



Temporal and spatial modeling of underground water level using Kriging models and Artificial Neural Networks (case study: Minab Plain)

Mohammad Ibrahim Afifi, Vahid Sohrabi*

Department of Geography, Faculty of Humanities, Islamic Azad University, Larestan Branch, Fars, Iran.

* Corresponding author: sohrabiv@gmail.com

© The Author(s) 2024

Received: 03 Apr 2024

Accepted: 22 Jun 2024

Published: 14 Jul 2024

Extended Abstract

Introduction

Groundwater resources constitute a significant portion of the world's water supply, and their management is crucial, especially in arid and semi-arid regions. Rapid population growth, agricultural expansion, and insufficient surface water availability have led to increased groundwater extraction, resulting in declining water tables and depletion of aquifers. In these dry regions, where rainfall is scarce, groundwater is vital for sustaining life. Therefore, effective management of groundwater resources is essential. This study aims to model the spatial and temporal dynamics of groundwater levels in the Minab plain. To assess the impact of excessive groundwater extraction, data from observation wells and hydrogeological information over a 17-year period (1997-2014) were analyzed. The study utilized both kriging geostatistical methods and Radial Basis Function (RBF) neural network interpolation techniques to evaluate groundwater level fluctuations. By employing time series analysis through the Mann-Kendall test, the research examined the trends in groundwater levels during the specified period. The results indicated a consistent declining trend in average groundwater levels, with the simple exponential kriging method exhibiting the highest accuracy among the models tested. The study concluded that groundwater depletion in the Minab plain is spatially heterogeneous, with significant variations in water level changes across different regions.

Materials and Method

This research adopts an applied approach with a descriptive-analytical framework. Data from 38 observation wells over the period of 1997 to 2014 were utilized, focusing on groundwater levels and hydrogeological characteristics. The study involved the calculation of spatial positions and average water levels from the observation wells. To interpolate groundwater levels across the Minab plain, both kriging and RBF neural network methods were employed. The Mann-Kendall test was applied to analyze temporal trends in groundwater levels, and the spatial-temporal modeling was conducted for the years 1997 to 2014. The kriging methods used included spherical, circular, and exponential models, while RBF neural network models were also developed for comparison. The spatial interpolation results were visualized using ArcGIS software, allowing for comprehensive analysis of groundwater level changes.



Results and Discussion

The spatial interpolation results indicated a significant decline in groundwater levels across the Minab plain. The average groundwater level trend showed a steady decrease over the years, with some periods exhibiting slight increases due to rainfall variations. The kriging method, particularly the simple exponential model, demonstrated the highest correlation coefficient ($R^2 = 0.89$), indicating its effectiveness in modeling groundwater fluctuations. In contrast, the RBF method, specifically the completely regular spline model, yielded a lower correlation coefficient ($R^2 = 0.67$). The Mann-Kendall test revealed a significant declining trend in groundwater levels, particularly in the eastern regions of the study area, which experienced the most severe reductions. The spatial distribution of groundwater levels was heterogeneous, with certain areas showing more drastic changes than others.

Conclusion

The findings of this study highlight the critical state of groundwater resources in the Minab plain, emphasizing the need for effective management strategies to address the challenges of groundwater depletion. The research demonstrates the utility of advanced modeling techniques, such as kriging and neural networks, in assessing and predicting groundwater level fluctuations. The results indicate a persistent declining trend in groundwater levels, underscoring the importance of monitoring and managing these vital resources. The study advocates for the implementation of sustainable groundwater management practices, including public awareness campaigns and policy interventions, to mitigate the impacts of over-extraction and ensure the long-term viability of groundwater supplies in arid regions like Minab.

Keywords: Temporal modeling, Water level, Kriging models, Neural Networks, Minab

Research Article



Temporal and spatial modeling of underground water level using Kriging models and Artificial Neural Networks (case study: Minab Plain)

Mohammad Ibrahim Afifi ,Vahid Sohrabi*

Department of Geography, Faculty of Humanities, Islamic Azad University, Larestan Branch, Fars, Iran.

* Corresponding author: sohrabiv@gmail.com

© The Author(s) 2024

Received: 03 Apr 2024

Accepted: 22 Jun 2024

Published: 14 Jul 2024

Abstract

Most of the world's water sources are underground water sources. Rapid population growth, agricultural development, and unresponsive surface water levels have led to an increase in water pumping, resulting in a drop in groundwater levels and depletion of aquifers. Life in arid and semi-arid regions is completely dependent on groundwater resources due to low rainfall, so proper management of groundwater in such regions is very critical. This research is aimed at modeling the spatial and temporal level of underground water in the Minab Plain. In order to know and evaluate the process of illegal withdrawal from the underground water table of the Minab Plain, the available information related to water resources (observation wells) and hydrogeological of Minab Plain in a period of 17 years (1376-1392) was used as the basis of the work. In addition to the geostatistical Kriging method, the Radial Basis Functions (RBF) method, which is based on a neural network, has also been used for zoning and interpolation of the underground water level of Minab Plain. In this context, the interpolation models of implementation and changes were investigated temporally and spatially in Minab Plain. The level of accuracy for each of the models was examined, and Kendall's time series method was used to examine the changes, and finally, spatio-temporal modeling was done during the years under review. The results of this research showed that the average balance had a completely decreasing trend. Among the kriging methods, the simplified kriging method with a determination coefficient of 0.89 showed the most accuracy among other models. Among the RBF methods, the fully regular spline method with a coefficient of determination of 0.67 was the most accurate compared to other models. After choosing the kriging method as the optimal method, spatial trending was done using annual level maps and it was found that the amount of level drop has a geographically uneven distribution and in some areas, the level drop was much more intense. All spatial-temporal trend zoning maps show that the decreasing trend of Minab Plain's underground water level is different from each other in terms of spatial distribution, and in different parts of the water level has changed with different intensity, which is necessary to choose the best method. Finally, different kriging and neural network models were used from the results of RMSE statistics and it was found that the kriging method has better modeled the water level changes in the Minab Plain compared to the RBF method.

Keywords: Temporal modeling, Water level, Kriging models, Neural Networks, Minab



مدل‌سازی زمانی و مکانی تراز آب زیر زمینی با استفاده از مدل‌های کریجینگ و شبکه‌های عصبی مصنوعی (مطالعه موردی: دشت میناب)

محمدابراهیم عقیفی، وحید سهرابی*

گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لارستان، فارس، ایران.

نویسنده مسئول: sohrabiv@gmail.com

© The Author(s) 2024

چاپ: ۱۴۰۳/۰۴/۲۴

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۰۲

دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۱۵

چکیده

بخش اعظمی از منابع آب دنیا، منابع آب زیرزمینی است. رشد سریع جمعیت، توسعه کشاورزی و جابگو نبودن میزان آب‌های سطحی منجر به افزایش روند پمپاژ آب و در نتیجه افت سطح آب‌های زیرزمینی و تهی‌شدن سفره‌ها شده است. حیات مناطق خشک و نیمه‌خشک، به دلیل کمی بارندگی کاملاً وابسته به منابع آب زیرزمینی است، بنابراین مدیریت مناسب آب‌های زیرزمینی در چنین مناطقی بسیار حیاتی است. این پژوهش با هدف مدل‌سازی مکانی و زمانی تراز آب‌های زیرزمینی در دشت میناب صورت گرفته است. به منظور شناخت و ارزیابی روند برداشت بی‌رویه از سفره‌های آب زیرزمینی دشت میناب، اطلاعات موجود مربوط به منابع آبی (چاه‌های مشاهده‌ای) و هیدروژئولوژیکی دشت میناب در دوره زمانی ۱۷ ساله (۱۳۷۶-۱۳۹۲) مبنای کار قرار گرفت. برای پهنه‌بندی و درون‌یابی تراز آب زیرزمینی دشت میناب علاوه بر روش زمین‌آماری کریجینگ از روش توابع پایه شعاعی (RBF) که مبتنی بر شبکه عصبی است نیز استفاده شد. در این راستا، مدل‌های درون‌یابی اجرا و تغییرات به صورت زمانی و مکانی در سطح دشت میناب بررسی شد. میزان دقت برای هر کدام از مدل‌ها مورد بررسی قرار گرفت و برای بررسی تغییرات از روش سری زمانی من‌کندال استفاده شد و در نهایت مدل‌سازی مکانی - زمانی در طی سال‌های (۱۳۷۶-۱۳۹۲) مورد بررسی صورت گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد که میانگین تراز روندی کاملاً کاهشی داشته است. در میان روش‌های کریجینگ روش کریجینگ ساده نمایی با ضریب تعیین ۰/۸۹ بیشترین دقت را در بین سایر مدل‌ها نشان داد. در بین روش‌های RBF نیز روش اسپلاین کاملاً منظم با ضریب تعیین ۰/۶۷ بیشترین دقت را نسبت به سایر مدل‌ها داشت. پس از انتخاب روش کریجینگ به عنوان روش بهینه، روندیابی فضایی با استفاده از نقشه‌های سالانه تراز صورت گرفت و مشخص شد که میزان افت تراز از نظر جغرافیایی توزیع ناهمسان دارد و در برخی مناطق افت تراز بسیار شدیدتر بوده است. تمامی نقشه‌های پهنه‌بندی روند مکانی-زمانی نشان از آن دارد که روند کاهشی تراز آب زیرزمینی دشت میناب از نظر توزیع مکانی با هم متفاوت است و در بخش‌های مختلف تراز آب با شدت متفاوتی تغییر یافته است که برای انتخاب بهترین روش از بین مدل‌های مختلف کریجینگ و شبکه عصبی در نهایت از نتایج حاصل از آماره RMSE استفاده شد و مشخص شد که روش کریجینگ در مقایسه با روش RBF به شکل بهتری تغییرات تراز آب را در دشت میناب مدل‌سازی کرده است.

