



## Technical Note

Evaluation of Corrosion and Scaling Potential  
of Groundwater in Dezful-Andimeshk Plain  
Using Geostatistical MethodsM. Ahmadi<sup>1\*</sup> and A. Hooshmand<sup>2</sup>

## Abstract

This study investigated the potential of corrosion and scaling for groundwater in the Dezful- Andimeshk plain. Four indicators of Langlier Saturation Index (LSI), Ryznar Stability Index (RSI), Puckorius scaling Index (PSI), and Larson-Skold Index (LS) were used. For zoning the indicators, this study used the kriging and cokriging methods with fit variograms. According to the results, the Spherical and Gaussian variogram model were best fitting variograms for spatial correlation of indicators. In addition, kriging was the best method for Puckorius and Langlier. For Larson-Skold this was the cokriging method and there was no difference between the methods for the Ryznar index. The groundwater in major part of the Plain was corrosive and in other areas it showed scaling potential. To use the groundwater in this region, provisions should be used; aeration to remove iron and manganese, cathodic protection, lining, and enameling and painting to prevent corrosion and scaling using inhibitors such as phosphate compounds. In addition, reduces extraction from groundwater resources is recommended to reduce the corrosion potential.

**Keywords:** Corrosion, Cokriging, Dezful-Andimeshk, Groundwater Kriging, Scaling.

Received: December 10, 2016

Accepted: July 15, 2017

## یادداشت فنی

بررسی پتانسیل خوردگی و رسوب‌گذاری آب‌های  
زیرزمینی دشت دزفول اندیمشک با استفاده از تکنیک  
زمین‌آمارمریم احمدی<sup>۱\*</sup> و عبدالرحیم هوشمند<sup>۲</sup>

## چکیده

در این مطالعه به بررسی پتانسیل رسوب‌گذاری و خوردگی آب زیرزمینی دشت دزفول- اندیمشک پرداخته شده است. به منظور محاسبه پتانسیل رسوب‌گذاری و خوردگی از چهار شاخص لانژیئر، رایزنر، پوکوریوس و لارسون-اسکولد استفاده شد. برای پهنه‌بندی شاخص‌ها با برازش واریوگرام از روش کریجینگ و کوکریجینگ استفاده شد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد واریوگرام نوع کروی و گوسین بهترین نوع واریوگرام جهت برازش همبستگی مکانی شاخص‌ها می‌باشد. علاوه بر این برای شاخص‌های لانژیئر و پوکوریوس روش کریجینگ و برای شاخص لارسون-اسکولد روش کوکریجینگ مناسب‌تر می‌باشد و برای شاخص رایزنر تفاوتی بین روش‌ها وجود ندارد. همچنین قسمت‌های اعظم دشت مشکل خوردگی داشته و مابقی قسمت‌ها رسوب‌گذار هستند. برای استفاده از آب زیرزمینی این منطقه باید از هوادهی برای حذف آهن و منگنز، حفاظت کاتدی، آسترپوشی، لعاب‌کاری و رنگ‌کاری برای جلوگیری از خوردگی و استفاده از مواد بازدارنده رسوب از جمله ترکیبات فسفات و همچنین برداشت کمتر از منابع آب برای جلوگیری از رسوب‌گذاری انجام شود.

**کلمات کلیدی:** خوردگی، رسوب‌گذاری، کریجینگ، کوکریجینگ، آب زیرزمینی، دزفول اندیمشک.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۵/۹/۲۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۶/۴/۲۴

1- PhD. Candidate, Irrigation and drainage Department, Water Engineering Faculty, Shahid Chamran University, Ahwaz, Iran. Email: ahmady\_ma120@yahoo.com

2- Associate Professor, Irrigation and drainage Department, Water Engineering Faculty, Shahid

\*- Corresponding Author

۱- دانشجوی دکتری گروه آبیاری و زهکشی دانشکده علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز.

۲- دانشیار گروه آبیاری و زهکشی دانشکده علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز.

\*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان تابستان ۱۳۹۷ امکانپذیر است.

## ۱- مقدمه

در این مطالعه به منظور بررسی خوردگی و رسوب گذاری از شاخص های لانژیلر، رایزنر، پوکوریوس و لارسون-اسکلوند و برای میانبندی و پهنه بندی پارامترها از روش کریجینگ استفاده شد.

