



Mapping pH of Groundwater and Determination of Vulnerability Areas for Citrus and Rice Growth in Mazandaran

R. Fazloulou^{1*}, H. Pouryazdankhah²

Received: 14-07-2022

Revised: 25-09-2022

Accepted: 02-10-2022

Available Online: 15-01-2023

How to cite this article:

Fazloulou, R., & Pouryazdankhah, H. (2022). Mapping pH of Groundwater and Determination of Vulnerability Areas for Citrus and Rice Growth in Mazandaran. *Journal of Water and Soil* 36(5): 545-559. (In Persian with English abstract)

DOI: [10.22067/JSW.2022.77702.1182](https://doi.org/10.22067/JSW.2022.77702.1182)

Introduction

Mazandaran province is one of the most important rice and citrus-producing areas in Iran, where most of the citrus orchards and agricultural fields are irrigated with groundwater. On the other hand, irrigation water pH is one of the basic qualitative factors that determine the solubility and biological availability of chemical components in the soil such as nutrients and heavy metals, and it can affect agricultural production.

Materials and Methods

The coastal strip of Mazandaran Province toward the southwest of the Caspian Sea is situated in the north of Iran with an area of 8,252 km² between 35.77 to 36.99 N latitudes and 50.36 to 57.13 E longitudes. In this study, the temporal and spatial variations of groundwater salinity were studied in the coastal strip using data from 300 wells, collected by Mazandaran Regional Water Company. Data included mean pH for each 6-month period of 9 consecutive years, from 2012 until the end of 2020. pH maps and maps of the risk probability area for rice and citrus growth were obtained by using Ordinary Kriging (OK) and Indicator Kriging (IK) in ArcGIS 10.7.1 software, respectively. Classifications were selected according to the properties pH range for the growth of citrus (5.8, 8) and the optimum pH for rice (6.8) in OK method. The indicator amount of pH was considered equal to 6.8 in IK method. Thereby, areas belonging to different pH classes were outlined and places with the risk probability for growing the rice and citrus were identified.

Results and Discussion

The 11 different models for semivariograms were drawn, and the best one was chosen according to the lowest nugget-to-sill ratio, and thus Stable and Exponential were obtained as the highest frequency for first and second half-years. The indices of cross validation for each selected semivariogram were estimated within acceptable ranges. In IK method, the pH of studying area was classified into 4 ranges of <5.8, 5.8–6.8, 6.8–8.0, >8, and the percentage area of each classification derived from the ArcGIS software, the average area of each classification during the studying period was calculated zero, 0.6, 83.5 and 15.9 percent, respectively. It showed that most part of the study area located in the range of 6.8-8. It means most rice fields and citrus orchards were irrigated by the groundwater with the pH close to neutral. The obtained maps in the OK method indicated that the pH of the groundwater was not acidic in any points and alkaline conditions were observed in the western and eastern parts of the province. Therefore, The IK method was used to further investigate and determine the vulnerable areas. The probability of pH risk in rice and citrus growth was classified into 4 ranges (0-20%, 20-40%, 40-60% and 60-100%), and the average percentage area of each classification along the period was estimated 94.9, 4.8, 0.3 and zero percent, respectively. Using the IK method, higher probability of groundwater pH reducing the yield in citrus orchards and rice fields was found in eastern parts of Mazandaran province, which was about 5% of total studying

1 and 2- Associate Professor and Postdoctoral Researcher, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran, respectively.

(*- Corresponding Author Email: r.fazloulou@sanru.ac.ir)

area. Also, the results of the study in these 9 consecutive years did not show any decreasing or increasing trend in pH changes and consequently the area under each classification.

Conclusion

Generally, the results indicated that the pH of groundwater for irrigating the citrus orchards and rice fields was appropriate in the most parts of the province and merely in the eastern part of the province, low water alkalinity may make a risk probability for rice and citrus growth in both western and eastern parts of the province. Due to the fact that alkaline water causes soil alkalinity and consequently reduces the solubility of phosphorus and some other plant nutrients in soil, it is suggested to supply the optimum required fertilization amounts of the nutrients in soil. However, the amount of fertilization should be on the basis of field research results. It is also proposed to study the condition of rice and citrus growth and the irrigated water in more details through the farms of western parts of the province. Due to the fact that most citrus orchards in this province are irrigated under the pressurized irrigation systems and using groundwater for irrigation, it is suggested that the Langelier Saturation Index (LSI) be examined in future research.

Keywords: Caspian coastal strip, Indicator Kriging, Mazandaran province, Ordinary Kriging, pH

مقاله پژوهشی

جلد ۳۶، شماره ۵، آذر-دی ۱۴۰۱، ص. ۵۴۵-۵۵۹

پهنه‌بندی pH آب‌های زیرزمینی و تعیین مناطق حساس برای رشد مرکبات و برنج در مازندران

رامین فضل‌اولی^{۱*} - هدیه پوریزدان‌خواه^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۱۰

چکیده

استان مازندران یکی از مهم‌ترین مناطق در زمینه‌ی تولید برنج و مرکبات در ایران است که بخشی از باغ‌ها و مزارع کشاورزی آن با آب‌های زیرزمینی آبیاری می‌شوند. با توجه به این امر که pH آب آبیاری تأثیر مهمی در عملکرد محصولات کشاورزی دارد، در این تحقیق، pH آب‌های زیرزمینی ۳۰۰ حلقه چاه مربوط به شرکت آب منطقه‌ای استان مازندران، به صورت مکانی و زمانی در نوار ساحلی استان مازندران به مساحت ۸۲۵۲ کیلومترمربع از ابتدای سال ۱۳۹۱ تا پایان سال ۱۳۹۹، با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS 10.7.1 با روش کریجینگ معمولی (OK) براساس میانگین pH در دوره‌های شش‌ماهه پهنه‌بندی شد. برای شناسایی مناطق با خطرپذیری بیشتر از روش کریجینگ شاخص (IK) استفاده شد. نتایج نشان داد که بهترین نیم‌تغییرنما برای پارامتر pH مدل Stable و Exponential است. طبقه‌بندی کلاس‌ها در روش OK براساس حساسیت مرکبات و برنج تعریف شد. نتایج نشان داد که در روش OK، میانگین درصد مساحت تحت کلاس‌های طبقه‌بندی pHهای $8/5 <$ ، $8/6-8/5$ ، $8/8-8/6$ و $8/8 >$ به ترتیب برابر با صفر، ۰/۶، ۸۳/۵ و ۱۵/۹ درصد و در روش IK، میانگین درصد مساحت تحت کلاس‌های طبقه‌بندی با احتمال خطر آسیب‌پذیری ۲۰-، ۴۰-، ۲۰، ۴۰-۶۰ و ۱۰۰-۶۰ درصد به ترتیب برابر با ۹۴/۹، ۴/۸، ۰/۳ و صفر درصد بود. نقشه‌های حاصل از روش OK نشان دادند که در هیچ منطقه‌ای pH آب زیرزمینی اسیدی نیست و در کناره‌های غربی و شرقی استان شرایط قلیایی مشاهده شد. نقشه‌های حاصل از روش IK نشان دادند که در اکثر مناطق استان مازندران احتمال خطر آسیب‌پذیری براساس pH آب‌های زیرزمینی برای باغ‌های مرکبات و مزارع برنج منطقه مورد مطالعه، در محدوده‌ی ۲۰-۰ تا ۴۰-۲۰ درصد قرار دارد و در بخشی‌های بسیار کمی در قسمت‌های شرقی استان احتمال خطر به ۴۰-۲۰ درصد می‌رسد. با توجه به آسیب‌پذیری مرکبات و گیاه برنج در pHهای بالا در آب آبیاری، توصیه می‌شود که در دو محدوده‌ی غربی و شرقی استان برای رشد بهتر گیاه برنج و عدم آسیب‌پذیری محصول به دلیل کمبود نیتروژن و فسفر، با انجام تحقیقات مزرعه‌ای کودهای حاوی عناصر مذکور به مزارع افزوده شود.

واژه‌های کلیدی: استان مازندران، کریجینگ شاخص، کریجینگ معمولی، نوار ساحلی دریای خزر، pH

مقدمه

از منابع آب زیرزمینی و بحث تأمین آب در سراسر جهان مورد توجه قرار گرفته است (Gunarathna et al., 2016). بنابراین اقدامات عملی برای حفاظت از کیفیت طبیعی آب‌های زیرزمینی ضروری است. همان‌طور که بسیاری از متخصصان اشاره می‌کنند، نقشه‌برداری کیفیت آب‌های زیرزمینی در مناطق وسیع اولین گام در برنامه‌ریزی منابع آب است (Todd and Mays, 2004) و تنها زمانی می‌توان با استفاده بهینه از آب‌های زیرزمینی به پایداری منابع آبی کمک نمود که کمیت و کیفیت آن به درستی ارزیابی شود (Kharad et al.,

آب برای حفظ و بقای حیات ضروری است. در این میان، آب‌های زیرزمینی یکی از ارزشمندترین منابع طبیعی است که از سلامت انسان، توسعه اقتصادی و تنوع اکولوژیکی حمایت می‌کند. با توجه به انفجار جمعیت، رشد صنعت و توسعه کشاورزی، استخراج آب‌های زیرزمینی افزایش یافته است (Grace, 2020). از طرفی، با توجه به کاهش سطح آب‌های زیرزمینی، خشک شدن تالاب‌ها و افزایش نفوذ آب دریا که نشان‌دهنده‌ی کاهش کیفیت آب است، پایداری در استفاده

۱ و ۲- به ترتیب دانشیار و پژوهشگر پسا دکتری، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

(Email: r.fazloula@sanru.ac.ir

*) نویسنده مسئول:

(2010).

