

مدل سازی و پایش شاخص های کیفیت آب زیرسطحی دشت سیستان با استفاده از سامانه های اطلاعات جغرافیایی

حلیمه پیری

دوره ۵، شماره ۱، بهار ۱۳۹۸، صفحات ۲۳ - ۱۵

Vol. 5(1), Spring 2019, 15 - 23

DOI: 10.22034/jewe.2019.138356.1268

Modeling and Monitoring Subsurface Water  
Quality Indicators of Sistan Plain using  
Geographic Information Systems

Piri H.



[www.jewe.ir](http://www.jewe.ir)

OPEN ACCESS

ارجاع به این مقاله: پیری ح. (۱۳۹۸). مدل سازی و پایش شاخص های کیفیت آب زیرسطحی دشت سیستان با استفاده از سامانه های اطلاعات جغرافیایی. مجله محیط زیست و مهندسی آب، دوره ۵، شماره ۱، صفحات: ۲۲ - ۱۵.

**Citing this paper:** Piri H. (2019). Modeling and monitoring of subsurface water quality indicators of Sistan Plain using geographic information systems. J. Environ. Water Eng., 5(1), 15- 22. DOI: 10.22034/jewe.2019.138356.1268

# مدل‌سازی و پایش شاخص‌های کیفیت آب زیرسطحی دشت سیستان با استفاده از سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی

حلیمه پیری

استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل، زابل، ایران

\*نویسنده مسئول: h\_piri2880@yahoo.com

## مقاله اصلی

تاریخ دریافت: [۱۳۹۷/۰۴/۱۱]

تاریخ بازنگری: [۱۳۹۷/۰۸/۱۸]

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۷/۱۱/۲۴]

## چکیده

بررسی تغییرات مکانی پارامترهای کیفی آب زیرزمینی در شناخت وضعیت کیفی آبخوان، منابع آلوده‌کننده و تعیین مناسب‌ترین راهکارهای مدیریتی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. روش‌های زمین‌آمار و GIS می‌توانند در این راستا ابزار مفیدی باشند. هدف از این پژوهش ارزیابی روش‌های زمین‌آمار به‌منظور بررسی و تحلیل مکانی میزان شوری، نیترات و کل مواد جامد محلول آب‌های زیرسطحی دشت سیستان در شمال استان سیستان و بلوچستان می‌باشد. برای این منظور از روش‌های زمین‌آمار کریجینگ معمولی (OK) و کریجینگ ساده (SK) و روش‌های معین مانند عکس فاصله (IDW)، تخمین‌گر موضعی (LPI)، تخمین‌گر عام (GPI) و تابع شعاعی (RBF) استفاده گردید. در ابتدا نرمال بودن داده‌ها مورد بررسی قرار گرفت و داده‌های غیرنرمال به روش لگاریتمی نرمال شد. سپس تجزیه و تحلیل واریوگرام‌ها انجام گرفت. ارزیابی نتایج با استفاده از روش ارزیابی متقابل صورت گرفت. نتایج برازش مدل‌ها نشان داد شاخص EC و TDS از مدل گوسی و شاخص نیترات از مدل کروی پیروی می‌کند و روش کریجینگ ساده جهت تهیه نقشه پهنه‌بندی شوری و نیترات و کریجینگ معمولی جهت تهیه نقشه پهنه‌بندی تغییرات کل مواد جامد محلول در منطقه مناسب می‌باشد. همچنین نتایج نشان داد که از نظر کل جامدات محلول، آب‌های زیرسطحی منطقه بر اساس دیاگرام شولر در دسته خوب تا قابل قبول و از نظر کیفیت شوری جهت استفاده در کشاورزی در گروه دارای مشکل متوسط تا شدید قرار می‌گیرند.

**واژه‌های کلیدی:** کیفیت آب؛ دیاگرام شولر؛ روش کالیفرنیا؛ دشت سیستان.

## ۱- مقدمه

رشد جمعیت و در نتیجه بهره‌برداری بیش از حد از منابع محدود آب زیرزمینی از یک طرف و آلوده شدن آن‌ها به سبب فعالیت‌های گوناگون زیستی و کشاورزی بشر از طرف دیگر زنگ خطر بحران آب را به صدا در آورده است. در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان مانند ایران، آب‌های زیرزمینی سهم به‌سزایی در تأمین آب آشامیدنی و کشاورزی دارند و کاهش کیفیت این منابع خطری بزرگی در راه توسعه پایدار کشور به‌شمار می‌رود (Shabani 2009). این مسئله به‌خصوص در استان سیستان و بلوچستان که با خشکسالی‌های پی‌در پی و کمبود شدید منابع آب سطحی مواجه بوده است، از اهمیتی دو چندان برخوردار است. از طرفی دشت سیستان با داشتن مقادیر بارندگی  $500 \text{ mm/y}$  در سال و میزان تبخیر بیش از  $500 \text{ mm/y}$  جزو مناطق خشک و کویری قرار داشته و با محدودیت منابع آب با کیفیت مناسب روبرو است. بنابراین، لزوم پیشگیری از آلودگی منابع آب، بهبود کیفیت‌های موجود و استفاده از آب‌های با کیفیت نازل‌تر در این منطقه اجتناب‌ناپذیر می‌باشد.

مهم‌ترین عوامل تشدیدکننده آلودگی آب در منطقه سیستان، خشک‌سالی‌های اخیر و کمبود شدید آب، وجود لایه سخت غیرقابل نفوذ در عمق خاک، وضعیت زمین‌شناسی منطقه، تبخیر و تعرق شدید بیش از  $4500 \text{ mm/y}$  و همچنین ورود جریانات آلوده سطحی (در اثر استفاده بی‌رویه از آفت‌کش‌ها) از کشورهای مجاور می‌باشد. به‌طوری‌که پیش‌بینی می‌شود در آینده نزدیک یکی از مهم‌ترین معضلات پیش‌روی کشاورزی سیستان، آلودگی شدید آب خواهد بود. لذا حفظ کیفیت فیزیکی و شیمیایی و بیولوژیکی منابع آب سرلوحه فعالیت بسیاری از سازمان‌هایی است که به‌نحوی با این منابع سروکار دارند. از این‌رو، مطالعه دقیق آب‌های زیرسطحی منطقه به‌منظور ارائه راه‌کارهایی در جهت حفاظت، مدیریت و بهره‌برداری بهینه از این منابع امری ضروری به‌نظر می‌رسد.