واژه‌های کلیدی: مدل‌سازی زمانی، تراز آب، مدل‌های کریجینگ، شبکه‌های عصبی، میناب

۱- مقدمه

منابع آب‌های زیرزمینی از مهم‌ترین منابع تأمین نیازهای آبی در اکثر نقاط دنیا بشمار می‌آیند. افزایش نیازهای آبی در بخش‌های مختلف و در نتیجه آن برداشت بیش از ظرفیت آبخوان‌ها منجر به تخریب این منابع با ارزش و افت قابل‌توجه تراز سطح آب زیرزمینی شده است. همچنین تزریق انواع آلاینده‌ها به سفره‌های زیرزمینی که در نتیجه توسعه جوامع شهری، صنعتی و کشاورزی و مدیریت ناصحیح می‌باشد، اثرات زیست‌محیطی جبران‌ناپذیری را در جهت کاهش کیفیت این منبع به دنبال داشته است. آب‌های زیرزمینی به‌عنوان یکی از باارزش‌ترین منابع و مسائل قرن حاضر می‌باشد که مستلزم شناخت و بررسی همه‌جانبه است (Mubaraki & Fereidoni, 2015). (Ghorbani et al., 2019) پیش‌بینی نوسانات تراز آب زیرزمینی در استرالیا را مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که ساختار درختی و برنامه‌ریزی بیان ژن برای تمام مقیاس‌های زمانی نسبت به شبکه عصبی از دقت بالاتری برخوردار است. یکی از مشکلات امروزه جهان و بخصوص کشور ایران که در منطقه نیمه‌خشک جهان قرار دارد، مسئله کمبود آب است. با افزایش جمعیت و مصرف روزافزون آب، طی هفتاد سال گذشته مصرف آب ۶ برابر شده است (Kazemi et al., 2021). وقوع خشکسالی‌های متوالی در دهه اخیر لزوم برنامه‌ریزی صحیح و همه‌جانبه جهت مقابله با مسئله کم‌آبی را افزایش داده است؛ این در حالی است که در اکثر مناطق خشک و نیمه‌خشک، منابع آب زیرزمینی سهم عمده‌ای در تأمین نیازهای آبی در بخش‌های کشاورزی، شرب و صنعت را ایفا می‌نمایند. بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی در سال‌های اخیر باعث به‌هم‌خوردن تعادل طبیعی شده و به‌تبع آن تراز آب زیرزمینی در آبخوان‌های بسیاری از نقاط کشور منفی شده است. به‌منظور آگاهی از وضعیت این منابع و مدیریت بهینه آن‌ها، لازم است پیش‌بینی دقیقی از نوسانات تراز آب زیرزمینی صورت گیرد. نظر به اهمیت بالای تراز آب زیرزمینی مطالعه دقیق و برآورد صحیح پارامتر فوق در مطالعات هیدروژئولوژیکی نقش بسزایی دارد. با توجه به محدودیت‌های موجود در حفر گمانه، مدل‌سازی زمانی و مکانی این پارامتر نیازی اساسی بشمار می‌رود (Rajaei & Zainivand, 2014).

(Hosseini Soumae et al., 2020) مدل‌سازی تغییرات سطح آب زیرزمینی بر اساس روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی را برای دشت زاوه انجام دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که شبکه عصبی مصنوعی با دقت بالا ($0.99=2R$) قادر به پیش‌بینی تراز سطح ایستابی می‌باشد. از جمله روش‌های درون‌یابی که می‌توان برای تخمین متغیرهای مکانی از قبیل سطح ایستابی بکار برد روش‌های زمین‌آماری است. با در نظر گرفتن پراکنش مکانی داده‌ها دستیابی به دقت مطلوب همیشه امکان‌پذیر نیست. تخمین زمین‌آماري فرایندی است که طی آن می‌توان مقداری کمیت در نقاطی با مختصات معلوم را با استفاده از مقدار همان کمیت در نقاط دیگری با مختصات معلوم بدست آورد. در روش‌های میان‌یابی مبتنی بر آمار کلاسیک مانند روش وزن‌دهی عکس فاصله توجهی به مبحث خودهمبستگی فضایی نمونه‌ها نمی‌شود، از این‌رو روش‌های زمین‌آماري از قبیل کریجینگ توسعه یافتند.

آب‌های زیرزمینی یکی از مهم‌ترین منابع آبی در ایران هستند و بخش مهمی از آب مورد نیاز کشاورزی و مصارف شهری از منابع آب زیرزمینی تأمین می‌شوند. برای مدیریت بهینه آب‌های زیرزمینی ضرورت دارد که اطلاعات کافی از مجموعه ویژگی‌های کمی و کیفی آبخوان مورد مطالعه جمع‌آوری شود. برای پیش‌بینی نوسانات سطح آب‌های زیرزمینی به علت پیچیده بودن ماهیت آن و عدم قطعیت در مؤلفه‌های مربوطه نیاز به مدل‌های پیچیده‌ای می‌باشد (Nayak et al., 2001) بنابراین یکی از مهم‌ترین رویکردها در برنامه‌ریزی مدیریت منابع آب به‌دست‌آوردن مدل مناسبی جهت پیش‌بینی رفتار منابع آب تحت‌تأثیر متغیرهای مؤثر بر این پدیده است. مهم‌ترین مدل‌های رایج در این زمینه مدل‌های رگرسیونی با سری زمانی (Shirzaei et al., 2019)، مدل‌های فیزیکی (Fakher 2000)، مدل‌های مبتنی بر شبکه عصبی مصنوعی، مدل‌های زمین‌آماري و مدل‌های فازی

(Moghaddisi et al., 2021) هستند. (Ramezani Chermahineh & Zounematkermani, 2017) کارایی روش‌های^۱ SVR، شبکه عصبی پرسپترون چندلایه و رگرسیون خطی چندمتغیره را به‌منظور پیش‌بینی تراز سطح آب زیرزمینی، مورد بررسی قرار دادند. که از اطلاعات ماهانه ۱۸ چاه مشاهده‌ای طی سال‌های ۱۳۷۹ تا ۱۳۸۹ به منظور شبیه‌سازی و پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی با مدل‌های رگرسیون خطی چندمتغیره، شبکه عصبی پرسپترون چند لایه و دو مدل رگرسیونی ماشین بردار پشتیبان با توابع کرنل پایه شعاعی و خطی استفاده کردند. با توجه به معیارهای خطا، مدل‌های پرسپترون چند لایه و ماشین بردار پشتیبان به همراه توابع کرنل پایه شعاعی و خطی نتایج بهتری را در برداشتند. از روش‌های کریجینگ نیز در چند سال اخیر به‌وفور در این زمینه استفاده شده است. کریجینگ درون‌یابی زمین‌آماری است و فرایندی است تخمینی که مبتنی بر میانگین متحرک وزن‌دار می‌باشد. در طی آن، برای تخمین مقادیر در نقاط نمونه‌برداری نشده، وزن‌هایی را به مقادیر نمونه‌برداری شده اطراف نسبت می‌دهد و بهترین تخمین‌گر خطی ناریب است. به‌منظور انجام درون‌یابی از سمی واریوگرام استفاده می‌شود که نشان‌دهنده درجه وابستگی مکانی متغیرهای اندازه‌گیری شده در خاک می‌باشد. از مدل‌های سری زمانی تجربی هر چند به طور گسترده‌ای برای مدل‌سازی سطح آب استفاده شده است، ولی هنگامی که رفتار دینامیک یک سیستم هیدرولوژیک با گذشت زمان تغییر می‌کند مدل‌های یاد شده برای پیش‌بینی مولفه‌های منابع آب توانایی کافی نداشته و مدل‌های مناسبی نیستند (Bierkens, 1998). از طرف دیگر، مدل‌های بر مبنای فیزیکی نیز در عمل به داده‌های زیادی برای پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی نیاز دارند و از آنجاکه روابط بین متغیرهای مؤثر بر سطح آب در یک سفره آب زیرزمینی احتمالاً غیرخطی هستند مدل‌های فوق در ارائه رابطه بین این متغیرها نیز نمی‌توانند به‌خوبی عمل کنند (Nayak et al., 2001).

(Boroujerdi & Feridouni, 2015) در تحقیقی با عنوان شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی با استفاده از مدل‌های بردار پشتیبان و مقایسه آن با مدل‌های عصبی فازی و موجک عصبی (مطالعه موردی دشت شیراز)، به بررسی مبانی علمی هر سه روش به‌کاررفته در پژوهش خود اعم از^۲ SVM،^۳ ANFIS و موجک عصبی پرداختند. نویسندگان در این پژوهش با استفاده از جعبه‌ابزارهای نرم‌افزار MATLAB به پیاده‌سازی الگوریتم‌ها و مدل‌های حاصله پرداختند. در نهایت با استفاده از داده‌های دو گام زمانی ماهیانه داده‌های ۱۹/۵ ساله بارش و سطح تراز آب از ابتدای سال ۷۲ تا شش ماهه دوم ۹۲ به پیش‌بینی ماهیانه تراز آب شیراز پرداخته شد که در بهترین حالات به ترتیب ضریب رگرسیون ۰/۹۹۳، ۰/۹۸۶ و ۰/۷۶۷ برای مدل موجک عصبی، ANFIS و ماشین بردار پشتیبان حاصل شد. نتایج آن‌ها گواه آن است که مدل موجک عصبی از سایر تکنیک‌ها موفقی‌تر و مدل SVM در بین مدل‌ها ضعیف‌تر از سایرین عمل کردند. (Feridouni & Khojand, 2014) در تحقیق با عنوان کاربرد مدل زمین‌آماری (کریجینگ) و تلفیق آن با سیستم استنتاج فازی عصبی در پهنه‌بندی تراز آب زیرزمینی (مطالعه موردی: دشت شیراز) به پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی با مدل‌های شبکه عصبی و عصبی فازی پرداختند. نتایج مدل‌سازی آن‌ها نشان داد که بهترین پیش‌بینی‌ها توسط سیستم استنتاج فازی با ضریب همبستگی ۹۵٪ به‌دست می‌آید. (Yazidi et al., 2007) با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی به‌پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی در دشت نیشابور پرداخت و بهترین مدل حاصل را ارائه داد. تحقیقاتی نیز به توانایی شبکه‌های عصبی مصنوعی در پیش‌بینی پارامترهای آبخوان مانند ضریب انتقال و آبدهی ویژه اشاره دارد (Sarzabi & Esmaili, 2013). در این تحقیقات تنها از مدل شبکه‌های عصبی استفاده شد و روش‌های زمین‌آماری مورد بررسی قرار نگرفته است در صورتی که نتایج

¹ Support Vector Regression

² Support Vector Machine

³ Adaptive Neuro Fuzzy Inference System

برخی تحقیقات حاکی از آن است که مدل‌های زمین‌آماري عملکرد بهتری نسبت به شبکه‌های عصبی مصنوعی دارند (Ahmadizadeh & Maroufi 2017).

(Affandi & Watanabe, 2007) با استفاده از داده‌های روزانه سطح آب، به کنترل افت آب زیرزمینی پرداختند و با مدل‌های ANFIS, RBF⁴ و LM⁵ سطح آب را بر اساس تأخیر زمانی از یک تا ۷ روز مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش گام زمانی، از دقت مدل‌ها کاسته می‌شود. در تحقیقات انجام شده اثرات پارامترهای تأثیرگذار بر تغییرات سطح آب در نظر گرفته نشد و تنها از اطلاعات سطح آب در روزهای قبل، جهت پیش‌بینی سطح آب استفاده نموده‌اند. (Mir Arabi & Nakhai, 2008) به بررسی دقت سیستم شبکه عصبی مصنوعی در پیش‌بینی نوسانات سطح آب زیرزمینی بر اساس اطلاعات پیژومتری در دشت بیرجند پرداختند و نتیجه گرفتند که با وارد کردن میزان بارندگی و برداشت با تأخیر زمانی ۲ ماهه دقت شبکه افزایش می‌یابد آن‌ها از برداشت و بارندگی کل دشت، به‌عنوان ورودی مدل استفاده کردند درحالی‌که میزان بارندگی و تخلیه در قسمت‌های مختلف دشت با هم متفاوت است و تأثیر بسزایی بر نوسانات سطح آب دارد. هدف از این پژوهش مدل‌سازی زمانی و مکانی تراز آب زیر زمینی دشت میناب با استفاده از مدل‌های کریجینگ (انواع روش‌ها) و نیز مدل‌های درون‌یابی مبتنی بر شبکه‌های عصبی مصنوعی است. همچنین ارزیابی دقت روش‌های درون‌یابی جهت پهنه‌بندی مکانی و زمانی و پارامترهای کمی آب‌های زیر زمینی نیز انجام شد. باتوجه به جایگاه آب‌های زیرزمینی به‌عنوان یکی از منابع آبی قابل‌استفاده و همچنین روبه کاهش آن، مطالعه و مدیریت بهره‌برداری از آن دارای اهمیت ویژه‌ای می‌باشد؛ از طرفی مدیریت صحیح منابع آب مستلزم داشتن اطلاعات از تغییرات مکانی و زمانی سطح آب زیرزمینی در سطح حوزه مورد مطالعه می‌باشد.