در کشور ایران، استان مازندران در زمینه‌ی کشاورزی، به‌عنوان اولین قطب تولید برنج و مرکبات در سطح کشور ایران شناخته می‌شود، به‌طوری که با دارا بودن ۲۲۸/۷ هزار هکتار مزارع برنج، که ۴۰ درصد از مزارع برنج سطح کشور را شامل می‌شود، رتبه نخست تولید برنج در کشور را دارا است (Yousefian et al., 2019). در زمینه‌ی تولید و صادرات مرکبات نیز، استان مازندران، جزء ۱۰ تولید کننده‌ی بزرگ مرکبات در سطح جهانی است و رتبه نخست را در سطح کشور دارد (Hosseini and Rafiei, 2008). برنج، غذای قالب در بسیاری از کشورهای در حال توسعه و یک غذای پایدار برای بیش از نیمی از جمعیت جهان محسوب می‌شود (Pouryazdankhah et al., 2019). به‌طوری که سطح زیر کشت آن در جهان، طی سال‌های اخیر از ۱۴۵ میلیون هکتار به ۱۶۷/۲ میلیون هکتار افزایش یافته است (FAO, 2018). در ایران، کشت برنج الگوی غالب تولیدات کشاورزی در منطقه شمال ایران (استان‌های مازندران، گیلان و گلستان) است که مجموعاً حدود ۲/۷ میلیون تن برنج تولید می‌کند (Statistical Center of Iran, 2011). مرکبات نیز به‌عنوان یک گروه درختی میوه با اهمیت زیاد در بخش کشاورزی جهانی شناخته شده است زیرا ۱۴۰ کشور تولید کننده‌ی مرکبات در جهان قرار دارد (Ziogas et al., 2021). برای دستیابی به تولید محصولات با راندمان بالا به‌عنوان یکی از مهمترین اهداف کشاورزی، کیفیت آب آبیاری در کشاورزی از عوامل مهم و اثرگذار است. با توجه به این امر که بسیاری از مزارع کشاورزی در استان مازندران به‌صورت برداشت‌های مجاز و غیرمجاز چاه‌ها در سطح استان، با آب‌های زیرزمینی آبیاری می‌شوند (IRNA, 2021)، ارزیابی و بررسی دقیق‌تر و شناخت بیشتر از کیفیت آب زیرزمینی موجود، به منظور دستیابی به تولید بهینه محصول در این استان به‌عنوان اولین قطب تولید برنج و مرکبات در کشور، نیاز است. از تحقیقات جامعی که در زمینه شناخت کیفیت آب‌های زیرزمینی استان مازندران انجام شده است می‌توان به تحقیق کاراندیش و شاهنظری (Karandish and Shahnazari, 2014) اشاره نمود که سه روش درون‌یابی با ArcGIS جهت پهنه‌بندی پارامترهای هدایت الکتریکی (EC)، pH، کل مواد جامد محلول در آب (TDS)، نسبت جذب سدیم (SAR)، سختی کل (TH)، غلظت یون کلرید (Cl⁻)، یون سدیم (Na⁺)، یون پتاسیم (K⁺)، یون بی‌کربنات (HCO₃⁻)، یون منیزیم (Mg⁺)، یون کلسیم (Ca⁺) و یون سولفات (SO₄²⁻) با داده‌برداری در پاییز و بهار سال ۲۰۰۴ با نمونه‌برداری از ۲۳ حلقه چاه انجام شد، میانگین آماری مقادیر EC، SAR، pH به ترتیب برابر با ۱۴۸۰، ۳/۲۶، ۷/۷۶ و میانگین غلظت TDS، TH، Cl⁻

، Na⁺، K⁺، HCO₃⁻، Mg⁺، Ca⁺ و SO₄²⁻ به ترتیب برابر با ۹۴۹، ۳۸۹، ۵/۰۴، ۶/۶۶، ۰/۰۷، ۷/۰۱، ۳/۳۳، ۴/۴۶ و ۲/۴۰ میلی‌گرم بر لیتر ارائه شد. پس از تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی مناطق با کیفیت آب آلوده شناسایی شد.

pH آب یک پارامتر کیفی پایه است و حلالیت و در دسترس بودن بیولوژیکی اجزای شیمیایی مانند مواد مغذی و فلزات سنگین را تعیین می‌کند، به‌طوری که استفاده از آب با pH بیشتر و یا کمتر از محدوده‌ی بهینه برای رشد گیاه، می‌تواند مضر باشد (Gunarathna et al., 2016). از حساس‌ترین پارامترهایی است که نقش بسیار مهمی در میزان عملکرد محصولات مورد کشت در منطقه ایفاء می‌کند. طی تحقیقاتی عنوان شده است که افزایش pH آب آبیاری در برنج می‌تواند منجر به افزایش و یا کاهش عناصر موجود در خاک به‌ویژه نیتروژن و فسفر شود که این امر متعاقباً باعث کاهش عملکرد محصول شود (van Asten et al., 2005) و در مرکبات نیز، عملکرد درختان با افزایش pH کاهش می‌یابد (Ghimire et al., 2020). به‌این منظور، کیفیت آب‌های زیرزمینی در بلندمدت باید بررسی شود، به‌طوری که تغییرات مکانی پارامترهای کیفی آب در یک دوره‌ی چند ساله مشخص شود. برای شناخت و ارزیابی تغییرات مکانی پارامترهای کیفی آب، نیاز به پهنه‌بندی این پارامترها در محدوده‌ی مورد مطالعه است. GIS می‌تواند به درک بهتر روابط مکانی و الگوها کمک کند (Grace, 2020). معمول‌ترین روش در علوم آب و خاک برای دستیابی به توزیع مکانی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک روش کریجینگ معمولی (OK¹) است (Mishra et al., 2009; Yasrebi et al., 2009). روش OK یک روش درون‌یابی زمین‌آماری برای تخمین متغیرهای مکانی پراکنده است (Lee et al., 2007). اما نمی‌تواند دقت ارزیابی و برآورد بر اساس میزان خطرپذیری و احتمال خطر در منطقه را بیان کند (Goovaerts et al., 1997). در مقابل، کریجینگ شاخص (IK²) یکی دیگر از روش‌های درون‌یابی زمین‌آماری برای ارزیابی مکانی متغیرها است که میزان خطر را با تعیین یک مقدار آستانه خاص بیان می‌کند (Belkhiri et al., 2017). روش IK در بسیاری از مطالعات ارزیابی پارامترهای کیفی آب آبیاری و زیرزمینی مانند غلظت نیترات، Cl⁻، Na⁺، SAR، EC و فلزات سنگین استفاده شده است (Chica-Olmo et al., 2014; Pouryazdankhah et al., 2019; Delbari et al., 2016; Piccini et al., 2012; Belkhiri et al., 2017).

طی تحقیق انجام شده در حوضه آبریزی واقع در یک منطقه‌ی کشاورزی به مساحت یک کیلومتر مربع در سریلانکا، توزیع مکانی pH آب‌های زیرزمینی با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS 10.2 رسم شد. برای این منظور اطلاعات مربوط به ۴۰ حلقه چاه برداشت شد و برای

1- Ordinary Kriging

2- Indicator Kriging

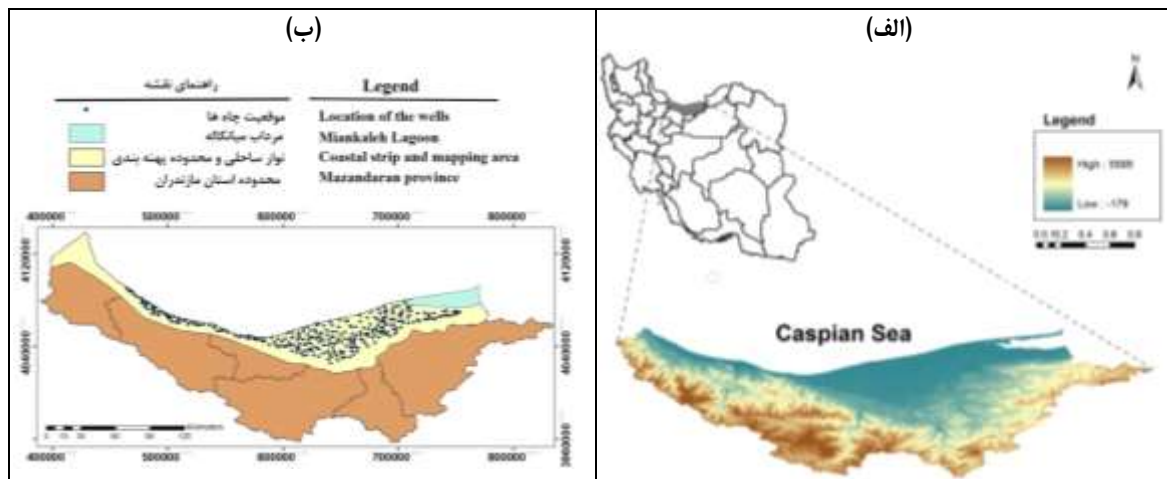
آب‌های زیرزمینی انجام شده است، اما تحقیقی در زمینه‌ی بررسی pH آب‌های زیرزمینی که به‌عنوان آب آبیاری در کشاورزی منطقه استفاده می‌شود، انجام نشده است. با توجه به اینکه استان مازندران، اولین تولید کننده‌ی مرکبات و برنج در کشور است، نیاز است وضعیت کنونی کیفیت آب‌های آبیاری منطقه، بررسی شود. بنابراین مهمترین اهداف این تحقیق عبارتند از بررسی مکانی pH آب‌های زیرزمینی طی نیم‌سال‌های اول و دوم سال‌های ۱۳۹۹-۱۳۹۱ با روش OK در ArcGIS براساس محدوده‌های حساس به pH در مرکبات و برنج که کشت غالب منطقه به‌شمار می‌روند و تعیین مکان‌های تحت خطر بیشتر براساس روش IK و ارائه راهکارهای مدیریتی.