روش‌های مختلفی برای مطالعه و پهنه‌بندی تغییرات ویژگی‌های آب‌های زیرزمینی وجود دارد که هر کدام از آن‌ها بسته به شرایط منطقه و وجود آمار و اطلاعات، دارای دقت‌های مختلفی می‌باشند. از جمله روش‌های میان‌یابی برای مطالعه و تهیه نقشه‌های تغییرات کیفیت آب‌های زیرزمینی را می‌توان

روش‌های زمین‌آمار کریجینگ و کوکریجینگ و روش‌های معین مانند روش عکس‌فاصله، تابع شعاعی و غیره ذکر نمود. انتخاب روش مناسب پهنه‌بندی و تهیه نقشه تغییرات ویژگی‌های کیفی آب‌های زیرزمینی گامی اساسی و مهم در مدیریت منابع آبی منطقه به‌شمار می‌رود. Lalehzari and Tabatabaei (2010) خصوصیات شیمیایی آب زیرزمینی دشت شهرکرد را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد میزان سختی و باقی‌مانده خشک در قسمت‌های جنوبی و غلظت نیترات در قسمت شمالی دشت حداکثر است. Shabani (2010) به ارزیابی روش‌های زمین‌آماری در تهیه نقشه‌های کیفی آب‌های زیرزمینی دشت نی‌ریز فارس پرداخت. نتایج مطالعه وی نشان داد روش کریجینگ ساده نسبت به روش تابع شعاعی برتری دارد و به‌عنوان روش مناسب جهت تهیه نقشه نهایی تغییرات شوری و نیترات در دشت نی‌ریز انتخاب گردید. در مطالعه کیفیت آب‌های زیرزمینی دشت‌های کشاورزی تریفا در شمال شرق مراکش از نظر اندازه‌ی نیترات آمونیوم و آلودگی‌های باکترولوژیکی از روش کریجینگ معمولی برای مطالعه و پهنه‌بندی نقشه کیفی آب‌های زیرزمینی استفاده شد. نتایج این پژوهش نشان‌دهنده تغییرات معنی‌دار در مقایسه با مطالعات قبلی بود و گزارش شد که اگر هیچ نوع برنامه‌ی دراز مدت بازدارنده صورت نگیرد، توسعه‌ی اراضی کشاورزی در این مناطق باعث تخریب کیفیت آب‌های زیرزمینی می‌گردد (Fetouani et al. 2008) جهت تهیه نقشه‌ی خطر نیترات در دشت مادنا در ایتالیا از روش کریجینگ گسسته و روش‌های شبیه‌سازی استفاده شد. نتایج پژوهش نشان داد که روش کریجینگ گسسته برای مطالعه‌ی خطر تخریب کیفیت آب‌های زیرزمینی مناسب است (Barcea et al. 2008).

به ارزیابی روش‌های مختلف درون‌یابی در پهنه‌بندی شوری آب زیرزمینی شهرکرد نشان داد که همبستگی مکانی خوبی بین داده‌های اندازه‌گیری‌شده در نقاط مختلف دشت شهرکرد وجود دارد و روش کریجینگ معمولی به‌عنوان مناسب‌ترین روش میان‌یابی در تهیه نقشه تغییرات مکانی شوری دشت شهرکرد انتخاب شد (Moradi et al. 2011). بررسی تغییرات مکانی نیترات دشت کردان با استفاده از زمین‌آمار نشان داد روش کریجینگ با کمترین خطا بیشترین دقت را در برآورد میزان

مذکور به اطلاعات ناحیه‌ای از روش‌های زمین‌آماری کریجینگ ساده (SK) و معمولی (OK) و روش‌های معین مانند عکس فاصله (IDW)، تابع شعاعی (RBF)، تخمین‌گر عام (GPI) و تخمین‌گر موضعی (LPI) استفاده گردید. به‌منظور تشریح پیوستگی مکانی متغیرها، نیم‌تغییرنما (سمی‌واریوگرام) داده‌ها به‌طور جداگانه در محیط نرم‌افزار  $GS^+$  ترسیم شد. برای انتخاب روش مناسب میان‌یابی در تهیه نقشه تغییرات ویژگی‌های کیفی آب‌های زیرزمینی دشت سیستان از روش ارزیابی متقابل استفاده گردید.

## ۲-۴- کریجینگ

در چند دهه گذشته روش کریجینگ ابزاری بنیادین و کارآمد بین روش‌های زمین‌آمار بوده است. در این روش با وزن‌دهی به داده‌های اطراف نقطه موردبرآورد کمیت مجهول به‌دست می‌آید. در روش‌های زمین‌آمار، اطلاعات موقعیت مکانی داده‌ها نیز در محاسبات وارد شده و سعی می‌شود تا رابطه‌ای بین آن‌ها تعریف گردد. معمولاً این ارتباط و همبستگی بین نمونه‌ها به‌صورت یک مدل ریاضی ارائه می‌شود تا از این طریق بتوان تغییرپذیری را شبیه‌سازی نمود. بنابراین، برای آن‌ها همبستگی مکانی را می‌توان تعریف نمود. ابزارهای مختلفی برای بررسی همبستگی وجود دارد که می‌توان به تغییرنما اشاره نمود. این روش از انواع کریجینگ معمولی، کریجینگ تعمیم‌یافته و کریجینگ گسسته تشکیل شده است.

