

## جدایش آب شور و شیرین با استفاده از شبیه‌سازی پی‌درپی گاوسی در نتایج برداشت مقاومت ویژه الکتریکی

شیما سلیمانی<sup>۱</sup>، امید اصغری<sup>۲\*</sup> و محمد کاظم حفیظی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، گروه فیزیک زمین، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

<sup>۲</sup> استادیار، دانشکده معدن، دانشگاه تهران، ایران

<sup>۳</sup> استاد، گروه فیزیک زمین، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۹۲/۴/۱۸، پذیرش نهایی: ۹۳/۷/۱)

### چکیده

مسئله نفوذ آب شور به داخل آب شیرین در مناطق ساحلی، بسیاری از کشورها را نگران کرده است. با توجه به اهمیت تامین منابع آب شیرین در چنین مناطقی و مخاطره موجود در احتمال برخورد چاه‌های آب حفر شده به زون‌های آب شور، داشتن مدل سه‌بعدی دقیقی از نحوه توزیع آب‌های شور و شیرین حائز اهمیت است. برای دستیابی به چنین مدلی، اندازه‌گیری‌های قابل اطمینان و تفسیرهای کامل و جامع مورد نیاز است. هدف از این تحقیق، استفاده از روش‌های زمین‌آماری برای سه‌بعدی‌سازی نتایج تحقیقات مقاومت ویژه و بارزسازی زون‌های آب شور و شیرین در آبخوان است. داده‌های مقاومت ویژه ظاهری مورد نیاز در این تحقیق با آرایه شلومبرژه در دشت برازجان بوشهر برداشت شد. پس از تفسیرهای صورت گرفته روی داده‌های اولیه، مقادیر مقاومت ویژه واقعی آبخوان، درحکم ورودی‌های الگوریتم شبیه‌سازی پی‌درپی گاوسی معرفی و داده‌ها ۱۰۰ بار شبیه‌سازی شدند. اعتبارسنجی صورت گرفته روی نتایج نشان می‌دهد که ۱۰۰ بار تحقق مقادیر مقاومت ویژه، معتبر هستند. سپس نقشه‌های E-type و احتمال مقاومت ویژه آبخوان رسم شد. این نقشه‌ها مدلی سه‌بعدی از توزیع مقاومت ویژه واقعی آبخوان و احتمال وجود آب شور و شیرین را نمایش می‌دهند. مقایسه مدل به‌دست آمده از شبیه‌سازی و چاه موجود در منطقه حاکی از تطبیق زیاد مدل با واقعیت است.

واژه‌های کلیدی: ژئوالکتریک، زمین‌آمار، آب شور و شیرین، شبیه‌سازی، تغییرنا (واریوگرام)

## Separation of saltwater and freshwater using sequential Gaussian simulation in resistivity measurements

Soleimani, S.<sup>1</sup>, Asghari, O.<sup>2</sup> and Hafizi, M. K.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>M.Sc. Student of Geophysics, Department of Earth Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

<sup>2</sup>Associate professor, Faculty of Mining Engineering, University of Tehran, Iran

<sup>3</sup>Professor, Department of Earth Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

(Received: 09 Jul 2013, Accepted: 23 Sep 2014)

### Summary

Saltwater intrusion into freshwater in coastal areas has been a serious concern for many countries. Providing fresh water in some regions is very crucial. In fact, the areas that are prone to encountering salt water zones should be checked meticulously. The preferred method for such investigation is a precise 3-D model of distribution of fresh and salt water. In order to reach such a model, reliable measurements and comprehensive resistivity interpretations are needed. The purpose of this study is to use geostatistical simulations in order to provide a 3-D aquifer model from the results of the resistivity studies. This means to delineate the boundary of saltwater and freshwater in the aquifer. Geostatistical simulation provides a robust tool for presentation of the results achieved from interpretation of resistivity data. Geostatistical simulations by assessing the risk and uncertainties regarding the measurements at hand, provides a method for a precise economical study and

therefore a more detailed financing and planning scheme. Most of the prediction/estimation methods involve, in some way, an averaging method in which smoothing and reducing the amplitude of fluctuations among their characteristics are happened. However, geostatistical simulation methods are able to reproduce the minor and local differences more precisely than other methods. In other words, the simulation does not reduce the variance of the data so the minimum and maximum values are reproduced. The required data for this study were acquired in Borazjan plane in the Boushehr province, south of Iran. 82 Vertical Electrical Sondage (VES) with Schlumberger array were conducted along with 6 profiles in the Study area. The distance between 2 subsequent measurements are 200 m, and lateral distance between 2 neighbor profiles is 1000 m. Distances between current electrodes (AB) are increased from 1.5 m to 1000 m. Each logarithmic decade contains 6 different measurements. Direction of survey oriented North-West to South-East in each profile. After the data gathering, with the use of electrical software, apparent resistivity sections are provided. In the next step, data are inverted using a software and the standard curves. The best multi-layered ground for the Earth is obtained. After the interpretation of the initial data, the real resistivity values of the aquifer are introduced to sequential Gaussian simulation algorithm as input data. Regarding the concept of 1D resistivity inversion, those maps and sections are considered important that manifest coherent amplitude of resistivity variations. In this study, those simulations are considered and used that are capable to reproduce coherent amplitude of resistivity values. For this reason, we use Sequential Gaussian Simulation method which includes such a characteristic in nature, for simulation of the aquifer. For this reason, data are normalized into Gaussian distribution.