۲- مواد و روش‌ها

تحقیق حاضر از نوع کاربردی و رویکرد حاکم بر آن توصیفی - تحلیلی می‌باشد. در این پژوهش از اطلاعات چاه‌های مشاهده‌ای مربوط به سال‌های ۱۳۷۶ تا ۱۳۹۲ به‌عنوان نمونه معلوم استفاده گردید و با استفاده از تکنیک‌های زمین‌آمار و شبکه عصبی مدل‌های درون‌یابی اجرا و تغییرات به‌صورت زمانی و مکانی در سطح دشت میناب مورد کنکاش قرار گرفت. به‌منظور شناخت و ارزیابی آثار برداشت بی‌رویه از سفره آب زیرزمینی دشت رودان و آسیب‌پذیری منطقه از این مسئله، ابتدا اطلاعات موجود مربوط به منابع آبی (چاه‌های مشاهده‌ای) و هیدروژئولوژیکی دشت در دوره زمانی ۱۷ساله مینای کار قرار گرفت. جهت مطالعه تغییرات کمی آب‌های زیرزمینی، اطلاعات مربوط به موقعیت مکانی و متوسط سطح آب چاه‌های مشاهده‌ای محاسبه شده است. برای پهنه‌بندی تراز آب زیرزمینی دشت میناب علاوه بر روش زمین‌آماري کریجینگ از روش RBF که مبتنی بر شبکه عصبی است نیز استفاده شد. در نهایت برای بررسی تغییرات به‌صورت سری زمانی از روش سری زمانی من‌کنده استفاده شده است و پهنه‌بندی مکانی زمانی در طی سال‌های ۱۳۷۶-۱۳۹۲ مورد بررسی صورت گرفت. در شکل (۱) فرایند پژوهش نشان‌داده شده است.

⁴Radial Basis Function

⁵ Levenberg-Marquard

شکل ۱- فرایند پژوهش

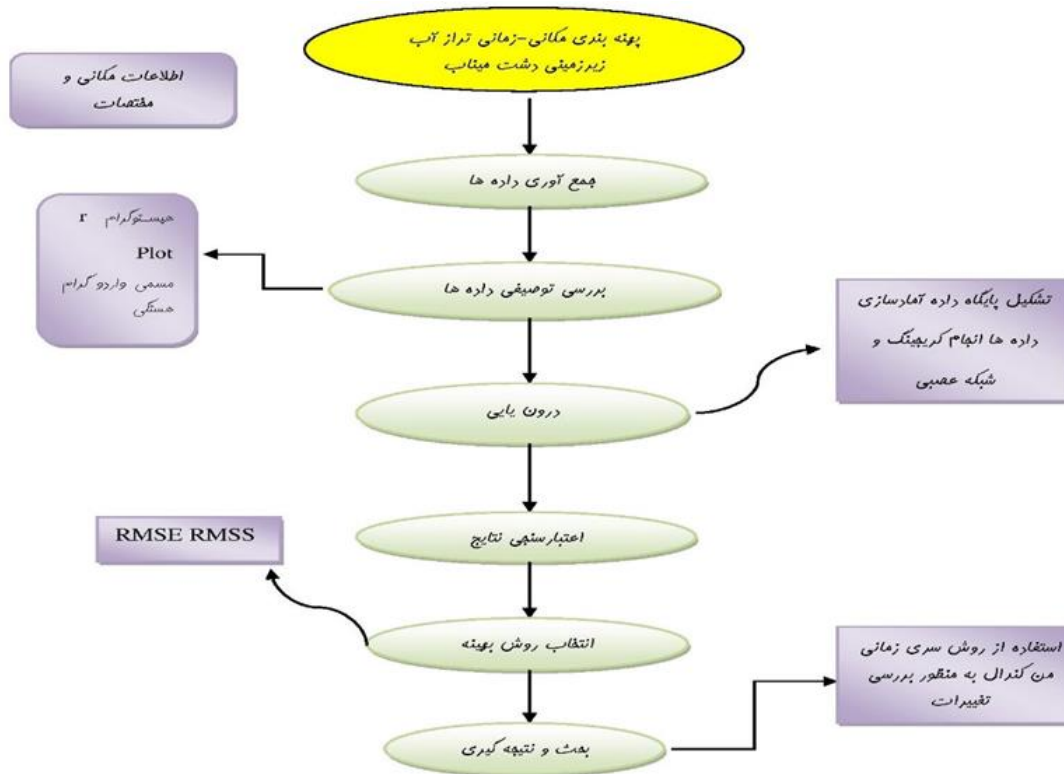


Fig 1. Research process

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

دشت میناب در استان هرمزگان و شهرستان میناب در طول‌های جغرافیایی ۵۶ درجه و ۴۸ دقیقه و عرض جغرافیایی ۵۷ درجه و ۱۹ دقیقه واقع شده است (شکل ۲). این دشت در ناودیسی با وسعت ۱۳۷۸ کیلومتر مربع واقع شده است که بر اساس نقشه رقومی ارتفاعی سازمان زمین شناسی امریکا (USGS) حداقل ارتفاع آن از سطح دریا ۲۰ و حداکثر ارتفاع آن ۱۹۷ متر می‌باشد. مهم‌ترین رودخانه این دشت رودخانه میناب است. این زیرحوزه براساس تقسیم بندی طرح جامع آب کشور، قلمرو مطالعاتی بخشی از حوضه آبریز رودخانه کل می‌باشد. متوسط بارندگی ۱۸۲ میلی‌متر در سال، متوسط دمای سالیانه ۲۵/۳ درجه سانتی‌گراد، حداقل دمای آن ۱۷/۳ و حداکثر دمای آن ۳۳/۳ درجه سانتی‌گراد و تبخیر سالیانه ۲۷۷۸/۴ میلی‌متر می‌باشد. منطقه مورد مطالعه زیر پوشش اقلیم‌های بیابانی گرم میانه تا بیابانی گرم شدید (روش آمبرژه) قرار می‌گیرد. از نظر زمین‌شناختی منطقه مورد مطالعه در زون ساختاری زاگرس چین خورده قرار داشته و به لحاظ لیتولوژی و چینه شناسی، غالب منطقه متعلق به دوران سوم زمین شناسی می‌باشد. رسوبات آبرفتی دوران چهارم نیز در شمال و شمال غرب منطقه دیده می‌شود. بافت رسوبات آبرفتی دشت را عمدتاً شن و ماسه تشکیل می‌دهد که در بین آن‌ها میان لایه‌های ریزدانه سیلتی و رسی نیز وجود دارد. سفره آب زیرزمینی دشت از نوع آزاد است. بخش‌های مرتفع‌تر این دشت در امتداد قسمت‌های شمال شرقی تا جنوب شرقی کشیده شده‌اند و به سمت جنوب و جنوب غرب از ارتفاع دشت کاسته می‌شود (Mashaikhi et al., 2022).

شکل ۲- موقعیت منطقه مورد مطالعه

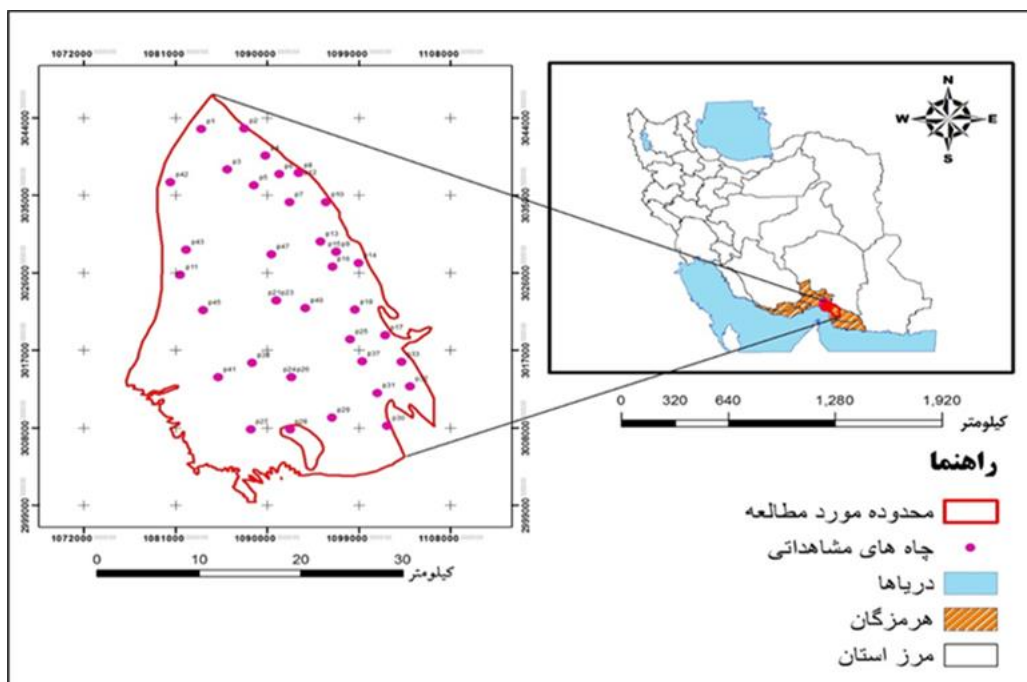


Fig 2. Location of the study area

۲-۲- جمع آوری و آماده سازی داده های پژوهش

داده های خام جمع آوری شده برای دشت میناب شامل ۳۸ چاه مشاهده ای بود. اطلاعات این چاه ها برای هر ماه از سال موجود بود که با میانگین گیری از آن ها داده ها به فرمت سالانه تبدیل شدند. از آنجا که برای برخی از سال ها داده ها ناقص بود، لذا در نهایت تعداد ۲۵ نقطه شاهد به عنوان داده نهایی انتخاب شد. همچنین از آنجا که داده ها در محیط اکسل بودند لذا به منظور تهیه نقشه های درونیابی شده و بررسی میزان تغییرات تراز آب زیر زمینی در محدوده مورد مطالعه از نرم افزار ArcGIS استفاده شد. جدول (۱) مشخصات جغرافیایی چاه های مشاهداتی مورد استفاده در پژوهش حاضر را نشان می دهد.

استفاده از روش های زمین آماری مستلزم بررسی وجود ساختار مکانی در بین داده هاست که توسط تجزیه و تحلیل واریوگرام این امر بررسی می شود. شرط استفاده از این تجزیه و تحلیل، نرمال بودن داده هاست؛ بنابراین تمامی داده های مربوط به هر پارامتر از نظر توزیع نرمال بودن بررسی گردید. این کار با استفاده از آزمون های کلموگراف - اسمیرنف و شاپیرو - ویلک در محیط SPSS انجام شد و مشخص شد که داده ها از توزیع نرمال برخوردار نیستند. از این رو با لگاریتم گیری از داده ها، نرمال سازی صورت گرفت. سپس داده های نرمال به محیط نرم افزار Arc GIS منتقل شده و اقدام به برازش واریوگرام و انتخاب مدل مناسب برای پهنه بندی گردید. علاوه بر هیستوگرام، میزان همبستگی آماری داده ها در سال های مختلف نیز مشخص شد. لازم به ذکر است که همبستگی مکانی داده ها برای داده های مکانی اهمیت بیشتری دارد و این موضوع پایه بسیاری از روش های زمین آمار است.