کریجینگ معمولی (OK) روش تخمین‌گری است که مقادیر یک متغیر را در نقاط نمونه‌برداری نشده به‌صورت ترکیب خطی از مقادیر همان متغیر در نقاط اطراف آن در نظر می‌گیرد. برآورد مقدار  $Z$  در نقطه  $x_0$  به‌وسیله‌ی این روش به‌صورت رابطه (۱) بیان می‌شود.

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

که در این رابطه  $Z_{OK}^*(x_0)$  و  $\lambda_1$  به‌ترتیب تخمین متغیر در نقطه  $x_0$  و وزن‌های آماری اختصاص یافته به مقادیر  $Z$  در نقاط  $x_i$  و  $n$  تعداد نمونه به‌کار رفته در کریجینگ می‌باشد (Habibi et al. 2008).

گاهی اوقات دسترسی به اطلاعاتی در مورد میانگین متغیر تصادفی از طریق تجارب و مطالعات قبلی امکان‌پذیر است.

نیترا در منطقه داشت (Ostai et al. 2012). مدل‌سازی تغییرات مکانی برخی از ویژگی‌های شیمیایی آب‌های زیرزمینی دشت شریف‌آباد قم به‌کمک روش‌های زمین‌آمار نشان داد روش‌های زمین‌آمار برتری بالایی نسبت به روش‌های معین داشته و بهترین روش برای مدل‌سازی تغییرات مکانی پارامترهای کلر، مجموع کاتیون‌ها و شوری روش کوکریجینگ و برای پارامترهای بی‌کربنات و سدیم روش کریجینگ می‌باشند (Habibi Arbatani et al. 2009). لذا، با توجه به مطالب ارائه شده هدف از این پژوهش تعیین مناسب‌ترین روش میان‌یابی به‌منظور مطالعه‌ی تغییرات کیفی و مکانی برخی ویژگی‌های آب زیرسطحی دشت سیستان جهت مصارف شرب و کشاورزی است.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه سیستان با طول جغرافیایی  $61^\circ$  و  $31'$  شرقی و عرض جغرافیایی  $30^\circ$  و  $55'$  شمالی در ارتفاع  $480$  m از سطح دریا قرار دارد. آب و هوای منطقه بر اساس طبقه‌بندی کوپن در اقلیم خشک بسیار گرم، با تابستان‌های گرم و خشک و بر اساس طبقه‌بندی آمبرژه جزء مناطق بیابانی معتدل طبقه‌بندی می‌شود. میانگین درازمدت بارندگی در منطقه  $55$  mm است. میزان تبخیر سالانه به‌طور متوسط  $4500-5000$  mm و میانگین دراز مدت درجه حرارت منطقه  $21/7^\circ C$  می‌باشد.

### ۲-۲- روش نمونه‌برداری

در این مطالعه  $57$  حلقه چاهک در دشت سیستان با پراکنش مناسب انتخاب و سپس به کمک بطری‌های نمونه‌برداری به حجم  $1000\text{ cm}^3$  نمونه‌هایی برداشت و جهت تعیین پارامترهای کیفی آب شامل شوری (EC)، کل مواد جامد محلول (TDS) و نیترا به آزمایشگاه ارسال شدند. هم‌زمان با برداشت هر نمونه، مختصات جغرافیایی هر حلقه چاه به‌کمک GPS در سیستم UTM یادداشت گردید.

### ۲-۳- آنالیز زمین‌آمار

در این مرحله کلیه داده‌های مربوط به هر پارامتر از نظر نرمال بودن توسط آزمون کلموگورف-اسمیرنوف مورد بررسی قرار گرفتند. پس از انجام این مراحل برای تبدیل داده‌های نقطه‌ای

روش‌های به‌کار رفته در شبیه‌سازی‌های زمین‌آماری می‌باشد  
با این تفاوت که در آن مدل‌سازی تغییرنا وجود ندارد.

روش تخمین‌گر عام GPI یک تکنیک درون‌یابی فراگیر است  
که جزء روش‌های قطعی سریع بوده و بسیار مناسب سطوحی  
است که به آهستگی و تدریجی تغییر می‌کنند. در این روش از  
طریق یک تابع ریاضی چند جمله‌ای، یک رویه هموار به  
داده‌های نقطه‌ای ورودی برازش داده می‌شود این رویه به تدریج  
تغییر می‌کند و الگوی تغییرات داده‌ها را ضبط می‌کند  
(Kurtulus and Razack 2010). این روش با توان ۱ بررسی  
شد.

روش چند جمله‌ای محلی (LPI) حداقل مجذورات متناسب را  
بین گره‌های شناسایی شده در محدوده بیضوی شکل، به‌عنوان  
وزن گره تخصیص می‌دهد. در این روش ضرایب تخصیص داده  
شده، با به‌دست آوردن رابطه درجه اول، دوم و سوم بین مقادیر  
 $X$ ،  $Y$  و  $Z$  و حداقل‌سازی اطلاعات محاسبه‌شده، درون‌یابی  
صورت می‌گیرد (رابطه ۴) (Marofi et al. 2010).

$$\sum_{i=1}^n W_i [F(x_i \times y_i) - z_i]^2 = \text{minimize} \quad (4)$$

## ۲-۵- تعیین مناسب‌ترین روش میان‌یابی

پس از رسم واریوگرام و برازش مناسب و میان‌یابی به روش‌های  
مذکور، برای تعیین روش مناسب میان‌یابی سه معیار مختلف  
متوسط خطا (ME) (رابطه ۵)، متوسط قدرمطلق خطا  
(MAE) (رابطه ۶)، و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)  
(رابطه ۷) مورد استفاده قرار گرفت:

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z^*(x_i) - Z(x_i)) \quad (5)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Z^*(x_i) - Z(x_i)| \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(Z^*(x_i) - Z(x_i))^2}{n}} \quad (7)$$