In order to investigate the anisotropy in the region, a directional variography is done; then the best variogram model is chosen using the cross validation test. The anisotropy shows range/sill variations of the variogram in different orientations; thus the variogram is a useful tool for identification the heterogeneities in the investigation area. Using  $50\text{ m}\times 50\text{ m}\times 10\text{ m}$  blocks and the sequential Gaussian simulation algorithm, 100 times simulations were performed and 100 realizations were obtained. The simulation results (realizations) are only acceptable when they can reproduce the identical histogram/variogram, which in this case is the histogram and the variogram of the raw data of the aquifer. After the simulation results were validated the E-type map is derived. This map shows the average value simulated for each block by averaging the values of the 100 realizations. This map is a 3-D model of the real resistivity distribution within the aquifer. The increase of the resistivity values can be observed in this map.

Among the most important results, obtained from the realizations, are the probability maps. These maps show the probability of exceeding a defined value, and are driven by counting the number of times that the resistivity value of a block has passed a certain resistivity value in the all realizations. In fact, the probability map can be assumed as a good factor for determination of drilling position for freshwater exploitation. Using the probability maps, the freshwater positions can be identified with the probability of 1 or very close to 1. In order to make a comparison between the data of the drilled well which is placed in the farthest distance between the two profiles, and the estimated model, a network was designed by which it was possible to estimate the aquifer resistivity values at the position of the well. The acquired resistivity values, using the Geostatistical simulation within the designed network and the resistivity values in the aquifer in the position of the well, proves the accurate estimation of the model in accordance with the reality of the aquifer.

**Keywords:** Geostatistics, Sequential Gaussian simulation, Freshwater, Saltwater, Resistivity, Variogram

## ۱ مقدمه

آبخوان‌های مناطق ساحلی معمولاً به صورتی است که آب‌های شیرین در تماس با آب‌های شور هستند و آب‌های شیرین با آب‌های شور آلوده می‌شوند. امروزه بیشترین توجه بر روش‌های ژئوفیزیکی برای حل مشکلات محیطی و هیدروژئولوژی است. برای مشخص کردن نفوذ آب دریا (پست، ۲۰۰۵؛ شریف و همکاران، ۲۰۰۶؛ خلیل، ۲۰۰۶؛ سیمینو و همکاران، ۲۰۰۸؛ ساتیش و الانگو، ۲۰۱۱) از سونداژزنی الکتریکی استفاده کردند. برای نمایش سه‌بعدی داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی تلاش‌هایی صورت گرفت (لارنت مارسکوت و ریگویت، ۲۰۰۶؛ آیزه بوخای و اولاینکا، ۲۰۱۱). هدف از این تحقیق تولید یک روش مناسب برای مشخص کردن نفوذ آب شور به آب شیرین با استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی و به کار بردن روش‌های زمین‌آماری است. روش زمین‌آمار اساساً برای برآورد متغیرهای منطقه‌ای گسترش پیدا کرده است و کاربرد آن برای آب‌های زیرزمینی از سوی تعدادی از محققان مطرح شده است (تروسی و همکاران، ۲۰۰۰؛ دوپیچ، ۲۰۰۱؛ دوپیچ، ۲۰۰۲؛ شیم، ۲۰۰۴؛ شیم و چانگ، ۲۰۰۴؛ یاداو و ناداتونگ، ۲۰۱۲؛ هرمانز و واندنبخای، ۲۰۱۰) و در این مقاله ما با استفاده از روش‌های زمین‌آماری و روش شبیه‌سازی پی‌درپی گاوسی، آبخوان را به صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی کردیم؛ به نحوی که محل آب شور و آب شیرین نشان داده می‌شود. بر اساس تحقیقات صورت گرفته، تقسیم‌بندی‌های متفاوتی برای شبیه‌سازی عرضه شده است. ملاک‌های متفاوتی مانند ماهیت نوع داده‌ها، الگوریتم‌های به کار رفته و وابستگی داده‌های شبیه‌سازی شده به داده‌های معلوم در این تقسیم‌بندی منظور شده‌اند. در بحث مدل‌سازی مقاومت ویژه، نقشه‌ها و مدل‌هایی حائز اهمیت‌اند که نشان‌دهنده دامنه پیوسته‌ای از تغییرات مقاومت ویژه باشند. در این تحقیق شبیه‌سازی‌هایی مدنظر است که قادر به تولید دامنه‌ای پیوسته از مقادیر مقاومت

ویژه باشند. لذا از روش شبیه‌سازی پی‌درپی گاوسی (SGS) که دارای چنین ویژگی است، برای شبیه‌سازی آبخوان استفاده می‌کنیم. با به کارگیری نقشه‌های احتمال منطقه، در واقع عدم قطعیت مقادیر برآورد شده مشخص می‌شود و این امر کمک شایانی به تعیین محل دقیق آب شیرین و تصمیم‌گیری برای تعیین محل حفر چاه می‌کند.

## ۲ بررسی موردی

## ۲-۱ زمین‌شناسی منطقه

منطقه مورد بررسی در زون ۳۹R قرار دارد و کمینه و بیشینه مختصات جغرافیایی آن بر مبنای WGS84 UTM دارای محدوده تغییرات طول و عرض جغرافیایی  $X=(515000-322800-324200)$ ،  $Y=(528000)$  است. این منطقه در حوالی شهر برازجان و در فاصله ۵۵ کیلومتری شمال شرقی بوشهر واقع شده است. استان بوشهر به لحاظ زمین‌شناسی به دو بخش کوهستانی و جلگه‌ای تقسیم شده است که شهر برازجان در محدوده جلگه‌ای قرار دارد. بخش جلگه‌ای در امتداد خلیج فارس قرار گرفته است و هرچه از شمال و شمال غرب به جنوب و جنوب شرق به سوی برازجان پیش می‌رویم، عرض جلگه بیشتر می‌شود و کوه‌ها مشرف به دریا هستند. جلگه پیش‌گفته از رسوبات رودهای دالکی و شاپور و اهرم شکل گرفته و بنابراین ناحیه مورد بررسی عموماً پوشیده از رسوبات دانه‌درشت و متوسط و واریزه‌ای است. در این منطقه عموماً سنگ کف از نوع سازند بختیاری یا آهکی است. در این محدوده مهم‌ترین سازند از نظر زمین‌شناسی سازند بختیاری است. در کنتاکت زیرین سازند بختیاری، سازند آغاچاری با دگرشیبی زاویه‌دار یا فرسایشی دیده می‌شود.