جدول ۱- مشخصات جغرافیایی چاه‌های مشاهداتی مورد استفاده در پژوهش

Table 1. Geographical characteristics of the observation wells used in the research

ارتفاع نقطه	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	نام ایستگاه
۲۲۱/۹۱۵	۳۰.۳۵۷۹۶	۵۱۲۳۵۱	p۱
۲۰۱/۴۴۹	۳۰.۳۶۳۸۴	۵۱۶۴۴۹	p۲
۲۳۷/۰۰۶	۳۰.۳۸۱۵۸	۵۲۲۳۹۶	p۳
۲۲۳/۳۳۸	۳۰.۳۸۹۵۵	۵۲۵۹۵۷	p۴
۲۰۳/۰۹۹	۳۰.۳۵۲۶۶	۵۲۴۱۲۷	p۵
۱۸۸/۶۲۷	۳۰.۳۲۱۴۳	۵۲۵۰۱۱	p۶
۱۸۱/۵۹	۳۰.۳۳۳۴۴	۵۱۹۶۹۶	p۷
۱۹۲/۸۳۷	۳۰.۳۲۳۷۶	۵۱۱۳۶۵	p۸
۱۸۰/۰۱۳	۳۰.۲۹۷۴۰	۵۱۵۸۴۱	p۹
۱۶۵/۳۴۲	۳۰.۲۷۹۳۴	۵۲۱۰۲۳	p۱۰
۲۰۰/۱۲۹	۳۰.۲۸۳۲۷	۵۲۴۷۶۱	p۱۱
۱۸۸/۸۱۷	۳۰.۲۶۹۳۳	۵۱۶۱۸۷	p۱۲
۱۸۳/۶۳۶	۳۰.۲۴۴۴۰	۵۱۷۸۶۳	p۱۳
۱۵۸/۰۳۹	۳۰.۲۴۳۵۲	۵۲۰۵۰۶	p۱۴
۱۸۲/۹۸۹	۳۰.۲۳۹۵۵	۵۲۳۷۹۲	p۱۵
۱۷۰/۷۸۳	۳۰.۲۱۲۸۲	۵۲۲۳۲۳	p۱۶
۱۶۱/۵۹۳	۳۰.۱۹۹۴۰	۵۱۹۹۴۶	p۱۷
۲۱۱/۷۹۶	۳۰.۲۱۱۷۹	۵۲۵۵۶۷	p۱۸
۱۸۶/۲۶۲	۳۰.۱۸۳۴۵	۵۲۵۹۰۱	p۱۹
۲۱۶/۳۴۴	۳۰.۱۲۸۴۱	۵۲۴۱۲۸	p۲۰
۱۵۲/۳۵۶	۳۰.۱۷۳۳۵	۵۲۲۰۴۹	p۲۱
۲۰۲/۴۳۴	۳۰.۱۴۶۴۲	۵۲۷۷۰۱	p۲۲
۲۳۸/۵۸۶	۳۰.۲۰۴۴۹	۵۲۷۸۷۴	p۲۳
۱۷۴/۲۶۴	۳۰.۱۹۵۲۹	۵۲۲۳۷۶	p۲۴
۱۷۳/۸۶۸	۳۰.۳۲۵۲۰	۵۱۷۳۳۹	p۲۵

۲-۳- پهنه‌بندی مکانی زمانی

برای بررسی تغییرات سطح آب زیرزمینی از روش آماری من کندال استفاده می‌گردد. با توجه به شکل رایج آمار کلاسیک، در اغلب مقالات از آمار من کندال استفاده گردیده است که در این پژوهش، تغییرات بر روی نقشه‌ها به صورت زمانی - مکانی تحلیل گردید. ابتدا سری‌های زمانی تغییرات تراز آب یا به عبارت ساده نقشه‌های درون‌یابی شده که دقت لازم را داشته‌اند به دست آمد و سپس از روش من کندال برای پهنه‌بندی مکانی زمانی تغییرات استفاده شده است. آزمون من کندال یک آزمون آماری ناپارامتری است که برای تجزیه و تحلیل روند در داده‌های بلندمدت استفاده می‌شود. روش‌های ناپارامتری نیاز به هیچ مفروضاتی با توجه به زمینه توزیع آماری داده‌ها ندارند. براین اساس آزمون من کندال نیاز به توزیع آماری خاص و تست حساسیت نمونه‌گیری به فاصله ندارد. روش من کندال می‌تواند برای مجموعه داده‌هایی که شامل فواصل نمونه‌برداری نامنظم، اطلاعات زیر حد تشخیص، اطلاعات از دست رفته یا ناچیز است، مورد استفاده قرار گیرد. این آزمون مخصوصاً در مواردی سودمند است که می‌توان اندازه‌گیری داده‌ها را با استفاده از روش‌های پارامتری تجزیه و تحلیل کرد. این روش می‌تواند برای ردیابی روند داده‌ها با هدف ارزیابی قابل قبول آب‌های زیرزمینی، بررسی مکان، نظارت بر کارایی عملکردهای اصلاحی آب زیرزمینی استفاده شود (Connor et al., 2012). روابط مربوط جهت تعیین مقادیر آماره من کندال به صورت زیر است:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(X_j - X_i) \quad (1)$$

$$\text{sgn}(X_j - X_i) = \begin{cases} +1 & \text{اگر } (X_j - X_i) > 0 \\ 0 & \text{اگر } (X_j - X_i) = 0 \\ -1 & \text{اگر } (X_j - X_i) < 0 \end{cases}$$

$$\text{var}(s) = \frac{1}{18} [n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5)]$$

$$Z_M = \begin{cases} \frac{s-1}{\sqrt{\text{VAR}(S)}} & \text{اگر } S > 0 \\ 0 & \text{اگر } S = 0 \\ \frac{s+1}{\sqrt{\text{VAR}(S)}} & \text{اگر } S < 0 \end{cases}$$

که در روابط فوق n تعداد داده مشاهده‌ای (طول دوره آماری)، X_i و X_j به ترتیب i امین و j امین داده مشاهده‌ای، و q تعداد گروه‌های ایجاد شده (با داده‌های برابر و بیشتر از دو عضو)، t_p تعداد داده‌های برابر در p امین گروه و Z_M مقدار آماره من کندال می‌باشد. مقدار منفی Z_M بیانگر روند کاهشی و مقدار مثبت آن نشان‌دهنده روند افزایشی در سری داده‌ها می‌باشد. با توجه به سطح معنی‌دار بودن ۹۵ درصد اگر $m > 96/1$ باشد فرض صفر رد شده و سری زمانی پارامتر مورد مطالعه دارای روند معنی‌دار و در غیر این صورت فاقد روند ارزیابی می‌شود. برای روندیابی از نرم‌افزار Edrisi Terset استفاده شد. آزمون من کندال متکی بر سه پارامتر آماری است (Aziz & Burn, 2003) که در زیر شرح داده می‌شود:

آماره: S نشان می‌دهد که آیا روند در بازه زمانی به صورت کاهشی (-S) و یا افزایشی (+S) اتفاق افتاده است.

ضریب اطمینان: میزان ضریب اطمینان محاسبه آماره S را اصلاح می‌کند و درجه‌ای از اعتماد به نفس را در تحلیل روند نشان می‌دهد. مثلاً "کاهش"، احتمالاً "کاهش"، افزایش، احتمالاً "افزایش". همچنین اگر میزان ضریب اطمینان کم باشد به دلیل تنوع قابل توجهی در داده‌ها یا به دلیل تغییر کمی در آن است.

ضریب واریانس: ضریب واریانس برای تمایز میان نتیجه "بدون روند" (پراکندگی قابل توجهی در روند مقابل زمان) و نتیجه "پایدار" (تنوع محدود در برابر زمان) برای مجموعه داده با روند کاهش یا افزایشی غیرقابل ملاحظه بوده است. جدول (۲) واحدهای آماری استفاده شده در آزمون من کندال را نشان می‌دهد.

جدول ۲- واحدهای آماری استفاده شده در آزمون من-کندال (Aziz & Burn, 2003)

Table 2. Statistical units used in the Mann-Kendall test (Aziz & Burn, 2003)

S آماره	اطمینان در روند (CF)	روند
$S > 0$	$CF > 95\%$	افزایش
$S > 0$	$95\% \geq CF \geq 90\%$	احتمال افزایش
$S > 0$	$CF < 90\%$	بدون روند
$S \leq 0$	$CF < 90\%$ and $COV \geq 1$	بدون روند
$S \leq 0$	$CF < 90\%$ and $COV < 1$	ثابت
$S < 0$	$95\% \geq CF \geq 90\%$	احتمال کاهش
$S < 0$	$CF > 95\%$	کاهش

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج درونیابی فضایی

برای یافتن مقادیر نامعلوم، از چاه‌های مشاهداتی دارای آمار استفاده شد تا معلوم گردد که میزان تراز آب در سایر مکان‌ها به چه شکل بوده است. تعیین مقادیر عددی برای مناطق مجهول با استفاده از تکنیک‌های زمین‌آمار و درونیابی فقط برای همان منطقه می‌تواند دقت لازم را داشته باشد، و شاید در مناطق دیگر مدل‌های دیگری قابل اعتماد باشد. در پژوهش حاضر برای تحلیل مکانی داده‌ها از نیم تغییر نگار مدل‌های مذکور استفاده شده است که با استفاده از نرم‌افزار ARC GIS10 محاسبه گردید. مدل‌های مورد استفاده جهت برآزش با روش کریجینگ شامل موارد زیر می‌باشد:

الف) مدل کروی ب) دایره ای پ) نمایی ت) گوسین

همچنین از مدل شبکه عصبی با استفاده از تابع پایه شعاعی (RBF) استفاده گردیده است. در شکل (۳) نقشه‌های درونیابی شده برای مدل‌های مختلف کریجینگ و شبکه عصبی ارائه شده است.