در رابطه‌های فوق،  $n$ : عبارت از تعداد داده‌های مورد استفاده  
است. این سه معیار اطلاعات مختلفی راجع به درجه اعتبار  
نتایج تخمین فراهم می‌کنند. ME: متوسط انحراف روش،  
MAE: مقدار خطای روش بدون در نظر گرفتن علامت و  
RMSE: هم مقدار انحراف میانگین و هم انحراف واریانس را

سیستم کریجینگ ساده با توجه به اطلاعات حاضر، چهارچوب  
محاسباتی مورد نظر را فراهم می‌کند و به شکل ترکیب خطی  
وزن‌دار است. معادله‌ی آن به‌صورت رابطه (۲) می‌باشد:

$$Z_{SK}^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) + \{1 - \sum_{i=1}^n \lambda_i\} \mu \quad (2)$$

که در این رابطه  $Z_{SK}^*(x_0)$  و  $\lambda_1$  به‌ترتیب تخمین متغیر در  
نقطه  $X_0$  و وزن‌های آماری کریجینگ ساده اختصاص یافته به  
مقادیر  $Z$  در نقاط  $x_i$  و  $\mu$  میانگین داده‌های مشاهداتی و  $n$   
تعداد نمونه به‌کار رفته در کریجینگ می‌باشد (Marofi et al. 2010).

در روش وزن‌دهی معکوس (IDW) برای هر یک از نقاط اندازه-  
گیری بر اساس فاصله بین آن نقطه تا موقعیت نقطه مجهول،  
وزنی در نظر گرفته می‌شود. سپس این اوزان توسط توان وزن-  
دهی کنترل می‌شود، به‌طوری که توان‌های بزرگ‌تر اثر نقاط  
دورتر از نقطه مورد برآورد را کاهش داده و توان‌های کوچک‌تر  
وزن‌ها را به‌طور یکنواخت‌تری بین نقاط همجوار توزیع می‌کنند.  
البته باید توجه داشت که این روش بدون توجه به موقعیت و  
آرایش نقاط، فقط فاصله آن‌ها را در نظر می‌گیرد، یعنی نقاطی  
که دارای فاصله یکسانی از نقطه برآورد هستند، دارای وزن  
یکسانی می‌باشند. مقدار عامل وزنی با استفاده از رابطه (۳)  
محاسبه می‌شود:

$$\lambda_i = \frac{D_i - \alpha}{\sum_{i=1}^n D_i - \alpha} \quad (3)$$

که در این رابطه،  $\lambda_1$ : وزن ایستگاه  $\alpha$ ،  $D_i$ : فاصله ایستگاه  $\alpha$   
تا نقطه مجهول، و  $\alpha$ : توان وزن‌دهی می‌باشد. توابع پایه شعاعی،  
از نوع شبکه‌های رو به جلو همراه با یک لایه میانی هستند.  
شبکه‌های توابع پایه شعاعی دارای پایه ریاضیاتی بسیار قوی،  
بر مبنای فرضیه منظم‌سازی برای حل مسائل مشکل می‌باشند.  
در روش معکوس فاصله سطح تخمین از مقادیر مشاهده‌ای عبور  
می‌نماید. اما این روش هیچ‌گاه مقادیر بیشتر از حداکثر و کمتر  
از حداقل داده‌های مشاهده‌ای را تخمین نمی‌زند. روش پایه  
شعاعی بر اساس پنج تابع مختلف درون‌یابی اطلاعات را انجام  
می‌دهد که هسته اصلی توابع، مجموعه مقادیر مجذورات ( $h^2$   
 $+ R^2$ ) می‌باشد. مقادیر  $R$  و  $h$  به‌ترتیب فاکتور هموارکننده و  
ترسیم ناهمسانگرد مرتبط با فاصله نقطه تا گره می‌باشد  
(Taghizadeh-Mehrjardi et al. 2008). این روش مشابه با



این داده‌ها زمانی که مرتب شوند حاوی اطلاعات مهم و مفیدی می‌باشند. ضریب تغییرات به‌عنوان یک شاخص، تغییرات کلی از ناهمگنی پارامترهای کیفیت آب زیرزمینی را نشان می‌دهد. بر اساس طبقه‌بندی نلسون و بوما، اگر ضریب تغییرات کمتر از ۱۰٪ باشد، تغییرپذیری ضعیف، اگر بیش از ۱۰٪ باشد، متوسط و در نهایت ضریب تغییرات برابر با ۱۰٪ نشان‌دهنده تغییرات بسیار شدید متغیر می‌باشد (Bameri et al. 2012). بنابراین، همان‌طور که در جدول (۱)، خلاصه آماری مربوط به پارامترهای مورد بررسی، دیده می‌شود، می‌توان شدت تغییرات شوری و مواد جامد محلول مورد اندازه‌گیری در منطقه مورد مطالعه را متوسط و شدت تغییرات نیترات در منطقه را بسیار شدید در نظر گرفت.

نتایج مربوط به آزمون کلموگورف-اسمیرنوف نشان داد که داده‌های مربوط به نیترات و شوری نرمال نبوده و لذا از لگاریتم داده‌ها برای نرمال‌سازی داده‌های نیترات و از روش ریشه دوم برای نرمال‌سازی داده‌های شوری استفاده گردید. که در جدول (۱) نتایج نشان داده شده است.