## ۲-۲ روش برداشت داده

تعداد ۸۲ VES با آرایه الکتریکی شلومبرژه در قالب ۶

نیم‌رخ در منطقه به کار رفته است. فاصله سونداژها ۲۰۰ متر و فاصله نیم‌رخ‌ها ۱۰۰۰ متر و فاصله الکترودهای جریان (AB) از ۱/۵ تا ۱۰۰۰ متر است. نقشه موقعیت منطقه به همراه محل بخشی از سونداژها در شکل ۱ نشان داده شده است.

الکترودهای جریان در جهت شمال غربی-جنوب شرقی گسترده شده است. پس از برداشت داده‌ها، شبه‌مقاطع هم‌مقاومت ویژه ظاهری رسم می‌شود. در مرحله بعد سونداژها با بهره‌گیری از شبه‌مقاطع و همچنین با استفاده از منحنی‌های استاندارد (آباک) وارون می‌شوند و بهترین مدل چندلایه‌ای برای منحنی صحرائی، پردازش و تفسیر می‌شود. هدف عملیات این است که علاوه بر بررسی مقاومت ویژه الکتریکی با عمق، به صورت جانبی در امتداد نیم‌رخ، و عمود بر آن بتوانیم بررسی‌ها را به صورت سه‌بعدی انجام دهیم. به منظور شبیه‌سازی مرز بین آب‌های شور و شیرین از روش شبیه‌سازی پی‌درپی گاوسی استفاده شد و داده‌های مقاومت ویژه واقعی موجود در آبخوان مورد استفاده قرار گرفت.

### ۳ روش‌شناسی

#### ۳-۱ زمین‌آمار

زمین‌آمار دانش بررسی پارامترهای متغیر در مکان و یا زمان است. زمین‌آمار به منظور فهم و مدل‌سازی پارامترهای فضایی، از مجموعه ابزارهای قطعی و احتمالی استفاده می‌کند. زمین‌آمار روشی برای توصیف پیوستگی فضایی است که این پیوستگی از جمله خصوصیات متغیرهای موجود در علوم زمین است. از طرفی این روش با استفاده از حالت برون‌یابی از روش رگرسیون کلاسیک، از مزایای وجود این پیوستگی فضایی در داده‌های موجود در علوم زمین استفاده می‌کند. زمین‌آمار در چند دهه اخیر رشد کاربردی گسترده‌ای در دانش‌های گوناگون از جمله صنایع معدنی، نفتی، تحقیقات آب، خاک، محیط زیست و مانند

آن داشته است.

از مدل‌سازی زمین‌آماري داده‌های سونداژزنی برای مدل‌سازی و برآورد پارامترهای زیرسطحی، به‌ویژه در تحقیقات هیدروژئولوژی و مشخصات لایه‌های آبخوان استفاده می‌شود. همچنین تحلیل زمین‌آماري ابزار قدرتمندی برای بهبود نتایج تفسیر سونداژهای مقاومت ویژه فراهم می‌کند.

روش شبیه‌سازی زمین‌آماري (Geostatistical simulation) را ژورنل در ۱۹۷۰ مطرح کرد و از آن پس در صنایع گوناگونی چون معدن، محیط زیست، نفت و گاز به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. مهم‌ترین خاصیت شبیه‌سازی زمین‌آماري تولید مجموعه‌ای از مدل‌ها (تصاویر) که دامنه‌ای از حالت‌های همگن را شامل می‌شوند، به همراه درصد احتمال رخداد آنها است. این روش می‌تواند تعداد بسیار زیادی از نقشه‌های توزیع عیار در یک منطقه (کانسار) را تولید کند؛ به طوری که همگی شباهت معینی با هم و با منطقه مورد بررسی داشته باشند. این شباهت معین به زبان زمین‌آماري همان نمودار فراوانی (هیستوگرام) و تغییرنما (واریوگرام) منطقه است (وان و همکاران، ۲۰۰۲). شبیه‌سازی زمین‌آماري با محاسبه مخاطره و عدم قطعیت همراه با اندازه‌گیری‌ها، امکان بررسی دقیق اقتصادی و در نتیجه سرمایه‌گذاری و برنامه‌ریزی دقیق‌تر را فراهم می‌کند.

#### ۳-۱-۱ شبیه‌سازی پی‌درپی گاوسی (Sequential Gaussian Simulation)

شبیه‌سازی پی‌درپی گاوسی (SGS)، به منزله یکی از روش‌های معمول و انعطاف‌پذیری است که امروزه بسیار مورد توجه قرار می‌گیرد (دوبرل، ۲۰۰۳؛ وان و همکاران، ۲۰۰۲). در بسیاری از شبیه‌سازی‌هایی که تاکنون روی پارامترهایی چون عیار، تخلخل، تراوایی و مانند آن صورت گرفته است، این روش شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته

است. در بحث مدل‌سازی مقاومت ویژه، نقشه‌ها و مدل‌هایی حائز اهمیت است که نشان‌دهنده دامنه پیوسته‌ای از تغییرات مقاومت ویژه باشد. در این تحقیق شبیه‌سازی‌هایی مدنظر است که قادر به تولید دامنه‌ای پیوسته از مقادیر مقاومت ویژه باشند. لذا از روش شبیه‌سازی پی‌درپی گاوسی که دارای چنین ویژگی است، برای شبیه‌سازی آبخوان استفاده می‌کنیم. آنچه که در تمام روش‌های گاوسی (Gaussian) به عنوان اصل پایه شناخته شده است، نرمال بودن داده‌های اولیه است. به این منظور کلیه داده‌ها باید به استاندارد نرمال  $N(0,1)$  تبدیل شوند.

