



Evaluation of Groundwater Quality in Qazvin Plain in Terms of Corrosion and Sedimentation Indices for Use in Drip Irrigation Systems

M.R. Khaledian^{1*} and J. Salehpour²

Abstract

In drip irrigation water quality control is crucial to prevent scale formation and corrosion of system components. Drip irrigation systems in the country mostly use groundwater resources. Qazvin province is one of the provinces facing water shortage and therefore, the use of drip irrigation has attracted the attention of farmers. The purpose of the present study is to investigate the quality of groundwater with regard to both sedimentation and corrosion indices. For this purpose, Langelier (LSI), Ryznar (RSI), and Puckorius (PSI) indices were used to determine the scaling formation and corrosion properties of groundwater in the study area. Then, the geostatistical methods were used to prepare the zoning maps of the indices. The temporal trend of changes in these indices is then examined. According to the results of the LSI index using Ordinary kriging, most of the area of the Qazvin plain is in the range of 0 to 2 indicating low, moderate, and in some of the years, high groundwater deposition. Also, according to the results of the RSI index, most of the plain is in the range of 6 to 7, indicating low corrosiveness of the groundwater. Indicator kriging results according to the LSI index, showed that the area of 80% to 100% of Qazvin groundwater resources is higher than the threshold. Also the results of the RSI index, the highest percentage of study area, are 80% to 100% above the threshold. Therefore, in areas where there is a problem with scaling formation, measures such as acidification of irrigation water or periodic acid flashing are recommended to prevent emitter clogging.

Keywords: Trend Analysis, Zoning Maps, Langelier Index.

Received: March 21, 2020

Accepted: October 8, 2020

ارزیابی کیفیت آب‌های زیرزمینی دشت قزوین از نظر شاخص‌های خوردگی و رسوب‌گذاری به منظور استفاده از سامانه‌های آبیاری قطره‌ای

محمدرضا خالدیان^{۱*} و جابر صالح‌پور^۲

چکیده

کیفیت آب در آبیاری قطره‌ای برای جلوگیری از رسوب‌گذاری و خوردگی اجزای سامانه بسیار مهم است. در کشور بیشتر از منابع آب زیرزمینی در آبیاری قطره‌ای استفاده می‌شود. استان قزوین یکی از استان‌هایی است که با مشکل کم‌آبی مواجه شده است. لذا استفاده از آبیاری قطره‌ای مورد توجه کشاورزان قرار گرفته است. هدف از مطالعه حاضر بررسی کیفیت آب‌های زیرزمینی با توجه به دو خاصیت رسوب‌گذاری و خوردگی است. برای این منظور از شاخص‌های لانژلیئر (LSI)، رایزنر (RSI) و پوکوریوس (PSI) برای تعیین خاصیت رسوب‌گذاری و خوردگی آب‌های زیرزمینی منطقه مورد مطالعه استفاده شد. سپس از زمین‌آمار برای تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی از شاخص‌ها استفاده شد. در ادامه روند زمانی تغییرات این شاخص‌ها بررسی شد. با توجه به نتایج شاخص LSI با استفاده از کریجینگ معمولی، بیشتر مساحت محدوده دشت قزوین در بازه ۰ تا ۲ قرار دارد که نشان از رسوب‌گذاری کم، متوسط و در برخی از سال‌ها رسوب‌گذاری زیاد آب‌های زیرزمینی می‌باشد. همچنین با توجه به نتایج شاخص RSI بیشتر مساحت محدوده دشت در بازه ۶ تا ۷ قرار دارد که نشان از خوردگی کم آب‌های زیرزمینی می‌باشد. بر اساس نتایج کریجینگ شاخص با توجه به شاخص LSI، مساحت ۸۰ تا ۱۰۰ درصد منابع آب زیرزمینی قزوین بیش از حد آستانه می‌باشد. همچنین نتایج شاخص RSI، بیش‌ترین درصد مساحت محدوده مطالعاتی، ۸۰ تا ۱۰۰ درصد بیش از حد آستانه قرار دارد. بنابراین، در پهنه‌هایی که مشکل رسوب‌گذاری وجود دارد برای جلوگیری از گرفتگی قطره‌چکان‌ها اقداماتی نظیر اسیدزنی به آب آبیاری یا آبشویی دوره‌ای با اسید توصیه می‌شود.

کلمات کلیدی: تحلیل روند، پهنه‌بندی، شاخص لانژلیئر.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۱/۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۷/۱۷

1- Associate Professor, Deptment of Water Engineering, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran, Deptment of Water Engineering and Environmental Sciences, Caspian Sea Basin Research Institute, Rasht, Iran. Email: khaledian@guilan.ac.ir

2- M.Sc. Graduate of Water Resources Engineering, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran.

*- Corresponding Author

۱- دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، گروه مهندسی آب و محیط زیست، پژوهشکده حوضه آبی خزر، رشت، ایران.

۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان زمستان ۱۳۹۹ امکانپذیر است.

۱- مقدمه

بررسی پتانسیل رسوب‌گذاری و خوردگی آب زیرزمینی دشت دزفول - اندیمشک پرداختند. نتایج نشان داد واریوگرام نوع کروی و گوسین بهترین نوع واریوگرام برای برازش همبستگی مکانی شاخص‌ها می‌باشد و برای شاخص‌های LSI و PSI روش کریجینگ و برای شاخص LSI روش کوکریجینگ مناسب‌تر می‌باشد و برای شاخص RSI تفاوتی بین روش‌ها وجود ندارد و قسمت اعظم دشت مشکل خوردگی داشته و مابقی قسمت‌ها رسوب‌گذار هستند. در پژوهشی دیگر (Nikbakht and Moradi, 2018) به بررسی تأثیر خشکسالی بر کمیت و کیفیت آب‌های زیرزمینی دشت هشتگرد از دیدگاه آبیاری پرداختند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد بر اساس شاخص LSI، در کلیه سال‌های مورد بررسی و در هر دو مقطع زمانی خرداد و آذر ماه، آب ۱۰۰ درصد سطح آبخوان دشت هشتگرد دارای پتانسیل رسوب‌گذاری بود. (Asadi Nalivan et al., 2018) نیز در پژوهشی کیفیت آب‌های زیرزمینی حوضه رودخانه حبله‌رود را از نظر پتانسیل خوردگی و رسوب‌گذاری مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها در این پژوهش از شاخص‌های LSI، RSI، PSI و AI استفاده کردند. نتایج نشان داد آب‌های زیرزمینی بیشتر سطح حوضه حبله‌رود پتانسیل رسوب‌گذاری دارد. (Zareei et al., 2018) در مطالعه‌ای به بررسی پتانسیل خوردگی و رسوب‌گذاری آب شرب شهر قروه با استفاده از شاخص‌های LSI و RSI پرداخت. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد، آب شرب شهر قروه خورنده و رسوب‌گذار می‌باشد که برای حل این مشکل در منطقه، پیشنهاد شد که با در نظر گرفتن شرایط حاکم بر شبکه مطالعات آزمایشگاهی برای تنظیم عوامل مؤثر در خوردگی مثل pH انجام گیرد. (Dianati tilaki and Mahmoudi, 2018) در مطالعه‌ای به بررسی شاخص‌های رسوب‌گذاری و خوردگی منابع آب شرب برخی از شهرهای استان مازندران با استفاده از شاخص‌های LSI، RSI، PSI، LS و AI پرداختند. نتایج آن‌ها نشان از رسوب‌گذار بودن آب شرب شبکه توزیع شهرهای مورد بررسی دارد. (Gholizadeh et al., 2017) در مطالعه‌ای به ارزیابی پتانسیل خوردگی یا رسوب‌گذاری منابع آب زیرزمینی دشت یزد- اردکان ایران براساس چهار شاخص خوردگی شامل LSI، RSI، AI و PSI پرداختند. آن‌ها برای توصیف تغییرات مکانی کیفیت آب از روش‌های عکس فاصله وزن‌دار (IDW⁶) و تکنیک‌های درون‌یابی کانتور^۷ استفاده نمودند. نتایج نشان داد که بیشتر منابع آب دارای خوردگی کم و متوسط بوده است. (Mirzabeygi et al., 2017) در پژوهشی به ارزیابی کیفیت آب‌های زیرزمینی و پتانسیل خوردگی و رسوب‌گذاری شبکه آبرسانی استان‌های شرقی ایران پرداختند. آن‌ها برای این منظور از پنج شاخص LSI، RSI، PSI، LS و AI استفاده نمودند. نتایج محاسبه هر یک از شاخص‌ها نشان داد که آب در بعضی از مناطق مورد مطالعه پتانسیل خوردگی دارد.

ایران جزء مناطق خشک و نیمه خشک جهان و آب‌های زیرزمینی در آن به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع تأمین آب محسوب می‌شود. و بخش کشاورزی به‌عنوان بزرگ‌ترین مصرف‌کننده آب محسوب می‌شود. در بخش کشاورزی روش‌های مختلف آبیاری تحت فشار از جمله آبیاری قطره‌ای به‌دلیل داشتن حداکثر بهره‌وری در استفاده از منابع آب، بیشتر مورد توجه قرار گرفته است (Reinders et al., 2005)؛ اما گرفتگی روزنه قطره‌چکان‌ها در اثر کیفیت نامناسب آب، بزرگ‌ترین عامل بازدارنده توسعه آن شده است (Gilbert et al., 1979). بنابراین ارزیابی کیفیت شیمیایی آب‌های زیرزمینی و پتانسیل گرفتگی قطره‌چکان‌ها در اثر رسوب‌گذاری و خوردگی تاسیسات آبی، یکی از مهم‌ترین اقداماتی است که مبنایی برای انتخاب نوع قطره‌چکان‌ها، سطح تصفیه و اقدامات پیش‌گیرانه در هنگام طرح، اجرا و مدیریت سامانه‌ها است و بر اساس خصوصیات کیفی آب و برخی شاخص‌ها انجام می‌گیرد.

برای تعیین رسوب‌گذار یا خورنده بودن آب در یک منطقه از شاخص‌های مختلفی استفاده می‌شود که می‌توان به شاخص‌های اشباع لانژیلیه (LSI¹)، رایزنر (RSI²) و پوکوریوس (PSI³) اشاره نمود. (Dehghani et al., 2019) در پژوهشی به ارزیابی پتانسیل خوردگی و رسوب‌گذاری منابع آب آشامیدنی آب‌های زیرزمینی شیراز طی سال‌های ۲۰۱۱-۲۰۰۷ پرداختند. آنها برای مشخص کردن پتانسیل خوردگی و رسوب‌گذاری از شاخص LSI و RSI استفاده کردند. نتایج نشان داد منابع آب زیرزمینی شیراز دارای پتانسیل رسوب‌گذاری می‌باشد. در پژوهشی دیگر (Abbasnia et al., 2019) به ارزیابی کیفی آب زیرزمینی استان سیستان و بلوچستان برای مصارف کشاورزی، شرب و صنعت با استفاده از شاخص‌های LSI، RSI، PSI، LS⁴ و AI⁵ پرداختند. نتایج نشان داد کیفیت منابع آب بر اساس شاخص AI و PSI دارای خوردگی کمتر و بر اساس شاخص RSI خوردگی کم و خفیف و بر اساس شاخص LS دارای خوردگی می‌باشد. (Nayeria et al., 2019) با استفاده از شاخص LSI، RSI، AI و PSI به ارزیابی کیفیت آب آشامیدنی شبکه توزیع آب شرب شهر کرمانشاه طی سال ۲۰۱۸ پرداختند. بر اساس نتایج این مطالعه شبکه توزیع آب آشامیدنی شهر کرمانشاه تمایل به خوردگی دارد.

در پژوهشی (Ahmadi and Hooshmand, 2018) با محاسبه چهار شاخص LSI، RSI، PSI و LS با استفاده از تکنیک زمین‌آمار به

بیش از بقیه روش‌ها کاربرد دارد (Yimit et al., 2011). پژوهشگران مختلفی از روش کریجینگ معمولی برای بررسی تغییرات مکانی پارامترهای کیفی آب زیرزمینی استفاده نموده‌اند که می‌توان به پژوهش‌های (Nas and Berkta, 2010; Kelin et al., 2005; Marengo et al., 2008; Yimit et al., 2011; Arslan et al., 2012; Chen and Feng, 2013; Sadeghian et al., 2018 Ashrafzadeh, 2016; Bakhshandehmehr, 2016) اشاره نمود. یکی دیگر از انواع کریجینگ، روش کریجینگ شاخص (K^8)، است که در آن فرآیند تخمین با مقادیر شاخص صورت می‌گیرد. مقادیر، در حالی که تنها یک حد آستانه وجود دارد، براساس دو شاخص صفر و یک طبقه‌بندی می‌شوند. کریجینگ شاخص توسط پژوهش‌گران زیادی برای تولید نقشه‌های احتمالاتی پارامترهای کیفی آب زیرزمینی استفاده شده است که از جمله می‌توان به (Kuisi et al., 2009; Dash et al., 2010; Hu et al., 2005; Delbari et al., 2014; Piccini et al., 2012; Adhikary et al., 2011; Jang, 2013; Osati et al., 2013) اشاره کرد. با توجه به توانایی روش‌های کریجینگ معمولی و شاخص در بررسی پارامترهای کیفی آب در مطالعات پیشین، در این مطالعه از این دو روش برای بررسی تغییرات مکانی وضعیت رسوب‌گذار یا خورنده بودن آب‌های زیرزمینی و روند تغییرات آن با استفاده از سه شاخص LSI، RSI و PSI استفاده شد.