مواد و روش‌ها

معرفی محدوده‌ی مطالعه

استان مازندران بین ۳۵/۷۷ تا ۳۶/۹۷ درجه عرض شمالی و ۵۰/۳۶ تا ۵۷/۱۳ درجه طول شرقی، در شمال ایران قرار دارد و دارای مرز مشترک طولانی با دریا است. قسمت هموار و جلگه‌ای مازندران، سرزمین هلالی شکل به مساحت ۸۲۵۲ کیلومترمربع است که مساحت پهنه‌بندی شده در این تحقیق را شامل می‌شود و از سواحل دریا در شمال به سمت قسمت کوهپایه‌ای در جنوب استان امتداد می‌یابد (Omrani et al., 2003). شکل ۱ محدوده‌ی مورد مطالعه و موقعیت ۳۰۰ چاه نمونه‌برداری را نشان می‌دهد. اقلیم منطقه معتدل و مرطوب است و میانگین بارندگی استان مازندران ۶۷۳ میلی‌متر است (Ghadami Firouzabadi, 2015). pH آب‌های زیرزمینی برای ۳۰۰ حلقه چاه در طی ۱۸ بازه زمانی به‌صورت شش ماهه از ابتدای سال ۱۳۹۱ تا پایان سال ۱۳۹۹ خورشیدی، توسط سازمان آب منطقه‌ای استان مازندران اندازه‌گیری شد و در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به این امر که در نیم‌سال اول، بارندگی کم‌تر و برداشت آب برای کشاورزی بیشتر است، و در نیم‌سال دوم، بارندگی و تغذیه آب‌های زیرزمینی زیاد است، جهت بررسی جزئی‌تر بازه‌های زمانی مورد مطالعه به‌صورت دوره‌های شش ماهه در نظر گرفته شد. میانگین پارامترهای کیفی منطقه نوار ساحلی نیز طی دوره مطالعاتی محاسبه شد که مقادیر SAR، TDS و EC به ترتیب برابر با ۶۹۴/۵ میلی‌گرم بر لیتر، ۱/۶ و ۱/۱ دسی‌زیمنس بر متر بدست آمد. زمین‌های کشاورزی در منطقه، شامل باغ‌های مرکبات و مزارع برنج هستند. به‌دلیل محدودیت آب سطحی در منطقه، آبیاری در این استان، از طریق برداشت از چاه‌های حفر شده و انتقال آب‌های زیرزمینی به مزارع و باغ‌ها نیز صورت می‌گیرد.

پهنه‌بندی از سه روش وزن دادن معکوس فاصله (IDW)، تابع پایه‌ای شعاعی (RBF) و روش درون‌یابی کریجینگ استفاده شد. در نهایت روش کریجینگ با مدل نیم‌تغییرنمای خطی (Liner) به‌عنوان بهترین روش برای پهنه‌بندی pH معرفی شد (Gunarathna et al., 2016). در استان فارس نیز تحقیقی به‌منظور انتخاب مناسب‌ترین روش درون‌یابی زمین‌آمار در تهیه نقشه پهنه‌بندی پارامترهای pH و TDS در آب‌های زیرزمینی دشت ارسنجان، روش‌های میان‌یابی کریجینگ ساده (SK)، OK، IDW و RBF با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS با یکدیگر مقایسه شدند. با رسم نیم‌تغییرنمای مربوطه، روش SK برای پارامتر TDS و روش OK برای پارامتر pH به‌عنوان بهترین روش‌ها انتخاب شدند و در نهایت نقشه‌ی هم‌تراز مربوط به دو پارامتر فوق برای آب‌های زیرزمینی رسم شد (Shabani, 2009). طی مطالعه موردی در استان زنجان، پارامترهای کیفی آب‌های زیرزمینی شامل، SAR، pH، TDS، TH، Ca^{2+} ، Mg^{2+} ، HCO_3^- ، K^+ ، Na^+ ، Cl^- و SO_4^{2-} برای ۱۵ حلقه چاه، طی ۴ بار نمونه‌برداری، اندازه‌گیری شدند، سپس با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS و با در نظر گرفتن شاخص آماری ضریب همبستگی ارزیابی شدند. نتایج نشان داد که کیفیت آب زیرزمینی در منطقه، طبق استاندارد سازمان بهداشت جهانی (WHO) برای شرب مناسب است (Asghari et al., 2018). در تحقیق انجام شده در دشت خفر، در ایران، سه روش درون‌یابی IDW، Spline و کریجینگ برای پهنه‌بندی پارامترهای کیفی آب‌های زیرزمینی منطقه از جمله SAR، EC و pH برای دوره بهار و پاییز مورد ارزیابی قرار گرفتند. کریجینگ به‌عنوان بهترین مدل برای پاییز و Spline به‌عنوان بهترین روش در پاییز شناخته شد. نتایج نشان داد بیشترین مقادیر EC در مرکز و جنوب شرقی و بالاترین مقدار SAR در جنوب شرقی منطقه مشاهده شد. نتایج پهنه‌بندی pH نشان داد که pH از مرکز به شمال و شمال غربی افزایش یافته است (Mohammadi et al., 2021). تحقیقی در استان مازندران با هدف بررسی وضعیت شوری آب‌های زیرزمینی طی یک دوره ۲۶ ساله، از سال ۱۹۸۷ تا ۲۰۱۳ (۱۳۶۶-۱۳۹۲) انجام شد. از روش OK برای پهنه‌بندی و تهیه نقشه شوری استان استفاده شد. نتایج نشان داد که همبستگی مکانی در اکثر سال‌های مورد مطالعه در سطح متوسط بود. بیشترین احتمال شوری در قسمت‌های شرقی استان و در نواحی پست‌تر مشاهده شد. در کل، با در نظر گرفتن حد آستانه ۱ دسی‌زیمنس بر متر نتیجه گرفته شد که استفاده از آب‌های زیرزمینی در بلندمدت می‌تواند باعث کاهش عملکرد برنج در منطقه شود (Amiri-Bourkhani et al., 2017). اگرچه تحقیقات بسیاری در استان مازندران در زمینه‌ی بررسی کیفیت



شکل ۱- الف) نقشه استان مازندران و موقعیت آن در کشور ایران، ب) محدوده مورد مطالعه در نوار ساحلی استان مازندران و موقعیت چاه‌های نمونه‌برداری به صورت نقاط (۳۰۰ حلقه چاه)

Figure 1- a) Map of Mazandarn Province and its location in Iran, b) Study area along the coastal strip of Mazandaran Province and the location of sampling wells (300 wells)

همچنین در این تحقیق عنوان شد که مرکبات تحت بیماری میوه سبز (Huanglongbing) که یکی از رایج‌ترین بیماری مرکبات است، در pHهای کمتر از ۵/۸ و بیشتر از ۸، بیشترین تلفات و ریزش برگ را دارند و همچنین ارتفاع رشد و میزان رشد زیست توده در آنها کمتر است (Ghimire et al., 2020). در گیاه برنج نیز بهترین pH برای آب آبیاری ۶/۲ عنوان شده است (van Asten et al., 2005; Honma et al., 2016)، همچنین عنوان شد که قلیایی بودن آب آبیاری باعث قلیائیت خاک شده و میزان حلالیت فسفر و نیتروژن در خاک را که از عوامل مهم رشد و بازده عملکرد بالای گیاه برنج هستند را کاهش می‌دهد (van Asten et al., 2005). بر این اساس، حدود کلاس‌های طبقه‌بندی به صورت ۵/۸، ۶/۲ و ۸ تعریف شد و براساس آنها نقشه‌های پهنه‌بندی انجام شد.

روش کریجینگ شاخص

با استفاده از روش IK، فرایند تخمین براساس مقادیر شاخص است و مستقل از توزیع نرمال داده‌ها است (Emery, 2006). در این تحقیق با توجه به موارد مذکور در بخش فوق، pH برابر ۶/۲ به‌عنوان بهترین pH برای مرکبات و برنج انتخاب شد و در این تحقیق، در روش کریجینگ شاخص، مقدار شاخص برابر با ۶/۲ در نظر گرفته شد. بر این اساس، نقشه احتمال خطر کاهش عملکرد در pH بالا، به‌دست آمد که مقادیر صفر و یک به ترتیب نشان‌دهنده کمترین و بیشترین میزان خطر است.