## ۲- روش تحقیق

این تحقیق در منطقه دزفول و اندیمشک انجام گردید. محدوده مطالعاتی دزفول-اندیمشک با مساحتی حدود ۲۰۷۳ کیلومتر مربع و مختصات جغرافیایی ۰۳' و ۳۲° تا ۳۳' و ۳۲° عرض شمالی و ۱۰' و ۴۸° تا ۳۷' و ۴۸° طول شرقی در شمال-شمال غرب استان خوزستان واقع شده است و مهمترین شهرهای آن دزفول، اندیمشک و شوش می باشد. شکل ۱ محدوده مورد مطالعه و چاه های مشاهداتی را نشان می دهد.

در این مطالعه از آمار کیفیت آب زیرزمینی بین سال های ۱۳۹۱-۱۳۸۰ استفاده شد. بر اساس آمار موجود، ۸۴ چاه مشاهداتی جهت بررسی مورد استفاده قرار گرفت. جهت بررسی خوردگی و رسوب گذاری از چهار شاخص لانژیلر (LSI<sup>۱</sup>)، رایزنر (RSI<sup>۲</sup>)، پوکوریوس (PSI<sup>۳</sup>) و لارسون-اسکلوند (LS<sup>۴</sup>) به شرح جدول ۱ استفاده شد (Rafety, 1999; Puchorius and Broke, 1991):

در این روابط pH اسیدیته آب و pH<sub>C</sub> اسیدیته محاسباتی بوده که با استفاده از نمایه های مربوط به کاتیون ها، کلسیم و منیزیم و کرنات و بی کرنات به دست می آید. برای تشریح پیوستگی مکانی پارامترها از واریوگرام استفاده و پس از مشخص شدن بهترین واریوگرام از روش کریجینگ و کوکریجینگ به شرح زیر برای میانبندی استفاده شد. کریجینگ بهترین تخمین گر خطی نا اریب با کمترین مقدار واریانس می باشد که برای استفاده از آن داده ها باید نرمال باشند.

$$X^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i \times X_i \quad (2)$$

یکی از عوامل ارزیابی کیفیت آب، مسأله رسوب گذاری و خوردگی می باشد. آب می تواند باعث خوردگی خطوط انتقال و توزیع و نیز ایجاد لایه های ضخیم رسوبی بر روی سطوح و دیواره های تأسیسات تبادل حرارتی شود. خوردگی بر اساس یک واکنش فیزیکی شیمیایی بین یک ماده و محیط اطراف آن انجام می گیرد و به تغییر خواص آن ماده منجر می گردد (Mokhtari, 2010). خوردگی باعث انحلال و ورود میکروآلاینده هایی از قبیل مس، سرب، کادمیوم، روی، آهن و منگنز به داخل آب می شود. که این فرآیند باعث ایجاد ظاهر نامطلوب و بسیاری مشکلات اقتصادی و بهداشتی در آب می شود (Singly and Lee, 1984; Ehsani et al., 2013). Ehsani et al. (2013) نشان دادند آب زیرزمینی شهر ساری از نظر شاخص رایزنر رسوب گذار است. Shams et al. (2012) برای طیس، Mokhtari et al. (2010) برای اردبیل وضعیت سیستم های انتقال و توزیع آب آشامیدنی را از نظر پتانسیل رسوب گذاری و خوردگی مورد بررسی قرار دادند. در روش زمین آمار و کریجینگ برای تشریح پیوستگی مکانی از واریوگرام (متغیرنا) استفاده می شود. پیوستگی مکانی بدین معناست که نمونه های مجاور تا فاصله معینی به هم وابستگی دارند و چنین فرض می شود که این وابستگی بین نمونه ها را می توان به صورت مدل ریاضی تحت عنوان تغییرنا ( $\gamma(h)$ ) ارائه کرد.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} [Z(x+h) - Z(x)]^2 \quad (1)$$

در این رابطه  $Z(x+h)$  مقدار متغیر در نقطه  $x+h$ ،  $Z(x)$  مقدار متغیر در نقطه  $x$  و  $n$  تعداد جفت نمونه ها می باشد. هر تغییرنا شامل سه مشخصه دامنه، اثر قطعه ای و سقف می شود که سقف نشان دهنده واریانس نمونه ها است، دامنه تأثیر نشان دهنده فاصله ای است که در آن نمونه ها وابستگی مکانی دارند و اثر قطعه ای بیان کننده مؤلفه غیر ساختاری (تصادفی) واریانس می باشد (Oliver and Webster, 2014).