دشت قزوین یکی از مراکز مهم کشاورزی استان قزوین است و آب زیرزمینی آن منبع اصلی تأمین آب شرب، کشاورزی و صنعت است. نتایج ارزیابی کارشناسان شرکت آب منطقه‌ای استان نشان می‌دهد که در اثر برداشت بی‌رویه منابع آب زیرزمینی، سالانه ۹۰ سانتی‌متر تا ۱/۵ متر افت سطح آب زیرزمینی در دشت قزوین مشاهده شده است که صدمات سنگینی بر کیفیت و کمیت آب منطقه وارد می‌کند و باعث ایجاد آسیب‌هایی مانند فرونشست زمین شده است. با توجه به اینکه بیش از ۹۶ درصد از مصارف آب در این دشت مربوط به مصارف کشاورزی می‌باشد، استفاده از سامانه‌های آبیاری قطره‌ای به منظور کاهش مصرف آب توصیه می‌شود. بنابراین تعیین پتانسیل خوردگی و رسوب‌گذاری آب زیرزمینی برای مدیریت پیش‌گیری رسوب‌گذاری و یا خوردگی در مجاری انتقال و سامانه‌های آبیاری قطره‌ای مفید خواهد بود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه‌ی مورد مطالعه و داده‌های مورد استفاده

استان قزوین در محدوده جغرافیایی $45^{\circ} 48'$ تا $50^{\circ} 50'$ طول شرقی و $35^{\circ} 37'$ تا $36^{\circ} 45'$ عرض شمالی با ارتفاع ۳۰۰ تا ۱۳۰۴ متر بالاتر از سطح دریا، قرار گرفته است (شکل ۱). این استان دارای مساحتی

(Rahimi et al., 2017) به‌منظور بررسی کیفیت آبخوان دشت اردبیل از شاخص‌های خوردگی و رسوب‌گذاری LSI، RSI و PSI استفاده کردند. نتایج نشان داد که آب زیرزمینی این آبخوان دارای خاصیت خوردگی بوده و استفاده از آن برای مصارف کشاورزی سبب بروز مشکل در اتصالات فلزی سامانه‌های آبیاری بارانی خواهد شد. (Ostovari et al., 2015) در پژوهشی به بررسی پتانسیل رسوب‌گذاری و خوردگی آب زیرزمینی دشت لردگان با استفاده از دو شاخص LSI و RSI و تهیه نقشه برای هر یک از این شاخص‌ها با استفاده از روش کریجینگ پرداختند. نتایج نشان داد که براساس شاخص LSI، ۷۶ درصد آبخوان دشت لردگان دارای پتانسیل رسوب‌گذاری کم و براساس شاخص RSI، ۸۴ درصد از آبخوان دشت لردگان پتانسیل خوردگی کم تا متوسط داشت و با توجه به اینکه بیشترین مساحت آبخوان دشت لردگان دارای پتانسیل رسوب‌گذاری کم است، به‌نظر می‌رسد مشکل رسوب‌گذاری در مجاری و مخازن انتقال آب و سامانه‌های آبیاری قطره‌ای قابل ملاحظه نخواهد بود. (Bamdad Machiani et al., 2014) به ارزیابی کیفی آب زیرزمینی استان گیلان در چهار منطقه لاهیجان، آستانه، تالش و فومنات برای مصارف کشاورزی پرداختند و از شاخص LSI به‌منظور بررسی کیفیت آب زیرزمینی این منطقه استفاده کردند. مطابق این شاخص، آب‌های زیرزمینی منطقه روند خاصی نداشته و بعضی از سال‌ها رسوب‌گذار و برخی از سال‌ها تمایل به رسوب نداشتند. (Jafari et al., 2011) به بررسی پتانسیل خوردگی یا رسوب‌گذاری آب شرب شهر انزلی با استفاده از چهار شاخص LSI، RSI، PSI و AI پرداختند. نتایج نشان داد منابع آب شرب انزلی پتانسیل خوردگی داشته و می‌تواند سلامت مصرف‌کنندگان را در طولانی مدت تهدید کند.

شناخت و تعیین الگوی تغییرات زمانی و مکانی هر یک از شاخص‌های LSI، RSI و PSI و تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی که بیانگر میزان خطر بالقوه کیفیت آب در ایجاد گرفتگی قطره‌چکان‌ها می‌باشد، می‌تواند گامی مهم در جلوگیری از خوردگی و یا رسوب‌گذاری، تعیین جنس مناسب مصالح، بهره‌برداری و کاربرد صحیح منابع آب در بخش‌های مختلف به‌ویژه کشاورزی پایدار باشد. برای شناخت تغییرات مکانی و زمانی متغیرهای کیفیت آب‌های زیرزمینی یک منطقه و تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی استفاده از روش‌های زمین آماری بسیار مفید و کارآمد می‌باشد (Sanchez, 2001). یکی از روش‌های درون‌یابی زمین‌آماره، کریجینگ است که مقدار پارامترها را در نقاط نمونه‌برداری نشده با دقت بیشتری نسبت به سایر روش‌ها تخمین می‌زند (El-Fadel et al., 2014). کریجینگ انواع مختلفی از قبیل: کریجینگ معمولی، کوکریجینگ، کریجینگ طبقه‌بندی‌شده، کریجینگ شاخص و کریجینگ غیرخطی دارد که کریجینگ معمولی

استفاده به‌طور خلاصه در ادامه شرح داده شده است. شاخص اشباع لاتزیلیه (LSI)، توسط لاتزیلیه در سال ۱۹۳۶ برای پیش‌بینی تمایل آب به رسوب یا انحلال کربنات کلسیم (CaCO_3) ارائه شد (Choi et al., 2015). CaCO_3 یکی از عمده‌ترین مواد معدنی موجود در آب بوده که به‌عنوان مهم‌ترین عنصر مسئول تشکیل رسوبات شناخته شده است (Antony et al., 2011). مقدار شاخص LSI از منفی تا مثبت در تغییر است و اگر $\text{pH} < \text{pH}_c$ باشد شاخص منفی بوده و باعث حل شدن CaCO_3 خواهد شد و از لحاظ رسوب‌گذاری مشکل‌ساز نیست و اگر $\text{pH} > \text{pH}_c$ باشد، شاخص LSI مثبت بوده و آب از CaCO_3 اشباع خواهد بود که در این حالت رسوب‌گذار است. شاخص LSI با استفاده از رابطه (۱) تعریف می‌شود (Rafferty, 2000):

$$\text{LSI} = \text{pH} - \text{pH}_c \quad (1)$$

که pH ، اسیدیته اندازه‌گیری شده آب و pH_c اسیدیته محاسبه شده بر اساس نتایج تجزیه شیمیایی آب می‌باشد و از رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$\text{pH}_c = (\text{PK}_2 - \text{PK}_c) + \text{P}(\text{Ca} + \text{Mg}) + \text{P}(\text{CO}_3 + \text{HCO}_3) \quad (2)$$

PK_2 لگاریتم منفی ضریب ثابت یونیزاسیون دوم H_2CO_3 و PK_c ضریب حلالیت CaCO_3 که هر دوی آن‌ها بر حسب قدرت یونی تصحیح شده‌اند. $\text{P}(\text{Ca} + \text{Mg})$ منهای لگاریتم غلظت مولار $\text{Ca} + \text{Mg}$ و $\text{P}(\text{CO}_3 + \text{HCO}_3)$ منهای لگاریتم غلظت معادل $\text{CO}_3 + \text{HCO}_3$ می‌باشد. هر یک از پارامترهای رابطه pH_c با استفاده از جدول راهنمایی که آیرز و وستکات (Ayers and Westcot, 1989) در نشریه شماره ۲۹ آبیاری و زهکشی فائو، بر مبنای مفهوم ارائه شده به‌وسیله سوارز (Suarez, 1981)، برای اصلاح نسبت جذب سدیم ارائه نمودند، تعیین شدند.

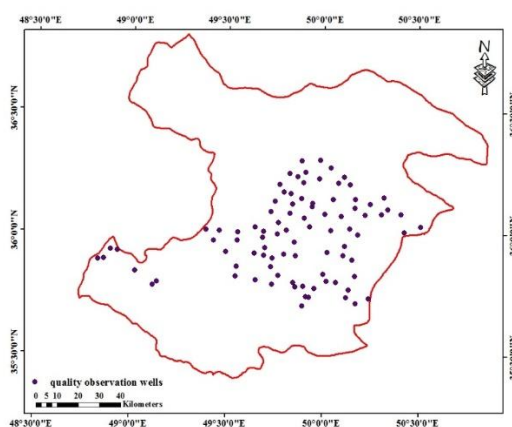


Fig. 2- The location of the sampled well
شکل ۲- موقعیت چاه‌های نمونه‌برداری شده

حدود ۱۵۸۲۰ کیلومترمربع است. میانگین بارش سالانه در سطح استان از ۲۱۰ میلی‌متر در بخش‌های شرقی تا بیش از ۵۵۰ میلی‌متر در ارتفاعات شمال شرقی متغیر است. براساس طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن بیشترین پهنه اقلیمی استان در اقلیم نیمه‌خشک سرد قرار می‌گیرد.

دشت قزوین یکی از مراکز مهم کشاورزی استان قزوین است. دشت قزوین دارای وسعتی حدود ۴۵۰۰ کیلومترمربع است. در قسمت‌های مرکزی دشت به دلیل بالا بودن سطح آب‌های زیرزمینی و عملکرد رسوبات تبخیری نظیر نمک، منابع آب و خاک کیفیت خود را از دست داده و سبب کاهش بازدهی زراعی و پراکندگی جمعیت شده است. آب کشاورزی این شهرستان از چاه‌های عمیق تأمین می‌شود.

در این مطالعه برای تعیین پتانسیل خوردگی و رسوب‌گذاری آب زیرزمینی از داده‌های آنالیز شیمیایی ۱۴ ساله (۱۳۸۰-۱۳۹۳)، ۹۰ چاه عمیق (شکل ۲) استفاده شد. در مجموع از تعداد ۸۹۴ نمونه برداشت شده از این منابع در مهر ماه استفاده شد. براساس روش‌های کریجینگ معمولی و کریجینگ شاخص در نرم‌افزار ArcGIS 10.3 نقشه‌های تغییرات مکانی شاخص‌های خوردگی یا رسوب‌گذاری تهیه شد. به‌منظور بررسی روند تغییرات زمانی از آزمون‌های من-کنندال و تخمین‌گر شیب سن استفاده شد.

۲-۲- شاخص‌های پایداری آب

در این مطالعه برای ارزیابی تمایل آب به رسوب‌گذاری یا خوردگی از شاخص LSI، RSI و PSI استفاده شد، هر یک از شاخص‌های مورد

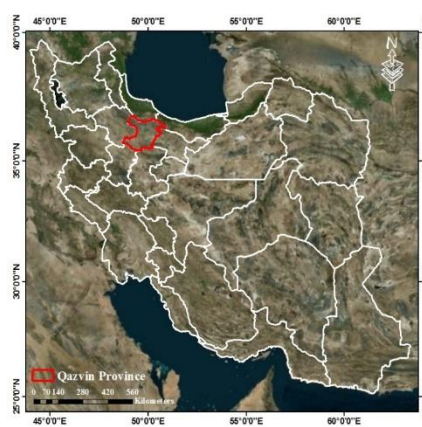


Fig. 1- The location of the study area
شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

۲-۴-۱- واریوگرام

واریوگرام اساسی ترین ابزار در زمین آمار است که برای تشریح ارتباط مکانی یک متغیر به کار می‌رود. واریوگرام‌ها اختلاف بین نمونه‌ها در یک جهت و جهات مختلف را به ما نشان می‌دهند (Webster and Oliver, 2000). واریوگرام کمی برداری است که درجه همبستگی مکانی و شباهت بین نقاط اندازه‌گیری شده را برحسب مربع تفاضل مقدار دو نقطه و با توجه به جهت و فاصله آن‌ها نشان می‌دهد که از رابطه (۷) قابل محاسبه است (Goovaerts, 1997):

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (7)$$

که در آن $\hat{\gamma}(h)$ را سمی واریوگرام یا واریوگرام تجربی می‌نامند، $N(h)$ تعداد جفت نمونه‌های به کار رفته در محاسبه که در فاصله h از یکدیگر قرار دارند، $Z(x_i)$ و $Z(x_i + h)$ به ترتیب مقادیر مشاهده شده متغیر در نقاط x_i و $x_i + h$ می‌باشند (Mallats et al., 1997).

در این پژوهش ابتدا ساختار و وابستگی مکانی هر یک از شاخص‌های LSI، RSI و PSI با استفاده از ابزارهای زمین‌آماري موجود در نرم‌افزار ArcGIS مورد بررسی قرار گرفتند و بهترین مدل سمی واریوگرام از میان یازده مدل پیشنهادی برای هر یک از شاخص‌ها و هر سال انتخاب شد که در جدول ۲ آمده است (Johnston et al., 2001).

۲-۴-۲- کریجینگ معمولی (Ordinary Kriging)

در روش کریجینگ معمولی مقدار متغیر در هر نقطه نمونه برداری نشده با استفاده از یک متوسط‌گیری متحرک وزنی خطی مقادیر اندازه‌گیری شده در همسایگی نقطه مورد نظر تخمین زده می‌شود (Isaaks and Srivastava, 1989). معادله تخمین گر OK به صورت رابطه (۸) می‌باشند (Journel et al., 1978):

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i), \quad \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (8)$$

که در آن $Z^*(x_0)$ مقدار تخمین زده شده Z در موقعیت نمونه برداری نشده x_0 ، λ_i وزن اختصاص داده شده به متغیر Z در نقطه x_i ، n تعداد نقاط همسایگی و $Z(x_i)$ مقدار اندازه‌گیری شده متغیر در نقطه x_i است، جمع مقادیر اختصاص داده شده به مقادیر معلوم (λ_i) باید برابر واحد باشد (Goovaerts, 1997; Baalosha, 2010).