تجزیه و تحلیل آماری

برای انتخاب بهترین نیم‌تغییرنما، از نمایه نسبت واریانس اثر

روش پهنه‌بندی

تجزیه و تحلیل داده‌های مورد نظر که شامل ۱۸ مجموعه داده بود در چهار مرحله انجام شد؛ ۱- نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون کلموگروف-اسمیرنوف در سطح معنی‌داری ۵ درصد با نرم‌افزار SPSS 26، بررسی گردید و در صورت نرمال نبودن، با در نظر گرفتن مقدار تابع انتقال Log در نرم‌افزار ArcGIS، داده‌ها به شرایط نرمال نزدیک شدند. ۲- بهترین نیم‌تغییرنماها با در نظر گرفتن بالاترین همبستگی از بین ۱۱ روش Spherical، Circular، Gaussian، Pentaspherical، Tetraspherical، Rational Quadratic، K-Bessel، J-Bessel، Hole Effect، Exponential با استفاده از ابزار Geostatistical wizard موجود در نرم‌افزار ArcGIS 10.7.1 برای هر مجموعه داده در روش‌های درون‌یابی کریجینگ معمولی و کریجینگ شاخص انتخاب شدند؛ ۳- با استفاده از درون‌یابی OK، نقشه‌های حاصل از پهنه‌بندی pH برای دوره‌های شش ماهه به‌دست آمد و براساس محدوده مناسب pH برای مرکبات و برنج، طبقه‌بندی انجام شد. ۴- بررسی نقاط خطرپذیر از نظر pH برای برنج با روش درون‌یابی IK انجام شد و مناطق حساس از نظر pH مشخص شد.

روش کریجینگ معمولی

با توجه به اینکه هدف اصلی از پهنه‌بندی pH، اثر آن بر عملکرد محصولات کشاورزی منطقه (برنج و مرکبات) است، در روش OK طبقه‌بندی براساس میزان حساسیت مرکبات و برنج به pH مناسب صورت گرفت. طی تحقیق انجام شده در زمینه‌ی مرکبات بهترین بازه pH برای دستیابی به عملکرد بالا بازه‌ی (۵/۸، ۸) بیان شده است،

$$RMSSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n ((Z^*(x_i) - Z(x_i)) / \sigma(x_i))^2}{n}} \quad (5)$$

که در آنها، $Z^*(x_i)$ مقدار پیش‌بینی شده، $Z(x_i)$ مقدار اندازه‌گیری شده، $\sigma(x_i)$ خطای استاندارد پیش‌بینی در مکان (x_i) و n تعداد مشاهدات است.

نتایج و بحث

با آزمون کلموگروف-اسمیرنوف موجود در نرم‌افزار SPSS 26 نرمال بودن داده‌ها در سطح معنی‌داری ۵ درصد بررسی شد، نتایج نشان‌دهنده‌ی توزیع غیرنرمال داده‌های مربوط به pH در هر یک از ۱۸ مجموعه داده‌ای مورد بررسی بود. برای هر ۱۸ داده در هر نیم‌سال، از تابع انتقال Log در ArcGIS 10.7.1 استفاده شد. برای درون‌یابی از روش‌های OK و IK در هر نیم‌سال استفاده شد، نیم‌تغییرنا به ۱۱ روش رسم شد و مقدار نمایه نسبت اثر قطعه‌ای به آستانه برآورد گردید. کمترین مقدار نمایه به عنوان بهترین روش انتخاب شد. **جدول‌های ۱ و ۲**، مدل‌های نیم‌تغییرنمای انتخابی، نسبت اثر قطعه‌ای به آستانه و شعاع تأثیر را در هر نیم‌سال به ترتیب برای روش‌های OK و IK ارائه می‌دهد، نتایج نمایه‌های آماری مربوط به اعتبارسنجی متقابل برای روش‌های OK و IK نیز به ترتیب در **جدول‌های ۳ و ۴** ارائه شده است.

با توجه به **جدول ۱** تمام مقادیر حد آستانه به اثر قطعه‌ای برآورد شده کمتر از ۷۵٪ و در بعضی موارد کمتر از ۲۵٪ بود که به ترتیب نشان‌دهنده همبستگی متوسط و قوی بین مقادیر داده‌های ورودی و مدل نیم‌تغییرنمای منتخب است.

قطعه‌ای به آستانه $(\frac{C_0}{C_0+C})$ استفاده شد که نشان‌دهنده میزان همبستگی نیم‌تغییرنا با داده‌های موجود است. به طوری که مقدار نمایه کمتر از ۲۵ درصد، نشان‌دهنده همبستگی بالا، مقادیر بین ۲۵ تا ۷۵ درصد نشان‌دهنده همبستگی متوسط و مقادیر بیشتر از ۷۵ درصد نشان‌دهنده همبستگی ضعیف آن است (Cambardella et al., 1994). بر این اساس بهترین نیم‌تغییرنا با در نظر گرفتن کمترین مقدار این نمایه برای هر نیم‌سال انتخاب شد. سپس، برای مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده از شاخص‌های آماری، در بخش predication performances در نرم‌افزار ArcGIS 10.7.1 از گزینه‌ی cross validation استفاده شد که شامل نمایه‌های میانگین خطای پیش‌بینی (ME)، ریشه‌ی دوم میانگین مربع خطا (RMSE)، میانگین خطای استاندارد (ASE)، میانگین خطای استاندارد شده (MSE) و ریشه‌ی دوم میانگین خطای استاندارد شده (RMSSE) است. برای داشتن یک پیش‌بینی دقیق و معتبر، لازم است مقدار MSE نزدیک به صفر، ME، RMSE، ASE حداقل ممکن و RMSSE نزدیک به یک باشد (Johnstone et al., 2001). معادلات هر یک از شاخص‌های آماری ME، RMSE، ASE، MSE و RMSSE به ترتیب در رابطه‌های ۱ تا ۵ ارائه شده است.

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

$$ASE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sigma(x_i)}{n}} \quad (2)$$

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n ((Z^*(x_i) - Z(x_i)) / \sigma(x_i))^2}{n} \quad (3)$$

$$RMSSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z^*(x_i) - Z(x_i))^2}{n}} \quad (4)$$

جدول ۱- پارامترهای مدل نیم‌تغییرنا در کریجینگ معمولی، برای مدل‌های منتخب برای نیم‌سال‌های اول و دوم

Table 1- Semivariogram model parameters in the ordinary kriging method for the first and second half-years

سال Year	نیم‌سال اول First half-year			نیم‌سال دوم Second half-year		
	مدل نیم‌تغییرنا Model	حد آستانه به اثر قطعه‌ای (%) Nugget-to-sill ratio (%)	شعاع تاثیر (km) Rang (km)	مدل نیم‌تغییرنا model	حد آستانه به اثر قطعه‌ای (%) Nugget-to-sill ratio (%)	شعاع تاثیر (km) Rang (km)
1391 (2012)	Exponential	10.7	20.5	Stable	0.0	48.8
1392 (2013)	Circular	72.7	13.6	Exponential	0.0	5.2
1393 (2014)	Stable	8.9	1.8	Stable	67.1	1.9
1394 (2015)	Stable	0.0	4.7	Exponential	0.0	35.2
1395 (2016)	Stable	20.7	18.3	Stable	20.7	1.2
1396 (2017)	K-Bessel	0.0	14.5	Exponential	2.0	7.8
1397 (2018)	Stable	0.0	0.7	Stable	0.0	6.7
1398 (2019)	Gaussian	9.1	0.8	K-Bessel	19.8	9.1
1399 (2020)	Exponential	13.4	45.7	Exponential	69.8	3.2

جدول ۲- پارامترهای مدل نیم تغییرنما در کریجینگ شاخص، برای مدل‌های منتخب برای نیم‌سال‌های اول و دوم

Table 2- Semivariogram model parameters in the indicator kriging method for the first and second half-years

سال Year	نیم‌سال اول First half-year			نیم‌سال دوم Second half-year		
	مدل نیم‌تغییرنما Model	حد آستانه به اثر قطعه‌ای (%) Nugget-to-sill ratio (%)	شعاع تاثیر (km) Rang (km)	مدل نیم‌تغییرنما model	حد آستانه به اثر قطعه‌ای (%) Nugget-to-sill ratio (%)	شعاع تاثیر (km) Rang (km)
1391 (2012)	Exponential	0.0	1.5	Stable	0.0	2.1
1392 (2013)	Circular	0.0	8.1	Stable	0.0	0.7
1393 (2014)	Exponential	59.5	20.8	Exponential	0.0	7.5
1394 (2015)	Exponential	0.0	5.4	Exponential	68.3	18.8
1395 (2016)	Pentaspheical	0.0	8.3	Circular	0.0	3.9
1396 (2017)	Stable	0.0	17.3	Exponential	0.0	3.4
1397 (2018)	Exponential	0.0	8.9	Exponential	0.0	2.4
1398 (2019)	Stable	0.0	1.4	Stable	0.0	1.4
1399 (2020)	Exponential	72.7	21.6	Stable	0.0	1.2

جدول ۳- نمایه‌های آماری حاصل از اعتبارسنجی متقابل در روش کریجینگ معمولی برای نیم‌سال‌های مورد بررسی

Table 3- The indices of cross-validation in the ordinary kriging method for the first and second half-year

سال Year	نیم‌سال اول First half-year					نیم‌سال دوم Second half-year				
	ME	RMSE	MSE	RMSSE	ASE	ME	RMSE	MSE	RMSSE	ASE
1391 (2012)	0.002	0.373	0.006	1.129	0.330	0.008	0.435	0.017	0.931	0.465
1392 (2013)	0.004	0.366	0.010	1.052	0.349	0.007	0.387	0.012	0.635	0.618
1393 (2014)	0.004	0.364	0.012	1.038	0.350	0.007	0.438	0.014	0.930	0.474
1394 (2015)	0.003	0.360	0.984	0.984	0.366	0.000	0.462	0.009	0.528	0.880
1395 (2016)	-0.002	0.359	-0.006	0.971	0.369	0.003	0.389	0.005	1.102	0.349
1396 (2017)	0.001	0.399	0.003	1.029	0.389	-0.006	0.497	-0.008	0.781	0.656
1397 (2018)	0.002	0.478	0.005	0.875	0.547	-0.004	0.379	-0.005	0.727	0.523
1398 (2019)	-0.003	0.417	-0.004	0.685	0.616	-0.012	0.458	-0.015	0.704	0.674
1399 (2020)	-0.010	0.409	-0.015	0.711	0.588	-0.002	0.431	-0.003	1.079	0.395