جدول ۱- تحلیل آماری کیفیت آب زیرسطحی

Table 1 Statistical analysis of subsurface water quality

ویژگی	واحد	حداکثر	حداقل	میانگین	انحراف معیار	چولگی	کشیدگی	ضریب تغییرات (%)
شوری (EC)	Ds/m	8.9	0.53	2.85	1.3	2.13	8.52	45.6
شوری* (EC)		2.98	0.73	1.65	0.36	0.4	4.17	22.3
کل مواد جامد محلول (TDS)		900	102	425.05	155.75	0.4	1.4	36.64
نیترات (NO <sub>3</sub> )	mg/l	4.96	0.085	0.83	0.8	3.6	15.46	97.36
نیترات** (NO <sub>3</sub> )		1.6	-2.41	-0.46	0.73	-0.05	1.75	159.02

\* استفاده از ریشه دوم جهت نرمال‌سازی؛ \*\* استفاده از روش لگاریتم جهت نرمال‌سازی داده‌ها

داد که ویژگی‌های مورد ارزیابی دارای همبستگی قوی می‌باشند. پس از به‌دست آوردن تغییرنماهای تجربی، مدل تئوری بر تغییرنما به کمک نرم افزار GS<sup>+</sup> برازش داده شد و انتخاب تغییرنما مناسب به داده‌های خصوصیات آب از بین مدل‌های خطی به سقف<sup>۱</sup>، خطی<sup>۲</sup>، کروی<sup>۳</sup>، نمایی<sup>۴</sup> و گوسی<sup>۵</sup> و بر اساس حداقل مجموع مربعات (RSS) و حداکثر میزان R<sup>2</sup> صورت گرفت. بهترین مدل برازش داده شده به تغییر نما و عامل‌های

نشان می‌دهد. به‌طور کلی بهترین روش، روشی است که کمترین مقدار متوسط انحراف روش (بدون در نظر گرفتن علامت)، مقدار خطای روش و مقدار انحراف میانگین را داشته باشد. تجزیه و تحلیل داده‌ها با نرم افزار SPSS (نسخه ۱۶) انجام گردید و از نرم‌افزارهای GS<sup>+</sup> و ArcGIS (نسخه ۹.۱) برای تحلیل‌های زمین آماری و تهیه نقشه استفاده شد. در نهایت با استفاده از روش‌های مختلف و استانداردهای موجود مانند دیگرام شولر و دانشگاه کالیفرنیا نقشه‌های به‌دست آمده جهت مصارف شرب و کشاورزی پهنه‌بندی و مناطق بحرانی بر روی آن‌ها مشخص شد.

### ۳- یافته‌ها و بحث

#### ۳-۱- محاسبات آماری

برای هرگونه مطالعه یا محاسبه آماری لازم است که داده‌های آزمایشی و مزرعه‌ای که به‌صورت توده‌ای از اعداد خام هستند، به‌شکل خاصی منظم شوند. تنظیم داده‌های عددی در جدول‌ها و ترسیم نمودار آن‌ها، از اولین مراحل تجزیه آماری می‌باشد و

پس از بررسی آمار توصیفی، همبستگی مکانی و همسان‌گردی ویژگی‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفتند. تعیین همبستگی و تغییرات مکانی با استفاده از روش‌های زمین آمار، محاسبه و الگوسازی تغییرنما را طلب می‌کند. در نتیجه به‌منظور تعیین و مطالعه ساختار تغییرات مکانی ویژگی‌های اندازه‌گیری شده آب‌های زیرسطحی دشت سیستان، تغییرنمای تجربی برای هر شاخص محاسبه و ترسیم گشت. بررسی تغییرنمای تجربی نشان

<sup>4</sup> Exponential

<sup>5</sup> Gaussian

<sup>1</sup> Linear to sill

<sup>2</sup> Linear

<sup>3</sup> Spherical

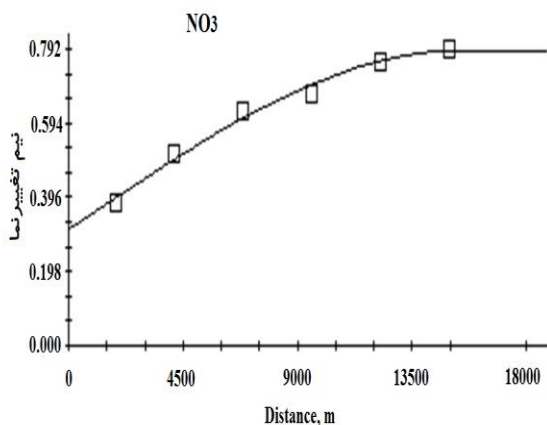
شکل (۲) نیز نیم تغییرنماهای مربوط به هر پارامتر را نشان می‌دهد.

مربوط به آن برای هر کدام از ویژگی‌های اندازه‌گیری شده در جدول (۲) خلاصه شده است.

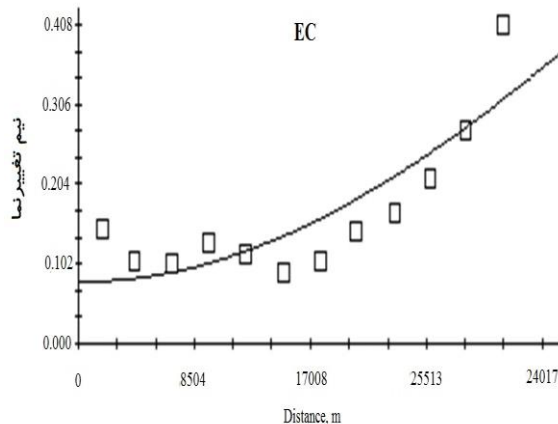
جدول ۲ - بهترین مدل برازش داده شده به تغییرنما و ضرایب مربوط به آن

Table 2 The best fitted model for change and its related coefficients

پارامتر	مدل	اثر قطعه‌ای C0	آستانه C0+C	شعاع تاثیر (متر) A0	تناسب مکانی C/(C0+C)	RSS	r <sup>2</sup>
EC	گوسی	0.07	1.41	71100	0.94	0.02	0.74
TDS	گوسی	0.03	0.24	71100	0.87	2.5 E-0.04	0.87
NO <sub>3</sub>	کروی	0.3	0.78	15460	0.6	1.5 E-0.03	0.98