بنابراین نقشه‌های پهنه‌بندی هر یک از شاخص‌های LSI، RSI و POR بر اساس بهترین مدل سمی واریوگرام و با استفاده از روش کریجینگ معمولی رسم شد. سپس با توجه به اینکه (Kevin, 2000)، برای شاخص LSI پنج سطح توصیفی رسوب‌گذار شامل عدم رسوب‌گذاری (کمتر از صفر)، رسوب‌گذاری کم (۰-۰/۵)، رسوب‌گذاری

شاخص پایداری رایزنر (RSI) یک روش تجربی برای ارزیابی پتانسیل آب در تشکیل رسوب CaCO_3 می‌باشد (Alsaqqar et al., 2014; World Health Organization, 2017). این شاخص نوع اصلاح شده شاخص LSI است که تمایل به رسوب‌گذاری و خوردگی شدید را بهتر تخمین می‌زند (Rafferty, 2000). بر خلاف شاخص LSI مقادیر شاخص RSI مثبت می‌باشد. اگر مقدار این شاخص بیشتر از شش باشد، آب خوردنده و در غیر این صورت آب رسوب‌گذار است. شاخص RSI از رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

$$\text{RSI} = 2(\text{pHc}) - \text{pH} = \text{pHc} - \text{LSI} \quad (3)$$

شاخص پورکوربوس (PSI)، پتانسیل خوردگی یا رسوب‌گذاری آب را ارزیابی می‌کند. اگر مقدار این شاخص بیشتر از شش باشد، آب خوردنده و در غیر این صورت آب رسوب‌گذار است. برای محاسبه این شاخص از pH آب در حالت تعادل (pH_{eq}) به جای pH واقعی آب استفاده می‌شود. pH_{eq} به کمک رابطه (۴) محاسبه می‌شود و با تعیین مقادیر pH_{eq} مقدار شاخص PSI از رابطه (۵) محاسبه می‌شود (Colin, 2006; Khorsandi et al., 2015; Taghipour et al., 2012; Davil et al., 2009):

$$\text{pH}_{\text{eq}} = 1.465 \log (\text{T.Alk}) + 4.54 \quad (4)$$

$$\text{PSI} = 2 \text{pH}_S - \text{pH}_{\text{eq}} \quad (5)$$

۲-۳- تحلیل آماری

برای تحلیل آماری از بسته نرم‌افزاری SPSS 23 استفاده شد. ابتدا داده‌های پرت (داده‌های بزرگ‌تر و کوچک‌تر از $\bar{X} \pm 3 \text{SD}$)، با استفاده از نمودار جعبه‌ای (box plot) مشخص و حذف شدند. از آن جایی که نرمال بودن یا نزدیک به نرمال بودن داده‌ها در عملکرد بهتر درون‌یابی کریجینگ مؤثر است (Johnston et al., 2001)، نرمال بودن توزیع داده‌ها با استفاده از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف^۹ بررسی و داده‌هایی که دارای توزیع نرمال نبودند، با استفاده از تبدیل انعکاس و ریشه مجذور^{۱۰} نرمال شدند. در این روش ابتدا بزرگ‌ترین مقدار داده (X_{max}) را با ۱ جمع و سپس هر یک از مقادیر (X_i) را از این مقدار کم و نهایتاً ریشه آن‌ها محاسبه می‌شود (رابطه ۶). خلاصه تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها در جدول (۱) ارائه شده است.

$$F(X_i) = \sqrt{(X_{\text{max}} + 1) - X_i} \quad (6)$$

۲-۴- تخمین زمین آماری

تخمین زمین آماری شامل دو مرحله می‌باشد: مرحله اول شناخت و مدل‌سازی ساختار فضایی متغیر است که به وسیله واریوگرام قابل بررسی می‌باشد، مرحله دوم تخمین است که به مشخصات مدل واریوگرام برآزش شده در مرحله اول وابسته است.

(Isaaks and Srivastava, 1989).

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^n (Z^*(x_i) - Z(x_i))}{n} \quad (10)$$

$$ASE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sigma(x_i)}{n}} \quad (11)$$

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (Z^*(x_i) - Z(x_i)) / \sigma(x_i)}{n} \quad (12)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n ((Z^*(x_i) - Z(x_i)))^2}{n}} \quad (13)$$

$$RMSSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(Z^*(x_i) - Z(x_i)) / \sigma(x_i)]^2}{n}} \quad (14)$$

در این معادلات، $Z^*(x_i)$ مقدار تخمین زده شده، $Z(x_i)$ مقدار اندازه‌گیری شده (مقدار واقعی)، $\sigma(x_i)$ خطای استاندارد پیش‌بینی در مکان x_i و n تعداد نمونه‌ها (تعداد چاه‌ها) می‌باشد. همچنین برای بررسی قدرت ساختار مکانی از نسبت اثر قطعه‌ای (Nugget) به آستانه (Sill) استفاده شد. چنانچه این نسبت کمتر از ۰/۲۵ باشد، نشان‌دهنده همبستگی مکانی قوی، اگر بین ۰/۲۵-۰/۷۵ باشد بیان‌گر وابستگی مکانی متوسط و اگر بزرگ‌تر از ۰/۷۵ باشد نشان‌دهنده وابستگی مکانی ضعیف است (Taghizadeh Mehrjardi et al., 2008).

۲-۶- بررسی روند

به منظور بررسی روند تغییرات مساحت محدوده‌های شاخص‌های RSI، LSI و PSI از آزمون‌های من-کنندال و تخمین‌گر شیب سن استفاده شد.

۳- نتایج و تحلیل نتایج

۳-۱- تحلیل آماری و زمین‌آماري

خلاصه آماری شاخص‌های محاسبه شده هر سال در جدول ۱ ارائه شده است. با توجه به اینکه اگر سطح معنی‌داری (p-value) در آزمون کلموگروف-اسمیرنوف، بیشتر از ۵ درصد باشد، می‌توان داده‌ها را نرمال فرض کرد، داده‌هایی که p-value آن‌ها کمتر از ۵ درصد بودند نرمال شدند که نتایج آماری آن در جدول ۱ آمده است. Ashrafzadeh et al. (2016) برای ارزیابی خطر شوری آب زیرزمینی با استفاده از روش کریجینگ در شمال ایران و Bakhshandehmehr et al. (2016) نیز برای بررسی مناسب بودن آب زیرزمینی برای آبیاری و تغییرات آن در اراضی کشاورزی دشت گرمسار، از همین روش برای آزمون نرمال بودن داده‌ها استفاده کردند. با توجه به جدول ۱، شاخص‌های LSI، RSI در کلیه سال‌ها نرمال بوده و POR جز در سال‌های ۲۰۰۴، ۲۰۰۷ و ۲۰۱۲ نرمال شده‌اند.

متوسط (۰/۵-۱)، رسوب‌گذاری زیاد (۱-۲) و رسوب‌گذاری خیلی زیاد (مقادیر بیشتر از ۲) و برای شاخص RSI هفت سطح توصیفی شامل رسوب‌گذاری شدید (کمتر از ۴)، رسوب‌گذاری زیاد (۴-۵)، رسوب‌گذاری متوسط (۵-۶)، رسوب‌گذاری کم و خوردگی کم (۶-۷)، خوردگی متوسط (۷-۷/۵)، خوردگی زیاد (۷/۵-۹) و خوردگی شدید (بزرگتر از ۹) قائل شد، نقشه پهنه‌بندی شاخص LSI و RSI با توجه به این سطوح توصیفی کلاسه‌بندی شدند. همچنین شاخص PSI نیز مشابه شاخص RSI کلاسه‌بندی شد.

۲-۴-۳- کریجینگ شاخص (Indicator Kriging)

کریجینگ شاخص (ID)، با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده متغیر در همسایگی نقطه مورد برآورد، احتمال مقادیر متغیر که بالاتر از یک حد آستانه معلوم هستند را تعیین می‌کند. مقادیر متغیر بر اساس حد آستانه داده شده به مقادیر شاخص تبدیل می‌شوند. بدین ترتیب که به مقادیر اصلی اگر از حد آستانه منتخب کوچک‌تر باشند، کد یک و اگر بزرگ‌تر باشند، کد صفر تعلق می‌گیرد. این روش مستقل از تابع توزیع داده‌ها است و در برابر نقاط پرت کارایی بهتری نسبت به روش OK دارد (Arslan, 2012). در حالت کلی معادله‌ی IK به صورت رابطه (۹) تعریف می‌شود:

$$I(s) = \begin{cases} 1, & \text{if } Z(x) \geq Z_C \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

که در آن $Z(x)$ مقدار اندازه‌گیری شده‌ی پارامتر مورد نظر در نقطه x و Z_C مقدار آستانه پارامتر مورد نظر می‌باشد. بنابراین در این مطالعه برای به دست آوردن نقشه‌های احتمالاتی پارامترهای RSI، LSI و PSI آب‌های زیرزمینی، از روش IK استفاده شد. در این روش نیز همانند روش OK باید بهترین مدل سمی‌واریوگرام برای نقاطی با شوری بیش از آستانه انتخاب شود که نتایج آن برای هر شاخص و هر سال در جدول ۷ آمده است.

۲-۵- ارزیابی روش‌های درون‌یابی

در این مطالعه دقت پیش‌بینی‌های انجام شده با استفاده از پنج شاخص ارائه شده توسط نرم‌افزار ArcGIS مورد ارزیابی قرار گرفت. این شاخص‌ها شامل میانگین خطای پیش‌بینی (ME)، ریشه‌ی دوم میانگین مربع خطا (RMSE)، میانگین خطای استاندارد (ASE)، میانگین خطای استاندارد شده (MSE) و ریشه دوم میانگین خطای استاندارد شده (RMSSE) می‌باشند. برای داشتن یک پیش‌بینی دقیق و معتبر باید مقدار MSE نزدیک به صفر، RMSE، ASE و ME کمترین مقدار ممکن و RMSSE نزدیک به یک باشد. این شاخص‌ها به صورت روابط ۱۰ تا ۱۴ تعریف می‌شوند (Johnston et al., 2001).

Table 1- Statistical analysis of LSI, RSI, and PSI indices
جدول ۱- نتایج تجزیه آماری هر یک از شاخص‌های LSI، RSI و PSI

Years	Variables	N ^a	Minimum	Mean	Maximum	SD ^b	Skewness	Kurtosis	p-value (KS ^c test)
2001	LSI	34	0.26	0.66	1.14	0.21	0.125	-0.07	0.2
	RSI	34	5.92	6.85	7.77	0.44	-0.288	0.165	0.164
	PSI	34	-4.4	2.95	9.12	3.59	-0.592	-0.317	0.014
	PSI*	34	1	2.59	3.81	0.68	-0.041	-0.16	0.2
2002	LSI	44	-0.29	0.212	0.89	0.266	0.32	-0.213	0.2
	RSI	44	6.02	7.11	8.19	0.53	-0.022	-0.856	0.2
	PSI	44	-7.89	1.95	8.37	4.08	-0.742	-0.352	0.023
	PSI*	44	1	2.62	4.15	0.74	0.234	-0.568	0.2
2003	LSI	83	0.22	0.9	2.17	0.33	0.537	1.428	0.2
	RSI	83	5.35	6.42	7.5	0.46	-0.121	-0.304	0.2
	PSI	83	-5.33	2.55	9.22	3.56	-0.255	-0.825	0.034
	PSI*	83	1	2.68	3.94	0.67	-0.259	-0.469	0.2
2004	LSI	90	-0.04	0.39	0.97	0.22	0.582	-0.14	0.2
	RSI	90	6.1	6.91	7.75	0.36	0.03	-0.564	0.2
	PSI	90	-6.91	2.55	9.39	3.88	-0.49	-0.342	0.094
2005	LSI	87	0.1	0.75	1.47	0.29	-0.128	-0.517	0.2
	RSI	87	5.39	6.59	7.69	0.5	0.091	-0.406	0.2
	PSI	87	-9.97	2.81	9.51	4.09	-0.825	0.359	0.002
	PSI*	87	1	2.67	4.53	0.74	0.119	-0.102	0.065
2006	LSI	88	0.25	0.99	1.81	0.34	0.056	-0.047	0.2
	RSI	88	5.4	6.32	7.6	0.5	0.635	-0.026	0.2
	PSI	88	-5.48	2.68	9.09	3.52	-0.403	-0.485	0.002
	PSI*	88	1	2.63	3.95	0.67	-0.2	-0.23	0.2
2007	LSI	64	0.27	0.85	1.55	0.27	-0.86	-0.587	0.2
	RSI	64	5.29	6.46	7.65	0.54	0.227	-0.737	0.2
	PSI	64	-0.87	4.34	8.91	2.48	-0.264	-0.469	0.2
2008	LSI	63	0.47	0.81	1.37	0.22	0.61	-0.076	0.2
	RSI	63	5.48	6.39	7.25	0.4	0.122	-0.083	0.2
	PSI	63	-3.73	3.46	8.96	3.03	-0.878	0.429	0.02
	PSI*	63	1	2.48	3.7	0.58	0.235	0.137	0.2
2009	LSI	59	0.43	1.05	1.66	0.268	-0.296	-0.172	0.056
	RSI	59	5.16	6.16	7.11	0.44	0.088	-0.737	0.2
	PSI	59	-1.31	4.48	8.99	2.55	-0.728	-0.102	0.001
	PSI*	59	1	2.28	3.36	0.543	0.139	-0.067	0.072
2010	LSI	74	-0.05	0.46	0.88	0.198	-0.205	-0.319	0.2
	RSI	74	5.84	6.77	7.94	0.48	0.54	-0.292	0.006
	PSI	74	-4.81	3.81	9.17	3.13	-0.408	-0.584	0.004
	PSI*	74	1	2.43	3.87	0.64	-0.88	-0.67	0.2
2011	LSI	72	0.12	0.44	0.74	0.13	0.087	-0.289	0.2
	RSI	72	6.13	6.71	7.46	0.3	0.292	-0.117	0.2
	PSI	72	-1.72	4.64	9.13	2.55	-0.619	0.106	0.002
	PSI*	72	1	2.27	3.44	0.55	-0.04	-0.055	0.2
2012	LSI	48	0.1	0.38	0.8	0.147	0.438	0.417	0.2
	RSI	48	6.22	6.81	7.49	0.32	0.309	-0.533	0.2
	PSI	48	-1.22	3.83	8.43	2.43	-0.27	-0.519	0.2
2013	LSI	21	-0.13	0.36	0.87	0.26	0.108	-0.692	0.2
	RSI	21	5.97	6.67	7.45	0.43	-0.033	-0.919	0.2
	PSI	21	-0.1	5.438	9	2.66	-0.614	-0.373	0.006
	PSI*	21	1.02	2.04	3.18	0.63	0.065	-0.713	0.135
2014	LSI	67	-0.01	0.452	0.99	0.242	0.045	-0.372	0.2
	RSI	67	5.74	6.63	7.81	0.412	0.252	0.083	0.2
	PSI	67	-3.96	4.99	10.9	3.741	-0.695	-0.53	0.004
	PSI*	67	1	2.53	3.98	0.7	0.273	-0.801	0.176

^a Number of samples, ^b Standard deviation, ^c Kolmogorov–Smirnov, * transformed data

فاصله‌ی مکانی یا زمانی می‌باشد. فاصله‌ای که در آن واریوگرام به حد ثابتی رسیده و به حالت خط افقی نزدیک می‌شود، دامنه یا شعاع تأثیر (Range) نامیده می‌شود (شکل ۴). این دامنه محدوده‌ای را مشخص می‌کند که می‌توان از داده‌های موجود در آن برای برآورد مقدار متغیر مجهول استفاده کرد. دامنه تأثیر بزرگ‌تر دلالت بر پیوستگی مکانی گسترده‌تری دارد (Shabani et al., 2009). آستانه تأثیر (Sill) به مقدار ثابتی که واریوگرام در دامنه‌ی تأثیر به آن می‌رسد گفته می‌شود. مقدار آستانه برابر واریانس کل تمام نمونه‌هایی است که در محاسبه‌ی تغییرنا بکار رفته‌اند.