جدول ۴- نمایه‌های آماری حاصل از اعتبارسنجی متقابل در روش کریجینگ شاخص برای نیم‌سال‌های مورد بررسی

Table 4- The indices of cross-validation in the indicator kriging method for the first and second half-year

سال Year	نیم‌سال اول First half-year					نیم‌سال دوم Second half-year				
	ME	RMSE	MSE	RMSSE	ASE	ME	RMSE	MSE	RMSSE	ASE
1391 (2012)	0.976	0.983	0.731	1.079	0.153	0.983	0.989	1.370	1.476	0.081
1392 (2013)	0.983	0.989	1.370	1.476	0.081	0.771	0.850	0.170	0.188	0.454
1393 (2014)	0.938	0.955	0.525	0.535	0.179	0.939	0.996	2.332	2.470	0.045
1394 (2015)	0.987	0.991	1.155	1.517	0.102	0.941	0.957	0.528	0.537	0.178
1395 (2016)	0.987	0.991	1.801	3.489	0.069	0.993	0.996	1.810	3.359	0.086
1396 (2017)	0.976	0.983	1.058	1.206	0.103	0.983	0.989	1.137	1.741	0.111
1397 (2018)	0.994	0.996	2.175	2.910	0.061	0.994	0.996	1.298	1.829	0.093
1398 (2019)	0.881	0.921	0.257	0.269	0.342	0.745	0.833	0.169	0.189	0.444
1399 (2020)	0.363	0.657	0.082	0.148	0.445	0.238	0.686	0.048	0.137	0.501

اعتبارسنجی متقابل در جدول ۳ و ۴ به ترتیب برای روش‌های IK و OK ارائه شده است که نشان‌دهنده‌ی صحت و دقت مقادیر پیش‌بینی شده است. مساحت تحت هر عملکرد مرکبات متأثر از pH با نرم‌افزار ArcGIS 10.7.1 برآورد شد و درصد هر یک کلاس طبقه‌بندی شده نسبت به کل مساحت پهنه‌بندی شده محاسبه شد و نتایج مربوط به روش‌های IK و OK به ترتیب در جداول ۵ و ۶ ارائه شده است. نتایج جدول ۵ نشان می‌دهد بیشترین مساحت منطقه تحت کلاس pH برابر ۶/۲-۸ هستند.

با توجه به نتایج جدول ۱، در تحقیق حاضر، دو مدل نیم‌تغییرنمای برازش شده Exponential، Stable، بیشترین فراوانی را در هر دو روش OK و IK در نیم‌سال‌های مورد بررسی داشته است و با دارا بودن کمترین مقادیر حد آستانه به اثر قطعه‌ای، بالاترین همبستگی در آنها مشاهده شد. در تحقیق انجام شده توسط شیت و همکاران نیز برای پهنه‌بندی pH آب‌های زیرزمینی، مدل نیم‌تغییرنمای Exponential به‌عنوان بهترین مدل‌های برازش شده با روش OK در غرب بنگال، هند معرفی شد (Shit et al., 2016). نتایج مربوط به

جدول ۵- مساحت تحت هر کلاس طبقه‌بندی در نیم‌سال‌های اول و دوم به صورت درصدی از کل مساحت نوار ساحلی در روش کریجینگ معمولی
Table 5- The amounts of each classified area calculated as the percentage of the total area using the ordinary kriging method for the first and second half-year

سال Year	نیم‌سال اول First half-year				نیم‌سال دوم Second half-year			
	<5.8	5.8-6.8	6.8-8.0	>8.0	<5.8	5.8-6.8	6.8-8.0	>8.0
1391 (2012)	0.0	0.0	81.6	18.4	0.0	0.0	78.8	21.2
1392 (2013)	0.0	3.7	85.5	10.8	0.0	0.0	84.5	15.5
1393 (2014)	0.0	0.8	82.8	16.4	0.0	0.0	83.4	16.6
1394 (2015)	0.0	0.0	85.0	15.0	0.0	0.0	84.6	15.4
1395 (2016)	0.0	0.0	85.1	14.9	0.0	0.0	85.1	14.9
1396 (2017)	0.0	4.2	80.1	15.6	0.0	0.0	83.9	16.1
1397 (2018)	0.0	1.1	83.6	15.3	0.0	0.0	84.6	15.4
1398 (2019)	0.0	0.0	84.6	15.4	0.0	0.1	83.0	17.0
1399 (2020)	0.0	0.0	83.3	16.7	0.0	1.2	83.5	15.3

جدول ۶- مساحت تحت هر محدوده‌ی احتمال خطر در نیم‌سال‌های مورد بررسی به صورت درصدی از کل مساحت نوار ساحلی در روش کریجینگ شاخص

Table 6- The amounts of each classified area based on the risk probability calculated as the percentage of the total area using the indicator kriging method for the first and second half-year

سال Year	نیم‌سال اول First half-year				نیم‌سال دوم Second half-year			
	0-20%	20-40%	40-60%	60-100%	0-20%	20-40%	40-60%	60-100%
1391 (2012)	87.2	12.8	0.0	0.0	85.4	12.5	2.1	0.0
1392 (2013)	100.0	0.0	0.0	0.0	80.8	16.7	2.5	0.0
1393 (2014)	82.5	17.5	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0
1394 (2015)	100.0	0.0	0.0	0.0	83.3	16.7	0.0	0.0
1395 (2016)	100.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0
1396 (2017)	100.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0
1397 (2018)	100.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0
1398 (2019)	100.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0
1399 (2020)	89.7	10.3	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0

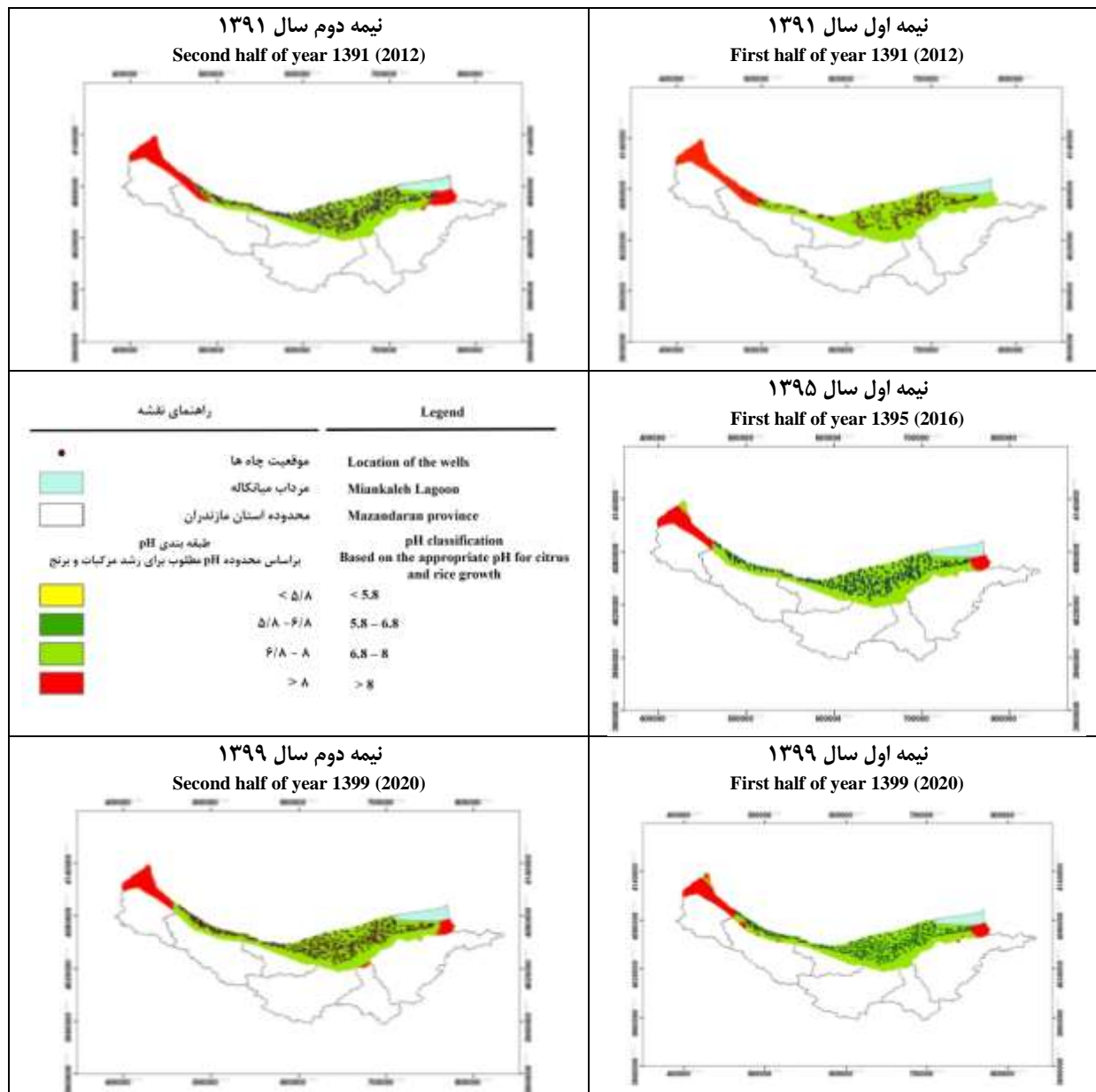
شاخص در شکل‌های ۲ و ۳ ارائه شده است. همان‌طور که در نقشه‌های پهنه‌بندی در شکل ۲ مشاهده می‌شود، pH آب‌های زیرزمینی استان مازندران در قسمت مرکزی استان در محدوده‌ی ۸-۶/۸ قرار دارد که وضعیت مطلوب pH برای رشد گیاهان منطقه است. همچنین نقشه‌های پهنه‌بندی نشان می‌دهند که در قسمت نوار غربی استان و قسمت بسیار کوچکی در انتهای شرقی استان، در زیر تالاب میانکاله در محدوده‌ی بیشتر از ۸ است که نشان دهنده‌ی وضعیت قلیایی آب‌های زیرزمینی در این نواحی است. نکته حائز اهمیت که در نقشه‌های پهنه‌بندی شده نشان می‌دهد این است که در هیچ منطقه‌ای pH آب زیرزمینی اسیدی نیست و تنها در کناره‌های غربی و شرقی استان شرایط قلیایی مشاهده شده است. از آنجایی که افزایش pH آب آبیاری برای مرکبات و گیاه برنج می‌تواند مشکل‌ساز باشد (Ghimire *et al.*, 2020; van Asten *et al.*, 2005)، پیشنهاد می‌گردد در این مناطق برای رشد بهتر گیاه برنج و عدم آسیب‌پذیری محصول به دلیل کمبود نیتروژن و فسفر، کودهای حاوی عناصر مذکور به مزارع افزوده شود. شایان ذکر است که تعیین میزان کود مورد نیاز، مستلزم تحقیقات جزئی و مزرعه‌ای می‌باشد.