به‌طور کلی الگوریتم شبیه‌سازی پی‌درپی گاوسی به صورت زیر است (دویچ و جورنل، ۱۹۹۲).

۱- رسم نمودار فراوانی داده‌های اولیه و تبدیل این داده‌ها به استاندارد نرمال  $(N(0,1))$ .

۲- رسم نمودار فراوانی با استفاده از داده‌های نرمال استاندارد شده.

۳- انتخاب یک مسیر (شبکه) تصادفی برای شبیه‌سازی.

۴- برآورد داده‌ها روی شبکه انداخته شده با استفاده از یکی از روش‌های کریجینگ و رسم نمودار فراوانی با داشتن میانگین و واریانس برآورد در هر نقطه.

۵- بیرون کشیدن یک عدد به‌طور تصادفی از نمودار فراوانی رسم شده.

۶- شرطی کردن داده‌ها.

۷- تکرار مرحله قبل تا اینکه کل شبکه دارای عدد شود.

۸- برای شبیه‌سازی دیگر، همه مراحل قبل دوباره تکرار می‌شود.

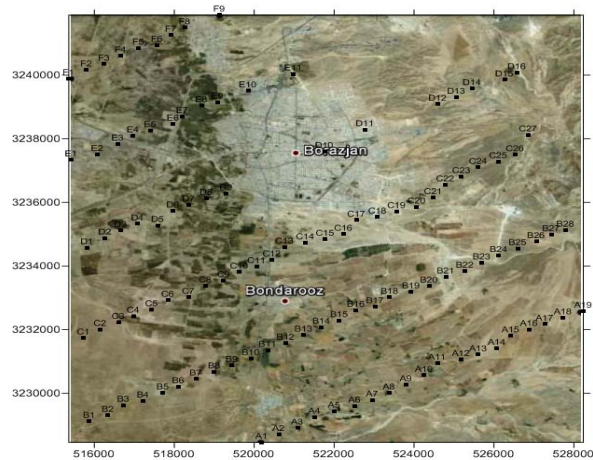
۹- تبدیل معکوس داده‌ها به حالت قبل

۱۰- اعتبارسنجی نتایج

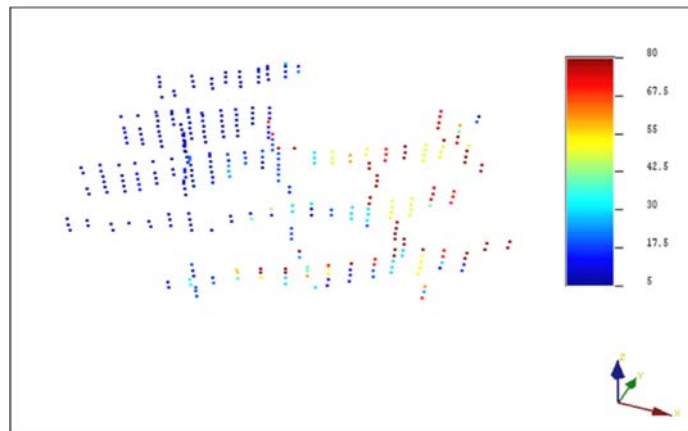
### ۲-۳ به کارگیری شبیه‌سازی پی‌درپی گاوسی روی داده‌های مقاومت ویژه

با محاسبه مقاومت ویژه واقعی لایه‌ها و مشخص کردن آبخوان منطقه می‌باید به بررسی صحت مقاومت ویژه‌ها در آبخوان مشخص شده با استفاده از لاگ چاه‌های موجود در منطقه پرداخت. نقاطی در داخل آبخوان را مشخص می‌کنیم و مقاومت ویژه واقعی آنها را در حکم داده‌های اولیه برای شبیه‌سازی به کار می‌بریم. در شکل زیر نمایی از داده‌های به کار رفته در تغییرنمای و شبیه‌سازی را مشاهده می‌کنیم.

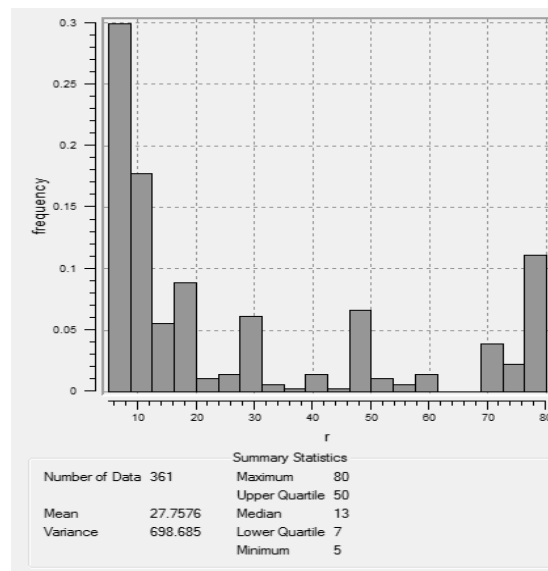
شکل ۳ نیز نمودار فراوانی داده‌های موجود را نشان می‌دهد. داده‌ها دارای مقدار کمینه ۵ و بیشینه ۸۰ اهم‌متر هستند و چولگی مثبت دارند؛ زیرا همان‌طور که در جدول می‌بینیم ۶۰ درصد داده‌ها مقادیر کمتر از ۲۰ اهم‌متر دارند و مقدار مُد، ۶ اهم‌متر است.