۳-۱-۱- کریجینگ معمولی (OK)

به منظور بررسی ساختار مکانی شاخص‌های LSI، RSI و PSI آب‌های زیرزمینی استان قزوین با استفاده از روش زمین‌آماری OK، از میان یازده مدل مختلف، بهترین مدل سمی واریوگرام تجربی برای هر یک از شاخص‌های مذکور و برای هر سال انتخاب و برازش داده شد. این مدل‌ها و مشخصات آن‌ها به ترتیب در شکل ۴ و جدول ۲ ارائه شده است.

هدف اصلی از محاسبه واریوگرام شناخت تغییرپذیری متغیر نسبت به

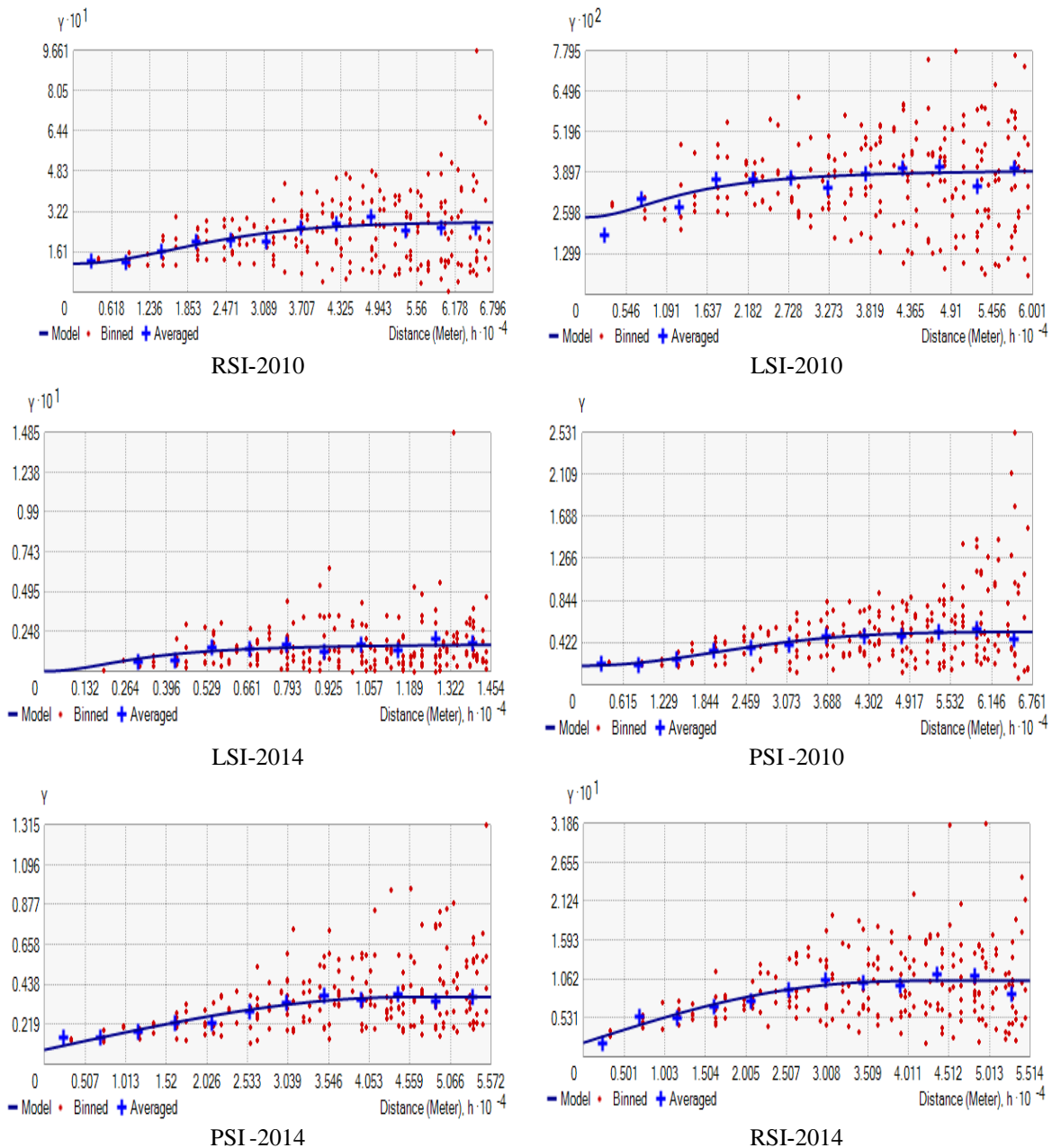


Fig. 4- The best fitted semi-variogram for 2010 and 2014

شکل ۴- بهترین واریوگرام‌های برازش شده برای سال‌های ۱۳۸۹ و ۱۳۹۳

Table 2- Characteristics of the best fitted empirical semi-variogram (ordinary kriging)
جدول ۲- مشخصات بهترین مدل‌های برازش داده شده بر سمی‌واریوگرام تجربی (کریجینگ معمولی)

Years	Variables	Fitted model	Parameters ^a				
			Nugget (C0)	Sill (C0 + C)	C0/ C0 + C	Spatial dependence	A (km)
2001	LSI	Circular	0.026	0.029	0.897	Weak	43.41
	RSI	Circular	0.04	0.216	0.185	Strong	41.6
	PSI*	Tetraspherical	0.197	0.396	0.497	Moderate	56.41
2002	LSI	Exponential	0.034	0.044	0.773	Weak	44.134
	RSI	Exponential	0.164	0.145	1.131	Weak	44.134
	PSI*	J-Bessel	0.345	0.226	1.527	Weak	46.61
2003	LSI	Hole effect	0.072	0.041	1.756	Weak	35.184
	RSI	J-BESSEL	0.123	0.1084	1.135	Weak	36.58
	PSI*	Rational Quadratic	0.253	0.356	0.711	Moderate	109.275
2004	LSI	Rational Quadratic	0.038	0.0712	0.534	Moderate	94.538
	RSI	Rational Quadratic	0.1	0.15	0.667	Moderate	97.927
	PSI	SPHERICAL	8.214	7.167	1.146	Weak	49.887
2005	LSI	Rational Quadratic	0.064	0.033	1.939	Weak	73.986
	RSI	Rational Quadratic	0.12	0.208	0.577	Moderate	109.735
	PSI*	K-BESSEL	0.383	0.271	1.413	Weak	46.358
2006	LSI	Gaussian	0.091	0.028	3.25	Weak	27.804
	RSI	Gaussian	0.145	0.155	0.935	Weak	45.864
	PSI*	J-BESSEL	0.256	0.268	0.955	Weak	58.401
2007	LSI	Circular	0.0388	0.062	0.626	Moderate	70.385
	RSI	Circular	0.1171	0.2748	0.426	Moderate	57.705
	PSI	J-BESSEL	7.69	1.71	4.497	Weak	66.191
2008	LSI	Circular	0.037	0.017	2.176	Weak	39.691
	RSI	Hole effect	0.118	0.073	1.616	Weak	85.499
	PSI*	J-Bessel	0.184	0.21	0.876	Weak	85.276
2009	LSI	k-Bessel	0.05	0.037	1.351	Weak	35.383
	RSI	J-Bessel	0.127	0.0756	1.68	Weak	0.075
	PSI*	Rational Quadratic	0.178	0.201	0.886	Weak	110.59
2010	LSI	Rational Quadratic	0.024	0.015	1.6	Weak	60.012
	RSI	k-Bessel	0.11	0.166	0.68	Moderate	51.99
	PSI*	Gaussian	0.191	0.341	0.56	Moderate	48.826
2011	LSI	Rational Quadratic	1.73	0.017	101.765	Weak	14.536
	RSI	Pentaspheical	0.019	0.084	0.226	Strong	44.657
	PSI*	Spherical	0.079	0.289	0.273	Moderate	45.068
2012	LSI	J-Bessel	0.0125	0.009	1.389	Weak	25.349
	RSI	Pentaspheical	0.029	0.11	0.264	Moderate	89.412
	PSI	Stable	3.518	2.246	1.566	Weak	26.833
2013	LSI	Circular	0.047	0.028	1.679	Weak	21.717
	RSI	Rational Quadratic	0.169	0.028	6.036	Weak	30.309
	PSI*	Hole effect	0.2	0.255	0.784	Weak	95.19
2014	LSI	Exponential	0	0.622	0	Strong	69.6
	RSI	K-BESSEL	0.152	0.057	2.667	Weak	25.945
	PSI*	Exponential	0	0.622	0	Strong	69.6

^a C0, nugget variance; C0+ C, sill; C0/C0+ C, nugget variance to sill ratio; A, range

* transformed data

کوچک‌تر از یک نشانگر بیش برآورد می‌باشد (Bahrami Jovein and Hosseini, 2015). با توجه به نتایج محاسبه شده مقدار RMSSE بین ۰/۴۸۶ تا ۱/۱۲۶ متغیر و مقدار ME برای این سال‌ها بسیار کوچک و نزدیک به صفر بود. نتایج ارزیابی متقابل نشان‌دهنده دقت مناسب پیش‌بینی‌ها است (Hengel et al., 2004). Sadeghian et al. (2018) نیز در پژوهشی که به ارزیابی پارامترهای کیفی آب زیرزمینی با استفاده از GIS و زمین‌آمار پرداختند، روش کریجینگ ساده (OR) را روشی مناسب برای درون‌یابی پارامترهای کیفی آب زیرزمینی دشت ارومیه معرفی کردند.

مساحت و درصد کلاس‌های طبقه‌بندی هر یک از شاخص‌های LSI، RSI و PSI آب زیرزمینی استان قزوین در جدول ۴، ۵ و ۶ آمده است. با توجه به نتایج جدول ۴، شاخص LSI بیشتر مساحت محدوده استان در بازه ۰ تا ۲ قرار دارد که نشان از رسوبگذاری کم، متوسط و در برخی از سال‌ها رسوبگذاری زیاد آب‌های زیرزمینی می‌باشد. همچنین با توجه به جدول ۵، شاخص RSI بیشتر مساحت محدوده استان در بازه ۶ تا ۷ قرار دارد که نشان از خوردگی کم آب‌های زیرزمینی می‌باشد. همچنین با توجه به جدول ۶، شاخص PSI بیشتر مساحت محدوده استان در بازه ۴ تا ۵ قرار دارد. نقشه پهنه‌بندی هر یک از شاخص‌های LSI، RSI و PSI دو سال ۱۳۸۹ و ۱۳۹۳ به صورت نمونه در شکل ۵ آمده است.

۳-۱-۲- کریجینگ شاخص

به‌منظور رسم نقشه‌های احتمالاتی هر یک از شاخص‌های LSI، RSI و PSI آب‌های زیرزمینی استان قزوین، از روش زمین‌آمار کریجینگ شاخص استفاده شد. سپس از میان یازده مدل مختلف پیشنهادی نرم‌افزار ArcGIS بهترین مدل سمی‌واریوگرام تجربی برای هر یک از شاخص‌های مذکور و برای هر سال، انتخاب و برازش داده شد. این مدل‌ها و مشخصات آن‌ها به‌ترتیب در شکل ۶ و جدول ۷ ارائه شده است. لازم به ذکر است در برخی از سال‌ها مقادیر بعضی از شاخص‌ها بیشتر از حد آستانه می‌باشد که برای آن‌ها امکان برازش مدل سمی‌واریوگرام و رسم نقشه احتمالاتی وجود نداشت که در جدول ۷ برای آن‌ها مشخصاتی ارائه نشده است.

نتایج ارزیابی متقابل در روش کریجینگ شاخص در جدول ۸ ارائه شده است. این نتایج نشان می‌دهد که مقدار RMSSE در هر طول دوره آماری مورد مطالعه نزدیک به یک بوده و مقادیر MSE و ME نیز بسیار کوچک و نزدیک به صفر می‌باشند.