نتایج جدول ۶ نشان می‌دهد که در اکثر مناطق استان مازندران احتمال خطر آسیب‌پذیری براساس pH آب‌های زیرزمینی جهت آبیاری باغ‌های مرکبات و مزارع برنج منطقه در محدوده‌ی ۲۰-۰ درصد قرار دارد و در بخشی‌های بسیار کمی احتمال خطر به ۴۰-۲۰ درصد می‌رسد، که در قسمت‌های شرقی استان مشهودتر است. با توجه به نقشه‌های بدست آمده می‌توان نتیجه گرفت که بیشترین سطح استان در محدوده‌ی امن قرار دارد که نشان دهنده‌ی وضعیت مطلوب pH آب‌های زیرزمینی استان برای آبیاری باغ‌های مرکبات و مزارع برنج است. اگرچه در نیمه‌ی دوم سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۲ احتمال خطر در محدوده‌ی ۶۰-۴۰ درصد در بعضی از مناطق مرکزی استان به‌صورت پراکنده مشاهده شده است، اما نقشه‌های بدست آمده در سال‌های بعد از آن نشان داد که روند خطر کاهش یافته و در نهایت مساحت تحت این محدوده در آن سال‌ها صفر درصد برآورد شده است. با توجه به اینکه کریجینگ شاخص روشی است برای نشان دادن مناطق با احتمال خطر بیشتر است، در تحقیقات مختلف در زمینه‌ی بررسی کیفی آب‌های زیرزمینی با تعریف حد آستانه پارامترهای مورد بررسی از آن استفاده شده است که می‌توان به تحقیق انجام شده در زمینه بررسی وضعیت نیترات، EC، SAR شاخص کیفی آب (WQI) و عناصر مختلف در آب‌های زیرزمینی اشاره نمود (Chatterjee *et al.*, 2010; Sheikhy Narany *et al.*, 2013; Pouryazdankhah *et al.*, 2019).

بعد از آن بیشترین فراوانی در بازه pH بیشتر از ۸ قرار دارند که این امر نشان دهنده‌ی این است که در باقی موارد آب‌های زیرزمینی قلیایی هستند و تقریباً هیچ سطحی از منطقه دارای آب‌های زیرزمینی با خاصیت اسیدی نیست. در کل، به‌طور میانگین مساحت تحت کلاس‌های طبقه‌بندی ۵/۸، ۶/۲-۵/۸، ۲-۶/۸ و < ۸ به ترتیب برابر با صفر، ۰/۶، ۸۳/۵ و ۱۵/۹ درصد بدست آمد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که بین سال‌های مورد بررسی و نیم‌سال‌های مورد بررسی روند و تفاوت مشهودی مشاهده نشده است.

نتایج جدول ۶ مساحت تحت احتمال‌های خطر با تعریف مقدار pH شاخص برابر با ۶/۲ را، در دو ستون مجزا برای نیم‌سال‌های اول و دوم نشان می‌دهد. مقادیر جدول ۶ نشان دهنده‌ی این است که تقریباً تمام سطح استان در محدوده‌ی امن از نظر pH است، به‌طوری‌که در بیشتر نیم‌سال‌های مورد بررسی ۱۰۰ درصد از مساحت استان مازندران در محدوده‌ی ۲۰-۰٪ احتمال خطر وجود دارد. این امر نشان دهنده‌ی این است که اگرچه حدود ۱۶ درصد از سطح استان مازندران تحت آب‌های زیرزمینی با pH قلیایی است اما از نظر احتمال خطر در محدوده‌ی امن ۲۰-۰ درصد است. در کل، نتایج جداول ۵ و ۶ نشان دهنده‌ی این است که pH آب‌های زیرزمینی در استان مازندران برای رشد محصولات باغ‌های مرکبات و مزارع برنج در وضعیت بسیار مطلوب قرار دارد. طی تحقیق انجام شده در نیشابور، با نمونه‌برداری از ۴۰۲ حلقه چاه طی سال‌های ۲۰۱۰-۲۰۱۳، وضعیت کیفی آب‌های زیرزمینی از نظر شرب بررسی شد، pH آب زیرزمینی یکی از پارامترهای مورد بررسی بود که با نرم‌افزار ArcGIS پهنه‌بندی صورت گرفت و نتایج نشان داد که حدود ۷۵ درصد آب‌های زیرزمینی منطقه دارای pH مناسب برای شرب هستند (Bhunja *et al.*, 2018). براساس نتایج تحقیق حاضر نیز ۸۳/۵ درصد از مساحت استان مازندران دارای pH مناسب و در محدوده‌ی نزدیک به خنثی، (۸، ۶/۲) هستند. در تحقیق انجام شده در سریلانکا نیز، بررسی آب‌های زیرزمینی را به‌عنوان منبع آب آبیاری در منطقه را با اهمیت دانستند و با ارزیابی پارامترهای کیفی ۲۹ حلقه چاه، از جمله EC، pH و SAR اعلام نمودند که به ترتیب ۴ و ۹۶ درصد از محدوده مورد مطالعه دارای آب مناسب و نسبتاً مناسب برای کشاورزی هستند (Kumari *et al.*, 2019).

برای نمونه، نقشه‌های مربوط به هر دو نیم‌سال، در سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۹ به‌عنوان شرایط ابتدایی و انتهای دوره‌ی بررسی شده و نیم‌سال اول سال ۱۳۹۵ به‌عنوان شرایط میانی دوره‌ی مورد بررسی در تحقیق حاضر، به ترتیب برای روش کریجینگ معمولی و کریجینگ