شکل ۱. نقشه موقعیت منطقه مورد بررسی و نبرخ‌های برداشت.



شکل ۲. نمایی از داده‌های مقاومت ویژه موجود در آبخوان برحسب اهم‌متر.



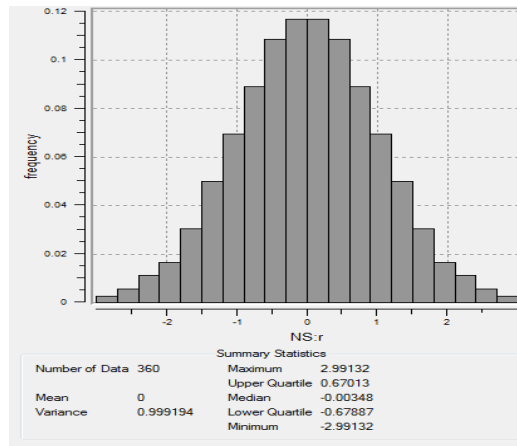
شکل ۳. نمودار فراوانی داده‌های مقاومت ویژه داخل آبخوان برحسب اهم‌متر.

برای شبیه‌سازی داده‌ها به روش SGS، لازم است که داده‌ها در ابتدا به استاندارد نرمال تبدیل شوند. شکل ۴ نمودار فراوانی داده‌های تبدیل شده به استاندارد نرمال را نشان می‌دهد.

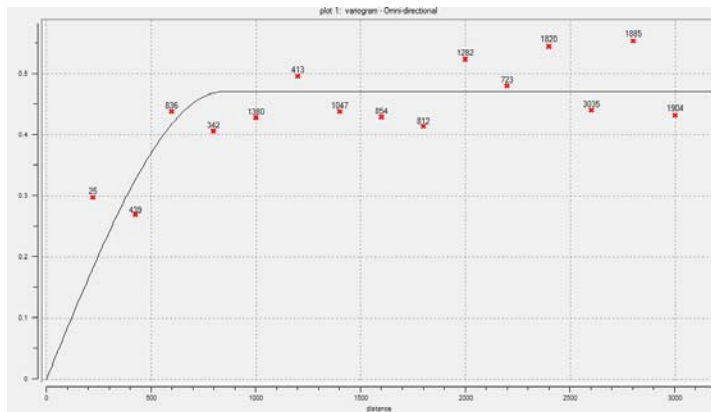
به منظور تعیین ساختار منطقه، تغییرنا غیرجهتی منطقه رسم می‌شود. شکل ۵ تغییرنا غیرجهتی داده‌ها را نشان می‌دهد، همان‌طور که مشاهده می‌شود یک مدل کروی با اثر قطعه‌ای، سقف ۰/۴۷ و دامنه ۸۴۰ متر به تغییرنا برازش

می‌شود.

به منظور تشخیص ناهمسانگردی منطقه تغییرناهای غیر جهتی در سمت‌های ۱۳۵، ۹۰، ۴۵، ۰ با شیب‌های ۱۳۵، ۹۰، ۴۵، ۰ درجه رسم شد. یک تغییرنا قائم نیز به منظور سنجش ناهمسانگردی در جهت قائم رسم شد. جدول ۱ پارامترهای مدل‌های برازش شده به تغییرناهایی که ناهمسانگردی را به بهترین وجه بازتاب می‌کنند، نشان می‌دهد.



شکل ۴. نمودار فراوانی نرمال داده‌های مقاومت ویژه داخل آبخوان.



شکل ۵. تغییرنا غیر جهتی و مدل برازش شده به آن.

جدول ۱. مدل برازش شده به تغییرناها در جهت‌های گوناگون.

Azimuth (deg.)	Dip (deg)	Fitted model	Equation
60	0	Spherical	$\gamma(h) = 0.45 \left( \frac{3h}{2 \times 1000} - \frac{h^3}{2(1000)^3} \right) \quad h \leq 1000$ $\gamma(h) = 0.45 \quad h > 1000$
150	0	Spherical	$\gamma(h) = 0.5 \left( \frac{3h}{2 \times 400} - \frac{h^3}{2(400)^3} \right) \quad h \leq 400$ $\gamma(h) = 0.5 \quad h > 400$
-	90	Spherical	$\gamma(h) = 0.38 \left( \frac{3h}{2 \times 50} - \frac{h^3}{2(50)^3} \right) \quad h \leq 50$ $\gamma(h) = 0.38 \quad h > 50$
0-360	0	Spherical	$\gamma(h) = 0.47 \left( \frac{3h}{2 \times 840} - \frac{h^3}{2(840)^3} \right) \quad h \leq 840$ $\gamma(h) = 0.47 \quad h > 840$

۳-۳ اعتبارسنجی متقابل

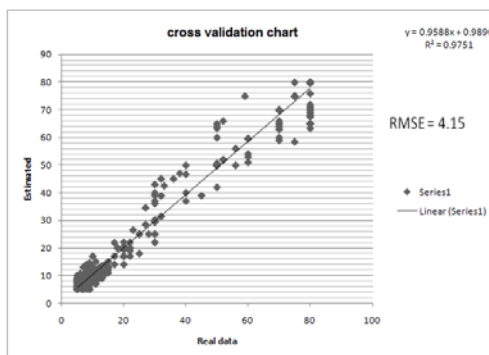
برای این نوع اعتبارسنجی یک نقطه نمونه از نقطه‌های معلوم حذف می‌شود و مقدار در محل نقطه، با استفاده از مدل تغییرنا انتخاب شده و داده‌های باقی‌مانده، برآورد می‌شود. خطای برآورد با استفاده از مقادیر واقعی طبق رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{x=1}^n (z(x) - z^*(x))^2} \quad (1)$$