در روش کریجینگ، واریوگرام‌هایی که دارای آستانه مشخصی هستند، اهمیت بیشتری دارند. مقدار واریوگرام در مبدأ مختصات، یعنی به ازای $h=0$ را اثر قطعه‌ای (Nugget یا C_0) می‌نامند. در حالت آرمانی مقدار C_0 باید صفر باشد، اما در بیشتر مواقع بزرگ‌تر از آن است. در این حالت بخش تصادفی و یا ناساختار متغیر ظاهر می‌شود. با توجه به جدول ۱، مقدار C_0 شاخص POR جز در سال‌های ۲۰۰۴، ۲۰۰۷ و ۲۰۱۲ در حد صفر می‌باشد. نسبت اثر قطعه‌ای به آستانه تأثیر ($C_0/C_0 + C$) شاخصی از قدرت ساختار مکانی قوی است. اگر این نسبت کمتر از ۰/۲۵ باشد نشان‌دهنده وابستگی مکانی قوی، بین ۰/۲۵ تا ۰/۷۵ قرار گیرد بیانگر همبستگی مکانی متوسط و چنانچه این نسبت بزرگتر از ۰/۷۵ شود نشان‌دهنده وابستگی مکانی ضعیف خواهد بود. همبستگی قوی مکانی به این معنی است که در دامنه تأثیر می‌توان متغیر مورد نظر را تخمین زد. میزان همبستگی مکانی هر یک از شاخص‌ها در جدول ۲ نشان داده شده است (Cambardella et al., 1994; Ostovari et al., 2011).

پس از انتخاب بهترین مدل سمی‌واریوگرام تجربی، نقشه‌های پهنه‌بندی هر یک از شاخص‌های RSI، LSI و PSI با استفاده از روش OK رسم شد و دقت نقشه‌ها با استفاده از شاخص‌های ارزیابی متقابل پیشنهادی GIS مورد ارزیابی قرار گرفت (جدول ۳). آماره ME نشان‌دهنده وجود اریبی است. مقادیر مثبت آن تخمین بیش از مقدار واقعی و مقادیر منفی آن تخمین کمتر از مقدار واقعی را نشان می‌دهد. هر اندازه آماره ME کوچک‌تر باشد پیش‌بینی روش درون‌یابی از اریبی کمتر برخوردار است. بنابراین با توجه به جدول ۳ مقدار ME برای تمام مؤلفه‌ها تقریباً نزدیک صفر به‌دست آمد که بیش برآورد (مقادیر ME مثبت) یا کم برآورد (مقادیر ME منفی) بسیار ناچیز بهترین مدل‌های سمی‌واریوگرام‌های برازش داده شده را نشان می‌دهد. مقدار RMSE در حالت بهینه یا حالتی که مقادیر برآورد شده و اندازه‌گیری شده مساوی باشند صفر است. هر اندازه مقدار RMSE کوچک‌تر باشد پیش‌بینی روش درون‌یابی از صحت بیشتری برخوردار است. با توجه به جدول ۳ مقدار RMSE برای اکثر مؤلفه‌های اندازه‌گیری شده جز شاخص PSI برای سال‌های ۲۰۰۴، ۲۰۰۷ و ۲۰۱۲ کمتر از ۱ محاسبه شد که نشانگر دقت بسیار خوب مدل‌های واریوگرام و تخمین‌ها است. هر چه MSE (میانگین خطاهای استاندارد شده) کمتر بوده و به صفر نزدیک‌تر باشد، مدل از جهت ناریبی عملکرد بهتری را دارا می‌باشد (Krivoruchko, 2011). با توجه به جدول ۳، در همه سال‌های مورد مطالعه مقدار MSE محاسبه شده نزدیک به صفر بود. هر چه RMSSE (ریشه دوم میانگین مربع خطاهای استاندارد شده) نزدیک‌تر به یک باشد، مدل در این مشخصه معتبرتر می‌باشد. RMSSE بزرگ‌تر از یک نشانگر کم برآورد تغییرپذیری پیش‌بینی‌ها و RMSSE

Table 3- Values of cross-validation statistics between sampled and estimated values (ordinary kriging)
جدول ۳- مقادیر آماره‌های ارزیابی متقابل بین مقادیر نمونه‌برداری شده و برآورد شده (کریجینگ معمولی)

Years	Variables	ME ($\mu\text{mhos/cm}$)	RMSE	MSE	RMSSE ($\mu\text{mhos/cm}$)	ASE ($\mu\text{mhos/cm}$) ^{0.5}
2001	LSI	-0.002	0.191	0	1.002	0.192
	RSI	-0.006	0.337	-0.011	1.075	0.311
	* PSI	-0.002	0.559	-0.003	0.993	0.569
2002	LSI	-0.000009	0.198	0.009	0.827	0.241
	RSI	0.001	0.377	-0.001	0.762	0.499
	* PSI	0.005	0.603	0.007	0.94	0.657
2003	LSI	0.0006	0.306	0.0015	1.02	0.3
	RSI	-0.004	0.4018	-0.009	1.007	0.396
	* PSI	0.013	0.549	0.016	0.989	0.551
2004	LSI	-0.0035	0.2482	-0.0108	1.101	0.222
	RSI	0.0042	0.3944	0.0077	1.098	0.353
	PSI	-0.02	3.267	-0.004	1.001	3.27
2005	LSI	-0.0003	0.2894	-0.003	1.039	0.2785
	RSI	0.0003	0.4027	0.00018	1.034	0.3872
	* PSI	0.0027	0.6434	0.0027	0.969	0.667
2006	LSI	-0.001	0.324	-0.002	0.99	0.328
	RSI	0.0009	0.4398	0.0008	0.996	0.441
	* PSI	0.006	0.547	0.0083	0.983	0.556
2007	LSI	-0.001	0.2405	-0.002	1.035	0.231
	RSI	0.006	0.474	0.006	1.07	0.428
	PSI	-0.026	2.74	-0.007	0.93	2.95
2008	LSI	0.0005	0.2099	0.004	0.989	0.212
	RSI	0.0003	0.3457	-	0.9612	0.362
	* PSI	0.008	0.473	0.0166	0.996	0.476
2009	LSI	-0.0007	0.2577	-0.0038	1.029	0.25
	RSI	-0.006	0.4083	-0.0123	1.049	0.388
	* PSI	0.008	0.482	0.0152	1.021	0.467
2010	LSI	0.003	0.172	0.019	0.974	0.177
	RSI	-0.004	0.34	-0.007	0.92	0.378
	* PSI	0.013	0.486	0.017	0.486	0.484
2011	LSI	0.005	0.126	0.039	0.988	0.125
	RSI	-0.004	0.2562	-0.013	1.126	0.221
	* PSI	0.004	0.451	0.008	1.08	0.407
2012	LSI	0.007	0.124	0.047	0.924	0.14
	RSI	0.003	0.23	0.012	0.983	0.2285
	PSI	-0.027	2.246	-0.017	0.996	2.247
2013	LSI	0.0191	0.305	0.061	1.079	0.276
	RSI	-0.022	0.475	-0.046	1.014	0.468
	* PSI	0.063	0.56	0.091	1.02	0.54
2014	LSI	0.012	0.426	0.014	0.966	0.451
	RSI	-0.005	0.42	-0.011	0.939	0.449
	* PSI	0.012	0.426	0.014	0.966	0.451

Table 4- Area and percentage of each classes of groundwater LSI index in the study area
جدول ۴- مساحت و درصد هر یک از کلاس‌های طبقه‌بندی شاخص LSI آب زیرزمینی محدوده مورد مطالعه

Years	LSI<0		0<LSI<0.5		0.5<LSI<1		1<LSI<2		LSI>2	
	%	Area (km ²)	%	Area (km ²)	%	Area (km ²)	%	Area (km ²)	%	Area (km ²)
2001	0	0	2.63	409.02	97.11	15103.15	0.26	40.59	0	0
2002	12.2	1896.96	68.81	10701.22	19	2954.59	0	0	0	0
2003	0	0	0.03	4.33	76.33	11871.94	23.64	3676.49	0	0
2004	0	0	57.27	8907.5	42.14	6553.84	0.59	91.42	0	0
2005	0	0	2.58	401.54	97.42	15151.22	0	0	0	0
2006	0	0	0.37	57.14	57.27	8907.5	42.36	6588.12	0	0
2007	0	0	0	0	78.59	12222.25	21.41	3330.51	0	0
2008	0	0	0	0	98.78	15363.22	1.22	189.54	0	0
2009	0	0	0	0	44.81	6968.77	55.19	8583.98	0	0
2010	0	0	62.2	9673.14	37.8	5879.62	0	0	0	0
2011	0	0	91.27	14195.65	8.73	1357.11	0	0	0	0
2012	0	0	97.72	15198.9	2.28	353.86	0	0	0	0
1392	0	0	93.7	14572.36	6.3	980.4	0	0	0	0
2013	0	0.39	70.24	10924.64	29.75	4627.72	0	0	0	0

Table 5- Area and percentage of each classes of groundwater RSI index in the study area
جدول ۵- مساحت و درصد هر یک از کلاس‌های طبقه‌بندی شاخص RSI آب زیرزمینی محدوده مورد مطالعه

Years	RSI<4		4<RSI<5		5<RSI<6		6<RSI<7		7<RSI<7.5		7.5<RSI<9		RSI>9	
	%	Area (km ²)	%	Area (km ²)	%	Area (km ²)	%	Area (km ²)	%	Area (km ²)	%	Area (km ²)	%	Area (km ²)
2001	0	0	0	0	0	0	69.93	10875	30.07	4677	0	0	0	0
2002	0	0	0	0	0	0	0.51	79.1	34.34	5341	14.8	2302.4	0	0
2003	0	0	0	0	1.78	277	98.22	15276	0	0	0	0	0	0
2004	0	0	0	0	0	0	78.44	12200	21.56	3353	0	0	0	0
2005	0	0	0	0	3.1	481.9	79.26	12328	17.64	2743	0	0	0	0
2006	0	0	0	0	5.57	866.1	89.4	13905	5.03	781.8	0	0	0	0
2007	0	0	0	0	10.21	1588	88.92	13830	0.87	135.2	0	0	0	0
2008	0	0	0	0	1.26	195.8	98.74	15357	0	0	0	0	0	0
2009	0	0	0	0	13	2021	87	13532	0	0	0	0	0	0
2010	0	0	0	0	0	0	67.6	10514	31.63	4920	0.77	119.4	0	0
2011	0	0	0	0	0	0	86.02	13378	13.98	2174	0	0	0	0
2012	0	0	0	0	0	0	79.96	12436	20.04	3117	0	0	0	0
1392	0	0	0	0	0	0	90.93	14142	9.07	1410	0	0	0	0
2013	0	0	0	0	0	0	99.3	15444	0.7	108.8	0	0	0	0

Table 6- Area and percentage of each classes of groundwater PSI index in the study area
جدول ۶- مساحت و درصد هر یک از کلاس‌های طبقه‌بندی شاخص PSI آب زیرزمینی محدوده مورد مطالعه

Years	PSI <4		4 < PSI <5		5 < PSI <6		6 < PSI <7		7 < PSI <7.5		7.5 < PSI <9		PSI >9	
	%	Area (km ²)	%	Area (km ²)	%	Area (km ²)	%	Area (km ²)	%	Area (km ²)	%	Area (km ²)	%	Area (km ²)
2001	67.68	10527	14.1	2193	13	2026.99	5.2	806	0	0	0	0	0	0
2002	64.44	10022	22.42	3486	12	1849.28	1.3	195	0	0	0	0	0	0
2003	33.64	5231	12.33	1918	23	3567.33	26	4117	2.71	421.6	1.91	298	0	0
2004	52.68	8193	21.04	3272	21	3333.66	4.6	722	0.1	16.16	0.1	16.2	0	0
2005	42.85	6665	14.4	2239	24	3771.85	16	2482	1.8	280.6	0.74	115	0	0
2006	48.24	7502	12.98	2018	22	3490.89	12	1931	3.22	500.4	0.71	110	0	0
2007	40.67	6326	20.71	3221	22	3385.28	17	2577	0.28	43.35	0	0	0	0
2008	41.37	6434	22.98	3574	22	3426.26	14	2103	0.1	14.97	0	0	0	0
2009	18.99	2954	13.5	2100	23	3619.74	39	6107	4.58	711.7	0.39	60.3	0	0
2010	38.66	6012	7.41	1152	11	1751.95	10	1608	16.5	2563	15.85	2466	0	0
2011	19.77	3074	18.55	2884	13	1993.89	23	3645	17	2646	8.41	1308	0	0
2012	49.95	7768	15.02	2336	30	4680.92	4.9	768	0	0	0	0	0	0
1392	9.44	1469	10.16	1580	18	2765.44	17	2654	20.4	3173	25.15	3911	0	0
2013	23.09	3591	8.63	1343	11	1648.31	15	2323	10.3	1596	23.52	3658	8.96	1394

به ترتیب در جداول ۹، ۱۰ و ۱۱ ارائه شده است. نتایج جدول ۹ نشان می‌دهد که با توجه به شاخص LSI، مساحت ۸۰ تا ۱۰۰ درصد منابع آب زیرزمینی قزوین بیش از حد آستانه می‌باشد. و همچنین نتایج جدول ۱۰ نشان می‌دهد با توجه به شاخص RSI، بیش‌ترین درصد مساحت محدوده مطالعاتی، ۸۰ تا ۱۰۰ درصد بیش از حد آستانه قرار دارد.

به‌طور کلی هر دو روش کریجینگ معمولی و شاخص توانسته‌اند وضعیت هر یک از شاخص‌های RSI، LSI و PSI منابع آب زیرزمینی استان قزوین را با دقت مناسبی به تصویر بکشند، ولی روش کریجینگ شاخص با دقت بالاتری توانسته است وضعیت هر یک از شاخص‌های RSI، LSI و PSI منابع آب زیرزمینی این دشت را نشان دهد.