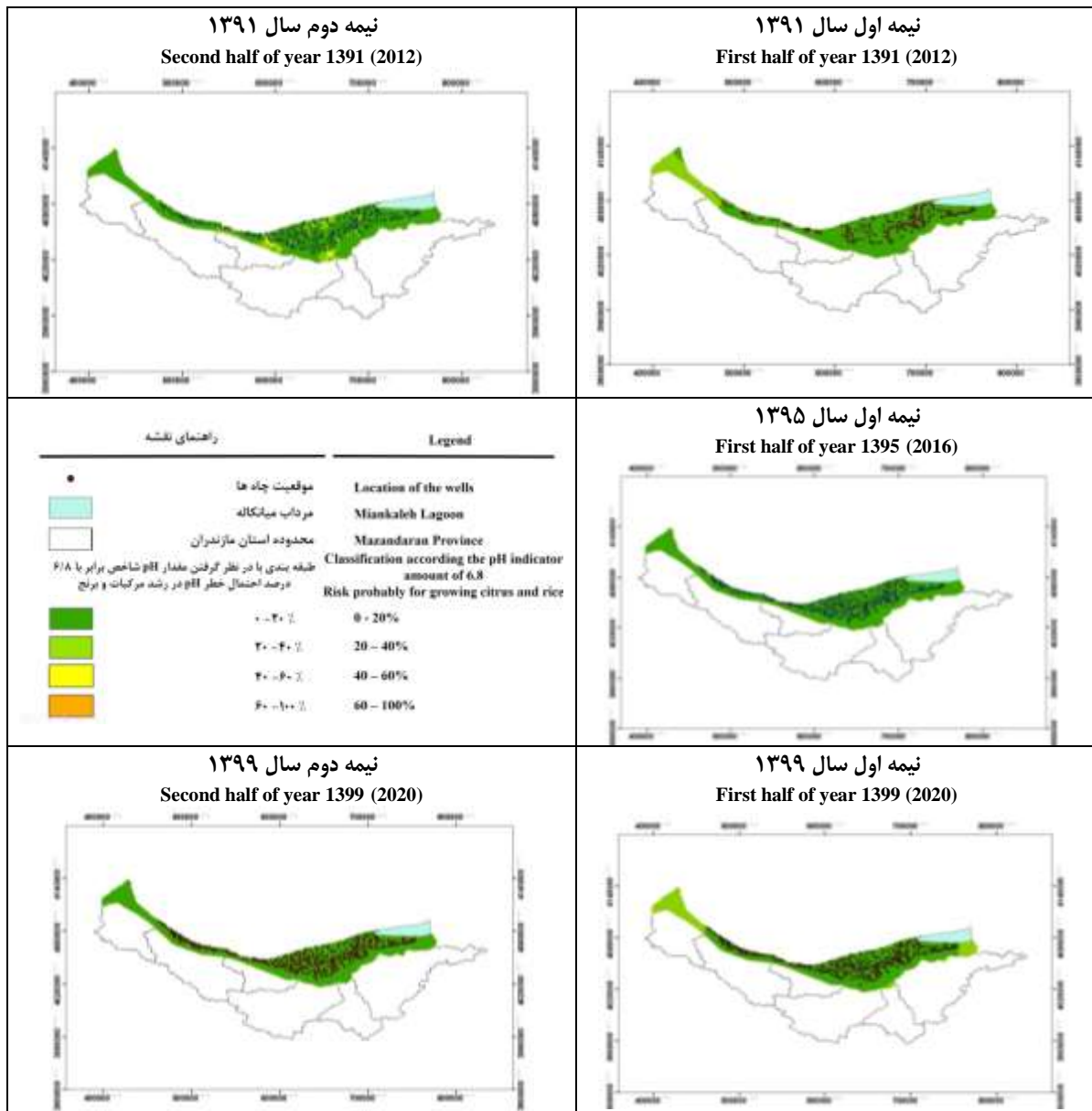


شکل ۲- نمونه‌ای از نقشه‌های پهنه‌بندی pH در نوار ساحلی استان مازندران با استفاده از روش میان‌یابی کریجینگ معمولی در نرم‌افزار ArcGIS 10.7.1

Figure 2- Samples of the spatial maps depicting groundwater pH by the ordinary kriging method in ArcGIS 10.7.1

اطلاعات جمع‌آوری شده از ۲۷ حلقه چاه مشاهده‌ای از جمله pH، EC، SAR و شاخص اشباع لانزیلر (LSI)، طی سال ۱۳۹۵، جهت استفاده در کشاورزی و آبیاری با استفاده از روش کریجینگ شاخص مورد بررسی قرار گرفت، در این تحقیق روش کریجینگ شاخص را به‌عنوان روشی مناسب برای تهیه نقشه‌های احتمالی آلودگی، با در نظر گرفتن آستانه مجاز آلودگی دانستند و نتایج تحقیق نشان داد که اراضی مناسب آبیاری تحت فشار در قسمت‌های شرقی و مرکزی دشت می‌باشد (Hamraz et al., 2019).

طی تحقیق انجام شده در منطقه‌ای در ایالت آندرا پرادش در هند، با استفاده از روش کریجینگ شاخص، پارامترهای کیفی آب‌های زیرزمینی ۱۱۶ حلقه چاه از جمله، کلرید، منیزیم، فلوراید، pH و TDS برای مصارف شرب بررسی شدن، در تحقیق انجام شده نیز همان تحقیق حاضر، نیم‌تغییرنمای Exponential به‌عنوان بهترین نیم‌تغییرنمای معرفی شد و در کل، نتیجه گرفته شد که روش‌های زمین‌آمار و GIS دارای قابلیت بالایی در زمینه‌ی تفسیر مسائل مربوط به منابع آب زیرزمینی است (Chandra and Sahoo, 2020). طی تحقیق انجام شده در بیرجند نیز، به‌منظور بررسی آبخوان بیرجند،



شکل ۳- نمونه‌ای از نقشه‌های پهنه‌بندی pH در نوار ساحلی استان مازندران با استفاده از روش میان‌یابی کریجینگ شاخص در نرم‌افزار ArcGIS 10.7.1

Figure 3- Samples of the spatial maps depicting groundwater pH by the indicator kriging method in ArcGIS 10.7.1

نتیجه‌گیری

این مطالعه با هدف بررسی وضعیت pH آب‌های زیرزمینی استان مازندران و طبقه‌بندی آن بر اساس حساسیت مرکبات و برنج، که کشت غالب در این استان است، انجام شد. بدین منظور از دو روش کریجینگ معمولی به منظور پهنه‌بندی وضعیت pH آب‌های زیرزمینی و از روش کریجینگ شاخص، به منظور بررسی احتمال خطر pH برای رشد مرکبات و برنج در منطقه، استفاده شد. یافته‌های حاصل از این

در تحقیق حاضر نیز در قسمت‌های مرکزی استان احتمال خطر بسیار کم است، پیشنهاد می‌گردد در قسمت‌های غربی استان مناطق به صورت جزئی تر و در مقیاس مزرعه‌ای مورد بررسی قرار گیرد. همچنین با توجه به اینکه بسیار از باغ‌های مرکبات با روش آبیاری تحت فشار آبیاری می‌شوند، پارامترهای دیگر از جمله LSI آب‌های زیرزمینی استان با روش کریجینگ شاخص بررسی گردد.

شرقی استان شرایط قلیایی مشاهده شده است. با توجه به احتمال آسیب‌پذیری مرکبات و گیاه برنج در pHهای بالا در آب آبیاری، پیشنهاد می‌گردد در مناطق کناره‌های غربی و شرقی استان برای رشد بهتر گیاه برنج و عدم آسیب‌پذیری محصول به دلیل کمبود نیتروژن و فسفر، کودهای حاوی عناصر مذکور به مزارع افزوده شود که تعیین میزان کود مورد نیاز، مستلزم تحقیقات به‌صورت مزرعه‌ای است. همچنین با توجه به اینکه بسیار از باغ‌های مرکبات با روش آبیاری تحت فشار آبیاری می‌شوند، پیشنهاد می‌شود که پارامترهای دیگر به‌ویژه LSI آب‌های زیرزمینی استان با روش کریجینگ شاخص بررسی گردد.

سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت مالی شرکت آب منطقه‌ای مازندران براساس قرارداد فی‌مابین آن شرکت و دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری به شماره: ۲۶/۹۸/۳۸۴۷/۱۱۳ مورخ ۱۳۹۸/۰۵/۱۰ و قرارداد داخلی به شماره: ۹۹/۲۰۴۲ و مورخ ۱۳۹۹/۰۲/۲۳ با عنوان: "بررسی و ارزیابی مسایل مدیریت آب و آرایه راهکارهای ارتقاء و بهبود آن در استان مازندران" انجام شده است که به این وسیله سپاسگزاری می‌شود.

پژوهش نشان داد که pH آب‌های زیرزمینی در قسمت مرکزی استان در حد مطلوب برای رشد گیاهان و در محدوده‌ی ۸-۶/۲ قرار دارد. در قسمت‌های غربی و شرقی استان pH آب زیرزمینی در محدوده قلیایی و بیشتر از ۸ قرار داشتند که در صورت تداوم و افزایش مقدار pH می‌تواند برای باغ‌های مرکبات و مزارع برنج در این نواحی خطرپذیر باشد، از این‌رو احتمال آسیب‌پذیری مرکبات و گیاه برنج با در نظر گرفتن pH برابر با ۶/۲ به‌عنوان مقدار شاخص با روش کریجینگ شاخص بررسی شد. نقشه‌های بدست آمده نشان دادند که در بیشتر نیم‌سال‌های مورد بررسی احتمال خطر در محدوده‌ی ۲۰-۰ درصد قرار داشتند. مساحت تحت هر محدوده در هر دو روش برای هر ۱۸ نیم‌سال بدست آمد. در روش کریجینگ معمولی، میانگین درصد مساحت تحت کلاس‌های طبقه‌بندی ۵/۸ <، ۵/۸-۶/۲، ۶/۲-۷/۸ و < ۸ به‌ترتیب برابر با صفر، ۰/۶، ۸۳/۵ و ۱۵/۹ درصد و در روش کریجینگ شاخص، میانگین درصد مساحت تحت کلاس‌های طبقه‌بندی با احتمال خطر آسیب‌پذیری ۲۰-۰، ۴۰-۲۰، ۶۰-۴۰ و ۱۰۰-۶۰ درصد به‌ترتیب برابر با ۹۴/۹، ۴/۸، ۰/۳ و صفر درصد برآورد شد. در هر دو روش OK و IK دو مدل نیم‌تغییرنمای برازش شده Stable و Exponential بیشترین فراوانی را در نیم‌سال‌های مورد بررسی داشتند. نقشه‌های حاصل از روش OK نشان داد که در هیچ منطقه‌ای pH آب زیرزمینی اسیدی نیست و تنها در کناره‌های غربی و