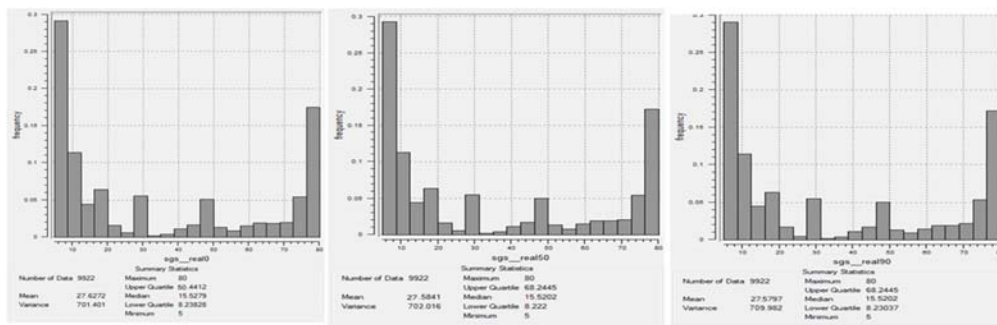
که در آن،  $Z$  مقدار واقعی و  $Z^*$  مقدار برآورد شده با کریجینگ ساده (Simple Kriging) است. مقدار RMSE هرچه به صفر نزدیک‌تر باشد، روش برآوردی اعتبار بیشتری دارد. از این اعتبارسنجی برای تعیین اعتبار تغییرنا استفاده می‌کنیم. این اعتبارسنجی با استفاده از نرم‌افزار WINGSLIB صورت پذیرفت.

نقطه‌های رسم شده در شکل ۶ در اطراف و نزدیکی

خط ۴۵ درجه قرار گرفته‌اند که این نشان‌دهنده تطابق خوب بین داده‌های واقعی و برآوردی است. مقدار RMSE به دست آمده ۴/۱۵ است و نشان‌دهنده اعتبار خوب روش برآوردی است. برای شبیه سازی آبخوان به روش SGS از نرم‌افزار SGEMS استفاده شد. برای شبیه‌سازی از بلوک‌هایی به ابعاد  $10 \times 50 \times 50$  استفاده شد و سپس ۱۰۰ بار شبیه‌سازی به منظور به دست آمدن ۱۰۰ تحقق (realization) مقاومت ویژه آبخوان روی داده‌های خام صورت گرفت. نتایج شبیه‌سازی (تحقق‌ها) هنگامی قابل قبول است که بتواند شباهت معین جامعه را که در اینجا همان نمودار فراوانی و تغییرنا جامعه است، دوباره تولید کند. لذا نمودار فراوانی و تغییرنا ۱۰۰ تحقق محاسبه شد که در اینجا نمودار فراوانی ۳ تحقق (شکل ۷) و تغییرنا تعدادی از تحقق‌ها (شکل ۸) برای نمونه آورده شده است.



شکل ۶. نمودار اعتبارسنجی متقابل بین مقادیر واقعی و مقادیر شبیه‌سازی شده. شیب رگرسیون نزدیک یک (۰/۹۶) و ضریب همبستگی نزدیک یک نشان‌دهنده اعتبار زیاد نتایج شبیه‌سازی است.



شکل ۷. نمودار فراوانی ۳ تحقق؛ با مشاهده آمارها مشخص است که شبیه‌سازی‌ها توانسته‌اند پارامترهای آماری داده‌های اولیه را بازتولید کنند.



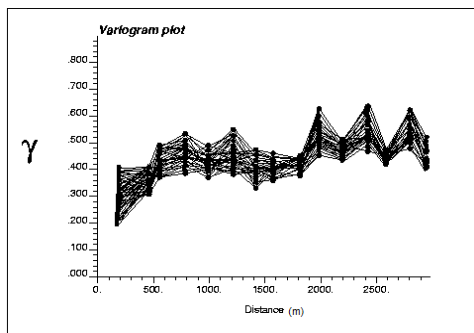
جدول ۲. مقایسه بین داده‌های اولیه و داده‌های شبیه‌سازی شده.

تعداد داده‌ها	تحقق اول	تحقق ۵۰	تحقق ۹۰	داده‌های اولیه
۹۹۲۲	۹۹۲۲	۹۹۲۲	۹۹۲۲	۳۶۱
۱۵/۵۲۷۹	۱۵/۵۲۰۲	۱۵/۵۲۰۲	۱۵/۵۲۰۲	۱۳
۲۷/۶۲۷۲	۲۷/۵۸۴۲	۲۷/۵۷۹۷	۲۷/۷۵۷۶	میانگین
۷۰۱/۴۰۱	۷۰۲/۰۱۶	۷۰۹/۹۸۲	۶۹۸/۶۸۵	واریانس
۸۰	۸۰	۸۰	۸۰	پیشینه
۵	۵	۵	۵	کمینه

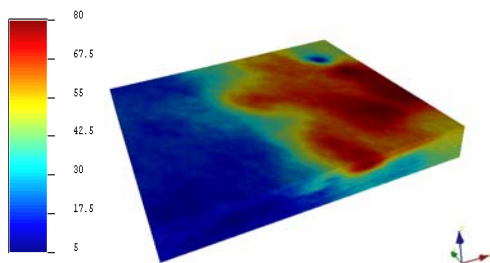
۴ بحث

با محاسبه ۱۰۰ تحقق همان‌طور که مشاهده می‌شود تحقق‌ها قادر به بازسازی نمودار فراوانی منطقه هستند و از این لحاظ دارای اعتبارند. بنابراین از آنجا که همه تحقق‌ها قادر به تولید مجدد پارامترهای آماری و زمین آماری منطقه هستند لذا همه آنها اعتبار دارند و می‌توان از آنها در تحلیل‌های بعدی استفاده کرد.