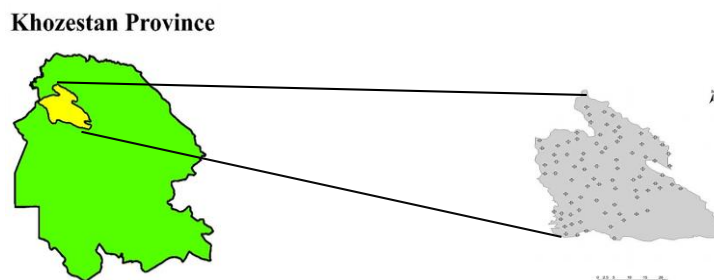


Fig. 1- Study area and observation wells

شکل ۱- محدوده مورد مطالعه و چاه های مشاهداتی مورد استفاده

**Table 1- Corrosion and Scaling indexes used in the study**  
**جدول ۱- شاخص‌های خوردگی و رسوب‌گذاری استفاده شده**

Index	Formula	Description
Langelier (LSI)	$LSI = pH - pH_C$	$LSI > 1$ : Scale forming, $LSI < 1$ : corrosion possible
Raisener (RSI)	$RSI = 2(pH_C) - pH$	$LSI > 6$ : corrosion possible, $LSI < 6$ : Scale forming
Puchorius scale	$PSI = 2(PH_C) - (1.465 * SAR + 4.54)$	$LSI > 6$ : corrosion possible, $LSI < 6$ : Scale forming
Larson-Skold	$LS = ([Cl^-] + [So_4^{2-}]) + ([Hco_3^-] + [Co_3^-])$	$LS < 0.8$ : chlorides and sulfate probably will not interfere with natural film formation, $0.8 < LS < 1.2$ : chlorides and sulfates may interfere with natural film formation. Higher than desired corrosion rates might be anticipated, $LS > 1.2$ the tendency towards high corrosion rates of a local type should be expected as the index increases

بر اساس نتایج به‌دست آمده بهترین مدل بر اساس کمترین مقدار باقیمانده و بیشترین ضریب تبیین به‌دست آمد. برای بررسی همبستگی از شاخص  $C0/(C0+C)$  استفاده شد که بر این اساس اگر مقدار شاخص کمتر از ۰/۲۵ باشد نشان‌دهنده همبستگی مکانی بالا می‌باشد که برای تمام شاخص‌ها همبستگی مکانی بالا بوده است. بطور کلی واریوگرام گوسین و کروی بهترین نوع واریوگرام برای شاخص‌های مورد نظر هستند. پس از برازش واریوگرام‌های هر متغیر برای استفاده از روش کوکریجینگ واریوگرام متقابل برای هر شاخص با شاخص یا پارامتری که بیشترین همبستگی را نشان داده به‌دست آمد. جدول شماره ۳ نتایج مربوط به برازش واریوگرام‌های متقابل برای هر شاخص را نشان می‌دهد.

پس از برازش واریوگرام‌ها مقادیر هر شاخص با استفاده از روش کریجینگ و کوکریجینگ محاسبه شد و مقدار خطای برآورد با استفاده از شاخص‌های آماری به‌دست آمد.

با توجه به نتایج به‌دست آمده در جدول ۴ برای شاخص‌های LSI و PSI روش کریجینگ مناسب‌تر است و برای شاخص LS روش کوکریجینگ مناسب‌تر می‌باشد و برای شاخص RSI تفاوتی بین روش‌ها وجود ندارد.

در این رابطه  $X^*$  مقدار برآورد شده،  $X_i$  مقدار متغیر در نقطه  $i$  و  $\lambda$  وزن مربوطه به هر نقطه مشاهده شده و  $n$  تعداد نقاط مشاهده شده می‌باشد (Oliver and Webster, 2014). در صورتی که از یک متغیر به اندازه کافی نمونه در دسترس نباشد و یا هدف تخمین با چند متغیر باشد، از روش کوکریجینگ استفاده می‌شود. در این روش با در نظر گرفتن یک متغیر کمکی در الگوریتم میانجی، بر اساس رابطه مکانی بین متغیر اصلی و کمکی تخمین صورت می‌پذیرد. برای استفاده از روش کریجینگ در ابتدا آمار موجود از نظر نرمال بودن در نرم‌افزار SPSS16 با استفاده از آزمون کولموگراف-اسمیرنوف بررسی شد و متناسب با نتایج حاصله از تبدیل لوگ نرمال یا ریشه مربعات در محیط نرم‌افزار GS+9 برای نرمال کردن داده‌ها استفاده شد. در نهایت جهت بررسی دقت نتایج از ضریب تبیین ( $R^2$ )، مجموع مربعات باقیمانده (RSS) و نسبت  $C0/(C0+C)$  که معیاری برای نشان دادن مقدار همبستگی مکانی در داده‌ها است و آماره‌های ریشه میانگین مربعات خطای نرمال (NMAE) شده و میانگین مربعات خطای مطلق نرمال (NRMSE) استفاده شد.