(Barcae et al. (2008), Taghizadeh Mehrjerdi et al. (2008) و Shabani (2012) در تحقیقات خود روش‌های زمین آمار مانند کریجینگ معمولی و کوکریجینگ را به‌عنوان ابزار مناسب برای مطالعه کیفیت آب‌های زیرزمینی و نقشه‌بندی آن‌ها در مناطق مختلف جهان پیشنهاد کرده بودند که نتایج به دست آمده از این تحقیق نیز مؤید نظر آن‌ها است.

با توجه به جدول ۸ مقدار ME برای تمام مؤلفه‌ها نزدیک صفر محاسبه شد که مقادیر ME مثبت بیش برآورد و مقادیر ME منفی کم برآورد بسیار ناچیز بهترین مدل‌های سمی‌واریوگرام‌های برازش داده شده را نشان می‌دهد. مقدار RMSE محاسبه شد برای همه مؤلفه‌های بسیار کوچک و نزدیک صفر اندازه‌گیری شده که نشانگر دقت بسیار خوب مدل‌های واریوگرام و صحت تخمین‌ها و درون‌یابی است.

همچنین مقدار MSE محاسبه شده نزدیک به صفر بود که نشان از عملکرد بهتر مدل از جهت ناریبی می‌باشد. مقادیر RMSSE نیز نزدیک صفر محاسبه شده که مقادیر بزرگتر از یک نشانگر کم برآورد تغییرپذیری پیش‌بینی‌ها و RMSSE کوچکتر از یک نشانگر بیش برآورد تغییرپذیری پیش‌بینی‌ها می‌باشد. مقدار ME نیز تقریباً برابر صفر محاسبه شده است.

نقشه‌های احتمالاتی بیش از حد آستانه هر یک از شاخص‌های RSI، LSI و PSI در پنج کلاس با احتمال ۰/۲-۰/۴، ۰/۴-۰/۶، ۰/۶-۰/۸، ۰/۸-۱ و ۱-۰/۸ طبقه‌بندی و رسم شده که برای دو سال ۱۳۸۹ و ۱۳۹۳ به‌صورت نمونه در شکل ۷ آمده است. همچنین درصد مساحت محدوده‌های احتمالاتی در هر یک از شاخص‌های RSI، LSI و PSI

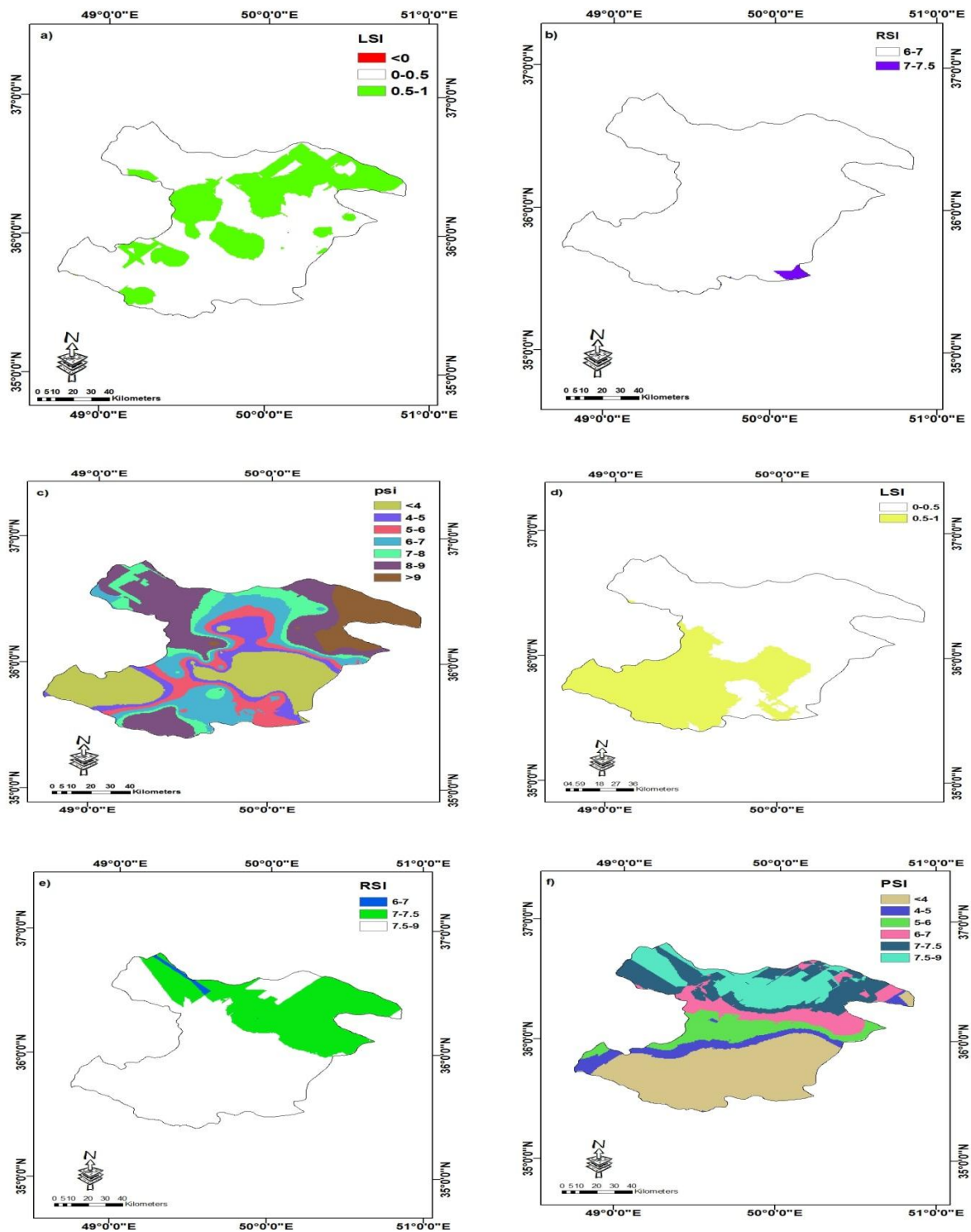


Fig. 5- Zoning maps of LSI (a: 2014, d: 2010), RSI (b: 2014, e: 2010), and PSI (c: 2014, f: 2010) indices
 شکل ۵- نقشه‌های پهنه‌بندی شاخص‌های LSI (a: سال ۱۳۹۳ - d: ۱۳۸۹)، RSI (b: سال ۱۳۹۳ - e: سال ۱۳۸۹) و PSI (c: سال ۱۳۹۳ - f: سال ۱۳۸۹)

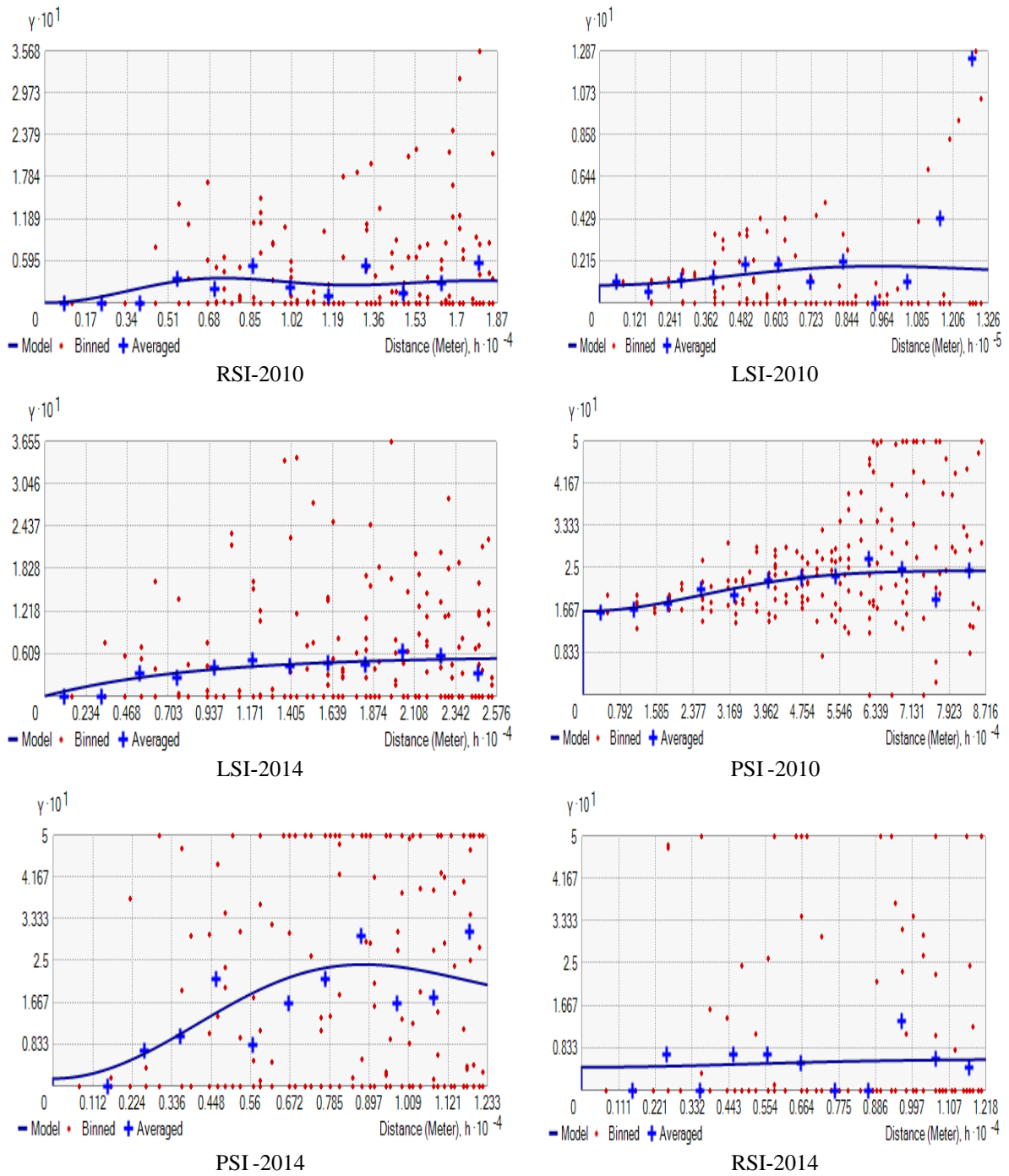


Fig. 6- The best fitted semi-variogram for kriging indicator in 2010 and 2014
 شکل ۶- بهترین سمی‌اریوگرام‌های برازش داده شده برای کریجینگ شاخص در سال‌های ۱۳۸۹ و ۱۳۹۳

Table 7- Characteristics of the best fitted empirical semi-variogram (indicator kriging)
جدول ۷- مشخصات بهترین مدل‌های برازش داده شده بر سمی‌واریوگرام تجربی (کریجینگ شاخص)

Years	Variables	Fitted model	Parameters				
			Nugget (C0)	Sill (C0 + C)	C0/ C0 + C	Spatial dependence	A (km)
2001	LSI	-	-	-	-	-	-
	RSI	Hole Effect	0	0.035	0	Strong	14.308
	PSI*	Gaussian	0.129	0	#DIV/0!	#DIV/0!	82.19
2002	LSI	Hole Effect	0.118	0.058	2.03	Weak	16.1
	RSI	-	-	-	-	-	-
	PSI*	Gaussian	0.081	0.006	13.5	Weak	46.59
2003	LSI	-	-	-	-	-	-
	RSI	circular	0.073	0.1	0.73	Moderate	24.19
	PSI*	Gaussian	0.074	0.179	0.41	Moderate	120.23
2004	LSI	J-Bessel	0.007	0.003	2.33	Weak	74.08
	RSI	Gaussian	0.017	0.0315	0.53	Moderate	73.35
	PSI	Gaussian	0.08	0.07	1.14	Weak	83.33
2005	LSI	-	-	-	-	-	-
	RSI	Hole Effect	0.077	0.049	1.57	Weak	136.73
	PSI*	Ration Quadratic	0.137	0.034	4.02	Weak	92.89
2006	LSI	-	-	-	-	-	-
	RSI	J-Bessel	0.144	0.097	1.48	Weak	28.6
	PSI*	Gaussian	0.092	0.061	1.5	Weak	70.34
2007	LSI	-	-	-	-	-	-
	RSI	Ration Quadratic	0.057	0.189	0.30	Moderate	77.71
	PSI	Gaussian	0.155	0.037	4.18	Weak	87.15
2008	LSI	-	-	-	-	-	-
	RSI	Spherical	0.141	0.025	5.64	Weak	66.42
	PSI*	Gaussian	0.102	0.026	3.92	Weak	13.78
2009	LSI	-	-	-	-	-	-
	RSI	K-Bessel	0.17	0.1	2.65	Weak	41.74
	PSI*	J-Bessel	0.038	0.154	0.24	Strong	14.90
2010	LSI	Hole Effect	0.008	0.007	1.14	Weak	132.61
	RSI*	Hole Effect	0	0.028	0	Strong	10.3
	PSI*	Gaussian	0.167	0.067	2.49	Weak	66.12
2011	LSI	-	-	-	-	-	-
	RSI	-	-	-	-	-	-
	PSI*	Hole Effect	0	0.216	0	Strong	13.09
2012	LSI	-	-	-	-	-	-
	RSI	-	-	-	-	-	-
	PSI	K-Bessel	0.126	0.002	63	Weak	117.33
2013	LSI	K-Bessel	0	0.099	0	Strong	172.16
	RSI	Ration Quadratic	0.049	0.005	9.8	Weak	72.27
	PSI*	Hole Effect	0.111	0.157	0.7	Moderate	20.70
2014	LSI	Exponential	0	0.056	0	Strong	25.76
	RSI	Gaussian	0.045	0.015	3	Weak	12.18
	PSI*	Hole Effect	0.014	0.186	0.07	Strong	12.32

Table 8- Values of cross-validation statistics between sampled and estimated values (indicator kriging)

جدول ۸- ارزیابی متقابل بین مقادیر نمونه برداری شده و برآورد شده (کریجینگ شاخص)