شکل ۳- نقشه های درون یابی شده برای مدل کریجینگ و مدل شبکه عصبی

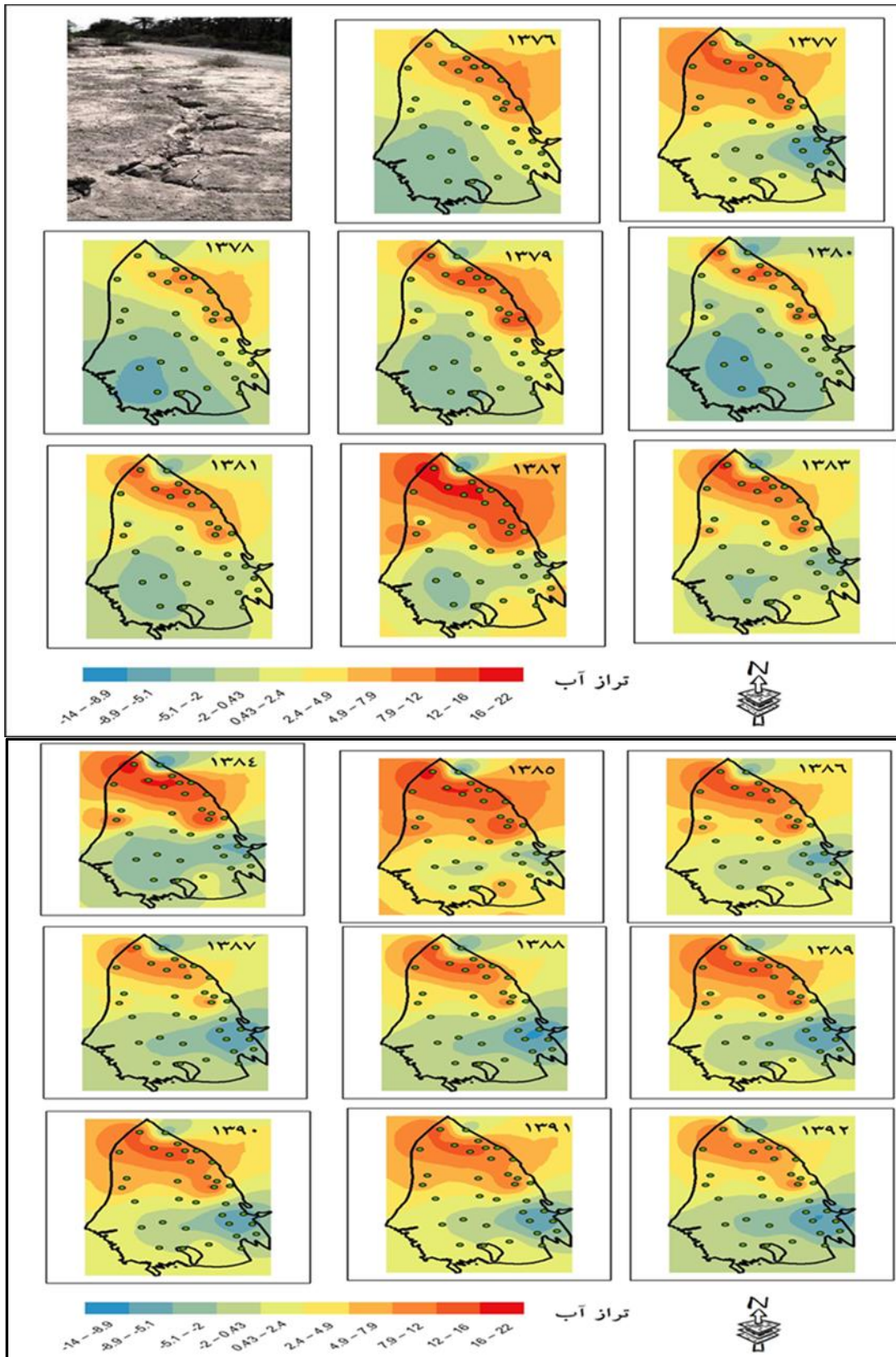


Fig 3. Interpolated maps for the Kriging model and Neural Network model

برای روش توابع پایه شعاعی نیز نقشه‌های درونیابی تهیه شد (شکل ۴).

شکل ۴- نقشه‌های درونیابی شده برای مدل کریجینگ و مدل شبکه عصبی

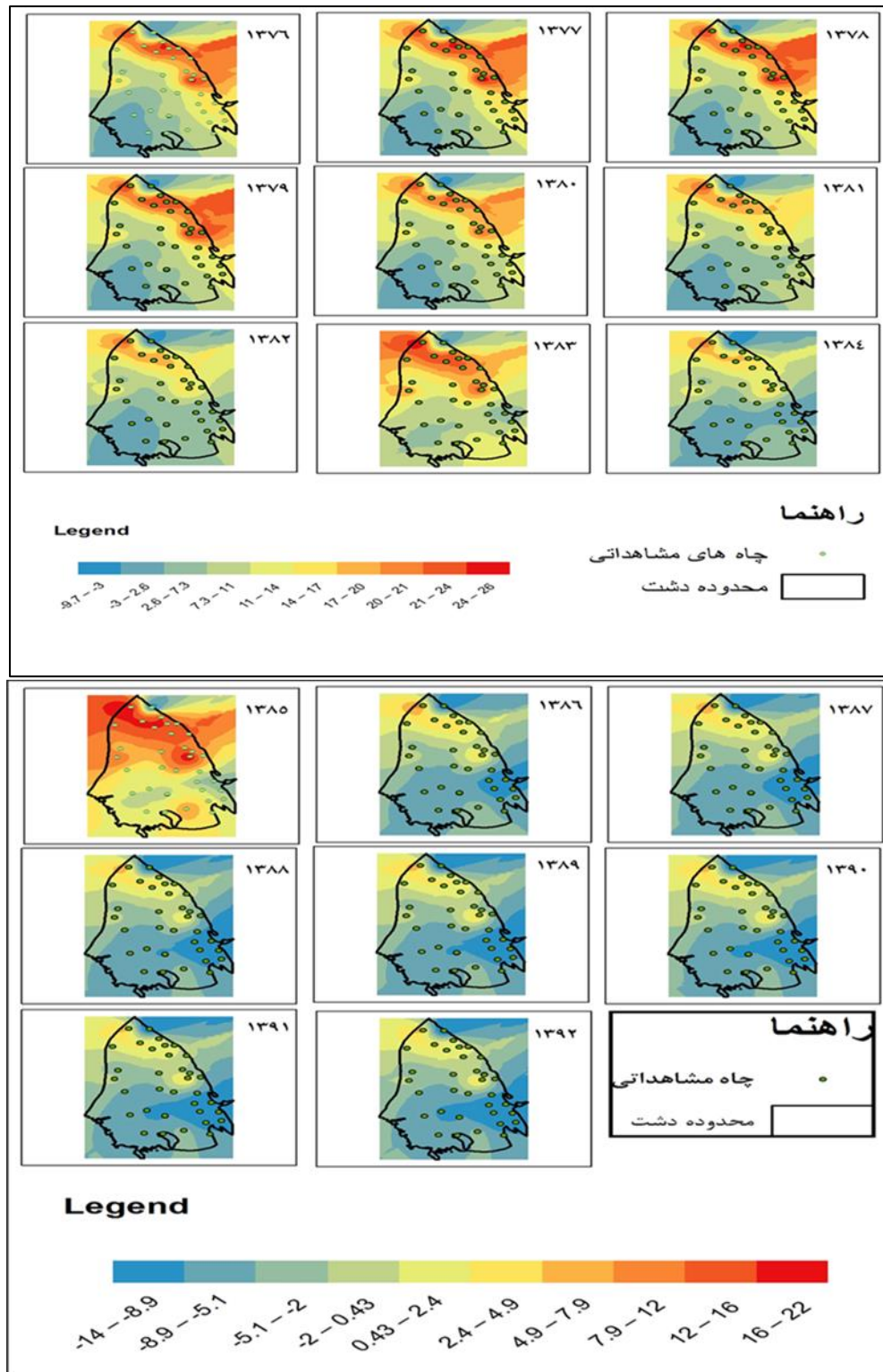


Fig 4. Interpolated maps for the Kriging model and Neural Network model

علاوه بر نقشه های مکانی میانگین کلی تراز (میانگین سالانه تراز برای تمامی چاه های مشاهداتی) در شکل (۵) نمایش داده شد.

شکل ۵- میانگین سالانه تراز آب در دشت میناب

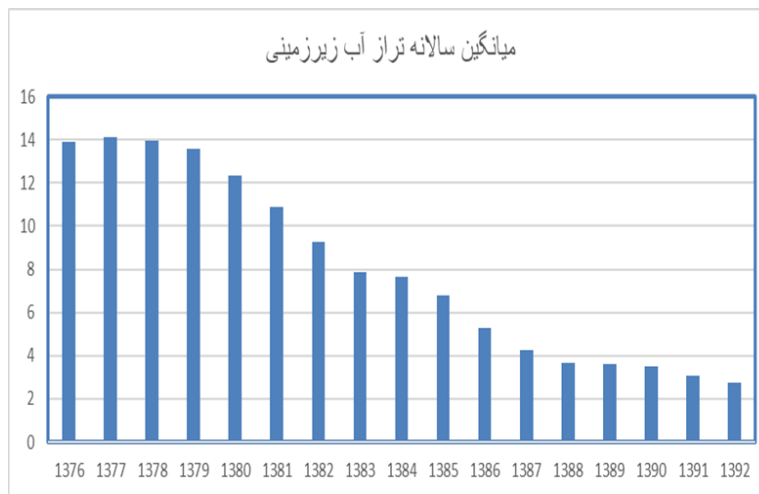


Fig 5. Annual average water level in Minab Plain

همان گونه که شکل (۵) نشان می دهد میانگین تراز روندی کاملاً کاهشی داشته است. طی سال های ۱۳۷۶ تا ۱۳۷۹ تقریباً روند ثابتی وجود داشته است و حتی در سال ۱۳۷۷ روند افزایشی بوده است. از سال ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۳ روندی کاملاً کاهشی وجود داشته است سپس در سال ۱۳۸۴ با افزایشی اندک در تراز آب مواجه هستیم. در سال ۱۳۸۵ همچنان روند کاهش شدید است و این روند با کاهشی تقریباً یکسان تا سال ۱۳۸۸ ادامه دارد. در سال ۱۳۸۹ و ۱۳۹۰ اندکی از میزان کاهش تراز آب کاسته شده ولی روند کاهش همچنان تا سال ۱۳۹۲ ادامه داشته است.

۳-۲- اعتبارسنجی نتایج درون یابی کریجینگ

مدل های مورد استفاده جهت برازش با روش کریجینگ دو نوع هستند: روش کریجینگ ساده و کریجینگ معمولی شامل مدل های کروی، دایره ای و نمایی می باشد که در این تحقیق نتایج مربوط به این روش ها ارزیابی شده است. جهت ارزیابی و تعیین بهترین مدل، صحت و دقت هر یک از نقشه ها تولید شده، محاسبه گردید که در این خصوص مقادیر اولیه در ساخت نقشه ها، با مقادیر محاسبه و تخمین زده شده، روی نمودار برازش قرار گرفته و با استفاده از محاسبه شاخص های ارزیابی متقاطع، میزان دقت هر کدام از نقشه ها تعیین گردید. میانگین مطلق خطا (MAE) و میانگین خطای انحراف (MBE) و ضریب تعیین (R2) نقشه ها برای مقایسه نتایج استفاده شده است. جدول (۳) نتایج ارزیابی متقابل نقشه های تولید شده را نشان می دهد. لازم به ذکر است که نتایج ارزیابی میانگین خطا برای تمامی سال ها برای هر روش می باشد. در ادامه نیز نتایج در سال های مختلف با استفاده از آماره RMSE و RMSS کنترل شده است.

