting small-scale biofuel production: a qualitative GIS-OWA methodology for land suitability analysis of winter rapeseed. *Multicriteria Analysis in Agriculture* 151-165
- Voogd H (1983) *Multicriteria evaluation for urban and regional planning*. Pion London
- Zaidi FK, Nazzal Y, Ahmed I, Naeem M, and Jafri MK (2015) Identification of potential artificial groundwater recharge zones in Northwestern Saudi Arabia using GIS and Boolean logic. *Journal of African Earth Sciences* 111:156-169
- RWCQ (2015) Water quality and pollution report of Salafchegan-Neizar study area. Qom Regional Water Company of QOM
- Saaty TL (1977) A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology* 15(3):234-281
- Samadi J (2016) Site selection modeling for artificial recharge in Kashan aquifer using statistical methods, AHP and Groundwater Environmental Considerations. *Iran-Water Resources Research* 12(1):84-94 (In Persian)
- Saraf AK and Choudhury PR (1998) Integrated remote sensing and GIS for groundwater exploration and identification of artificial recharge sites. *International Journal of remote sensing* 19(10):1825-1841
- Sargaonkar AP, Rathi B, and Baile A (2011) Identifying potential sites for artificial groundwater recharge in sub-watershed of River Kanhan, India. *Environmental Earth Sciences* 62(5):1099-1108
- Schmucker KJ (1984) *Fuzzy sets, natural language computations, and risk analysis*. Computer Science Press
- Selvam S, Magesh NS, Chidambaram S, Rajamanickam M, and Sashikkumar MC (2015) A GIS based identification of groundwater recharge potential zones using RS and IF technique: a case study in Ottapidaram taluk, Tuticorin district, Tamil Nadu. *Environmental Earth Sciences* 73(7):3785-3799
- Shaban A, Khawlie M, and Abdallah C (2006) Use of remote sensing and GIS to determine recharge potential zones: the case of Occidental Lebanon. *Hydrogeology Journal* 14(4):433-443