Years	Variables	ME	RMSE	MSE	RMSSE	ASE
2001	LSI	-	-	-	-	-
	RSI	-0.01	0.136	-0.041	0.8	0.174
	PSI *	-0.01	0.35	-0.029	0.96	0.372
2002	LSI	0.002	0.416	0.001	0.944	0.43
	RSI	-	-	-	-	-
	PSI *	0.007	0.29	0.026	0.977	0.296
2003	LSI	-	-	-	-	-
	RSI	-0.002	0.344	-0.006	0.987	0.348
	PSI *	-0.002	0.324	-0.01	1.126	0.285
2004	LSI	-0.0007	0.11	-0.006	1.178	0.093
	RSI	-0.002	0.181	-0.022	1.268	0.14
	POR	0.002	0.343	0.008	1.09	0.313
2005	LSI	-	-	-	-	-
	RSI	0.001	0.332	0.004	1.138	0.289
	PSI *	-0.0003	0.387	0.00001	0.98	0.392
2006	LSI	-	-	-	-	-
	RSI	-0.0002	0.44	-0.001	0.977	0.45
	PSI *	-0.001	0.35	-0.005	1.09	0.319
2007	LSI	-	-	-	-	-
	RSI	-0.004	0.372	-0.014	1.1948	0.307
	POR	-0.001	0.382	-0.003	0.924	0.411
2008	LSI	-	-	-	-	-
	RSI	-0.005	0.38	-0.01	0.96	0.39
	PSI *	0.0004	0.363	0.002	1.001	0.363
2009	LSI	-	-	-	-	-
	RSI	-0.005	0.453	-0.009	1.0009	0.451
	PSI *	0.016	0.402	0.03	0.97	0.4
2010	LSI	-0.0006	0.122	-0.007	1.209	0.099
	RSI	0.011	0.172	0.058	0.961	0.17
	PSI *	0.007	0.438	0.014	1.017	0.43
2011	LSI	-	-	-	-	-
	RSI	-	-	-	-	-
	PSI *	0.033	0.458	0.029	1.01	0.44
2012	LSI	-	-	-	-	-
	RSI	-	-	-	-	-
	POR	-0.0142	0.366	-0.04	0.99	0.36
2013	LSI	0.04	0.218	-0.436	2.896	0.0246
	RSI	-0.009	0.231	-0.035	0.972	0.241
	PSI *	0.05	0.482	0.094	0.93	0.51
2014	LSI	0.009	0.228	0.024	1.1	0.197
	RSI	-0.002	0.229	-0.008	0.9	0.256
	PSI *	0.0122	0.438	0.019	1.001	0.439

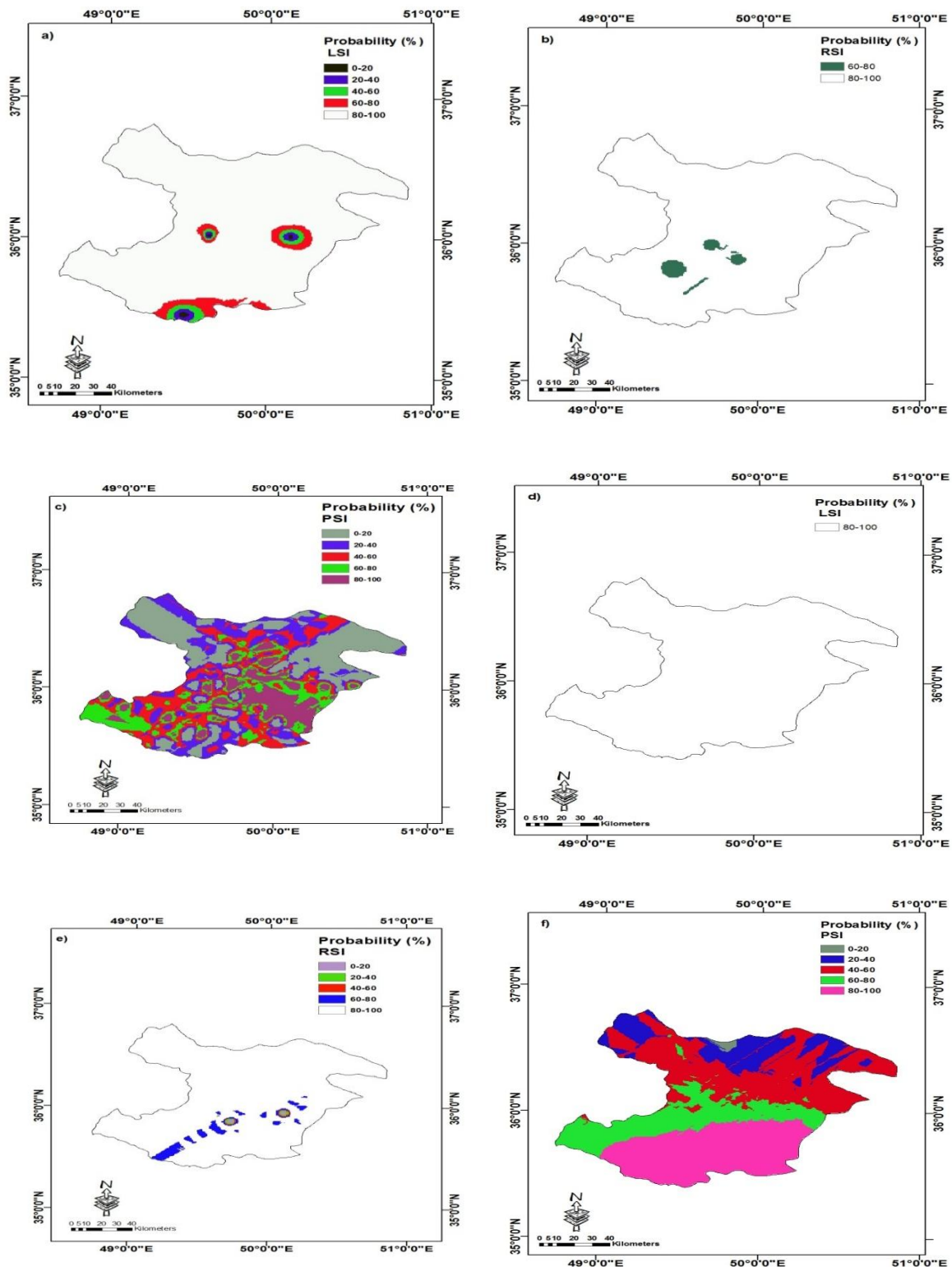


Fig. 7- Probability zoning maps of LSI (a: 2014, d: 2010), RSI (b: 2014, e: 2010), and PSI (c: 2014, f: 2010) indices

شکل ۷- نقشه‌های احتمالاتی شاخص‌های LSI (a: سال ۱۳۹۳ - d: ۱۳۸۹)، RSI (b: سال ۱۳۹۳ - e: سال ۱۳۸۹) و PSI (c: سال ۱۳۹۳ - f: سال ۱۳۸۹)

Table 9- Area percentage of LSI probability ranges over the threshold

جدول ۹- درصد مساحت محدوده‌های احتمالاتی LSI بیش از حد آستانه

Years	0-0.2	0.2-0.4	0.4-0.6	0.6-0.8	0.8-1
2001	-	-	-	-	-
2002	1.21	5.64	17.04	13.41	62.7
2003	-	-	-	-	-
2004	0	0	0	0	100
2005	-	-	-	-	-
2006	-	-	-	-	-
2007	-	-	-	-	-
2008	-	-	-	-	-
2009	-	-	-	-	-
2010	0	0	0	0	100
2011	-	-	-	-	-
2012	-	-	-	-	-
2013	13.38	7.67	8.6	10.06	60.29
2014	0.18	0.77	1.58	4.5	92.97

Table 10- Area percentage of RSI probability ranges over the threshold

جدول ۱۰- درصد مساحت محدوده‌های احتمالاتی RSI بیش از حد آستانه

Years	0-0.2	0.2-0.4	0.4-0.6	0.6-0.8	0.8-1
2001	0.24	0.26	4.19	8.42	86.89
2002	-	-	-	-	-
2003	0.71	1.78	5.21	20.67	71.62
2004	0	0	0	10.03	89.97
2005	0	0	0.93	31.56	67.51
2006	2.1	8.22	19.1	33.51	37.07
2007	3.1	4.86	10.06	26.29	55.69
2008	0.11	0.25	7.21	20.81	71.62
2009	3.17	8.09	18.39	52.51	17.84
2010	0.17	0.22	0.2	3.45	95.97
2011	-	-	-	-	-
2012	-	-	-	-	-
2013	0	0	0	0	100
2014	0	0	0	2.17	97.83

Table 11- Area percentage of PSI probability ranges over the threshold
 شکل ۱۱- مساحت محدوده‌های احتمالاتی PSI بیش از حد آستانه

Years	0-0.2	0.2-0.4	0.4-0.6	0.6-0.8	0.8-1
2001	0	0	0.03	22.27	77.7
2002	0	0.01	2.69	24.33	72.97
2003	0	8.54	24.15	30.01	37.31
2004	45.31	31.81	21.9	0.98	0
2005	0	0.53	19.36	41.1	39.01
2006	0	0.28	14.58	37.25	47.9
2007	46.38	20.58	24.44	8.6	0
2008	0	2.87	13.97	26.83	56.34
2009	8.7	12.02	23.76	28.17	27.35
2010	0.56	14	34.77	20.81	29.86
2011	12.27	21.75	19.1	21.09	25.79
2012	53.14	38.19	8.67	0	0
2013	14.27	23.1	28.69	19.98	13.96
2014	28.8	22.92	21.26	14.66	12.36

صورت اگر Z محاسبه شده از مقدار ۱/۹۶ بزرگتر باشد، آنگاه در سطح ۵ درصد روند داده‌ها معنادار خواهد بود و چنانچه مقدار Z بزرگتر از ۲/۵۶ باشد، آنگاه در سطح ۱ درصد نیز معنادار خواهد بود (Torabi Poudeh and Hamezadeh, 2018).

نتایج آزمون من- کندال و سن در بررسی روند تغییرات شاخص LSI در جدول ۱۲ ارائه شده است. نتایج نشان داد که تنها مساحت مناطقی با $0.5 < LSI < 1$ در طول دوره آماری دارای روند منفی معنی‌دار در سطح پنج درصد می‌باشد و مساحت LSI سایر محدوده‌ها بدون روند می‌باشد. در آزمون تخمین گر شیب سن نیز بیشترین شیب مثبت مربوط به $0 < LSI < 0.5$ (۴۴۹/۷۶۸) و بیشترین شیب منفی متعلق به $0.5 < LSI < 1$ (-۸۵۶/۰۴۶) می‌باشد.

۳-۲- تحلیل روند

به منظور بررسی روند تغییرات شاخص‌های LSI، RSI و PSI آب‌های زیرزمینی در طی دوره آماری ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۳، ابتدا مساحت‌های هر کلاس از شاخص‌های LSI، RSI و PSI را برای همه سال‌ها محاسبه و سپس از آزمون‌های آماری من-کندال و تخمین گر شیب سن استفاده شد. جداول ۱۲، ۱۳ و ۱۴ نتایج آزمون‌های تحلیل روند شاخص‌های LSI، RSI و PSI را نشان می‌دهند. مقدار مثبت آماره من- کندال (Z) نشان‌دهنده روند افزایشی و مقدار منفی آن بیان‌کننده روند کاهشی در سری داده‌هاست. برای بررسی روند داده‌ها در سری‌های سالانه داده‌ها، چنانچه مقادیر Z به دست آمده از آزمون من- کندال بزرگتر از مقدار ۱/۶۴۵ باشد روند داده‌ها در سطح ده درصد معنی‌دار و در غیر این صورت غیر معنی‌دار فرض می‌گردد، به همین

Table 12- Results of the Mann-Kendall and Sen slope estimator tests for changes in groundwater LSI index in Qazvin province

جدول ۱۲- نتایج آزمون من- کندال و سن در بررسی روند تغییرات شاخص LSI آب زیرزمینی استان قزوین

LSI classes	Mann-Kendall		Sen slope estimator	
	Test Z	Significant	Q	B
LSI<0	0	ns	0	0
0<LSI<0.5	1.156012	ns	449.768	2743.338
0.5<LSI<1	-1.97082	*	-	13584.03
1<LSI<2	-1.117	ns	856.046	20.295

$f(\text{year}) = Q * (\text{year} - \text{first data year}) + B$
 first data year: 2001

ns, *, ** and ***, respectively, indicate no significant trend and significant trend at five, one, and one-tenth percentile probabilities, respectively.

(۱۳۳) و بیشترین شیب منفی متعلق به $PSI < 4$ (-5.05) می‌باشد.

۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

هدف از مطالعه حاضر بررسی کیفیت آب‌های زیرزمینی دشت قزوین با توجه به دو خاصیت رسوب‌گذاری و خوردگی برای مدیریت بهتر سامانه‌های آبیاری قطره‌ای است. با استفاده از شاخص‌های رسوب‌گذاری و خوردگی و با کمک زمین‌آمار و آزمون‌های تحلیل روند مناطقی که مستعد رسوب‌گذاری و خوردگی هستند مشخص شد. در برخی مناطق با توجه به ریسک رسوب‌گذاری می‌توان اقدامات مدیریتی برای جلوگیری از گرفتگی قطره‌چکان‌ها نظیر اسیدشویی و تزریق اسید انجام داد. یکی دیگر از راه‌حل‌های مناسب استفاده از قطره‌چکان‌هایی است که ریسک گرفتگی در آن‌ها کمتر است که می‌توان به قطره‌چکان‌های خودشوینده اشاره کرد.

نتایج آزمون من-کندال و سن در بررسی روند تغییرات شاخص RSI در جدول ۱۳ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که مساحت LSI محدوده‌ها بدون روند می‌باشد. در آزمون تخمین‌گر شیب سن نیز بیشترین شیب مثبت مربوط به $6 < RSI < 7$ (226.75) و بیشترین شیب منفی متعلق به $7 < RSI < 7.5$ (-168.429) می‌باشد.