تحقق‌ها حاصل می‌شوند. این نقشه‌ها احتمال عبور از حد معینی از مقدار مشخص را نشان می‌دهند و با شمارش تعداد دفعاتی که مقدار یک بلوک از مقدار حدی در همه تحقق‌های ایجاد شده عبور می‌کند، به‌دست می‌آیند. در واقع نقشه احتمال می‌تواند معیار خوبی برای مشخص کردن مکان حفاری برای استخراج آب شیرین باشد.



شکل ۸. تغییرنا رسم شده برای تعدادی از تحقق‌ها.



شکل ۹. نقشه E-type حاصل از میانگین‌گیری بین نتایج برحسب اهم‌تر حاصل از شبیه‌سازی‌ها.

۴-۱ نقشه میانگین تحقق‌ها - E-type

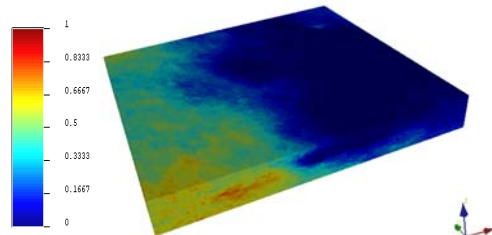
پس از اینکه تحقق‌ها به‌دست آمدند و نتایج آنها اعتبارسنجی شد، نقشه E-type رسم می‌شود. این نقشه مقدار متوسط نهایی برآوردی را برای هر بلوک با میانگین‌گیری بین مقادیر حاصل از ۱۰۰ تحقق نشان می‌دهد. بدین ترتیب یک نقشه میانگین از کل منطقه حاصل می‌شود.

در این نقشه روند افزایش مقاومت ویژه از چپ به راست کاملاً مشخص است و با توجه به موقعیت منطقه، هرچه از دریا دور می‌شویم، مقاومت ویژه افزایش می‌یابد، برای بهتر تشخیص دادن محل جدایش آب شور و شیرین می‌توان از نقشه‌های احتمال نیز کمک گرفت.

۴-۲ نقشه‌های احتمال

نقشه‌های احتمال از جمله مهم‌ترین نتایج هستند که از

با احتمال ۱ را مشخص کرد. برای مقایسه بین اطلاعات چاه حفاری شده و مدل برآورد شده، شبکه‌ای طراحی شد که با استفاده از آن بتوان مقادیر داخل آبخوان در محل حفاری چاه را برآورد کرد. مقادیر به دست آمده از شبیه‌سازی زمین‌آماری، در شبکه طراحی شده، در جدول شکل ۱۲ آمده است.

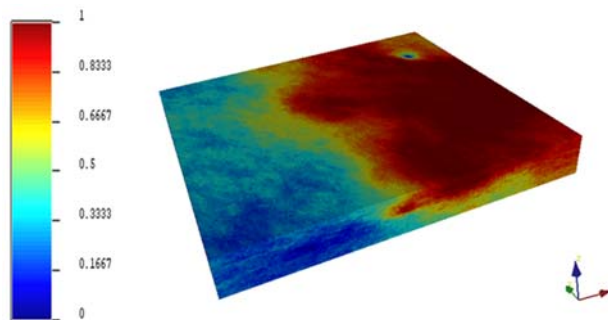


شکل ۱۰. نقشه احتمال مقاومت ویژه کمتر از ۸ اهم‌متر.

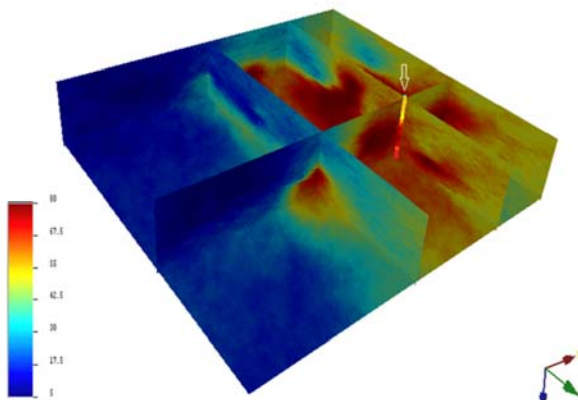
در شکل ۱۲-الف محل چاه حفاری شده نشان داده شده است، این چاه در نقطه‌ای بین دو نیم‌رخ L و M قرار دارد و در واقع در دورترین نقطه از هر دو نیم‌رخ است. مقاومت ویژه داخل آبخوان در نقطه حفر چاه ۷۰ اهم‌متر است که با مقادیر به دست آمده از شبیه‌سازی زمین‌آماری که در جدول ۳ آمده است تطابق خوبی دارد.

در نقشه احتمال، مکان‌هایی که با احتمال زیاد دارای مقاومت ویژه بیشتر از ۲۰ اهم‌متر هستند، نشان‌دهنده محل آب شیرین‌اند. مقاومت ویژه بین ۸ تا ۲۰ اهم‌متر برای آب شور در نظر گرفته شده است.

با استفاده از نقشه‌های احتمال می‌توان محل آب شیرین



شکل ۱۱. نقشه احتمال مقاومت ویژه بیشتر از ۲۰ اهم‌متر.



(ب)

(الف)

شکل ۱۲. (الف) موقعیت چاه حفاری شده و (ب) نمایش موقعیت سطح آب در چاه حفاری شده به همراه واحدهای سنگی رسوبی.