### ۳- نتایج و تحلیل نتایج

جهت بررسی پیوستگی مکانی بین پارامترها از چهارنوع واریوگرام شامل کروی، نمایی، گوسین و خطی استفاده شد. نتایج حاصل از برازش‌ها در جدول ۲ نشان داده شده است.

**Table 2- The results of variograms for each parameter**  
**جدول ۲- نتایج برازش واریوگرام مربوط به هر پارامتر**

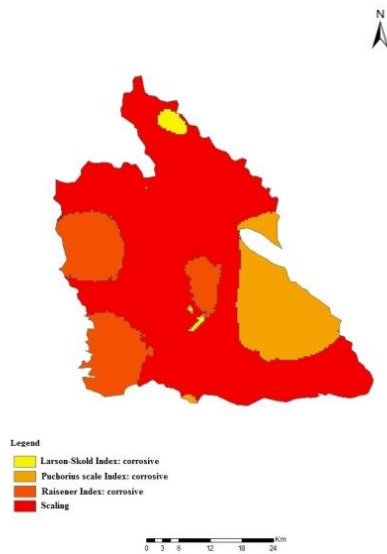
MODEL	Nugget (C <sub>0</sub> )	Sill (C <sub>0</sub> +C)	Range Parameter (A <sub>0</sub> )	RSS <sup>5</sup>	R <sup>2</sup>	C <sub>0</sub> /(C <sub>0</sub> +C)	
LSI	Gaussian	0.0004	0.02180	119800	$1.093 \times 10^{-4}$	0.88	0.02
RSI	Gaussian	0.0005	0.0065	88270	$2.15 \times 10^{-8}$	0.987	0.08
PSI	Spherical	0.002	0.075	72320	$2.51 \times 10^{-5}$	0.976	0.03
LS	Spherical	0.097	0.536	45250	$2.47 \times 10^{-3}$	0.983	0.18
SAR	Spherical	0.020	0.456	91090	$1.10 \times 10^{-3}$	0.979	0.04

**Table 3- The results of Cross Variogram of indexes**  
**جدول ۳- نتایج برازش واریوگرام متقابل مربوط به شاخص‌ها**

MODEL	Nugget (C <sub>0</sub> )	Sill (C <sub>0</sub> +C)	Range Parameter (A <sub>0</sub> )	RSS	R <sup>2</sup>	C <sub>0</sub> /(C <sub>0</sub> +C)
LSI * RSI Gaussian	-0.004	-0.0285	88030	1.093*10 <sup>-4</sup>	0.987	0.14
PSI* SAR Spherical	0.0005	0.0065	88270	2.15*10 <sup>-8</sup>	0.987	0.08
LS* EC Spherical	-0.280	-3.565	68290	0.251	0.95	0.08

**Table 4- Estimation errors of kriging and cokriging methods**  
**جدول ۴- مقدار خطای برآورد شده با روش کریجینگ و کوکریجینگ**

Parameters	Kriging		Cokriging	
	NRMSE <sup>7</sup>	NMAE <sup>6</sup>	NRMSE	NMAE
LSI	0.042	0.005	0.155	0.017
RSI	0.006	0.001	0.006	0.001
PSI	0.009	0.001	0.045	0.005
LS	1.19	0.131	0.748	0.083
SAR	0.542	0.060	0.023	0.113
EC	0.516	0.057	0.258	0.028



**Fig. 2- The integrated map of corrosion and scaling**  
**شکل ۲- نقشه کلی خوردگی و رسوب گذاری**

بر اساس نتایج حاصله محدودیتی از نظر خوردگی و رسوب گذاری برای مصارف آبیاری ندارد (شاخص لانژیلر) ولی با توجه به نتایج مابقی شاخص‌ها با توجه به استعداد خوردگی و رسوب گذاری برخی مناطق بهتر است برای مصارف آشامیدن تمهیدات لازم صورت گیرد. به طور کلی مناطق دارای خوردگی از نظر تمام شاخص‌ها، دارای فصل مشترک نمی‌باشد؛ ولی در مجموع ۳۲ درصد کل آب زیرزمینی منطقه از نظر چهار شاخص مورد استفاده خورنده است و مابقی دشت مشکل رسوب گذاری دارد (شکل ۲). در نهایت برای جلوگیری از مشکلات