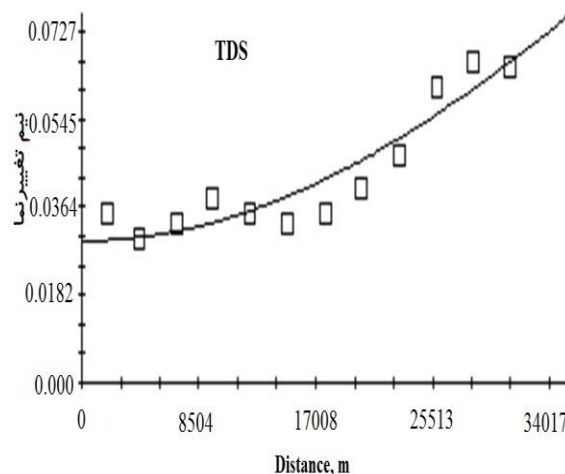


ب- NO<sub>3</sub>



الف- EC

نتایج برازش مدل‌ها نشان داد شاخص EC و TDS از مدل گوسی و شاخص نیترات از مدل کروی پیروی می‌کند. یکسانی مدل واریوگرام دو شاخص EC و TDS را می‌توان به وجود همبستگی معنی‌دار و قوی بین آن‌ها و تغییرات مکانی مشابه آن‌ها در آبخوان نسبت داد. (Ostovari (2011) در آبخوان دشت لردگان نیز برای EC و TDS مدل گوسی را مناسب دانستند. مدل برازش داده شده به EC و TDS در پژوهش Taghizadeh-Mehrjardi et al (2008) در دشت اردکان یزد نیز یکسان اما کروی بود و نیز همبستگی قوی بین این دو پارامتر وجود داشت. (Heshmati and Beigi (2011) در ارزیابی کیفی آب‌های زیرزمینی شهرکرد برای EC و TDS مدل گوسی را برازش دادند. بنابراین می‌توان گفت الگوی تغییرات مکانی پارامترهای کیفی آب زیرزمینی از دشتی به دشت دیگر متفاوت و ناشی از تفاوت در جنس زمین منطقه مورد مطالعه می‌باشد. نسبت واریانس قطعه‌ای به آستانه



ج- TDS

شکل ۲ (الف) - نیم تغییرنماهای مربوط به پارامترهای مختلف  
Fig. 2 The half of the changes related to different parameters: a) EC, b) NO<sub>3</sub> and c) TDS

توزیع مقدار یک متغیر در سطح سفره می‌تواند ناشی از عکس-العمل سازند زمین‌شناسی و ویژگی‌های آب باشد. همچنین، نقشه‌های توزیع یک متغیر می‌تواند در نحوه مدیریت آب یا مدیریت کاربرد آن مفید واقع شود. لذا، پس از تجزیه و تحلیل تغییرنما، درون‌یابی داده‌ها به کمک نرم افزار ArcGIS به وسیله روش‌های زمین‌آماری کریجینگ ساده (SK) و کریجینگ معمولی (OK) و روش معین وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW)، تابع شعاعی (RBF)، تخمین‌گر عام (GPI) و تخمین‌گر موضعی (LPI) انجام گرفت که نتایج آن در جدول (۳) آورده شده است.

یا واریانس کل ( $C/(C_0+C)$ ) شاخصی از قدرت ساختار مکانی متغیرها می‌باشد. چنانچه این نسبت کمتر از  $0/25$  گردد، نشان‌دهنده همبستگی مکانی ضعیف می‌باشد. اگر این نسبت بین  $0/25-0/75$  قرار گیرد، بیانگر وابستگی مکانی متوسط، چنانچه این نسبت بزرگ‌تر از  $0/75$  گردد، نشان‌دهنده وابستگی مکانی قوی خواهد بود (Habashy et al. 2007). در این پژوهش EC و TDS از همبستگی قوی و نیترات از همبستگی مکانی متوسط برخوردار بود.

### ۳-۲- پهنه‌بندی شاخص‌های کیفی آب زیرسطحی دشت سیستان

جدول ۳- نتایج آنالیز آماری برای هر یک از روش‌های معین و کریجینگ  
Table 3 Statistical analysis results for each of the specified methods and kriging

R <sup>2</sup>	RMSE	MAE	ME	روش	پارامتر
0.23	2.05	2.59	20.12	عکس فاصله (IDW)	EC
0.14	1.65	3.48	18.41	تابع شعاعی (RBF)	
0.21	1.3	2.76	19.83	تخمین‌گر عام (GPI)	
0.18	1.34	3.9	17.62	تخمین‌گر موضعی (LPI)	
0.78	1.03	1.87	15.26	کریجینگ ساده (SK)	
0.75	1.1	2.01	16.45	کریجینگ معمولی (OK)	
0.56	132.27	78.69	22.16	عکس فاصله (IDW)	TDS
0.43	132.81	91.63	35.41	تابع شعاعی (RBF)	
0.29	162.41	145.34	46.74	تخمین‌گر عام (GPI)	
0.36	155.76	107.25	39.82	تخمین‌گر موضعی (LPI)	
0.55	131.37	79.42	29.36	کریجینگ ساده (SK)	
0.69	140.86	56.82	15.35	کریجینگ معمولی (OK)	
0.54	0.49	1.67	3.87	عکس فاصله (IDW)	نیترات
0.56	0.44	1.65	3.75	تابع شعاعی (RBF)	
0.43	0.82	2.02	5.04	تخمین‌گر عام (GPI)	
0.49	0.55	1.98	4.52	تخمین‌گر موضعی (LPI)	
0.71	0.4	0.89	2.23	کریجینگ ساده (SK)	
0.68	0.43	1.02	3.19	کریجینگ معمولی (OK)	

انجام گرفت که در شکل (۳) به‌عنوان نمونه برای پارامتر EC نشان داده شده است. نتایج این تحقیق در خصوص روش برتر با نتایج (Shabani 2010) در ارتباط با ارزیابی روش‌های زمین‌آماری در تهیه نقشه‌های کیفی آب زیرزمینی دشت نیریز فارس هم‌خوانی دارد. جدول (۴) نیز به‌عنوان نمونه مساحت مربوط به هر یک از طبقات EC را نشان می‌دهد.