جدول ۳- نتایج ارزیابی متقابل روش‌های درون‌یابی کریجینگ

Table 3. Results of mutual evaluation of Kriging interpolation methods

معادله خط رگرسیون	خطای روش ارزیابی متقابل				مدل	روش
	R2	RMSS	MAE	MBE میانگین مطلق خطا		
$y = 0.12x + 13.21$	۰/۵۹	۸/۳	۳۹/۳۳	-۰/۳۲	کروی	کریجینگ
$y = -1.4564x + 1438.4$	۰/۶۴	۷/۳	۳۹/۴۴	-۰/۰۵	دایره‌ای	معمولی
$y = 1.478x + 239.01$	۰/۸۲	۶/۹	۴۱/۲۳	-۴/۱۲	نمایی	
$y = 0.121x + 66.51$	۰/۵۹	۸/۳	۳۸/۴۵	-۵/۴۴	گوسین	
$y = 1.679x + 766.94$	۰/۷۱	۹/۲۲	۴۵/۵۵	-۵/۶۵	کروی	کریجینگ
$y = 0.683x + 75.86$	۰/۶۷	۷/۴	۵۲/۲	-۱/۱۲	دایره‌ای	ساده
$y = -0.586x + 1738.4$	۰/۸۹	۶/۷	۳۹/۴۴	-۰/۰۵	نمایی	
$y = 1.885x + 118.06$	۰/۴۹	۷/۷	۵۱/۱۳	-۴/۱۴	گوسین	

همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهد روش کریجینگ ساده نمایی با ضریب تعیین ۰/۸۹ بیشترین همبستگی را در بین سایر مدل‌ها داراست. همچنین در شکل‌های ۶ و ۷، صحت مربوط به روش کریجینگ ساده به ترتیب مربوط به سال‌های مختلف با آماره RMSE و آماره RMSS کنترل شده است.

شکل ۶. نتایج ارزیابی روش کریجینگ در سال‌های مختلف با آماره RMSE

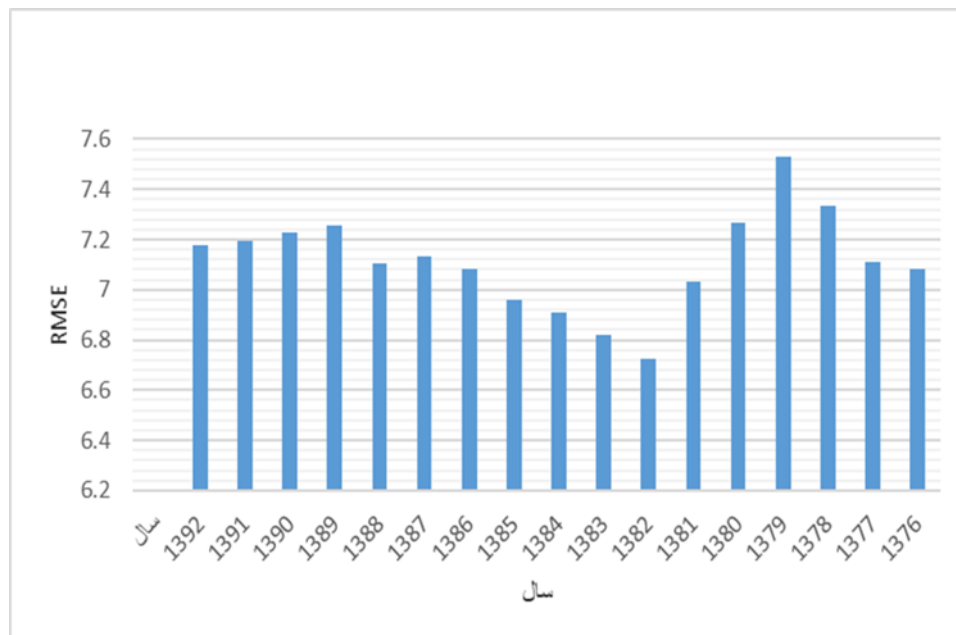


Fig 6. Evaluation results of Kriging method in different years with RMSE statistics

شکل ۷- نتایج ارزیابی روش کریجینگ در سال های مختلف با آماره RMSS

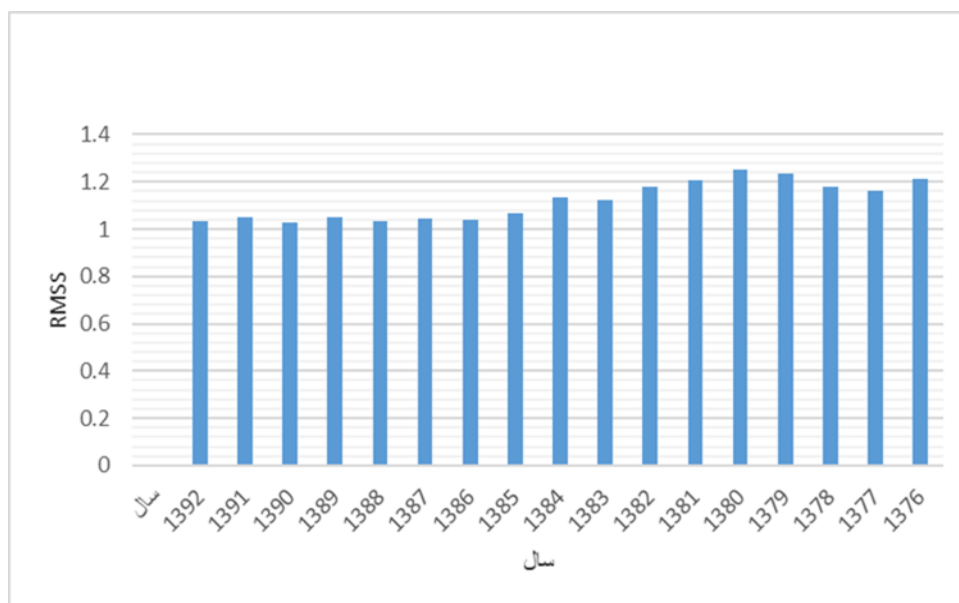


Fig 7. Evaluation results of Kriging method in different years with RMSS statistics

همان گونه که مشخص است آماره RMSE به شکل بهتری می تواند میزان خطا در سال های مختلف را به تصویر بکشد. بهترین دقت در این آماره مربوط به سال ۱۳۷۹ است.

۳-۳- اعتبارسنجی نتایج درون یابی با روش شبکه های عصبی

مدل های مورد استفاده جهت برازش با روش شبکه های عصبی (RBF) که مورد ارزیابی قرار گرفتند عبارت اند از: (۱) اسپیلاین کاملاً منظم، (۲) مولتی کوادریک معکوس، (۳) مولتی کوادریک، (۴) اسپیلاین با کشش، (۵) اسپیلاین صفحه نازک دو نوع روش کریجینگ ساده و کریجینگ معمولی شامل: مدل های کروی، دایره ای و نمایی می باشد که در این تحقیق نتایج مربوط به این روش ها ارزیابی شده است. همانند روش کریجینگ برای ارزیابی نتایج درون یابی مربوط به تراز آب زیرزمینی دشت میناب با استفاده از روش RBF که مبتنی بر شبکه عصبی است از میانگین مطلق خطا (MAE)، میانگین خطای انحراف (MBE) و ضریب تعیین (R2) نقشه ها استفاده شده است. جدول (۴) نتایج ارزیابی متقابل نقشه های تولید شده در روش RBF را نشان می دهد. لازم به ذکر است که نتایج ارزیابی میانگین خطا برای تمامی سال ها برای هر روش می باشد. نتایج ارزیابی روش شبکه عصبی در سال های مختلف با آمار RMSE و RMSS در اشکال ۸ و ۹ نمایش داده شده است. نتایج جدول (۴) نشان می دهد روش اسپیلاین کاملاً منظم با ضریب تعیین ۰/۶۷ بیشترین همبستگی را در بین سایر مدل ها داراست.

جدول ۴- نتایج ارزیابی متقابل نقشه‌های تولید شده در روش RBF

Table 4. Mutual evaluation results of the maps produced in the RBF method

معادله خط رگرسیون	خطای روش ارزیابی متقابل				مدل	روش
	R2	RMSE	MAE	MBE میانگین مطلق خطا		
$y = 0.110x + 548.31$	۰/۶۷	۷/۹۹	۶۵/۶۷	-۴/۱۴۴	اسپیلاین کاملاً منظم	شبکه عصبی RBF
$y = 1.814x + 557.27$	۰/۴۳	۹/۵	۴۵/۸۶	-۲/۹۸	مولتی کوادریک معکوس	
$y = 2.213x + 145.07$	۰/۴۴	۸/۲۷	۴۶/۴۲	-۲/۵۵	مولتی کوادریک	
$y = 2.238x + 168.58$	۰/۴۱	۹/۹۸	۳۴/۵۹	۱/۴۴۵۴	اسپیلاین با کشش	
$y = 0.112x + 147.46$	۰/۳۹	۱۰/۲۲	۵۴/۸۷	-۱/۷۶	اسپیلاین صفحه نازک	

شکل ۸- نتایج ارزیابی روش شبکه عصبی در سال‌های مختلف با آماره RMSE

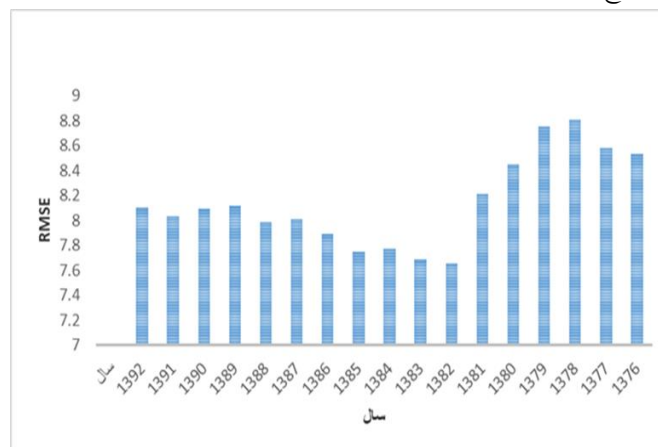


Fig 8. Evaluation results of the Neural Network method in different years with RMSE statistics

شکل ۹- نتایج ارزیابی روش شبکه عصبی در سال‌های مختلف با آماره RMSS

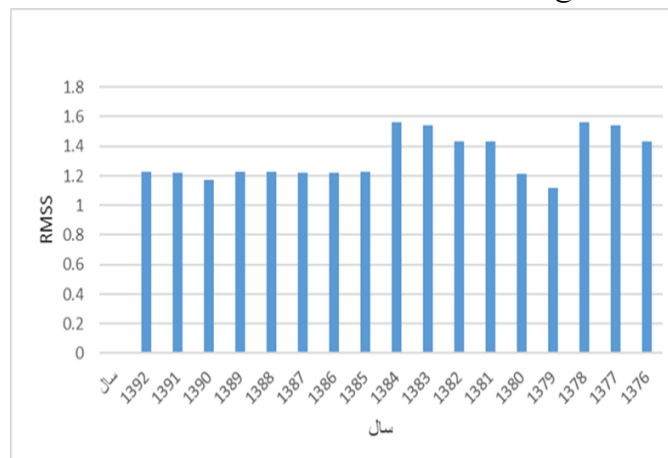


Fig 9. Evaluation results of the Neural Network method in different years with RMSS statistics

همانند روش کریجینگ آماره RMSE به شکل بهتری توانسته است میزان خطا در سال های مختلف را به تصویر بکشد. بهترین دقت در این آماره مربوط به سال ۱۳۸۲ است.

۳-۴- انتخاب روش بهینه

برای انتخاب بهترین روش از بین مدل های مختلف کریجینگ و شبکه عصبی در نهایت از نتایج حاصل از آماره RMSE استفاده شده است. هر روشی که دقت بهتری را داشته باشد از نتایج آن برای بررسی روند تغییرات سطح تراز آب استفاده خواهد شد. در شکل (۱۰) نمودار مقایسه دقت روش ها در کنار هم نشان داده شده است.