نتایج آزمون من-کندال و سن در بررسی روند تغییرات شاخص PSI در جدول ۱۴ ارائه شده است. مساحت PSI محدوده $PSI < 4$ در طول دوره آماری دارای روند منفی معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد، مساحت PSI محدوده $7 < PSI < 7.5$ و $7.5 < PSI < 9$ دارای روند مثبت معنی‌دار در سطح پنج درصد بوده که نشان‌دهنده‌ی افزایش خوردگی و کاهش کیفیت منابع آب زیرزمینی استان قزوین در دهه‌ی گذشته است. مساحت PSI سایر محدوده‌ها بدون روند می‌باشد. در آزمون تخمین‌گر شیب سن نیز بیشترین شیب مثبت مربوط به $7 < PSI < 7.5$

Table 13- Results of the Mann-Kendall and Sen slope estimator tests for changes in groundwater RSI index in Qazvin province

جدول ۱۳- نتایج آزمون من-کندال و سن در بررسی روند تغییرات شاخص RSI آب زیرزمینی استان قزوین

RSI classes	Mann-Kendall		Sen slope estimator	
	Test Z	Significant	Q	B
$5 < RSI < 6$	-0.36628	ns	0	0
$6 < RSI < 7$	1.532857	ns	226.75	11470.38
$7 < RSI < 7.5$	-1.15601	ns	-168.429	3423.929
$7.5 < RSI < 9$	-0.54545	ns	0	0

$$f(\text{year}) = Q * (\text{year} - \text{first data year}) + B$$

first data year: 2001

ns, *, ** and ***, respectively, indicate no significant trend and significant trend at five, one, and one-tenth percentile probabilities, respectively.

Table 14- Results of the Mann-Kendall and Sen slope estimator tests for changes in groundwater PSI index in Qazvin province

جدول ۱۴- نتایج آزمون من-کندال و سن در بررسی روند تغییرات شاخص PSI آب زیرزمینی استان قزوین

PSI classes	Mann-Kendall		Sen slope estimator	
	Test Z	Significant	Q	B
$PSI < 4$	-2.62775	**	-505	9838.5
$4 < PSI < 5$	-1.31388	ns	-82.375	2663.75
$5 < PSI < 6$	-0.32847	ns	-25.48	3474.13
$6 < PSI < 7$	0.985408	ns	103.2857	1397.286
$7 < PSI < 7.5$	2.367072	*	133	-148.8
$7.5 < PSI < 9$	1.797299	+	60.3	-93.25
$PSI > 9$	1.488417	ns	0	0

$$f(\text{year}) = Q * (\text{year} - \text{first data year}) + B$$

first data year: 2001

ns, *, ** and ***, respectively indicate no significant trend and significant trend at five, one, and one-tenth percentile probabilities.

Bakhshandehmehr L, Yazdani M, Zolfaghari A (2016) the evaluation of groundwater suitability for irrigation and changes in agricultural land of Garmsar basin. *Journal of Water and Soil* 30(6):1773-1786 (In Persian)

Bamdad Machiani S, Khaledian MR, Rezaei M, Tajdari Kh (2014) Evaluation of groundwater quality in Gilan province for agricultural and industrial uses. *Journal of Irrigation Drain* 8(2):246-256 (In Persian)

Barcae E, Passarella G (2008) Spatial evaluation of the risk of groundwater quality degradation: A comparison between disjunctive Kriging and Geostatistical simulation. *Journal of Environmental Monitoring and Assessment* 133:261-273

Bendra B (2008) Assessing groundwater quality in the irrigated plain of Triffa (North-east Morocco). *Journal of Agricultural Water Management* 95:133-142

Cambardella C A, Moorman T B, Novak J M, Parkin T B, Karlen D L, Turco R F, Koropaka A E (1994) Field –scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Science Society of America Journal* 58:1501-1511

Chen L, Feng Q (2013) Geostatistical analysis of temporal and spatial variations in groundwater levels and quality in the Minqin oasis, Northwest China. *Environmental Earth Sciences* 70(3):1367-1378

Choi J, Choi BG, Hong S (2015) Effects of NF treated water on corrosion of pipe distribution system and its implications to blending with conventionally treated water. *Desalination* 360:138-145

Colin M (2006) Stress corrosion cracking. The 4th International Congress of Energy and Environment Engineering and Management (CIEM), Madison. 19-28

Dash JP, Sarangi A, Singh DK (2010) Spatial variability of groundwater depth and quality parameters in the national capital territory of Delhi. *Environmental Management* 45(3):640-650

Davil MF, Mahvi AH, Norouzi M, Mazloomi S, Amarluie A, Tardast A, Karamitabar Y (2009) Survey of corrosion and scaling potential produced water from Ilam water treatment plant. *World Applied Sciences Journal* 7(11):11-24

Delbari M, Afrasiab P (2014) Application of indicator and ordinary kriging for modeling of groundwater chloride. *Journal of Environmental Studies* 40(3):751-764 (In Persian)

Delbari M, Amiri M, Motlagh MB (2016) Assessing groundwater quality for irrigation using indicator

- 1- LSI: Langelier Saturation Index
- 2- RSI: Ryznar Stability Index
- 3- PSI: Puckorius Scaling Index
- 4- LS: Larson–Skold Index
- 5- AI: Aggressive Index
- 6- IDW: Inverse Distance Weighting
- 7- Contour Interpolation Techniques
- 8- IK: Indicator Kriging
- 9- Kolmogorov–Smirnov
- 10- Reflect and Square Root

۵- مراجع

Adhikary PP, Dash CJ, Bej R, Chandrasekharan H (2011) Indicator and probability kriging methods for delineating Cu, Fe, and Mn contamination in groundwater of Najafgarh Block, Delhi, India. *Environmental Monitoring and Assessment* 176(1-4):663-676

Al Kuisi M, Al-Qinna M, Margane A, Aljazzar T (2009) Spatial assessment of salinity and nitrate pollution in Amman Zarqa Basin: a case study. *Environmental Earth Sciences* 59(1):117-129

Antony A, Low JH, Gray S, Childress AE, Le-Clech P, Leslie G (2011) Scale formation and control in high pressure membrane water treatment systems: a review. *Journal of Membrane Science* 383(1-2):1-16

Arslan H (2012) Spatial and temporal mapping of groundwater salinity using ordinary kriging and indicator kriging: the case of Bafra Plain, Turkey. *Agricultural Water Management* 113:57-63

Ashrafzadeh A, Roshandel F, Khaledian M, Vazifedoust M, Rezaei M (2016) Assessment of groundwater salinity risk using kriging methods: a case study in northern Iran. *Agricultural Water Management* 178:215-224

Ayers RS, Westcot DW (1985) Water quality for agriculture. *FAO Irrigation and drainage paper* 29 Rev. 1. Food and Agricultural Organization, Rome, 1, 74

Baalousha H (2010) Assessment of a groundwater quality monitoring network using vulnerability mapping and geostatistics: a case study from Heretaunga Plains, New Zealand. *Agricultural Water Management* 97(2):240-246

Bahrami Jovein E, Hosseini S (2015) A systematic comparison of geostatistical methods for estimation of groundwater salinity in desert areas, Case study: Feyz Abad-Mahvelat Plain. *Iran-Water Resources Research* 11(2):1-15 (In Persian)

- Johnston K, Ver Hoef JM, Krivoruchko K, Lucas N (2001) Using ArcGIS geostatistical analyst (Vol. 380). Redlands: Esri
- Khorsandi H, Mohammadi A, Karimzadeh S, Khorsandi J (2016) Evaluation of corrosion and scaling potential in rural water distribution network of Urmia, Iran. *Desalination and Water Treatment* 57(23):10585-10592
- Krivoruchko K (2011) Spatial statistical data analysis for GIS users. Redlands. Esri Press: 928
- Lauer W (2003) Introduction to water treatment: Principles and practices of water supply operations. 2nd DeneverAWWA: Press, 9:718
- Marengo E, Gennaro MC, Robotti E, Maiocchi A, Pavese G, Indaco A, Rainero A (2008) Statistical analysis of ground water distribution in Alessandria Province (Piedmont-Italy). *Microchemical Journal* 88(2):167-177
- Nas B (2009) Geostatistical approach to assessment of spatial distribution of groundwater quality. *Polish Journal of Environmental Studies* 18(6):1073-1082
- Nas B, Berktaş A (2010) Groundwater quality mapping in urban groundwater using GIS. *Environmental Monitoring and Assessment* 160(1-4):215-227
- Osati K, Salajegheh A, Areki S (2013) Spatial variation of nitrate concentrations in groundwater by Geostatistics (Case Study: Kurdan Plain). *Journal of Natural Environment* 65(4):461-472 (In Persian)
- Ostovari Y, Beigi Harchegani H, Davoodian A R (2011) Assessment, spatial variability and mapping of some water quality parameters for use in drip irrigation design in Lordegan plain, Iran. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage* 5(2):242-253 (In Persian)
- Ostovari Y, Beigi-Harchegani H, Davoudian A (2015) Geostatistical analysis of scaling and corrosion potential in the Lordegan Aquifer. *Journal of Environmental Science and Technology* 1792:45-61 (In Persian)
- Piccini C, Marchetti A, Farina R, Francaviglia R (2012) Application of indicator kriging to evaluate the probability of exceeding nitrate contamination thresholds. *International Journal of Environmental Research* 6(4):853-862
- Rafferty K (2000) Scaling in geothermal heat pump systems, Geo- Heat Center Oregon Institute of Technology 3201 Campus Drive Klamath Falls. pp 11-15
- Rahimi M, Besharat S, Rezaverdinejad VR (2017) Quality evaluation of groundwater resources of Ardabil aquifer for agricultural and drinking uses. kriging method. *Applied Water Science* 6(4):371-381
- Edwards M (2004) Controlling corrosion in drinking water distribution systems: a grand challenge for the 21st century. *Water Science and Technology* 49(2):1-8
- El-Fadel M, Tomaszewicz M, Adra Y, Sadek S, Najm MA (2014) GIS-based assessment for the development of a groundwater quality index towards sustainable aquifer management. *Water Resources Management* 28(11):3471-3487
- Gholizadeh A, Mokhtari M, Naimi N, Shiravand B, Ehrampoush MH, Miri M, Ebrahimi A (2017) Assessment of corrosion and scaling potential in groundwater resources; a case study of Yazd-Ardakan Plain, Iran. *Groundwater for Sustainable Development* 5:59-65
- Gilbert RG, Nakayama FS, Bucks DA (1979) Trickle irrigation: Prevention of clogging. *Transactions of the ASAE*: 22(3):514-519
- Goovaerts P (1997) Geostatistics for natural resources evaluation. Oxford University Press
- Hu K, Huang Y, Li H, Li B, Chen D, White RE (2005) Spatial variability of shallow groundwater level, electrical conductivity and nitrate concentration, and risk assessment of nitrate contamination in North China Plain. *Environment International* 31(6):896-903
- Hu K, Huang Y, Li H, Li B, Chen D, White RE (2005) Spatial variability of shallow groundwater level, electrical conductivity and nitrate concentration, and risk assessment of nitrate contamination in North China Plain. *Environment International* 31(6):896-903
- Institute for Agricultural Engineering (South Africa), Reinders FB (2005) Sub-surface drip irrigation: Factors affecting the efficiency and maintenance. Water Research Commission
- Isaaks EH, Srivastava RM (1989) An introduction to applied geostatistics. Oxford University Press, New York, 561p
- Jafari MA, Fallah F, Hassani AH (2011) Investigating the Hygiene of Anzali drinking water resources for corrosion and precipitation potentials using corrosion indexes. *Journal of Guilan University of Medical Sciences* 20(79):90-96
- Jang CS (2013) Use of multivariate indicator kriging methods for assessing groundwater contamination extents for irrigation. *Environmental Monitoring and Assessment* 185(5):4049-4061

- of estimating SAR of soil or drainage waters. Soil Science Society of America Journal 45(3):469-475
- Taghipour H, Shakerkhatibi M, Pourakbar M, Belvasi M (2012) Corrosion and scaling potential in drinking water distribution system of Tabriz. Northwestern Iran Health Promot Perspect 2(1):103-11 (In Persian)
- Taghizadeh Mehrjardi R, Zareian Jahromi M, Mahmodi S, Heidari A (2008) Spatial distribution of groundwater quality with geostatistics (Case study: Yazd-Ardakan Plain). World Applied Sciences Journal 4(1):9-17
- Torabi Poudeh H, Hamezadeh P (2018) Evaluate the water quality and trend of changes in quality parameters of Kashkan basin. Iranian Journal of Ecohydrology 5(1):23-36 (In Persian)
- Yimit H, Eziz M, Mamat M, Tohti G (2011) Variations in groundwater levels and salinity in the Ili River Irrigation Area, Xinjiang, Northwest China: A geostatistical approach. International Journal of Sustainable Development and World Ecology 18(1):55-64
- Journal of Environmental and Water Engineering 2(4):360-375 (In Persian)
- Reinders FB, Smal HS, Van Niekerk AS, Bunton S, Mdaka B (2005) Sub-Surface drip irrigation: Factors affecting the efficiency and maintenance. Project Executed by the ARC-Institute for Agricultural Engineering
- Roberge PR (2006) Corrosion basics: An introduction. National Association of Corrosion Engineers (NACE)
- Sanchez-Martos F, Jimenez-Espinosa R, Pulido-Bosch A (2001) Mapping groundwater quality variables using PCA and geostatistics: A case study of Bajo Andarax, southeastern Spain. Hydrological Sciences Journal 46(2):227-242
- Shabani M (2012) Determining the most suitable interpolation method for groundwater chemical characteristics mapping. Watershed Engineering and Management 3(4):196-204 (In Persian)
- Suarez DL (1981) Relation between pHc and Sodium Adsorption Ratio (SAR) and an alternative method