جدول (۳) نشان می‌دهد که روش‌های زمین‌آماری کریجینگ نسبت به سایر روش‌ها تخمین بهتری را برآورد می‌کند. همچنین برای پارامترهای EC و نیترات با توجه به  $R^2$  بالا و RMSE پایین، روش کریجینگ ساده و برای TDS کریجینگ معمولی به‌عنوان روش‌های برتر میان‌یابی انتخاب شدند. لذا پهنه‌بندی این پارامترها بر اساس روش برتر در محیط GIS



جدول ۵- مساحت مربوط به هر یک از طبقات TDS در دشت

سیستان

Table 5 Area for each TDS class in Sistan Plain

مساحت (%)	مساحت (km <sup>2</sup> )	طبقات TDS (mg/l)
3086	7602594	102-294.98
22081	45097324	398.84-294.98
43.13	85256961	454.73-398.84
14.48	28634203	484.81- 454.73
4.86	9610217	501-484.81
3.41	6741634	517.18-501
3.71	7349187	547.26-517.18
2.52	4997122	603.15-547.26
1.18	2351406	900-603.15

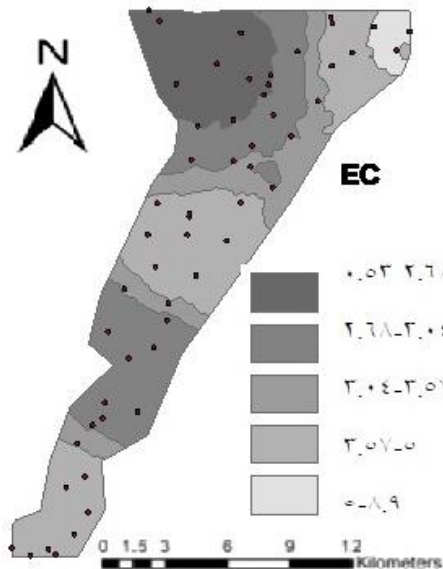
تغییرات نیترات در نقاط مرکزی منطقه بیشتر از سایر نقاط است و قسمت‌های شمالی و جنوبی منطقه دارای مقادیر کمتری نیترات می‌باشند. غلظت EC، TDS و نیترات در نقاط مرکزی منطقه مورد مطالعه بیشتر از سایر نقاط است که علت آن را می‌توان به وجود استخرهای پرورش ماهی که در این نقاط وجود دارد، نسبت داد.

از نظر کیفیت TDS بر اساس دیاگرام شولر (که نمودار آن در این مقاله ارائه نشده است) آب‌های زیرسطحی منطقه جهت مصارف شرب در دو دسته خوب و قابل قبول قرار می‌گیرند. که وضعیت قابل قبول بیشترین درصد را به خود اختصاص داده است.

از نظر شوری کیفیت منابع آب منطقه در سه دسته بدون مشکل تا مشکل شدید قرار می‌گیرد که دسته بدون مشکل در برابر دسته‌های دیگر بخش بسیار جزئی را به خود اختصاص داده است. بنابراین می‌توان گفت از نظر شوری آب‌های منطقه جهت استفاده در آبیاری با استفاده از روش کالیفرنیا دارای مشکلات متوسط تا شدید می‌باشند. لذا باید مدیریت لازم جهت استفاده از این آب‌ها در کشاورزی اتخاذ گردد. از نظر وجود نیترات در آب‌ها می‌توان گفت آب‌های مورد استفاده هیچ‌گونه مشکلی از این نظر جهت استفاده در آبیاری ندارند.

#### ۴- نتیجه‌گیری

هدف از انجام این تحقیق ارزیابی روش‌های زمین‌آمار در تهیه نقشه‌های کیفیت آب‌های زیرسطحی این منطقه از نظر میزان



شکل ۳- تغییرات EC آب‌های زیرسطحی منطقه بر اساس روش کریجینگ ساده (mmohs/cm)

Fig. 3 EC changes in subsurface waters of the area based on simple kriging method (mmohs/cm)

جدول ۴- مساحت مربوط به هر یک از طبقات EC در دشت

سیستان

Table 4 Area of each EC class in Sistan Plain

مساحت (%)	مساحت (km <sup>2</sup> )	طبقات EC (mmohs/cm)
17.78	35131945	-0.53- 2.68
28.46	56248845	2.68-3.04
15.83	31289379	3.04-3.57
35.03	69234160	3.57-5
2.9	5736319	5-8.9

با توجه به شکل (۳) می‌توان گفت نقاط جنوب‌غربی و مرکزی منطقه مورد مطالعه دارای شوری بالاتری نسبت به سایر نقاط می‌باشند. همچنین بیشترین درصد مساحت شوری (۳/۰۳/۳۵٪) با توجه به جدول (۴) برای شوری‌های ۳/۵۷-۵ mmohs/cm می‌باشد. مقدار TDS از ۱۰۷ تا ۹۰۰ متغیر است. بیشتر ازاضی منطقه از TDS نسبتاً پایینی برخوردار است و با توجه به جدول (۵) قسمت اعظم آب زیرسطحی منطقه (۴۳/۱۳٪) دارای TDS برابر با ۳۹۸/۸۴ تا ۴۵۴/۷۳ می‌باشد.

۲- نتایج تحقیق نشان داد آب زیرسطحی دشت سیستان از نظر کیفیت TDS جهت مصارف شرب بر اساس دیاگرام شولر در دسته خوب تا قابل قبول قرار دارد و هیچ‌گونه محدودیتی برای استفاده در شرب ندارد.