شکل ۱۰- مقایسه همزمان روش کریجینگ و روش شبکه عصبی RBF

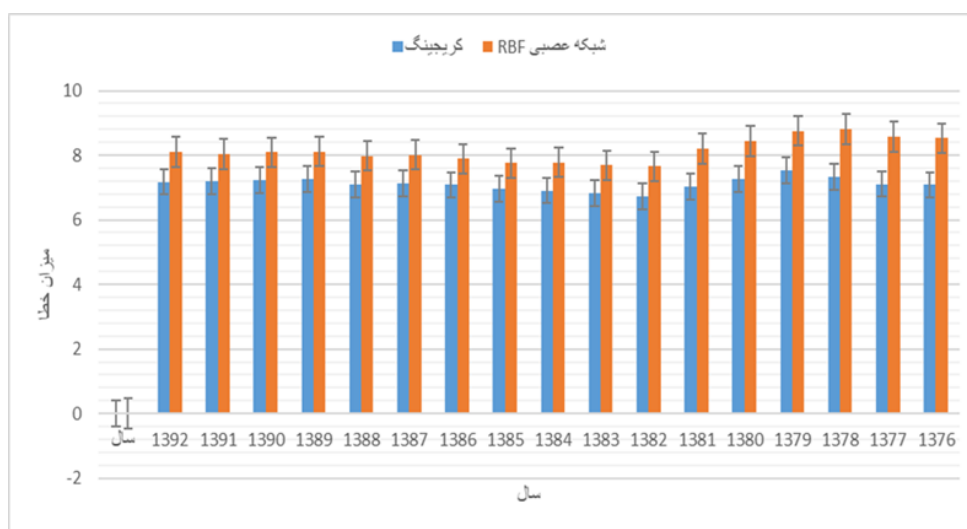


Fig10. Simultaneous comparison of the Kriging method and RBF Neural Network method

همان گونه که شکل (۱۰) نشان می دهد روش کریجینگ در همه سال ها توانسته دقتی به مراتب بالاتر از روش شبکه عصبی به دست آورد؛ از این رو از نقشه های این روش برای بررسی روند تغییرات تراز آب استفاده شد.

۳-۵- بررسی روند تغییرات تراز آب

برای بررسی روند مکانی - زمانی تغییرات سطح تراز آب در دشت میناب از آزمون من کندال استفاده شده است. آزمون من - کندال یکی از مناسب ترین روش ها برای تحلیل زمانی - مکانی داده های سری زمانی به منظور روندیابی فضایی است. روندیابی فضایی در نرم افزار ادریسی صورت گرفت. مدل های مختلفی برای روندیابی فضایی در نرم افزار ادریسی وجود دارد که همه آن ها محاسبات را بر پایه نقشه های رستری انجام می دهند؛ بنابراین این قابلیت وجود دارد که علاوه بر بررسی میزان تغییرات و روند آن ها، به صورت بصری و بر روی نقشه روند و شدت تغییرات بررسی شود. از جمله این مدل ها که بر اساس نوع روند و میزان اهمیت تغییرات دسته بندی می شوند می توان به موارد زیر اشاره کرد: آماره R^2 : در این آماره ها میزان ضریب همبستگی حداقل

مربعات در سری‌های زمانی (نقشه‌های سالانه تراز آب) با استفاده از یک رابطه خطی محاسبه می‌شود. در شکل (۱۱) نقشه R2 برای سری‌های زمانی ارائه شده است.

شکل ۱۱- نقشه R2 روندهای تراز آب زیرزمینی

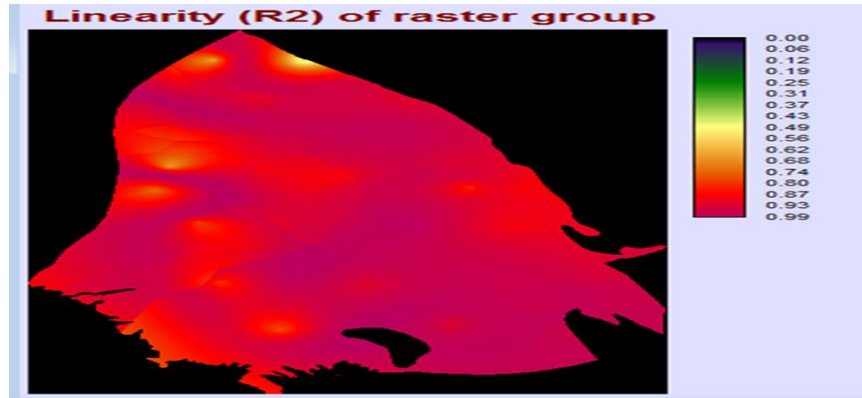


Fig 11. R2 map of groundwater level trends

در مناطقی که میزان R2 کمتر باشد میزان تغییرات بیشتر است و بر عکس در مناطقی که میزان R2 به ۱ نزدیک‌تر است باشد میزان تغییرات کمتر است. همانگونه که مشخص است در بخش‌های مختلف منطقه مورد مطالعه تغییراتی در طی زمان صورت گرفته است و میزان این تغییرات از توزیع یکسانی برخوردار نیست.

علاوه بر R2 از نقشه روند خطی (OLS) که ضریب شیب رگرسیون حداقل مربعات معمولی بین ارزش هر پیکسل در طول زمان در یک سری کاملاً خطی را محاسبه می‌کند استفاده شده است. نتیجه بیان نرخ تغییرات در هر مرحله زمان است. به این معنی که هر پیکسل در نقشه خروجی نشان می‌دهد که شیب خط به صورت صعودی است یا نزولی و شدت آن نیز مشخص می‌شود. شکل (۱۲) روند خطی OLS از سری زمانی داده‌های درون‌یابی شده به روش کریجینگ را نمایش می‌دهد.

شکل ۱۲- روند خطی OLS از سری زمانی داده‌های درون‌یابی شده به روش کریجینگ

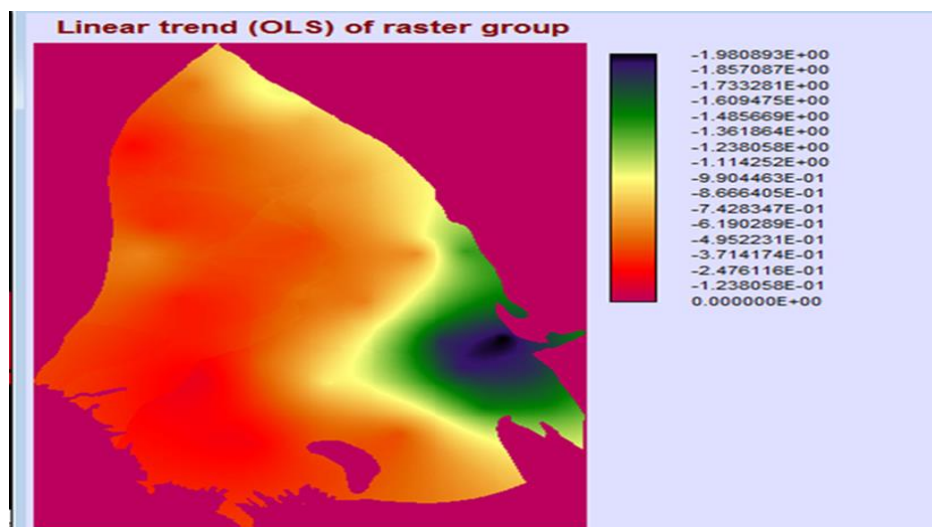


Fig 12. OLS linear trend of the interpolated data time series using the Kriging method

همان گونه که مشخص است روند کاهشی در تمام منطقه وجود داشته است. شرق منطقه مورد مطالعه روند نزولی با نرخ تغییرات نزدیک به ۲- دارد و در مقایسه با سایر مناطق شدت تغییرات و میزان کاهش بیشتر بوده است. هر چه به سمت غرب حرکت کنیم روند تغییرات کاهش می یابد و در برخی مناطق روند ثابتی را داشته است.

مدل روندیابی من کندال نیز روندهای کاهشی و یا افزایشی پدیده ها را بررسی می کند. آزمون من کندال جزو روش های تجزیه و تحلیل پارامتریک رگرسیون خطی می باشد. نتایج روش من کندال بین اعداد ۱- و ۱ قرار دارد. عدد یک به این معنی است که پدیده مورد مطالعه در آن منطقه بیشترین تغییرات افزایشی را داشته است و ۱- به این معنی است که پدیده مورد مطالعه در آن مکان بیشترین تغییرات کاهشی را داشته است و صفر به معنی عدم تغییر در پدیده مورد مطالعه می باشد. این روش مشابه به روندیابی میانه محاسبه می شود. شکل (۱۳) روند من کندال از سری زمانی داده های درون یابی شده به روش کریجینگ را نمایش می دهد.

شکل ۱۳- روند من کندال از سری زمانی داده های درون یابی شده به روش کریجینگ

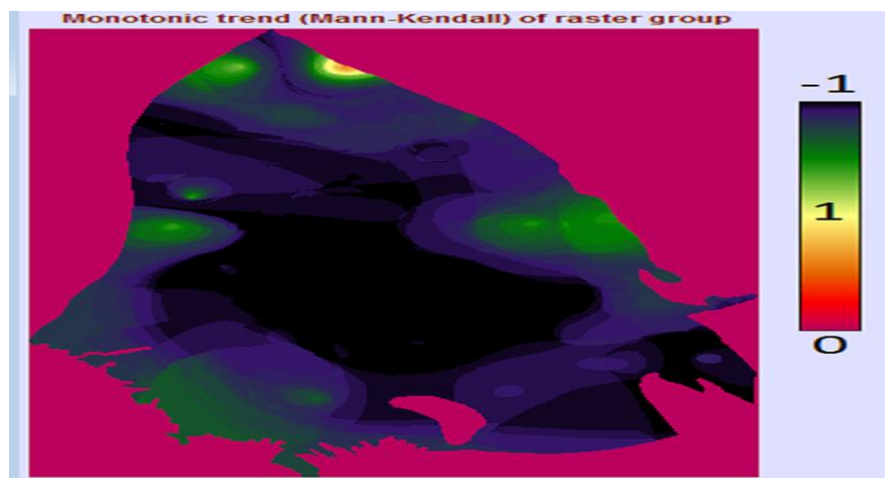


Fig 13. Man-Kendall trend of the interpolated data time series by Kriging method

باتوجه به شکل، روند مثبت و افزایش در منطقه به جز در بخش کوچکی که با رنگ زرد است وجود ندارد. در تمام بخش های مرکزی روند کاهشی با شدت بالا و نزدیک ۱- مشاهده می شود. شمال منطقه نیز روند کاهشی را نمایش می دهد با این تفاوت که از شدت کمتری نسبت به بخش مرکزی برخوردار است. برخی از مناطق در شرق و غرب منطقه روند تقریباً ثابتی را نشان می دهند.