منابع

- Amiri-Bourkhani, M., Khaledian, M.R., Ashrafzadeh, A., & Shahnazari, A. (2017). The temporal and spatial variations in groundwater salinity in Mazandaran Plain, Iran, during a long-term period of 26 years. *Geofizika* 34(1): 119-139. <https://doi.org/10.15233/gfz.2017.34.4>.
- Asghari, F.B., Mohammadi, A.A., Dehghani, M.H., & Yousefi, M. (2018). Data on assessment of groundwater quality with application of ArcGIS in Zanjan, Iran. *Data in Brief* 18: 375. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2018.03.059>.
- Belkhir, L., Mouni, L., Sheikhy Narany, T., & Tiri, A. (2017). Evaluation of potential health risk of heavy metals in groundwater using the integration of indicator kriging and multivariate statistical methods. *Groundwater for Sustainable Development* 4: 12-22. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2016.10.003>.
- Bhunia, G.S., Keshavarzi, A., Shit, P.K., Omran, E.S.E., & Bagherzadeh, A. (2018). Evaluation of groundwater quality and its suitability for drinking and irrigation using GIS and geostatistics techniques in semiarid region of Neyshabur, Iran. *Applied Water Science* 8(6): 1-16. <https://doi.org/10.1007/s13201-018-0795-6>.
- Cambardella, C.A., Moorman, T.B., Parkin, T.B., Karlen, D.L., Novak, J.M., Turco, R.F., & Konopka, A.E. (1994). Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils. *Soil Science Society of America Journal* 58(5): 1501. <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x>.
- Chandra, N.A., & Sahoo, S.N. (2020). Indicator kriging approach using a GIS to classify groundwater quality parameters of east Godavari District. Andhra Pradesh, India. In III Indian National Groundwater Conference on Groundwater Resources Management for Sustainable Development: Special Emphasis on Coastal and Urban Environment, CWRDM, Kozhikode, 18-20 February 2020. (<http://hdl.handle.net/2080/3512>).
- Chatterjee, R., Tarafder, G., & Paul, S. (2010). Groundwater quality assessment of Dhanbad district, Jharkhand, India. *Bulletin of Engineering geology and the Environment* 69(1): 137-141. <https://doi.org/10.1007/s10064-009-0234-x>.
- Chica-Olmo, M., Luque-Espinar, J.A., Rodriguez-Galiano, V., Pardo-Igúzquiza, E., & Chica-Rivas, L. (2014). Categorical indicator kriging for assessing the risk of groundwater nitrate pollution: the case of Vega de Granada aquifer (SE Spain). *Science of the Total Environment* 470-471: 229-239. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.09.077>.
- Delbari, M., Amiri, M., & Motlagh, M.B. (2016). Assessing groundwater quality for irrigation using indicator

- kriging method. *Applied Water Science* 6(4): 371–381. <https://doi.org/10.1007/s13201-014-0230-6>.
10. Emery, X. (2006). Ordinary multigaussian kriging for mapping conditional probabilities of soil properties. *Geoderma* 132(1–2): 75–88. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2005.04.019>.
 11. FAO. (2018). *Food and Agriculture Organization rice market monitor (RMM)*. Available at <http://www.fao.org/economic/est/publications/ricepublications/rice-market-monitor-rmm/en/> (visited 27 April 2022).
 12. Ghadami Firouzabadi, A. (2015). *The water use management and soil changes by full irrigation and partial rootzone drying (PRD) in sunflower*. Ph.D. Thesis, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran: 174p. (In Persian with English abstract).
 13. Ghimire, L., Kadyampakeni, D., & Vashisth, T. (2020). Effect of Irrigation Water pH on the Performance of Healthy and Huanglongbing-affected Citrus. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 145(5): 318-327. <https://doi.org/10.21273/JASHS04925-20>.
 14. Goovaerts, P., Webster R., & Dubois, J.P. (1997). Assessing the risk of soil contamination in the Swiss Jura using indicator geostatistics. *Environmental and Ecological Statistics* 4(1): 49–64. <https://doi.org/10.1023/A:1018505924603>.
 15. Grace, M.S. (2020). A Geospatial Analysis of Ground Water Quality Mapping using GIS in Sangareddy District. *International Journal of Engineering Research and Technology (IJERT)* 9: 1150-1153. <https://doi.org/10.17577/IJERTV9IS070508>.
 16. Gunarathna, M.H.J.P., Kumari, M.K.N., & Nirmanee, K.G.S. (2016). Evaluation of interpolation methods for mapping pH of groundwater. *International Journal of Latest Technology in Engineering, Management and Applied Science* 3: 1-5.
 17. Hamraz, B., Shahidi, A., & Khashei Saiyuki, A. (2019). Qualitative assessment of Birjand plain aquifer for pressurized irrigation by using geostatistic Indicator Kriging method. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage* 13(1): 34-44. (In Persian with English abstract)
 18. Honma, T., Ohba, H., Kaneko-Kadokura, A., Makino, T., Nakamura, K., & Katou, H. (2016). Optimal soil Eh, pH, and water management for simultaneously minimizing arsenic and cadmium concentrations in rice grains. *Environmental Science and Technology* 50(8): 4178-4185. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b05424>.
 19. Hosseini, S.S., & Rafiei, H. (2008). Investigation of citrus market behavior in Mazandaran province, case study of Sari. *Agricultural Economics* 2(4): 73-92. (In Persian with English abstract)
 20. IRNA. (2021). *10 million cubic meters are extracted annually from illegal wells in Mazandaran*. The Islamic Republic News Agency, News Cod: 84206632, Reporter Code: 1045, date: 2021.02.01. available at <https://www.irna.ir/news/84206632> (visited 14 May 2022). (In Persian)
 21. Johnston, K., Ver Hoef, J.M., Krivoruchko, K., & Lucas, N. (2001). *Using ArcGIS geostatistical analyst 380*. Esri Redlands: 273p.
 22. Karandish, F., & Shahnazari, A. (2014). Appraisal of the geostatistical methods to estimate Mazandaran coastal ground water quality. *Caspian Journal of Environmental Sciences* 12(1): 129-146.
 23. Kharad, S.M., Rao, K.S., & Rao, G.S. (2010). *GIS based groundwater assessment model*, GIS@development, Nov–Dec 1999. <https://doi.org/10.5897/AJEST11.134>.
 24. Kumari, M.K.N., Sakai, K., Kimura, S., Yuge, K., & Gunarathna, M.H.J.P. (2019). Classification of groundwater suitability for irrigation in the Ulagalla tank Cascade landscape by GIS and the analytic hierarchy process. *Agronomy* 9(7): 351. <https://doi.org/10.3390/agronomy9070351>.
 25. Lee, J.J., Jang, C.S., Wang, S.W., & Liu, C.W. (2007). Evaluation of potential health risk of arsenic-affected groundwater using indicator kriging and dose response model. *Science of the Total Environment* 384(1–3): 151–162. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.06.021>.
 26. Omrani, S.J., Almasian, M., Poshtekohi, M., & Asa'di, R. (2003). *Geological Atlas (National Atlas of Iran)*. National Cartographic Center (Plan and Budget Organization): 110p. (In Persian)
 27. Mishra, U., Lal, R., Slater, B., Calhoun, F., Liu, D., & Van Meirvenne, M. (2009). Predicting soil organic carbon stock using profile depth distribution functions and ordinary kriging. *Soil Science Society of America Journal* 73(2): 614–621. <http://doi.org/10.2136/sssaj2007.0410>.
 28. Mohammadi, E., Rostami Ravary, A., & Fararouie, A. (2021). Salinity assessment and ground water quality mapping using principal component analysis, Case study: Khafr plain. *Water Resources Engineering*. (In Persian with English abstract)
 29. 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. <https://doi.org/10.22059/ijer.2012.556>.
 30. Pouryazdankhah, H., Shahnazari, A., Ahmadi, M.Z., Khaledian, M., & Andersen, M.N. (2019). Rice yield estimation based on forecasting the future condition of groundwater salinity in the Caspian coastal strip of Guilan Province, Iran. *Environmental Monitoring and Assessment* 191(8): 1-16. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7613-y>.

31. Shabani, M. (2009). Determination of most suitable geostatistical method for the pH and TDS mapping of groundwater resources (Case study: The Arsanjan plain). *Water Engineering 1*(1): 47-57 (In Persian with English abstract)
32. Sheikhy Narany, T., Firuz Ramli, M., Zaharin Aris, A., Azmin Sulaiman, W.N., & Fakharian, K. (2013). Spatial assessment of groundwater quality monitoring wells using indicator kriging and risk mapping, Amol-Babol Plain, Iran. *Water 6*(1): 68-85. <https://doi.org/10.3390/w6010068>.
33. Shit, P.K., Bhunia, G.S., & Maiti, R. (2016). Spatial analysis of soil properties using GIS based geostatistics models. *Modeling Earth Systems and Environment 2*(2): 1-6. <http://dx.doi.org/10.1007/s40808-016-0160-4>.
34. Statistical Center of Iran. (2011). *Selected findings of the 2011 national population and housing census*. Available at www.amar.org.ir/de/.
35. Todd, D.K., & Mays, L.W. (2004). *Groundwater hydrology*. John Wiley & Sons.
36. van Asten, P.J., Van Bodegom, P.M., Mulder, L.M., & Kropff, M.J. (2005). Effect of straw application on rice yields and nutrient availability on an alkaline and a pH-neutral soil in a Sahelian irrigation scheme. *Nutrient Cycling in Agroecosystems 72*(3): 255-266. <http://doi.org/10.1007/s10705-005-3108-z>.
37. Yasrebi, J., Saffari, M., Fathi, H., Karimian, N., Moazallahi, M., & Gazni, R. (2009). Evaluation and comparison of ordinary kriging and inverse distance weighting methods for prediction of spatial variability of some soil chemical parameters. *Research Journal of Biological Sciences 4*(1): 93-102. <https://medwelljournals.com/abstract/?doi=rjbsci.2009.93.102>.
38. Yousefian, M., Soltani, A., Dastan, S., & Ajamnoroozi, H. (2019). Documenting production process and the ranking factors causing yield gap in rice fields in Sari, Iran. *Iran Agricultural Research 38*(1): 101-109. <https://doi.org/10.22099/iar.2019.5316>.
39. Ziogas, V., Tanou, G., Morianou, G., & Kourgialas, N. (2021). Drought and salinity in citriculture: optimal practices to alleviate salinity and water stress. *Agronomy 11*(7): 1283. <https://doi.org/10.3390/agronomy11071283>.