۳- آب زیرسطحی دشت سیستان از نظر شوری جهت استفاده در آبیاری مطابق روش کالیفرنیا دارای مشکلات متوسط تا شدیدی می‌باشد

شوری، املاح کل محلول و نیترات و پهنه‌بندی آن‌ها جهت مصارف شرب و آبیاری می‌باشد. برای این منظور از روش‌های زمین آماری کریجینگ ساده (SK) و معمولی (OK) و روش‌های معین مانند عکس‌فاصله (IDW)، تابع شعاعی (RBF)، تخمین‌گر عام (GPI) و تخمین‌گر موضعی (LPI) استفاده گردید.

۱- از بین روش‌های مذکور روش‌های زمین آماری کریجینگ ساده جهت تهیه نقشه شوری و نیترات و کریجینگ معمولی جهت تهیه نقشه تغییرات کل مواد جامد محلول مناسب می‌باشد.

## Referances

- Bameri A., Khormalali F., Kiani F. and Dehghani A. A. (2012). Spatial variability of soil organic carbon on different slope positions of loess hillslopes in Toshan area, Golestan Province. *J. Water Soil Conserv.*, 19(2), 43-61 [In Persian].
- Barcae E. and Passarella G. (2008). Spatial evaluation of the risk of groundwater quality degradation: A comparison between disjunctive kriging and geostatistical simulation. *J. Environ. Monit. Assess.*, 137(1-3), 261-273.
- Fetouani S., Sbaa M., Vanclooster M. and Bendra B. (2008). Assessing groundwater quality in the irrigated plain of Triffa (North-east Morocco). *J. Ag. W. Man.*, 95, 133-142.
- Habibi Arbatani A., Ahmadi A. S. and Fattahi M. (2009). Modeling the spatial variation of some of the chemical properties of groundwater using statistical methods. *J. Water Manag. Sci. Eng.*, 7(3), 23-33 [In Persian].
- Heshmati S. and Beigi Harchagani H. (2011). Zoning of Shahrekord underground water quality indices for use in designing irrigation systems. *J. Water Res. Agri.*, 1(26), 44-59 [In Persian].
- Kurtulus B. and Razack M. (2010). Modeling daily discharge responses of a large karstic aquifer using soft computing methods: Artificial neural network and neuro-fuzzy. *J. Hydrul.* 381, 101-111.
- Lalehzari R. and Tabatabaei S. A. (2010). Groundwater quality analysis in Shahrekord aquifer. *J. Environ. Studies*, 36(53), 55-62 [In Persian].
- Marofi S., Toranjeyan A. and Zare Abyaneh H. (2010). Evaluation of geostatistical methods for estimating electrical conductivity and pH of stream drained water in Hamedan-Bahar Plain. *J. Water Soil Conserv.*, 16(2), 169-187 [In Persian].
- Moradi M., Vagharfard H., Khorani A. and Mahmoudinejad V. (2011). Evaluation of different interpolation methods in zoning of groundwater salinity using cross-validation technique (Case study of Shahrekord plain). *J. Remote. Sens. GIS.*, 3(1), 35-44 [In Persian].
- Osati Kh., Salajegh A. and Arekhi S. (2012). Spatial variations of nitrate concentrations in groundwater by geostatistics (Case study: Kurdan Plain). *J. Range Watershed Manag.*, 65(4), 461-472 [In Persian].
- Shabani M. (2010). Evaluation geostatistical methods for mapping of groundwater quality and their zoning. Case study: Neyriz Plain, Fars Province. *J. Nat. Geogr. Lar*, 4(13), 93-96 [In Persian].
- Shabani M. (2009). Determination of the most suitable geostatistical method for the pH and TDS mapping in groundwater resources (Case study: the Arsanjan Plain). *Water Eng.*, 1(1), 47-57 [In Persian].

Taghizadeh-Mehrjardi R., Zareian-Jahromi M.,  
Mahmoudi Sh. and Heidari A. (2008). Spatial  
distribution of groundwater quality with

geostatistics (Case Study: Yazd-Ardakan  
Plain). World Appl. Sci. J., 4(1), 9-17.

Archive of SID

# Modeling and Monitoring of Subsurface Water Quality Indicators of Sistan Plain using Geographic Information Systems

Halimeh Piri

Assist. Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Zabol University, Zabol, Iran

\*Corresponding author: [h\\_piri2880@yahoo.com](mailto:h_piri2880@yahoo.com)

## Original Paper

Received: July 02, 2018

Revised: November 09, 2018

Accepted: February 13, 2019

## Abstract

Investigating the spatial variation of groundwater quality parameters is important in identifying the quality of the aquifer and contaminating resources, and determining the most appropriate management solutions. Geostatistical and GIS methods can be useful tools in this regard. The aim of this study was to evaluate the geostatistical methods in order to investigate and analyze the spatial amount of salinity, nitrate, and total dissolved solids of subsurface waters of Sistan Plain in northern Sistan and Baluchestan province. For this purpose, ordinary Kriging (OK) and simple Kriging (SK) and certain methods such as inverse distance weighing (IDW), local polynomial interpolation (LPI), global polynomial interpolation (GPI) and radial basis function (RBF) were used. First, the normality of the data was investigated and the non-normal data were normalized by logarithmic method. Then analysis of variograms was performed. The results were evaluated using a cross-evaluation method. The fitting results of the models showed that the EC and TDS indices follow the Gaussian model and the nitrate index follows the spherical model, and simple kriging method is suitable for salinity and nitrate mapping and ordinary kriging for zoning maps of TDS. Moreover, based on the Schuller's diagram, in terms of TDS, sub-surface waters of the region are classified as good to acceptable and in terms of salinity for agricultural use in the moderate to severe problem class.

**Keywords:** Water Quality; Schuller's Diagram; California Method; Sistan Plain.