۴- نتیجه گیری

بخش اعظمی از منابع آب دنیا، منابع آب زیرزمینی است. رشد سریع جمعیت جهان و توسعه کشاورزی در دهه های گذشته و جوابگو نبودن میزان آب های سطحی به نیازهای بشر منجر به افزایش روند پمپاژ آب و در نتیجه افت سطح آب زیرزمینی و تهی شدن سفره ها شده است. تهی شدن سفره آب زیرزمینی و پی آمدهای آن از جمله افزایش هزینه های استحصال آب، نشست زمین و کاهش کیفیت آب، امروزه به یک مشکل جهانی تبدیل شده و در مناطق مختلف دنیا نیز شاهد چنین وضعیتی هستیم. ایران نیز از جمله کشورهایی است که به دلیل کمبود منابع آب سطحی، بیشترین آب مصرفی در کشاورزی را از آب های زیرزمینی تأمین می کند؛ بنابراین کمبود منابع آب زیرزمینی یکی از بحران های زیست محیطی حال حاضر کشور محسوب می شود، به طوری که

بسیاری از سفره‌های آب کشور به دلیل برداشت بیش از حد در شرایط بحرانی قرار دارند. در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران این منابع اهمیت بسیار زیادی دارند. این پژوهش با هدف مدل‌سازی مکانی و زمانی تراز آب‌های زیرزمینی در محدوده مورد مطالعه (دشت میناب) با استفاده از مدل‌های کریجینگ و شبکه عصبی مصنوعی صورت گرفت. به منظور شناخت و ارزیابی آثار برداشت بی‌رویه از سفره آب زیرزمینی دشت میناب و آسیب‌پذیری منطقه از این مسئله، ابتدا اطلاعات موجود مربوط به منابع آبی (چاه‌های مشاهده‌ای) و هیدروژئولوژیکی دشت در دوره زمانی ۱۷ ساله مبنای کار قرار گرفت. جهت مطالعه تغییرات کمی آب‌های زیرزمینی، اطلاعات مربوط به موقعیت مکانی و متوسط سطح آب چاه‌های مشاهده‌ای محاسبه شد. سپس برای پهنه‌بندی تراز آب زیرزمینی دشت میناب علاوه بر روش زمین‌آماري کریجینگ از روش توابع پایه شعاعی (RBF) که مبتنی بر شبکه عصبی است نیز استفاده شد. در این زمینه با استفاده از تکنیک‌های زمین‌آمار و شبکه عصبی مدل‌های درونیابی اجرا و تغییرات به‌صورت زمانی و مکانی در سطح دشت میناب بررسی شد. برای بررسی تغییرات از روش سری زمانی من‌کنندال استفاده شده است و مدل‌سازی مکانی - زمانی در طی سال‌های مورد بررسی صورت گرفت.

نتایج این پژوهش نشان داد که میانگین تراز طی سال‌های ۱۳۷۶ تا ۱۳۹۲ روندی کاهشی داشته است. هر چند که در برخی سال‌ها مثل سال ۱۳۸۴ افزایشی اندک در تراز آب وجود داشت ولی به نظر می‌رسد افزایش بارندگی در این سال دلیل این امر بوده و این امر یک روند محلی بوده است و روند کلی کاهشی می‌باشد. از سال ۱۳۸۵ همچنان روند کاهش شدید است و این روند با کاهشی تقریباً یکسان تا سال ۱۳۸۸ ادامه دارد. هر چند در سال ۱۳۸۹ و ۱۳۹۰ اندکی از میزان کاهش تراز آب کاسته شده ولی روند کاهشی همچنان تا سال ۱۳۹۲ ادامه داشته است. علاوه بر بررسی نتایج درونیابی، مدل‌های مختلف مورد استفاده در این تحقیق مورد ارزیابی قرار گرفت. جهت ارزیابی و تعیین بهترین مدل، با استفاده از محاسبه شاخص‌های ارزیابی متقاطع، میزان دقت هر کدام از نقشه‌ها تعیین گردید. میانگین مطلق خطا (MAE)، میانگین خطای انحراف (MBE) و ضریب تعیین (R2) نقشه‌ها برای مقایسه نتایج استفاده شد. همچنین با استفاده از آماره RMSE بهترین مدل درونیابی انتخاب شد. نتایج حاکی از آن بود که در میان روش‌های کریجینگ روش کریجینگ ساده‌نمایی با ضریب تعیین ۰/۸۹ بیشترین همبستگی را در بین سایر مدل‌ها داراست. برای ارزیابی نتایج درونیابی مربوط به تراز آب زیرزمینی دشت میناب با استفاده از روش RBF از میانگین مطلق خطا (MAE)، میانگین خطای انحراف (MBE) و ضریب تعیین (R2) نقشه‌ها استفاده شد. نتایج نشان داد که روش اسپلاین کاملاً منظم با ضریب تعیین ۰/۶۷ بیشترین همبستگی را در بین سایر مدل‌ها داراست.

برای انتخاب بهترین روش از بین مدل‌های مختلف کریجینگ و شبکه عصبی در نهایت از نتایج حاصل از آماره RMSE استفاده شد و مشخص شد که روش کریجینگ در مقایسه با روش RBF به شکل بهتری تغییرات تراز آب را در دشت میناب مدل‌سازی کرده است. آخرین گام در پژوهش حاضر بررسی روند تغییرات بوده است. یافته‌ها نشان داد که روند کاهشی در تمام منطقه وجود داشته است. شرق منطقه مورد مطالعه نیز روند نزولی با نرخ تغییرات نزدیک به ۲- داشت. همچنین روند مثبت و افزایش در منطقه به جز در بخش کوچکی وجود نداشت و در تمام بخش‌های مرکزی نیز روند کاهشی با شدت بالا و نزدیک ۱- مشاهده شد. شمال منطقه نیز روند کاهشی را نمایش داد با این تفاوت که از شدت کمتری نسبت به بخش مرکزی برخوردار بود. همچنین تمامی نقشه‌های پهنه‌بندی روند مکانی-زمانی نشان از آن دارد که روند کاهشی تراز آب زیرزمینی دشت میناب از نظر توزیع مکانی با هم متفاوت است و در بخش‌های مختلف تراز آب با شدت متفاوتی تغییر یافته است.

۵- تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منافی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

۶- منابع

- Affandi, A. & Watanabe, K. (2007). Daily groundwater level fluctuation forecasting using soft computing estimation of reference evapotranspiration from pan evaporation in a semi-arid environment. *Irrigation Science*.
- Ahmadizadeh, M., & Maroufi, P. (2017). Application of Bayesian analysis and particle filter in rainfall-runoff models and uncertainty analysis, *Journal of Water and Soil Protection Research*, 24(1), 251. <https://doi.org/10.22069/jwfsst.2017.12108.2663>. (In Persian)
- Aziz, O. I. A., & Burn, D. H. (2006). Trends and variability in the hydrological regime of the Mackenzie River Basin. *Journal of hydrology*, 319(1-4), 282-294.
- Bierkens, M. (1998). Modeling water table fluctuations by means of a stochastic differential equation. *Water Resources Reserch*, 34(10), 2485-2499.
- Boroujerdi, A., & Feridouni, M. (2015). Simulation of underground water level using support vector models and its comparison with fuzzy neural models and neural wavelet (case study of Shiraz Plain), Water Engineering Conference and Exhibition. <https://civilica.com/doc/407797/>. (In Persian)
- Connor KM, Davidson JR, Churchill LE, Sherweed A, & Foa EB. (2012). Psychometric properties of the Social Phobia Inventory (SPIN). *The British Journal of Psychiatry*, 176, 379-386.
- Fakher, A. (2000). Application of physical models in teaching engineering courses. *Iranian Engineering Educational Journal*, 2(6), 39-72. <https://doi.org/10.22047/ijec.2000.2014>. (In Persian)
- Feridouni, M., & Khojand, M. (2014). Application of geostatistical model (Kriging) and its integration with neural fuzzy inference system in underground water level zoning (case study: Shiraz plain), 2nd National Conference on Water, Man and Earth. <https://cpro.ir/product/586034/>. (In Persian)
- Ghorbani, M.A., Khatibi, R., Hasanpour Kashani M., & Kisi, O. (2019). Comparison of three artificial intelligence techniques for discharge routing. *Journal of Hydrology*, 4. <https://doi.org/10.22034/hydro.2024.60223.1310>. (In Persian)
- Hosseini Soumae, M., Roshani, A., & Zebah, A. (2020). Modeling of groundwater level changes based on methods based on artificial intelligence (Case study of Zaveh Torbat Heydariyeh plain). *Water-shed Management*, 11(21), 223-235. <https://doi.org/10.52547/jwmr.11.21.223>. (In Persian)
- Kazemi, T., Fadeli, M., & Farzin, M. (2021) Assessment and analysis of peak flow with different return periods for Bashar river using HEC-HMS model, *Iranian Water Resources Research*, 17(4), 50-69. <https://doi.org/20.1001.1.17352347.1400.17.4.3.0>. (In Persian)
- Mashaikhi, S., Ebrahimi, K., Modaresi, F., & Iraqhinejad, S. (2022). Integrated management of Minab basin water resources using modified sustainability index, *Iranian Journal of Irrigation and Water Engineering*, 12(47). (In Persian)
- Mir Arabi, A., & Nakhai, M. (2008). Prediction of underground water level fluctuations in Birjand Plain using artificial neural network, 12th conference of Geological Society of Iran. (In Persian)
- Moghadisi, M., Mardian, M., & Parsa, M. (2021). Comparison and evaluation of smart models and geostatistics in order to analyze the spatial changes of groundwater quality (Dasht Kamijan), *Watershed Management Research Journal*, 12(24), 54 -64. <https://doi.org/10.52547/jwmr.12.24.54>. (In Persian)
- Mubaraki, M. & Fereidoni, M. (2015). Simulation of underground water level using the combination of wavelet, neural fuzzy models and its comparison with the neural fuzzy model, International Conference on New Research Achievements in Civil Engineering and Urban Architecture. (In Persian)

- Nayak, P., Satyaji Rao, Y.R. & Sudheer, K.P. (2001). Groundwater level forecasting in a shallow aquifer using artificial neural network approach. *Water Resources Management*, 20,77-90.
- Rajaei, T. & Zainivand, A. (2014). Modeling the underground water level using the hybrid wavelet-artificial neural network model (case study: Sharifabad plain), *Reist Civil and Environmental Engineering Journal*, 44.4(77), 51-63. (In Persian)
- Ramezani Charmehineh, A. & Zounematkermani, M. (2017). Investigating the efficiency of support vector regression, multilayer perceptron neural network and multivariable linear regression methods to predict the level of underground water (case study: Shahrekord Plain). *Watershed Management Research Journal*, 8(15), 1-12 . <https://doi.org/10.29252/jwmr.8.15.1>. (In Persian)
- Sarzabi, H. & Esmaili, K. (2013). Investigation and quantitative modeling of groundwater (Case study: Neishabur Plain), *Irrigation Engineering Sciences (Agriculture Scientific Journal)*, 36(4). <https://doi.org/20.1001.1.25885952.1392.36.4.8.5>. (In Persian)
- Shirzaei, S. (2019). A review of variable selection methods in regression models with time series errors, Master's Thesis, Shahrood University of Technology. (In Persian)
- Yazidi, A., Davari, K., Alizadeh, A., Kahraman, B., & Haqati Moghadam, S.A. (2007). Prediction of water level using artificial neural networks (case study: Neishabur Plain). *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 1(2), 59-71. (In Persian)