جدول ۳. مقادیر حاصل از یک مرتبه شبیه‌سازی در محل چاه.

x	Y	z	بالای ۱۲	زیر ۸	E-type	تحقق شماره ۱
524105	3.24E+06	40	0.99	0	75.7122	71.9109
524105	3.24E+06	35	0.99	0	75.7567	73.0109
524105	3.24E+06	30	1	0	76.8392	78.355
524105	3.24E+06	25	1	0	77.291	77.6508
524105	3.24E+06	20	1	0	77.6048	70.0264
524105	3.24E+06	15	1	0	76.8148	76.4683
524105	3.24E+06	10	1	0	76.7747	77.2928
524105	3.24E+06	5	1	0	75.1302	76.2092

## مراجع

- گزارش شرکت مهندسی مشاور صحراکاو، ۱۳۸۹.
- Aizebeokhai.A. P., Olayinka, A. I., 2011, Effectiveness of 3D geoelectrical resistivity imaging using parallel 2D profiles, current science, **101**(8), 1036-1052.
- Cimino, A., Cosentino, C., Oieni, A. and Tranchina, L., 2008, A geophysical and geochemical approach for seawater intrusion assessment in the Acquadolci coastal aquifer (Northern Sicily ), Environmental Geology, **55**(7), 1473-1482.
- Deustch, C. V. and Journel, A. G., 1992, GSLIB, geostatistical software library and user's guide, Oxford Univ. press. New York, 340P.
- Deustch, C. V., 2001, Two artifacts of probability field simulation, mathematical geology, 341951
- Deustch, C. V., 2002, Geostatistical reservoir modeling, Oxford university press, New York, 371 pp.
- Dubrule, O., 2003, Geostatistics for seismic data integration in earth models, EAGE: European Association of Geoscientists and Engineers, printed in US.
- Hermans.T. and Vandenbohede, A., 2010, Imaging artificial salt water infiltration using electrical resistivity tomography constrained by geostatistical data, Journal of Hydrology, 438-439.
- Khalil, M. K., 2006, Geoelectric resistivity sounding for delineating salt water intrusion in the Abu Zenima area, west Sinai, Egypt Journal of Geophysics and Engineering, **3**, 243-251.

## ۵ نتیجه‌گیری

در این تحقیق مرز آب شور و آب شیرین به صورت سه‌بعدی در منطقه برازجان بوشهر به روش‌های زمین‌آماری به دست آمد. مراحل عملیات به این صورت است که ابتدا آبخوان منطقه مشخص می‌شود و روش SGS برای برآورد مقاومت ویژه واقعی در داخل آبخوان به کار می‌رود. در نقشه E-type مشاهده می‌شود که آب شور از قسمت جنوب غربی و غرب شروع می‌شود و به داخل آب شیرین نفوذ می‌کند.

با توجه به اینکه این اطلاعات با واقعیت موجود در محل چاه همخوانی زیادی دارد، شبیه‌سازی زمین‌آماری می‌تواند روش مفیدی برای نشان دادن محل آب شیرین و آب شور و مشخص کردن محل حفر چاه باشد. در واقع با این روش با استفاده از اطلاعات برداشت یک‌بعدی مقاومت ویژه می‌توان توزیع سه‌بعدی مقاومت ویژه و احتمال خطای آن را مشاهده کرد. این روش را می‌تواند به اطمینان بخشیدن از تعیین محل آب شیرین و درست بودن نقطه حفر چاه کمک کند. این روش همچنین می‌تواند در مناطقی که امکان برداشت داده، به علت شرایط بد منطقه، در همه‌جا وجود ندارد، بسیار مفید باشد.

- coastal aquifer system, *Environmental Geology*, **46**, 533-541.
- Shim, B. O. and Chung, S. Y., 2004, Intrinsic random function of order of electrical resistivity data for estimate the extent of saltwater intrusion in a coastal a aquifer system, *Environment Goedogy*, **46**, 533-541.
- Troisi, S., Fallico, C., Straface, S. and Migliari, E., 2000, Application ofkriging with external drift to estimate hydraulic conductivity from electrical-resistivity data in unconsolidated deposits near Montalto Uffugo, Italy, *Hydrogeol Journal.*, **8**, 356-367.
- Vann, J. and Bertoli, O. and Jackson, S. 2002, Geostatistical simulation for quantifying risk, *Gestatistical Association of Australian symposium.*
- Yadav., G. S., and Ndatuwong, L. G., 2012, Mapping the spatial extend of groundwater declination using geostatistical techniques, *Archives of Applied Science Research*, **4**(1), 236-245.
- Marescot, L. And Rigobeit. S., 2006, A general approach for DC apparent resistivity evaluation on arbitrarily shape 3D structures, *Journal of Applied Geophysics*, **60**, 55-67..
- Post, V. E. A., 2005, Fresh and saline groundwater interaction in coastal aquifers: is our technology ready for the problems ahead?, *Hydrogeology Journal.*, **13**(1), 120-123.
- Sathish, S. and Elango, L., 2011, Assessmant of seawater mixing in a coastal aquifer by high resolution electrical resistivity tomography, *International Journal of Invironment Science and Technology*, **8**(3), 483-492.
- Sherif, M., ElMahmoudi, A., Gar amoon, H ., Kacimov, A ., 2006, Geoelectrical and hydrogeochemical studies for delineating seawater intrusion in the outlet of Wadi Ham, UAE. *Environ -mental Geology*, **49**(4), 536-551.
- Shim, B .O., 2004, Intrinsic random function of order kriging of electrical resistivity data for estimating the extent of saltwater intrusion in a