بر اساس پهنه‌بندی انجام شده برای شاخص‌ها (شکل ۲) منطقه از نظر شاخص لانژیلر از نظر رسوب گذاری و خوردگی مشکل چندانی ندارد. در واقع بر اساس این شاخص تمام منطقه دارای رسوب گذاری خیلی کمی می‌باشد. بدین ترتیب با توجه به اینکه از این شاخص برای آبیاری تحت فشار استفاده می‌شود، پس منطقه از نظر رسوب گذاری کربنات کلسیم مسأله‌ای ندارد و استفاده از این آب‌ها در آبیاری تحت فشار بلامانع می‌باشد. از نظر شاخص رایزرنر ۸۴ درصد منطقه رسوب گذار و ۱۶ درصد آن خورنده می‌باشد. از آنجایی که شاخص رایزرنر برای سیستم‌های در حال جریان که سرعت آب در آن‌ها بیشتر از ۰/۶ متر بر ثانیه باشد (سیستم‌های انتقال آب) کاربرد دارد. (Rafety, 1999)، باید در سیستم‌های انتقال آب تمهیداتی از قبیل پوشش دار کردن لوله‌ها و یا تغییر جنس لوله‌ها انجام شود. همچنین با توجه به شاخص پوکوریوس ۸۵ درصد منطقه رسوب گذار و ۱۵ درصد آن خورنده است و بر اساس شاخص لارسون-اسکلوند در ۹۹ درصد منطقه تمایل به خوردگی و فقط یک درصد منطقه تمایل به تشکیل رسوب دارد.

#### ۴- نتیجه گیری

با توجه به نتایج به دست آمده روش کریجینگ و کوکریجینگ روش‌های مناسبی برای بررسی کیفیت آب‌های زیر زمینی و به طور ویژه خوردگی و رسوب گذاری هستند. با این وجود قضاوت در مورد رسوب گذاری و خوردگی منطقه بستگی به نوع استفاده از آب دارد؛ زیرا برای هر کاربرد از شاخص خاصی استفاده می‌شود و اهمیت این موضوع بخاطر مسائل بهداشتی در مصارف آشامیدنی بیشتر است.

Lyon S B (2010) Corrosion in natural waters. Revision of the third edition article 2.3 by CW, Drane and RJ, OlipHant

Mokhtari SA, Aalighadri M, Hazrati S, Sadeghi H, Gharari N, Ghorbani L (2010) Evaluation of corrosion and precipitation potential in ardebil drinking water distribution system by using Langelier and Ryznar Indexes. Journal of Health 1(1):14–23 (In Persian)

Oliver M A and Webster R (2014) A tutorial guide to geostatistics: Computing and modeling variograms and kriging. Catena 113:56–69

Puchorius PR and Broke JM (1991) A new practical index for calcium carbonate scale prediction in cooling tower system. Corrosion 47(4):280-284

Rafaty K (1999) Scaling in geothermal heat pump systems. US Department of Energy Idaho Operations Office785 DOE Place Idaho Falls, ID 83401

Shams M, Mohamadi A, and Sajadi A (2012) Evaluation of corrosion and scaling potential of water in rural water supply distribution networks of Tabas, Iran. World Applied Sciences Journal, 17(11):1484-1489

Singly C E and Lee T (1984) Determining internal corrosion potential in water supply system committee report, J. AWWA, August

خورندگی استفاده از مواد شیمیایی، هوادهی، حفاظت کاتدی، آستریوشی و رنگ کاری و به منظور جلوگیری از مشکلات خوردگی استفاده از ترکیبات فسفانه و کاهش برداشت از آب زیرزمینی پیشنهاد می‌شود (Ehsani, 2013; Hossini, 2003).

#### پی‌نوشت‌ها

1-LSI: Langlier Index

2-RSI: Raisener Index

3-PSI: Puchorius Scale Index

4-LS: Larson-SkoldIndex

5-RSS: Residual Sums of Squares

6-NMAE: Normalized Root Mean Squared Error

7-NRMSE: Normalized Mean Absolute Error

#### ۶- مراجع

Ehsani S, Salehpour M, EhsaniArdakani H, Abbasi P (2013) Assessment of salinity and corrosion potential of Sari groundwater with emphasis for using in industry. Agriculture and urban, journal of Human & Environment 11(1):1-7 (In Persian)

Hossini Y (2003) Optimization of drainage parameters using geo statistics and its impact on drain spacing. MSc thesis, Shahid Chamran, University Of Ahwaz (In Persian)